

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ROBOTS DE COMPETENCIA
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL ROBOT DE COMPETENCIA
CATEGORÍA CARRERA DE BÍPEDOS**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

DAVID FABRIZIO MENA AVILÉS

david.mena05@epn.edu.ec

DIRECTOR: NELSON GONZALO SOTOMAYOR OROZCO, MSc.

nelson.sotomayor@epn.edu.ec

DMQ, octubre 2022

CERTIFICACIONES

Yo, David Fabrizzio Mena Avilés declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'David Mena Avilés', with a large, sweeping flourish underneath.

David Fabrizzio Mena Avilés

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por David Fabrizzio Mena Avilés, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Nelson Sotomayor Orozco', with a large, sweeping flourish underneath.

Nelson Gonzalo Sotomayor Orozco, MSc.

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

David Fabrizzio Mena Avilés

Nelson Gonzalo Sotomayor Orozco, MSc.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres Azucena Avilés y Fabrizzio Mena y a mis hermanos Bryan Mena y Viviana Mena, pues sin ellos no habría logrado este trabajo.

David Mena

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres y hermanos por su apoyo constante e incondicional para superar los obstáculos que se me han presentado durante mi carrera universitaria.

A mi Director, el MSc. Nelson Sotomayor, por su guía en la realización del presente trabajo.

A todos los profesores de la EPN que alguna vez me han compartido su conocimiento y experiencia dentro o fuera de las aulas.

A todos mis familiares y amigos por sus ánimos y apoyo durante este largo camino.

A todos aquellos que alguna vez me han brindado su apoyo para seguir adelante.

David Mena

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1.3 ALCANCE.....	2
1.4 MARCO TEÓRICO.....	3
1.4.1 ESPECIFICACIONES DE LOS ROBOTS DE COMPETENCIA DE LA CATEGORÍA CARRERA DE BÍPEDOS	3
1.4.1.1 Concurso Ecuatoria de Robótica 2017	3
1.4.1.2 Robot Games Zero Latitud 7	4
1.4.1.3 Riotronic 2022	5
1.4.1.4 Robots utilizados en la categoría carrera de bípedos	5
1.4.2 CARACTERÍSTICAS PROPUESTAS	6
1.4.3 ELEMENTOS A SER UTILIZADOS EN EL ROBOT	6
1.4.3.1 Microcontrolador.....	6
1.4.3.2 Módulo de control de servomotores	7
1.4.3.3 Servomotores	8
1.4.3.4 Módulo Bluetooth	8
1.4.3.5 Fuente alimentación	9
1.4.3.6 Regulador de voltaje.....	9
2 METODOLOGÍA.....	10
2.1 ESTRUCTURA MECÁNICA.....	10
2.1.1 DISTRIBUCIÓN DE ARTICULACIONES.....	13
2.1.2 ENSAMBLAJE DE LA ESTRUCTURA	14
2.2 DISEÑO ELECTRÓNICO	16
2.2.1 FUENTE DE ALIMENTACIÓN.....	17

2.2.1.1	Análisis de carga	18
2.2.1.2	Dimensionamiento de la batería.....	18
2.2.1.3	Circuito de alimentación	21
2.2.2	ACTUADORES.....	22
2.2.2.1	Servomotores MG996R	22
2.3	PROGRAMA DE CONTROL.....	24
2.3.1	Generación de rutinas de movimiento	25
2.3.2	PROGRAMA DE CONTROL DEL MICROCONTROLADOR.....	26
2.3.2.1	Rutina de caminata frontal	27
2.3.2.2	Rutina de caminata lateral.....	31
2.3.2.3	Rutina para levantamiento frontal.....	34
2.3.2.4	Rutina para levantamiento posterior.....	37
2.3.3	PROGRAMA DE LA APLICACIÓN MÓVIL	39
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	41
3.1	RESULTADOS	41
3.1.1	PRUEBAS INDIVIDUALES DE LAS RUTINAS DE MOVIMIENTO.....	41
3.1.1.1	Procedimiento de uso del robot humanoide	41
3.1.1.2	Rutina de caminata frontal	43
3.1.1.3	Rutina de caminata lateral.....	43
3.1.1.4	Rutina de levantamiento frontal.....	45
3.1.1.5	Rutina de levantamiento posterior.....	45
3.1.2	PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO EN UN AMBIENTE DE COMPETENCIA.....	46
3.1.3	LISTADO DE ELEMENTOS Y COSTOS.....	49
3.2	CONCLUSIONES	50
3.3	RECOMENDACIONES	51
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
5	ANEXOS	54

RESUMEN

En este trabajo se presenta la construcción de un robot con forma humanoide que sea capaz de realizar las rutinas de movimiento necesarias para participar en la competencia carrera de humanoides.

Después de una revisión bibliográfica de los reglamentos de varias de las competencias nacionales se propone un robot humanoide con 20 articulaciones repartidas en sus 4 extremidades, a las que se les moverá con la ayuda de servomotores.

Para la programación y control del robot se utiliza la tarjeta Arduino Nano y un módulo controlador de servomotores. Finalmente, también se incorpora un módulo bluetooth que permita la comunicación con un dispositivo móvil para la calibración de los movimientos del robot

En el software Arduino IDE se realiza la programación de las rutinas de movimiento del robot, las cuales incluyen la caminata frontal, caminata lateral y el levantamiento en caso de una caída.

Finalmente, para probar el desempeño del robot, se prueba su funcionamiento en una pista con las características establecidas por los reglamentos de los concursos de robótica.

PALABRAS CLAVE: robot, humanoide, servomotor, articulación, competencia.

ABSTRACT

This work presents the construction of a robot with a humanoid shape that is capable of performing the necessary movement routines to participate in the humanoid race competition.

After a bibliographic review of the regulations of several of the national competitions, a humanoid robot with 20 joints distributed in its 4 limbs is proposed, which will be moved with the help of servomotors.

For the programming and control of the robot, the Arduino Nano card and a servomotor controller module are used. Finally, a bluetooth module is also incorporated that allows communication with a mobile device for the calibration of the robot's movements.

In the Arduino IDE software, the programming of the robot's movement routines is carried out, which include the frontal walk, lateral walk and the lifting in case of a fall.

Finally, to test the performance of the robot, its operation is tested on a track with the characteristics established by the regulations of robotics contests.

KEYWORDS: robot, humanoid, servomotor, articulation, competition.

1 INTRODUCCIÓN

Los concursos de robótica son eventos realizados con el objetivo de promover y/o comprobar el avance tecnológico realizado por estudiantes e ingenieros que trabajan en el campo de la robótica. En Ecuador, cada año se realizan varios concursos de Robótica organizados por distintas instituciones, de los cuales el más importante a nivel nacional es el Concurso Ecuatoriano de Robótica (CER).

El CER es un concurso organizado por categorías ligadas a un tipo de robot en específico, en las cuales participan estudiantes de distintas instituciones del país con sus prototipos de robot [1]. El Club de Robótica de la Escuela Politécnica Nacional ha participado en este concurso por más de una década, logrando en diversas ocasiones conseguir resultados satisfactorios en varias categorías.

En específico la categoría carrera de bípedos se caracteriza por el uso de robots humanoides comerciales, los cuales generalmente suelen tener precios muy elevados y su programación se realiza a través de un software propio del robot, lo cual, pese a que facilita en gran manera la programación de los movimientos del robot, también la restringe mucho, pues para realizar una programación más personalizada es necesario programar directamente el microcontrolador del robot [2].

Para superar las desventajas de precio y programación que conlleva utilizar un robot comercial en esta categoría, se plantea en este trabajo la construcción y programación de un robot de competencia tipo carrera de bípedos, el cual deberá cumplir con todas las especificaciones establecidas por el CER para esta categoría.

El robot que se planea construir será un robot humanoide constituido por varias articulaciones con las cuales podrá moverse. El robot también será capaz de realizar comunicación inalámbrica con un dispositivo móvil para la calibración de los movimientos y el desarrollo de los algoritmos para las rutinas de movimiento. Finalmente, el robot tendrá un sistema embebido en el cual se realizará la programación de las rutinas de movimiento del robot.

El desarrollo de este trabajo empezará con una investigación acerca de los reglamentos de la categoría carrera de bípedos de diferentes competencias, además de una investigación sobre los sensores y actuadores necesarios para su funcionamiento. Posteriormente, se seleccionará una estructura mecánica adecuada y se diseñará un circuito electrónico que permita el control sobre el movimiento del robot. Seguido a eso, se

implementarán los algoritmos de control para el movimiento del robot. Finalmente, se realizarán las pruebas del funcionamiento del robot para realizar las calibraciones finales y comprobar el desenvolvimiento del robot en un ambiente de competencia.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un robot de competencia categoría carrera bípedos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar una revisión bibliográfica sobre las especificaciones y sobre los sensores y actuadores que debe tener un robot de la categoría carrera de bípedos de acuerdo con las especificaciones del Concurso Ecuatoriano de Robótica CER.
2. Diseñar e implementar el circuito eléctrico para el control de un robot carrera de bípedos de acuerdo con las especificaciones del Concurso Ecuatoriano de Robótica CER.
3. Seleccionar una estructura mecánica para realizar el ensamblaje del robot carrera de bípedos de acuerdo con las especificaciones del Concurso Ecuatoriano de Robótica CER.
4. Diseñar los algoritmos de control para las rutinas de movimiento del robot carrera de bípedos.
5. Realizar pruebas de funcionamiento del robot implementado para comprobar su desempeño en un ambiente de competencia.

1.3 ALCANCE

Realizar una revisión bibliográfica sobre las especificaciones de los robots de competencia de la categoría carrera de bípedos, con la finalidad de determinar las características del robot a implementar.

Realizar una revisión bibliográfica de los sensores y actuadores usados en el robot de competencia carrera de bípedos, con el fin de seleccionar los que serán usados en el robot a ser implementado.

Implementar un robot de competencia categoría carrera de bípedos de acuerdo con las especificaciones del Concurso Ecuatoriano de Robótica CER.

Implementar los algoritmos de control que permitan al robot realizar las rutinas especificadas en el reglamento del Concurso Ecuatoriano de Robótica CER.

Realizar pruebas de funcionamiento del robot implementado en una pista acorde al reglamento del Concurso Ecuatoriano de Robótica CER.

1.4 MARCO TEÓRICO

En la presente sección se va a realizar una revisión bibliográfica de la solución propuesta para el problema a resolver con este trabajo. A continuación, se presenta la revisión de los reglamentos de diferentes concursos de robótica, con el fin de determinar sus características más relevantes, además de los sensores, actuadores y sistema embebido que se usará en el robot a desarrollar.

1.4.1 ESPECIFICACIONES DE LOS ROBOTS DE COMPETENCIA DE LA CATEGORÍA CARRERA DE BÍPEDOS

Con el objetivo de determinar las características que debe presentar un robot para participar en la categoría carrera de bípedos, se va a realizar una revisión bibliográfica de los reglamentos correspondientes a dicha categoría proporcionados en las diferentes competencias.

1.4.1.1 Concurso Ecuatoria de Robótica 2017

Según las normas de la categoría “carrera de bípedos” establecidas por el CER 2017, se establece que el robot bípedo debe poseer las siguientes características [2]:

- Debe tener una estructura bípida y tener la capacidad de caminar.
- La altura máxima es de 60 cm.
- Puede ser autónomo o controlado remotamente.

- Debe tener una fuente de alimentación interna. Solo se consideran baterías DC.
- Se permiten robot comerciales y prototipos.
- El robot no debe poseer:
 - Armas u algún objeto capaz de lastimar a las personas o a la pista.
 - Mecanismos adicionales que mejoren la tracción, equilibrio o capacidades permanentes.
 - Dispositivos que puedan interferir con el control de un oponente.
- Queda prohibido:
 - Usar productos y accesorios que puedan dañar la pista.
 - El lanzamiento de objetos dirigidos hacia algún robot oponente.
 - Usar algún dispositivo de ignición, sistemas neumáticos o de fluidos presurizados y armas accionadas.

1.4.1.2 Robot Games Zero Latitud 7

Según las normas de la categoría “carrera de humanoides” establecidas por el RGZL7, se establece que el robot debe poseer las siguientes características [3]:

- Debe contar con dos pies, para cumplir con las características de un robot humanoide.
- La altura máxima es de 90 cm y no existe límite de peso.
- Puede ser autónomo o controlado remotamente. En cualquier caso, debe permanecer con ese tipo de control durante toda la competencia.
- En caso de que el robot sea controlado remotamente:
 - El receptor de comunicación debe estar embebido en el robot junto con su sistema de alimentación eléctrica,
 - El robot deberá tener un sistema de paro de emergencia que detenga el movimiento del robot cuando se pierda la conexión emisor-receptor.
- El robot debe poder levantarse después de una caída.

1.4.1.3 Riotronic 2022

Según las normas de la categoría “carrera de humanoides” establecidas por el RIOTRONIC del 2022, se establece que el robot debe poseer las siguientes características [4]:

- Debe poseer una estructura bípeda y debe tener la capacidad de caminar.
- La altura máxima es de 60 cm.
- Puede ser autónomo o controlado remotamente.
- Se permite el uso de robots comerciales o prototipos.
- El robot no debe presentar:
 - Armas o algún tipo de objeto que pueda lastimar a personas o la pista.
 - Mecanismos que mejoren su tracción, equilibrio o capacidades permanentes.
 - Dispositivos que interfieran con el control de un oponente.
- Queda prohibido:
 - Usar productos y accesorios que puedan alterar la pista de competencia.
 - Cualquier tipo de lanzamiento de algún objeto hacia un oponente.
 - Usar dispositivos de ignición, sistemas neumáticos o de fluidos presurizados y armas acondicionadas.

1.4.1.4 Robots utilizados en la categoría carrera de bípedos

En base a los reglamentos presentados por las instituciones organizadoras de los concursos, para la categoría carrera de bípedos/humanoides en general se presentan robots comerciales, de los cuales los más representativos suelen ser:

- Robot humanoide Alpha 1.
- Robot humanoide Bioloid.
- Robot humanoide Nao.

En la Figura 1.1 se muestra una imagen de los robots humanoides comúnmente utilizados en la categoría carrera de bípedos.



Figura 1.1. Robots humanoides

1.4.2 CARACTERÍSTICAS PROPUESTAS

A partir de las características establecidas por los reglamentos de las competencias analizadas, se proponen las siguientes características para el robot a construir en este trabajo:

- Estructura mecánica con forma humanoide, con una altura de máximo 60 cm.
- Articulaciones comandadas por servomotores para su movimiento.
- Tarjeta embebida para programar las rutinas de control para los servomotores.
- Módulo de control de servomotores para mayor facilidad en su manejo.
- Fuente de alimentación basada en baterías tipo LiPo.
- Comunicación bluetooth para la calibración de los movimientos y su posible control.

Adicionalmente, se debería crear también una rutina para que el robot pueda levantarse después de una caída.

1.4.3 ELEMENTOS A SER UTILIZADOS EN EL ROBOT

En esta sección se va a dar una pequeña descripción y resumen de las características de los diferentes elementos electrónicos que se van a implementar en el robot.

1.4.3.1 Microcontrolador

El sistema embebido elegido para el control del robot es la tarjeta de desarrollo Arduino Nano, el cual es un dispositivo de la familia Arduino, que funciona a partir de un microcontrolador ATmega328. La tarjeta elegida es adecuada para la actual aplicación

debido a su reducido tamaño y a la facilidad de programación en el entorno propio de Arduino (Arduino IDE). Adicionalmente, existe una gran cantidad de información y de código público para el uso de diferentes dispositivos electrónicos con Arduino. En la Figura 1.2 se muestra una imagen del elemento [5].

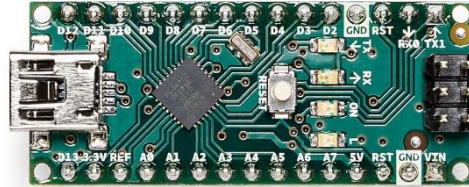


Figura 1.2. Placa de desarrollo Arduino Nano [5]

A continuación, se presentan las características relevantes de este dispositivo [5]:

- Alimentación: 5 V.
- Oscilador: 16 MHz.
- Memoria: 32 KB de Flash y 2 KB de SRAM.
- Pines digitales: 22 (6 de PWM).
- Pines de entrada analógica: 8.
- Comunicación: Serial, I2C y SPI.

1.4.3.2 Módulo de control de servomotores

Para el control de los servos se va a utilizar el módulo PCA9685, el cual originalmente tiene el propósito de controlar LEDs por PWM, sin embargo, se puede usar también para el control de servomotores. Este dispositivo permite realizar el control de 16 servomotores al mismo tiempo. En la Figura 1.3 se muestra una imagen del elemento [6].



Figura 1.3. Módulo PCA9685 [6]

A continuación, se presentan las características relevantes de este módulo [6]:

- Voltaje de alimentación: 2.3 V a 5.5 V.
- Corriente: 6 mA.
- Comunicación I2C.
- Resolución de la PWM: 12 bits.
- Canales: 16.

1.4.3.3 Servomotores

Se elige el servomotor MG996R para realizar el movimiento de las articulaciones. Este elemento es un servomotor de alto torque, que puede realizar movimientos angulares precisos de hasta 120° (60° en cada dirección). En la Figura 1.4 se muestra una imagen de este dispositivo [7].



Figura 1.4. Servomotor MG996R [7]

A continuación, se enlistan las características relevantes de este servomotor [7]:

- Voltaje de alimentación: 4.8 V a 7.2 V.
- Torque: 9.4 kgf.cm (4.8 V) – 11 kgf.cm (6 V).
- Velocidad: 0.17 s/60° – 0.14 s/60°.
- Corriente: 500 mA (4.8 V) – 900 mA (6 V).
- Ángulo de giro: 120°.

1.4.3.4 Módulo Bluetooth

Se usará el módulo HC-05 para realizar comunicación maestro/esclavo entre la tarjeta embebida y un dispositivo móvil, con el fin de agilizar el proceso de calibración de

movimientos, y realizar un posible control a distancia del robot. En la Figura 1.6 se muestra una imagen de este elemento [8].

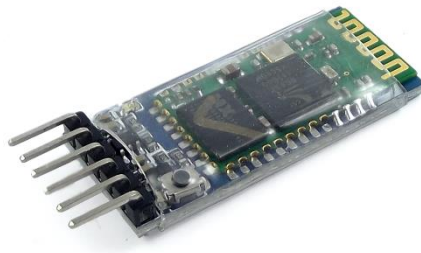


Figura 1.5. Módulo bluetooth HC-05 [8]

A continuación, se presentan las características relevantes del módulo [8]:

- Voltaje de alimentación: 3.6 V a 6 V.
- Corriente: 50 mA.
- Interface de comunicación: Serial TTL.
- Velocidad de transmisión: 1.2 Kbps a 1.3 Mbps.
- Frecuencia de banda: ISM 2.4 GHz.

1.4.3.5 Fuente alimentación

Como fuente de alimentación para todo el sistema electrónico se va a usar una batería tipo LiPo la cual proporcionará el voltaje y la corriente necesaria para el funcionamiento de todos los elementos. En el siguiente capítulo se realizará el dimensionamiento para seleccionar esta fuente de alimentación en base a su voltaje y corriente.

1.4.3.6 Regulador de voltaje

Es necesario usar un elemento que permita regular el voltaje de la fuente de alimentación al voltaje necesario para alimentar los servomotores, además de aislar la parte de control de la de potencia. Adicionalmente, también se debe considerar la regulación de voltaje a 5V para alimentar la parte de control del sistema electrónico, es decir el microcontrolador, sensores y módulos necesarios para el funcionamiento del dispositivo. En el siguiente capítulo se realizará el dimensionamiento de la regulación de voltaje para la selección de los elementos necesarios.

2 METODOLOGÍA

El presente proyecto es un trabajo exploratorio/experimental con un enfoque cualitativo, pues tiene como objetivo la implementación de un robot de la categoría carrera de bípedos que pueda competir en las competencias de dicha categoría. Para evaluar el cumplimiento de dicho objetivo se pondrá a prueba el robot en un ambiente de competencia lo que permitirá validar su funcionamiento.

En base a la metodología de investigación que se usa, este proyecto se divide en cuatro fases. La fase teórica, presente en el capítulo 1, se trata de una revisión bibliográfica de competencias de robots poniendo énfasis en la carrera de bípedos, con el objetivo de determinar las características que debe tener el robot a implementar. La fase de diseño, presente en el capítulo 2, muestra la implementación de la estructura mecánica, así como el diseño electrónico que cumpla con las características determinadas en la etapa anterior. La fase de implementación, presente en el capítulo 2, consiste en la implementación de los diseños realizados anteriormente, es decir la construcción del prototipo, además de realizar la programación para su movimiento. Finalmente, se tiene una fase de pruebas de funcionamiento, presente en el capítulo 3, la cual consiste en realizar pruebas en un ambiente de competencia para validar el funcionamiento del prototipo.

2.1 ESTRUCTURA MECÁNICA

Para la estructura mecánica que se va a implementar en el prototipo se toma en cuenta el siguiente fragmento extraído del reglamento de la categoría carrera de bípedos del CER: “El robot debe poseer una estructura bípeda y su modo de locomoción debe cambiar su centro de gravedad para mantener el equilibrio al caminar”. Con estas consideraciones, se decide utilizar una estructura humanoide, pues cumple con las características establecidas en el reglamento de la competencia.

Para la selección de la estructura mecánica, se revisaron estructuras de robots comerciales, como la del robot humanoide Darwin Mini [9] o la del robot Anthony [10], que son estructuras que podrían servir para la implementación del robot a desarrollar, sin embargo, estas estructuras están diseñadas para funcionar con servomotores propios de la marca del robot, lo que conlleva a que tengan precios bastante elevados, por lo cual se optó por elegir una estructura de un robot no comercial.

Entonces, para la implementación del prototipo se selecciona la estructura presentada en la Figura 2.1, la cual fue diseñada por el autor Chani, propietario del canal de youtube “chanhui.robot”. Esta estructura, tiene forma humanoide, por lo que consta de dos extremidades superiores y dos extremidades inferiores, cada una de las cuales consta de 5 articulaciones, por lo cual se tiene un total de 20 articulaciones. La estructura tiene una altura de 25 cm aproximadamente por lo que cumple con las especificaciones de altura dadas por los reglamentos de las competencias.

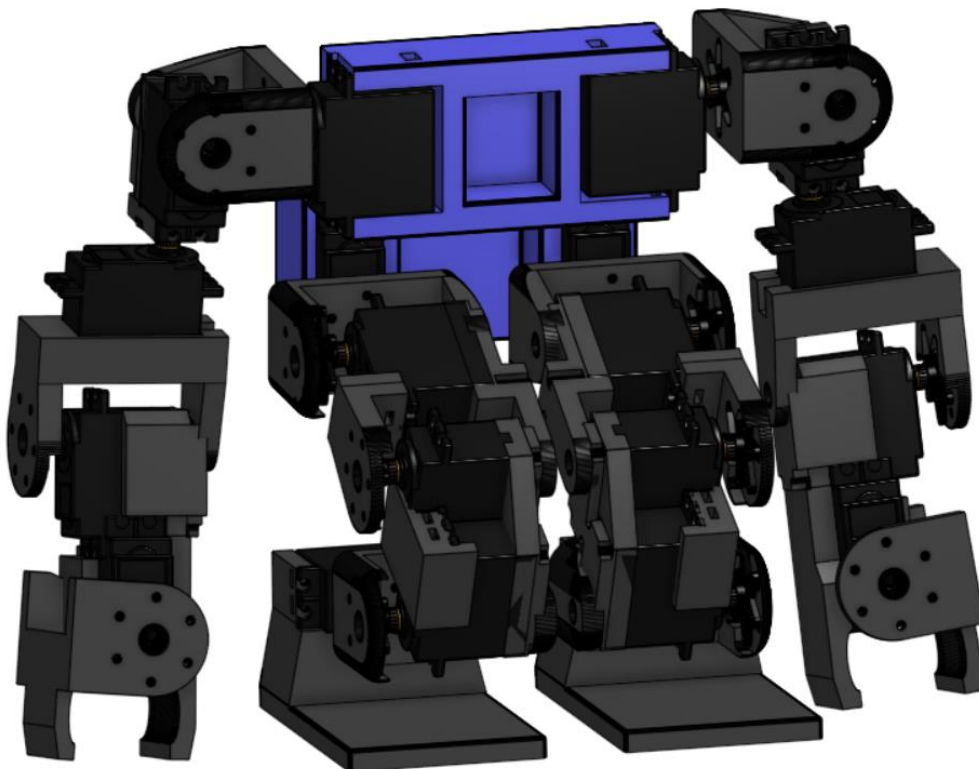


Figura 2.1 Estructura del prototipo

La estructura presentada se elige debido a la gran estabilidad que podría presentar a la hora de realizar las rutinas de caminata, pues presenta largos brazos que ayudan a mantener el centro de masa en un punto central a la hora de realizar el movimiento de las piernas. Adicionalmente, esta estructura presenta una gran versatilidad con respecto a los movimientos del prototipo debido al gran número de articulaciones que presenta. En la sección de anexos se mostrará cada una de las piezas que conforman la estructura.

Posteriormente, se diseñan dos piezas adicionales para la estructura. La primera de estas, presentada en la Figura 2.2, se trata de una cabeza para brindar un aspecto más humanoide al robot, además de proporcionar un espacio donde se empotrará la batería

que alimentará el sistema. Esta pieza tiene una forma rectangular con una dimensión de 87 mm de largo, 47 mm de ancho y 35 mm de alto. Además, se agregó tres agujeros a la estructura para simular los ojos y la boca.

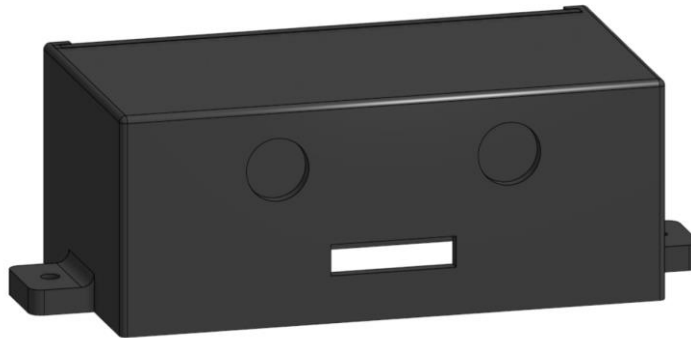


Figura 2.2 Diseño 3D de pieza en forma de cabeza

Por otro lado, la segunda pieza que se diseña, presentada en la Figura 2.3, es una tapa que cubrirá el sistema eléctrico/electrónico del prototipo, la cual cumplirá la función de mejorar la estética del robot, además de proteger el sistema de algún elemento externo que pueda afectar el circuito electrónico. Esta pieza tiene una forma rectangular con una dimensión de 114 mm de largo, 65 mm de ancho y 60 mm de alto. Además, en la parte superior se agregó agujeros para poder ajustar la cabeza con tornillos, pasar los cables de la alimentación desde la cabeza y ubicar el interruptor de encendido en la estructura. En la parte lateral se agrega agujeros para pasar los cables de los servomotores hacia el circuito electrónico. Finalmente, se agregan agujeros en la parte posterior para atornillar la pieza a la estructura.

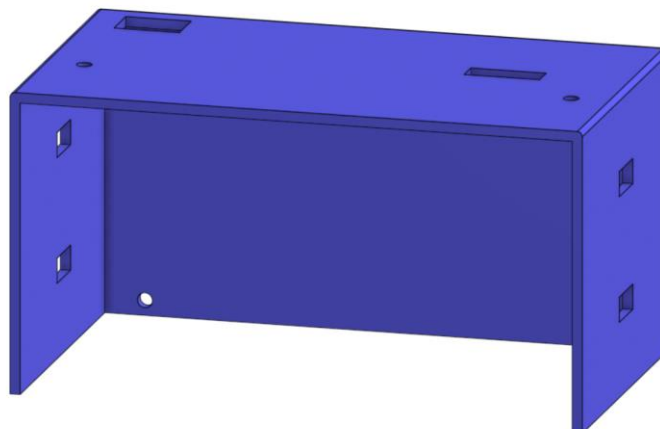


Figura 2.3 Diseño 3D de pieza en forma de tapa

Con la inclusión estas dos nuevas piezas se completa el diseño estructural del dispositivo, cuyo diagrama se muestra en la Figura 2.4.

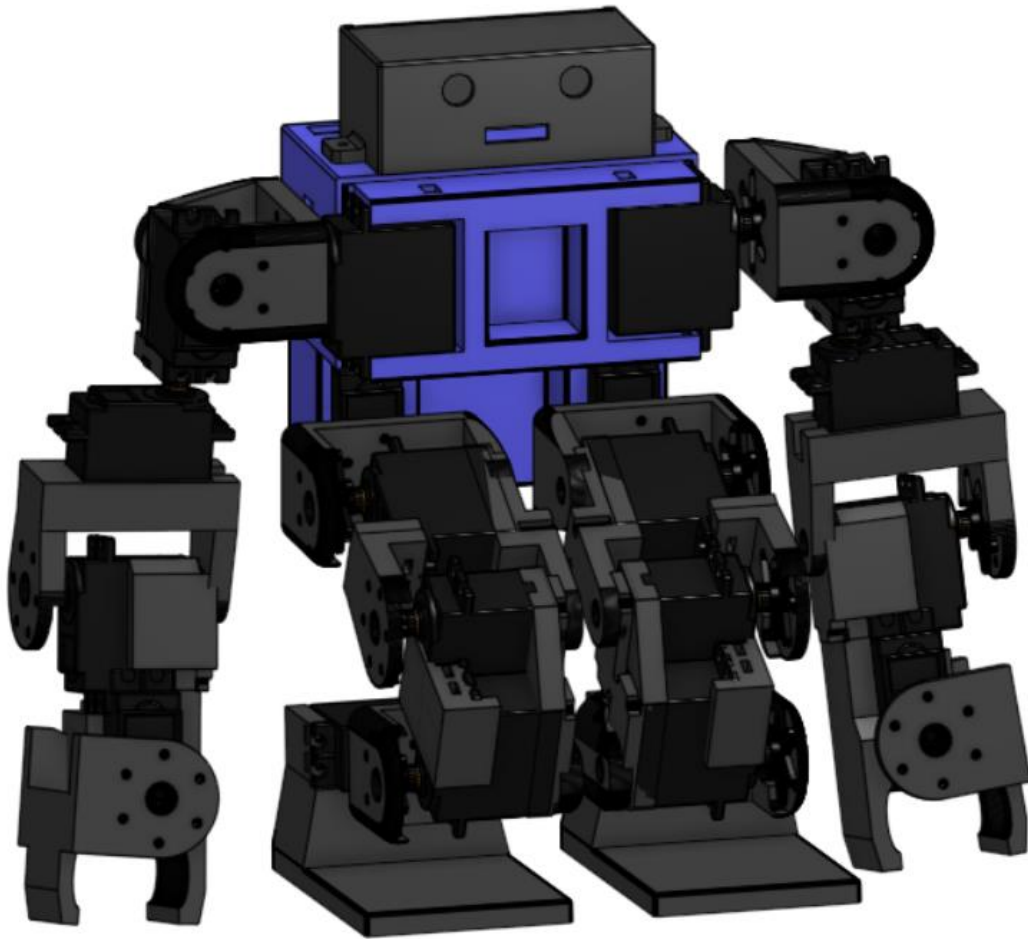


Figura 2.4 Diseño completo de la estructura

2.1.1 DISTRIBUCIÓN DE ARTICULACIONES

El prototipo a implementar se trata de un robot articulado con 20 GDL (Grados de Libertad), es decir que presenta 20 articulaciones, las cuales están distribuidas equitativamente en cada extremidad, es decir 5 articulaciones en cada una de ellas. Cada articulación será controlada por un servomotor su ubicación se detalla en la Figura 2.5.

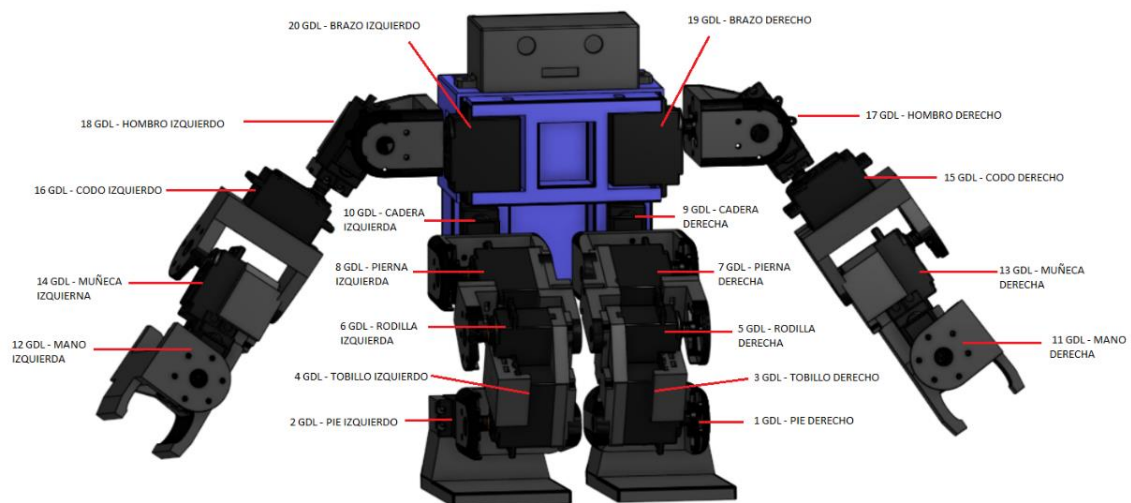


Figura 2.5 Ubicación de articulaciones

Puesto que las articulaciones son controladas por servomotores, estas son del tipo rotacional, es decir que, al enviar una señal de control a los servomotores, estos girarán la articulación. El movimiento giratorio puede ser traducido en distintos tipos de movimiento dependiendo del tipo de acople utilizado en la articulación.

2.1.2 ENSAMBLAJE DE LA ESTRUCTURA

Una vez se dispone de los planos de la estructura completa, esta se la implementa mediante impresión 3D con filamento PLA y se procede a la etapa del ensamblaje.

Para realizar el proceso de ensamblaje de la estructura propuesta, se sigue la guía diseñada por el autor de esta, para lo cual se necesita tuercas, tornillos y rodamientos, además de los servomotores MG996R que son los elementos principales.

El proceso de ensamblaje consistió esencialmente en la unión de los diferentes eslabones de la estructura mediante servomotores, los cuales permiten el movimiento de cada una de las articulaciones.

En primer lugar, se realizó el ensamblaje de las piernas del robot, las cuales están conformadas por cinco articulaciones: pie, tobillo, rodilla, pierna y cadera. Se realizó la unión de las diferentes piezas que conforman cada una de las piernas en base a los cinco servomotores que dan movimiento a la extremidad. En la Figura 2.6 se muestra el resultado del ensamblaje de las piernas del robot.

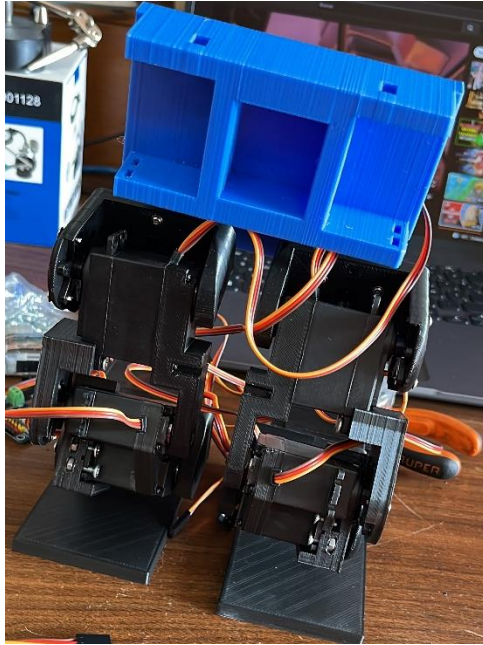


Figura 2.6 Piernas ensambladas del robot

De la misma forma, se realizó el ensamblaje de los brazos del robot, los cuales están conformados por cinco articulaciones: mano, muñeca, codo, hombro y brazo. Se realizó la unión de las diferentes piezas que conforman cada uno de los brazos en base a los cinco servomotores que dan movimiento a la extremidad. En la Figura 2.7 se muestra el resultado del ensamblaje de los brazos del robot.

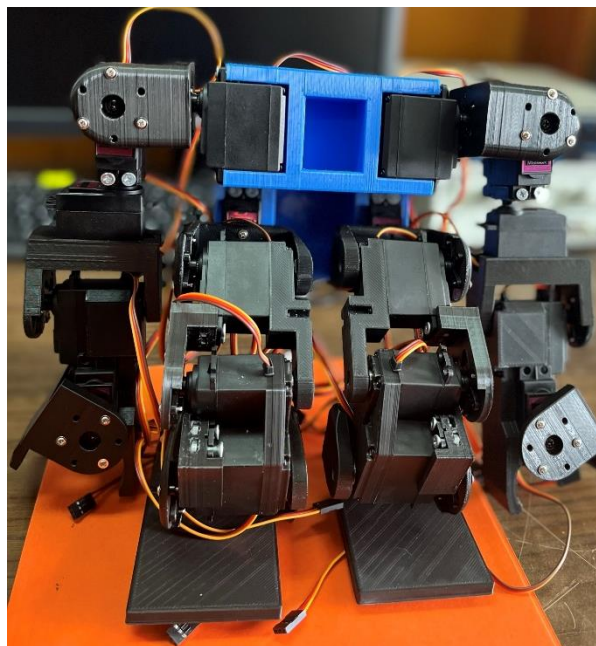


Figura 2.7 Brazos ensamblados del robot

Una vez ensambladas las extremidades del robot, se realiza el ensamblaje de las piezas adicionales a la estructura. La pieza de la tapa del circuito electrónico se ubica en la parte posterior de la pieza del cuerpo y la pieza de la cabeza se ubica encima de la pieza de la tapa. Con estas piezas ensambladas se obtuvo la estructura mostrada en la Figura 2.8.

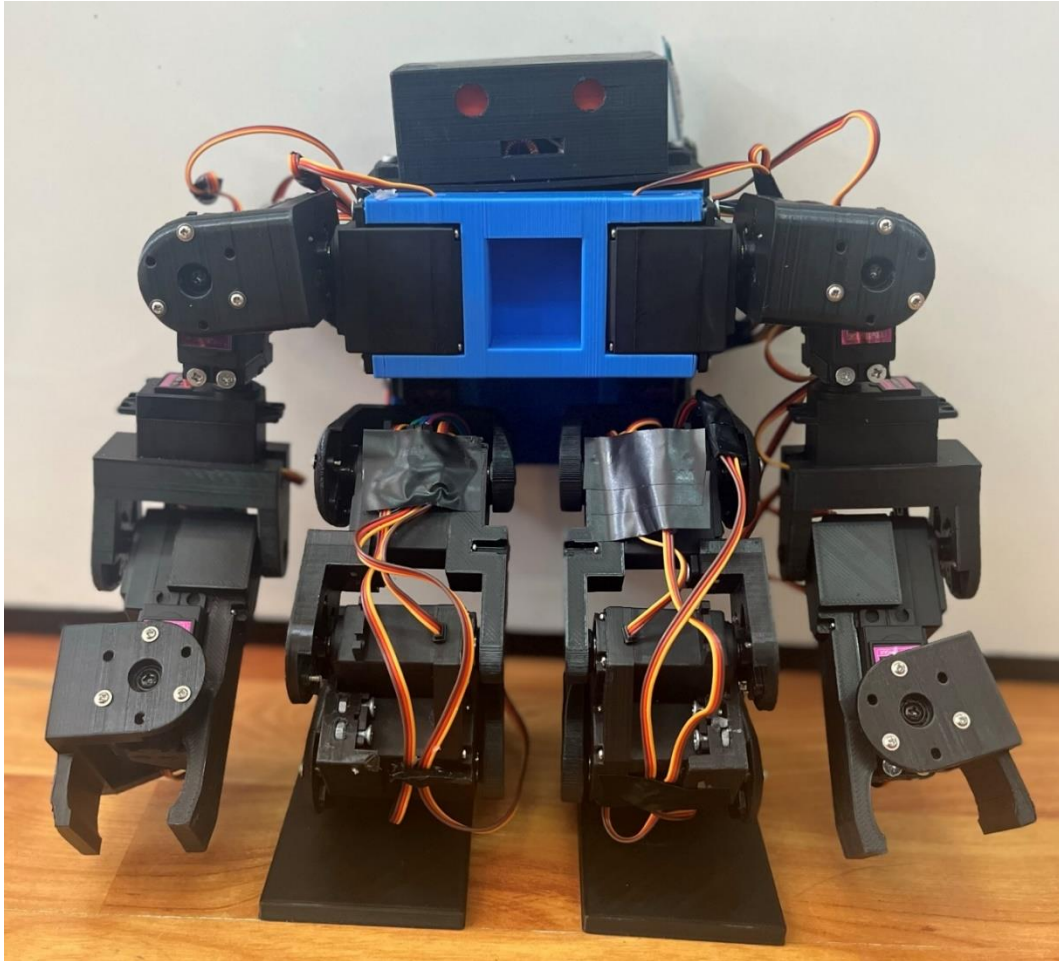


Figura 2.8 Estructura implementada del prototipo

2.2 DISEÑO ELECTRÓNICO

Para el funcionamiento del prototipo es necesario el diseño e implementación de un circuito electrónico que sea capaz de enviar las señales de control al sistema de locomoción para que el prototipo realice las rutinas de movimiento necesarias.

Además, este circuito debe incluir la implementación de un sistema de comunicación inalámbrica para la calibración y el control del robot.

Para tener una idea clara del diseño electrónico en la Figura 2.9 se muestra la arquitectura del sistema de control en la cual se bosqueja las entradas y salidas del mismo. Como entradas del sistema se tiene la señal del ángulo de orientación medida por el acelerómetro y la señal de control inalámbrica enviada por el módulo bluetooth. En el caso de las salidas, solamente se tiene la señal de control enviada al módulo controlador de servomotores, el cual a su vez se encargará de controlar los servomotores. Finalmente, se tiene la alimentación del sistema, el cual consta de dos secciones, una alimentación para el circuito de control y una alimentación para los servomotores.

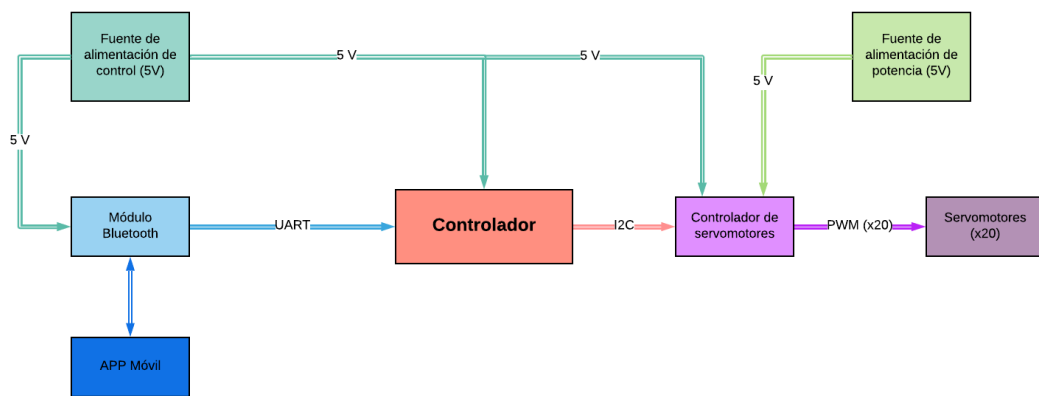


Figura 2.9 Arquitectura del sistema electrónico

2.2.1 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

El primer paso a la hora de diseñar un sistema electrónico es el dimensionamiento de la fuente de alimentación, pues es necesario diseñar un sistema que permita alimentar sin problemas todas las cargas necesarias.

Para el prototipo que se está diseñando se plantea el uso de una batería tipo LiPo, ya que estas son recargables y comercialmente existe una gran variedad de baterías LiPo que proporcionan diferentes valores de voltaje y corriente.

Estas baterías son muy utilizadas en el campo de la robótica pues son capaces de proporcionar corrientes muy altas pese a que tienen tamaños y pesos reducidos, lo que las convierte en la fuente de alimentación ideal para robots de pequeño tamaño.

2.2.1.1 Análisis de carga

Antes de realizar el dimensionamiento de la batería es necesario realizar un cálculo de la corriente eléctrica que el sistema va a consumir, pues la corriente es uno de los factores más importantes a la hora de seleccionar una batería. En la Tabla 2.1 se realizará el cálculo de la corriente necesaria para alimentar todo el sistema.

Tabla 2.1 Carga de operación

Elemento	Cantidad	Corriente individual [mA]	Corriente total [mA]
Microcontrolador	1	19	19
Módulo Bluetooth	1	50	50
Regulador de 5V	1	10	10
Servomotores	6	500	3000
LEDs indicadores	2	15	30
TOTAL			3109

Es necesario tomar en cuenta que, en el caso de los servomotores, aunque la estructura cuente con 20 de ellos, no todos serán utilizados al mismo tiempo, pues al realizar un análisis previo de la locomoción bípeda, se prevé que se puede realizar las rutinas de caminata en movimientos que usen máximo 6 servomotores a la vez, es así que, para el dimensionamiento de carga, se considera esta cantidad de servomotores.

2.2.1.2 Dimensionamiento de la batería

En primer lugar, para seleccionar la batería LiPo a utilizar en el sistema es necesario seleccionar el dato de voltaje de la batería y la capacidad de corriente que puede proporcionar al sistema.

Con respecto a la selección de voltaje, hay que tener en cuenta que existen valores de voltaje estándar de baterías LiPo, los cuales pueden ser 3.7 V, 7.4 V, 11.1 V, etc. Entonces, de los valores comerciales disponibles, se elige 7.4 V, voltaje que se reducirá mediante reguladores de voltaje para poder alimentar los servomotores y el circuito de control que funcionan con otros niveles de voltaje.

Por otro lado, para la selección del valor de capacidad de corriente, es importante tomar en cuenta que este dato es la cantidad de corriente que la batería puede proporcionar en un periodo de tiempo, expresada en mAh. Entonces para el cálculo de la capacidad de la batería a usar en el sistema se utiliza la ecuación 2.1 [11].

$$C = \frac{C_1 / \text{día} \cdot N}{\text{DoD}} \quad (2.1)$$

Donde:

- C = Capacidad de corriente en mAh.
- C_1 = Capacidad de corriente ideal en mAh.
- N = Número de días de autonomía.
- DoD = Profundidad de descarga permitida en %.

En primer lugar, se realiza el cálculo de la capacidad de corriente ideal utilizando la ecuación 2.2 [12].

$$C_1 = I \cdot t \quad (2.2)$$

Donde:

- C = Capacidad de corriente ideal en mAh.
- I = Corriente de la carga en mA.
- t = Tiempo de uso en horas.

Para realizar este cálculo, es necesario saber el tiempo de uso continuo que se va a mantener encendido el sistema, lo cual corresponde al tiempo que dura una competencia de carrera de bípedos. Estas competencias cuentan con una sola ronda, donde compiten todos los robots al mismo tiempo. En las reglas no se establece un tiempo máximo de duración de la competencia, sin embargo, contando el tiempo de homologación y competencia, se podría establecer como tiempo máximo 10 minutos. Adicional al tiempo se requiere también el valor de la corriente de la carga, el cual se calculó en la Tabla 2.1 y es de 3.11 A; este valor se sobredimensiona a un valor de 4 A para considerar el incremento de la corriente de los servomotores cuando estos tienen carga. Estos valores considerados se los aplica en la ecuación 2.2.

$$C_1 = 4000 \text{ mA} \cdot 10 \text{ min} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 666.67 \text{ mAh}$$

Por otro lado, para la profundidad de descarga, se toma como referencia la curva de descarga para una batería LiPo de una celda mostrada en la Figura 2.10. En base a la curva, se selecciona un valor de profundidad de descarga de 50%, que corresponde a un nivel de carga de aproximadamente 3.85 V, que se duplica a 7.7 V en el caso de una batería de 2 celdas. Este valor es seleccionado debido a que el valor nominal de la batería es 7.4 V y se prefiere que el estado de carga de la batería siempre este por encima de este valor, evitando de esa manera que se descargue a niveles que podrían ser peligrosos para la batería, además de que el estado más estable de la batería se encuentra en el 50% del nivel de carga de la misma [13].

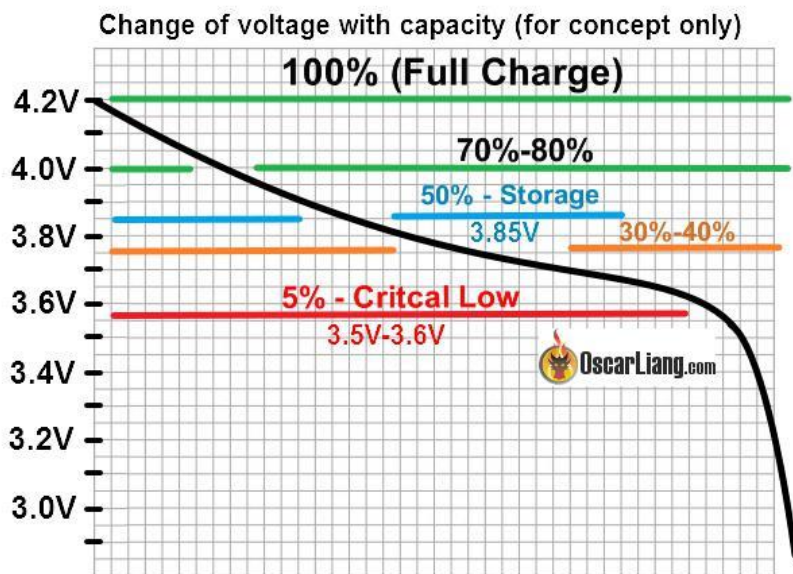


Figura 2.10 Curva de descarga de una batería LiPo [13]

Para la obtención de la capacidad de la batería a elegir se aplican todos los valores considerados en la ecuación 2.1.

$$C = \frac{666.67 \text{ mAh/día} \cdot 1 \text{ día}}{0.5} = 1333.33 \text{ mAh}$$

A partir del valor de consumo de corriente calculado, se escoge el valor comercial de 1500 mAh para la selección de la batería LiPo que se usará en el sistema. En la Figura 2.11 se muestra una imagen del elemento elegido.



Figura 2.11 Batería LiPo de 7.4 V y 1500 mAh [14]

2.2.1.3 Circuito de alimentación

Como se había mencionado anteriormente, es necesario reducir el voltaje entregado por la LiPo a valores menores para alimentar tanto el circuito de control como los elementos de potencia (servomotores).

Entonces, en primer lugar, el circuito de control se alimenta con 5 V y la corriente que consume no supera los 150 mA, por lo cual que es necesario reducir el voltaje de 7.4 V, para esto se plantea el uso de un regulador ASM1117 5.0. En la Figura 2.12 se encuentra el esquema del circuito a implementar, el cual también tiene etapas de filtrado a la entrada y salida del ASM1117. Los valores de los capacitores cerámicos usados para el filtrado son obtenidos de la hoja de datos proporcionada por el fabricante, mientras que los valores de los capacitores electrolíticos son estimados a 100 uF para que cumplan la función de un filtro adicional.

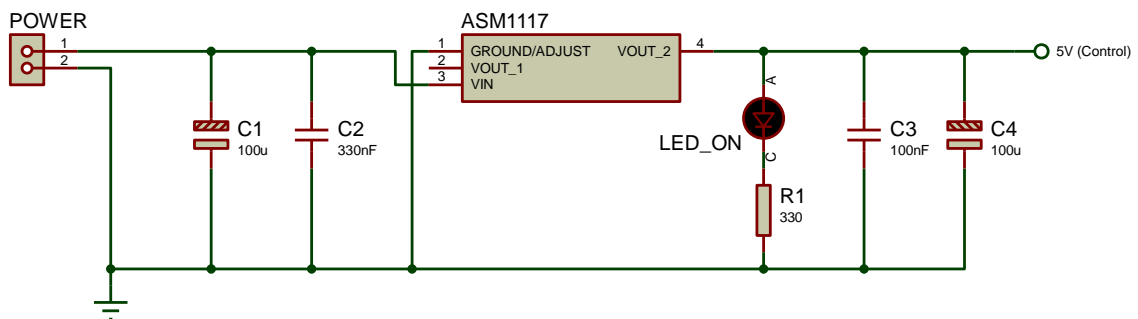


Figura 2.12 Circuito de alimentación para los elementos de control

En segundo lugar, para la alimentación de los elementos de potencia hay que tomar en cuenta que se considera el uso de 6 servomotores máximo al mismo tiempo, con los cuales se obtiene una corriente de 3 A y requieren un voltaje de entre 4.8 V a 7.2 V. Para cumplir

con los requerimientos necesarios se elige un módulo reductor de voltaje, que permite obtener a la salida un voltaje de 5 V (Valor que puede ser variado con potenciómetros) y además puede soportar hasta 5 A, lo que permite tener un rango de sobredimensionamiento para el uso de los servomotores con carga. En la Figura 2.13 se muestra una imagen del módulo XL4015 elegido para alimentar la parte de potencia [15].



Figura 2.13 Módulo regulador de voltaje XL4015 [15]

2.2.2 ACTUADORES

Los actuadores generalmente se refieren a dispositivos que generen algún tipo de movimiento en el sistema, por lo que al hablar del prototipo los actuadores del sistema son los servomotores, los cuales realizan el movimiento de todas las articulaciones.

Para un uso más eficiente de los pines y la memoria del Arduino, se usa un módulo de control de servomotores o driver.

2.2.2.1 Servomotores MG996R

El servomotor que se utiliza en el prototipo es el MG996R debido a que la estructura mecánica elegida fue desarrollada para este tipo de servomotores. Estos dispositivos son elementos de alta precisión y gran torque, cuyo ángulo de posicionamiento se controla variando el ciclo de trabajo de una PWM de 50 Hz entre 1 ms y 2 ms.

Los servomotores tienen dos cables para la alimentación (entre 4.8 V y 7.2 V) y uno para la señal de control (PWM) [7].

Como se mencionó anteriormente, el robot desarrollado cuenta con 20 articulaciones, por lo que es necesario controlar 20 servomotores, por lo que se va a utilizar el módulo de control de servomotores PCA9685. Este módulo es un dispositivo que permite realizar el control de manera independiente de hasta 16 servomotores a la vez, es decir que permite

sacar hasta 16 PWM diferentes a la vez de sus pines de control. Tomando en cuenta el número de servomotores que puede controlar un solo módulo, se planifica el uso de 2 módulos, que tendrán conectados 10 servomotores cada uno.

El módulo presenta dos entradas de alimentación, una de ellas es la alimentación para la tarjeta de control y debe ser de +5 V, mientras que la otra es la alimentación para los servomotores, por lo que se debe introducir el voltaje necesario para alimentarlos, que en el caso del presente trabajo será de +5 V. Por otro lado, para el envío de los comandos de control por parte del Arduino hacia el módulo de control, se utiliza comunicación I2C. Las resistencias de pull-up del bus I2C se implementan usando las resistencias de pull-up internas del Arduino, las cuales se activan al usar la librería "wire.h".

El esquema de conexión de los módulos de control con los servomotores y con el Arduino se presenta en la Figura 2.14 [16].

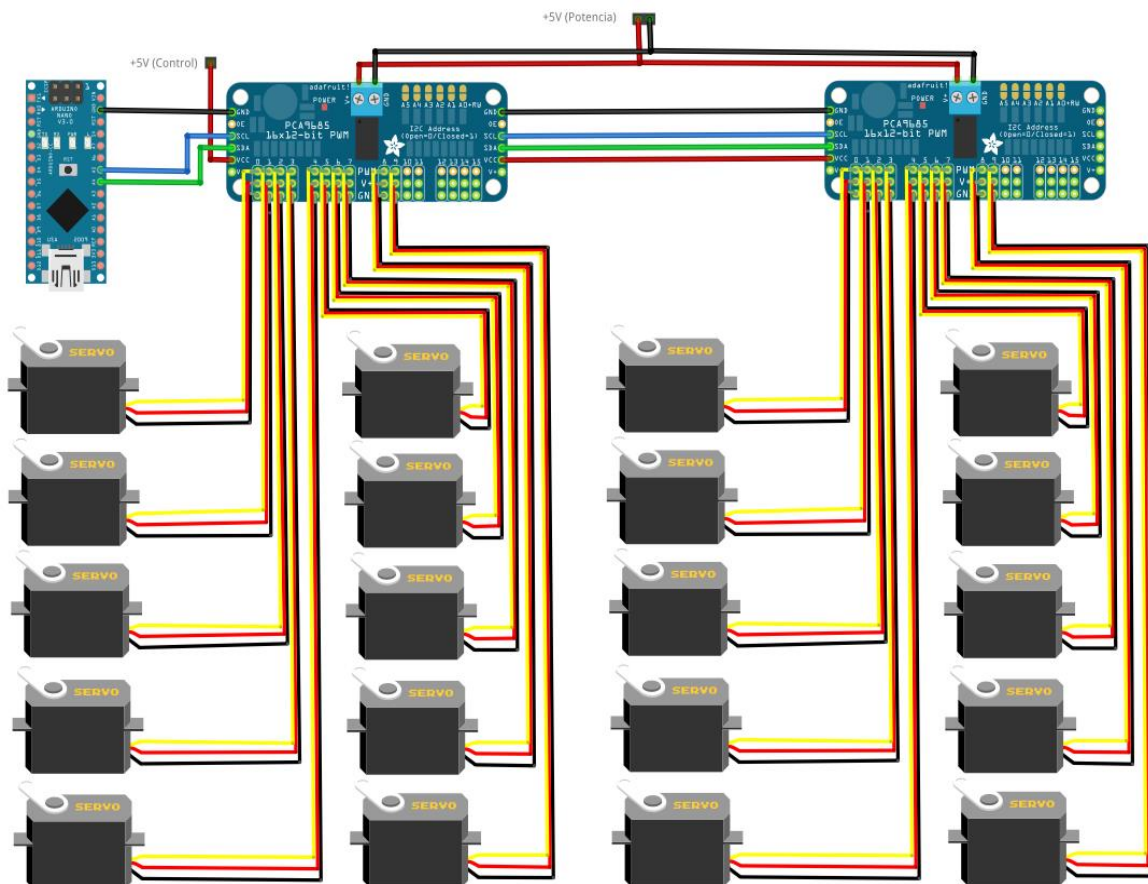


Figura 2.14 Conexión de los servomotores

A partir del esquema se realiza la Tabla 2.2 que muestra la conexión de los pines de los servomotores y del módulo PCA9685. Como se presenta en la tabla se realiza la conexión de la alimentación de los servomotores por medio de los pines V+ y GND del módulo, la entrada de la señal de control de los servomotores se conecta a los pines PWM del módulo. Por otro lado, se alimenta el módulo con +5 V por medio de los pines VCC y GND, y la comunicación I2C se realiza por medio de los pines A5 y A4 que corresponden a la línea del reloj y a la de datos respectivamente. Adicionalmente, se conecta la fuente de alimentación de potencia (+5 V) para alimentar todos los servomotores.

Tabla 2.2 Conexión de los servomotores

PCA9685		
Control	VCC	+5 V (Control)
	GND	GND
	SCL	A5 (Arduino)
	SDA	A4 (Arduino)
Potencia	V+	+5 V (Potencia)
	GND	GND
MG996R		
Rojo	V+ (PCA9685)	
Negro	GND	
Amarillo	PWM (PCA9685)	

Una vez definida cada una de las partes del sistema electrónico se diseña el circuito completo mostrado en la sección anexos, con el cual se diseña la PCB también mostrada en la misma sección.

2.3 PROGRAMA DE CONTROL

El programa de control del robot humanoide de este trabajo involucra un programa para el microcontrolador que se encarga del control de los servomotores del robot y un programa para el funcionamiento de una aplicación móvil, con la cual se controla a distancia al robot

para que realice las rutinas correspondientes según las instrucciones enviadas usando comunicación bluetooth.

Para tener una idea clara del diseño de software en la Figura 2.16 se muestra la arquitectura del programa de control en la cual se bosqueja el procedimiento que se debe realizar para que el robot realice las diferentes acciones. En primer lugar, se elige una acción en la aplicación móvil y se envía un comando por medio de comunicación bluetooth al microcontrolador, según el comando recibido, el microcontrolador ejecutará la rutina de la acción seleccionada controlando los servomotores para realizar los movimientos necesarios.

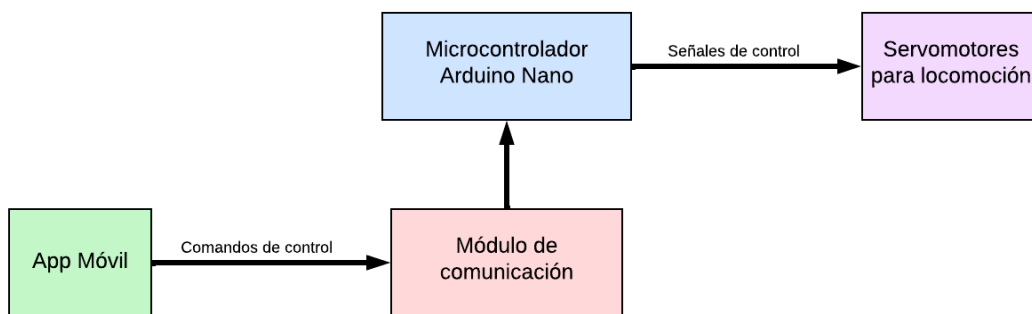


Figura 2.15 Arquitectura del programa de control

2.3.1 GENERACIÓN DE RUTINAS DE MOVIMIENTO

Como se mostró anteriormente en la Figura 2.5 el robot desarrollado consta de 20 articulaciones que le dan una movilidad similar a la de los seres humanos. Para realizar los movimientos requeridos se coordinarán los movimientos individuales de cada una de estas articulaciones mediante el control de los servomotores.

Para realizar los movimientos necesarios del robot para una competencia de carrera de humanoides se elabora las siguientes rutinas:

- Rutina de caminata frontal.
- Rutina de caminata lateral.
- Rutina para levantamiento frontal.
- Rutina para levantamiento posterior.

2.3.2 PROGRAMA DE CONTROL DEL MICROCONTROLADOR

El programa de control que se ejecuta en el Arduino tiene como objetivo recibir los comandos de control de la aplicación móvil y ejecutar la rutina de movimiento correspondiente al comando recibido. Para la realización del programa se incluye las librerías de comunicación serial, comunicación I2C y del módulo de control de servomotores PCA9685.

En primer lugar, se ejecuta un lazo de inicialización, en donde se inicializa la comunicación serial y los módulos de los servomotores. Además, también se realiza la ejecución de la rutina de posición inicial del robot.

En el programa principal se realiza constantemente la lectura de la entrada de comunicación serial y en caso de que se reciba un comando de control, se ejecuta la rutina correspondiente. En la Figura 2.16 se muestra el diagrama de flujo del programa principal del robot.

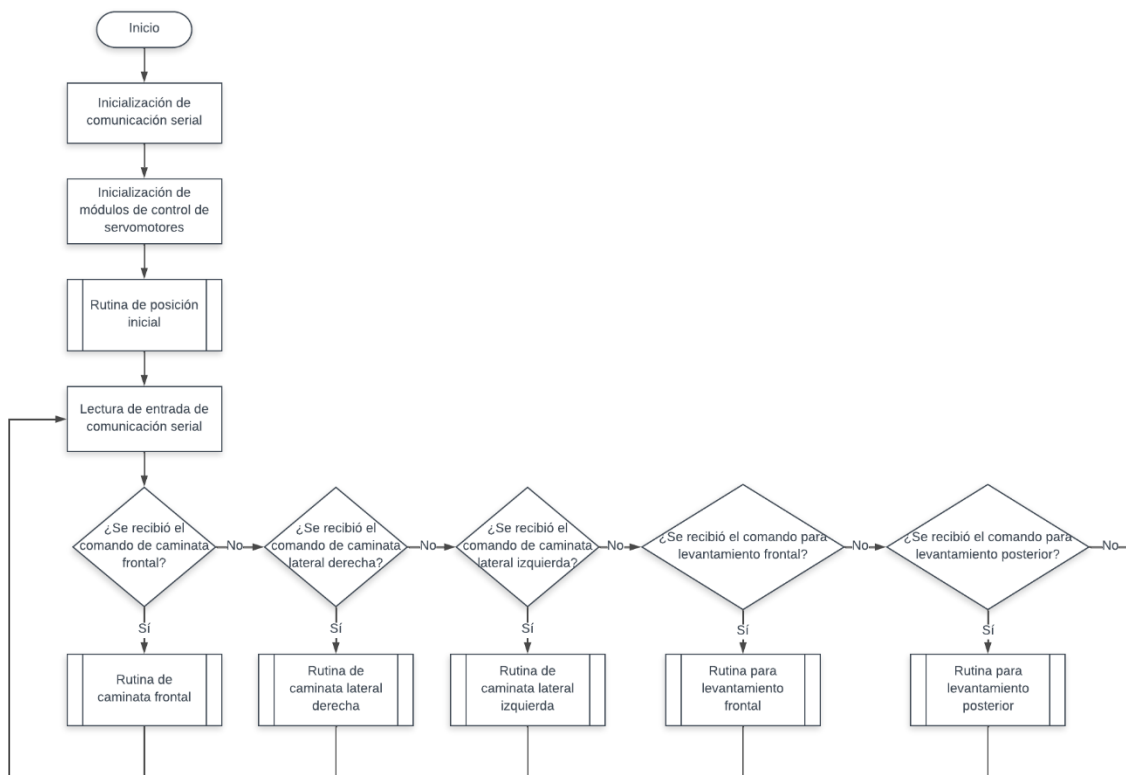


Figura 2.16 Diagrama de flujo del programa de control

Con el objetivo de explicar las rutinas de movimiento del robot, se va a utilizar el esquema de la Figura 2.17 que representa el robot a utilizar, en la cual se establece una nomenclatura a las articulaciones en base a la Figura 2.5.

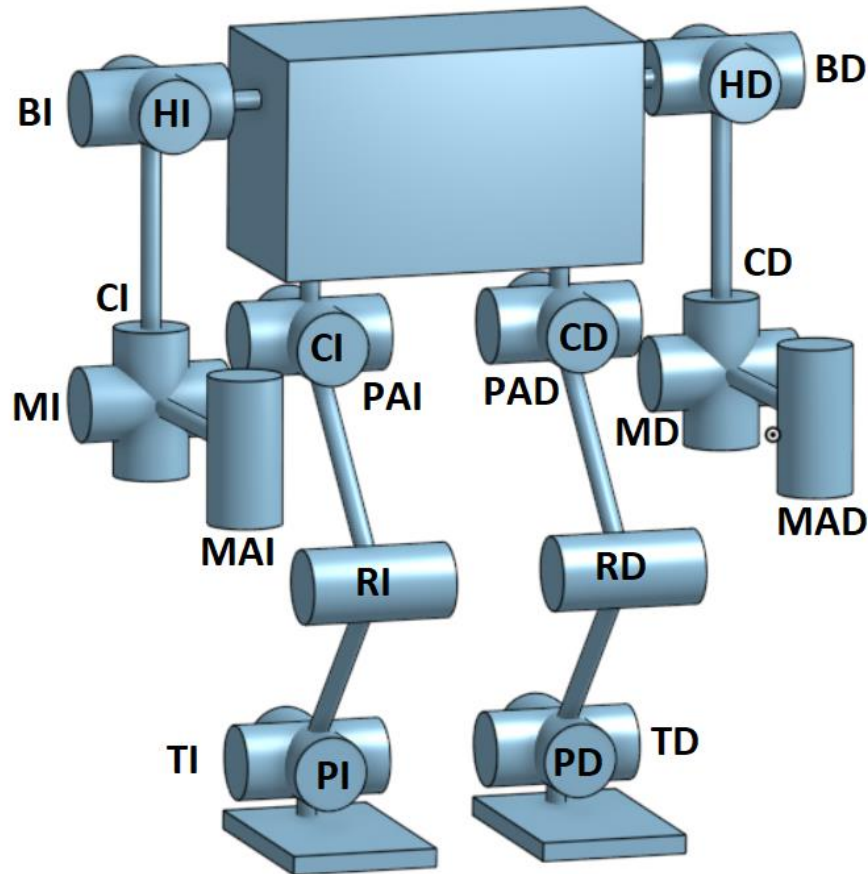


Figura 2.17 Esquema del robot articulado

2.3.2.1 Rutina de caminata frontal

Para desarrollar la rutina de caminata frontal, se toma como punto de partida el procedimiento que realiza un ser humano para caminar. En la Figura 2.18 se muestra un medio ciclo de una caminata bípeda.

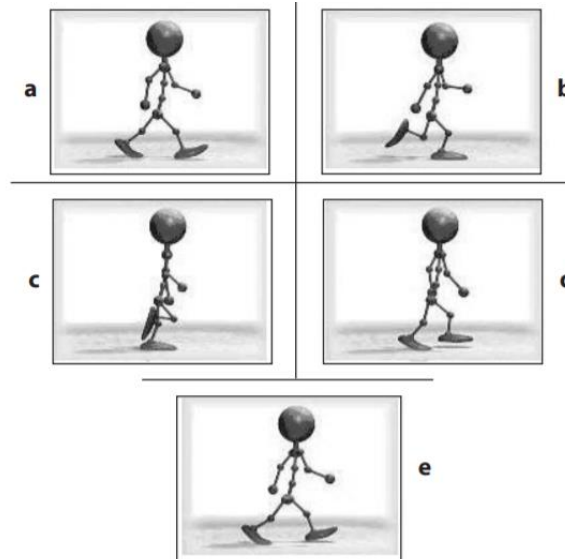


Figura 2.18 Caminata bípeda [17]

La caminata empieza en la fase a, que consiste en una posición de doble soporte, pues se reposan ambos pies en el piso para mantener el equilibrio. A continuación, se tiene la fase b, en la cual se levanta la pierna trasera y todo el peso recae en la pierna delantera, para lo cual esta se flexiona y se convierte en el soporte de esta fase. Seguidamente se inicia con la fase c, en la que se lleva la pierna levantada hacia adelante y la pierna de soporte se endereza provocando un balanceo hacia adelante. Posteriormente se realiza la fase d, en la cual la pierna levantada cae hasta llegar al piso, volviendo a un estado de doble soporte. Finalmente, una vez la pierna ha llegado al piso se vuelve a la posición inicial y se ha completado el primer medio ciclo de la caminata. El segundo medio ciclo es un reflejo del primero, pues se realiza el mismo procedimiento con la otra pierna [17].

Adicionalmente, es importante tomar en cuenta los movimientos de los brazos, pues estos se balancean para mantener el equilibrio durante la camina, es así que cuando la pierna derecha este adelante, el brazo derecho estará atrás y viceversa.

Después del análisis realizado, se establece la rutina de caminata, la cual consta esencialmente de 4 etapas: etapa inicial, etapa de despegue, etapa de avance y etapa de aterrizaje.

La etapa inicial consiste en que el robot adopte una posición equilibrio en donde las dos piernas estén reposando en el piso, tal como se muestra en la Figura 2.19. Como su nombre lo indica en esta etapa el robot está en una posición inicial para empezar con la rutina de la camina.

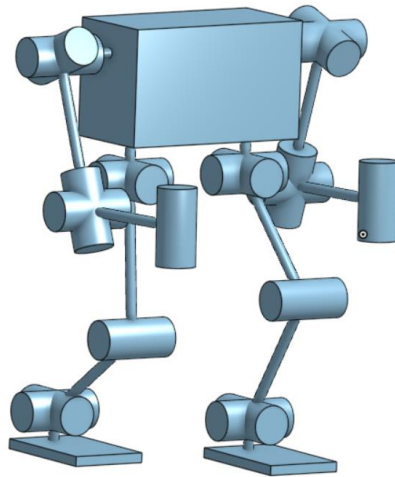


Figura 2.19 Etapa inicial

La etapa de despegue consiste en inclinar el cuerpo del robot para que la pierna que va a avanzar, en este caso la pierna izquierda, se separe del piso, para lo cual se realizará un cambio de posición de las articulaciones PI y PD en el mismo sentido y se obtiene la posición mostrada en la Figura 2.20.

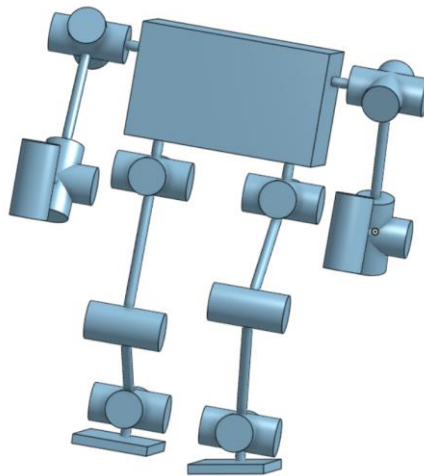


Figura 2.20 Etapa de despegue

En la etapa de avance se debe hacer que la pierna levantada avance y se ubique en una posición delantera, mientras que la pierna de soporte se inclinará para quedar en una posición trasera, para lo cual se realizará un cambio de posición de las articulaciones PAI, PAD, RD, RI, TI y TD, y se mantiene la posición de las articulaciones PD y PI. Adicionalmente, se realiza el balanceo de brazos moviendo las articulaciones BI y BD, con lo cual se obtiene la posición mostrada en la Figura 2.21.

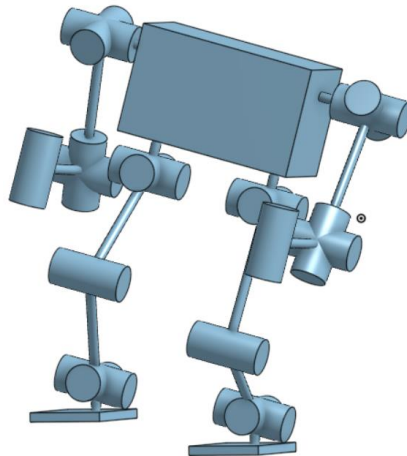


Figura 2.21 Etapa de avance

Finalmente, la etapa de aterrizaje consiste en llevar el pie levantado al piso de nuevo, volviendo a una posición de equilibrio con las dos piernas apoyadas en el suelo, para lo cual las articulaciones PI y PD regresan a su posición inicial y las articulaciones PAI, PAD, RI, RD, TI y TD cambian de posición para llegar a la posición mostrada en la Figura 2.22.

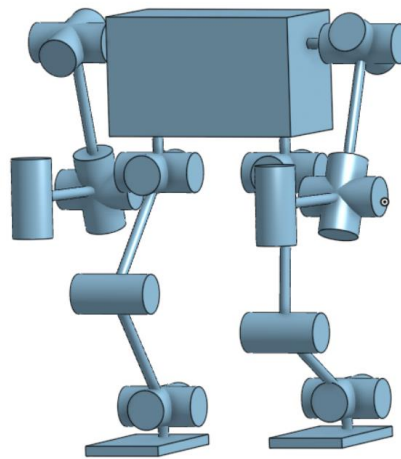


Figura 2.22 Etapa de aterrizaje

Posteriormente, se inicia el segundo medio ciclo de la caminata, el cual consiste en repetir el procedimiento detallado, pero realizando el avance de la pierna derecha [18].

En la Figura 2.23 se muestra el diagrama de flujo de la rutina de caminata frontal que se ejecuta en el programa principal.

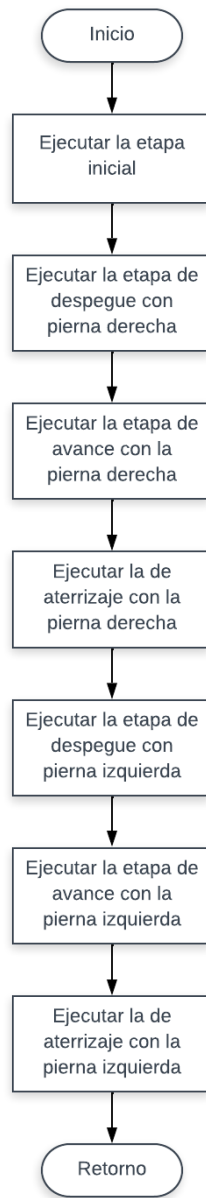


Figura 2.23 Diagrama flujo de rutina de camina frontal

2.3.2.2 Rutina de caminata lateral

Para realizar la rutina de caminata lateral, se realiza un análisis de los movimientos realizados por robots humanoides comerciales para realizar este tipo de caminata, con lo cual se obtuvo una rutina compuesta de cuatro etapas: etapa inicial, etapa de avance, etapa de empuje, etapa de aterrizaje.

Se va a realizar la explicación solo de la caminata lateral hacia la izquierda, pues para realizar la caminata a la derecha se realiza el mismo procedimiento.

La etapa inicial consiste en que el robot adopte una posición de equilibrio en la cual las dos piernas estarán asentadas en el piso como se muestra en la Figura 2.24.

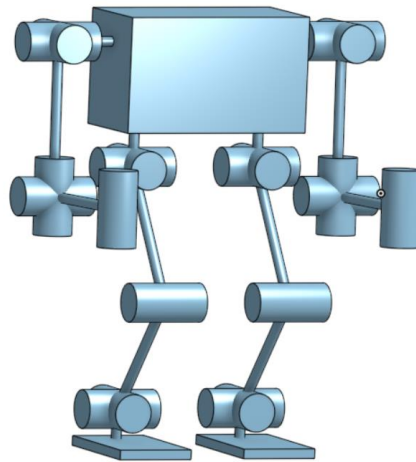


Figura 2.24 Etapa inicial

En la etapa de avance se debe realizar el movimiento lateral de la pierna izquierda que provocará un pequeño avance hacia la izquierda, para lo cual se realiza un cambio de posición de las articulaciones CI y PI, lo que provoca el movimiento requerido como se muestra en la Figura 2.25.

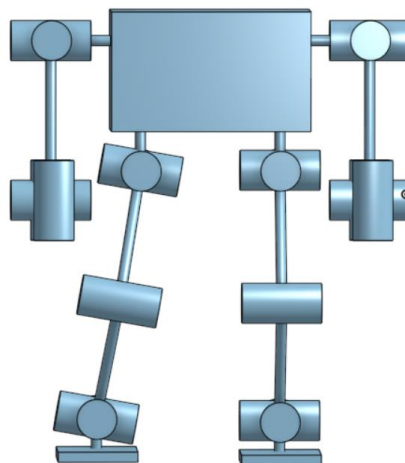


Figura 2.25 Etapa de avance

En la etapa de empuje se debe lograr levantar la pierna derecha, convirtiendo a la izquierda en el punto de soporte, para lo cual se inclina el cuerpo del robot hacia la izquierda, lo que permite que la pierna derecha se separe del piso. Además, con la pierna derecha se realiza un pequeño empuje que ayuda al robot a adoptar la posición inclinada. Para realizar este

paso se realiza el movimiento de las articulaciones CI, CD, PI y PD, obteniendo la posición que se muestra en la Figura 2.26.

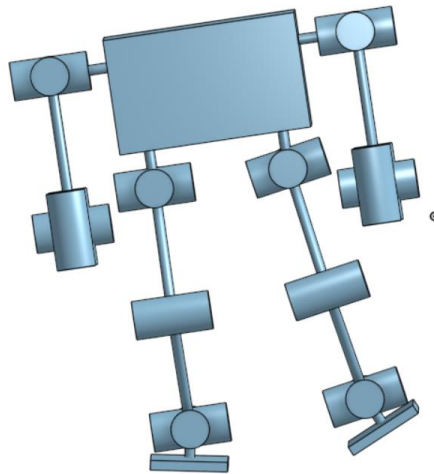


Figura 2.26 Etapa de empuje

La etapa de aterrizaje tiene como objetivo regresar a la posición inicial, para lo cual la pierna derecha se endereza de nuevo, y de la misma manera la pierna izquierda, logrando que ambas piernas vuelvan a asentarse en el piso, con lo cual se completa el paso. Para realizar este paso se necesita realizar un cambio de posición en las articulaciones CD, PI y PD, obteniendo la posición de la Figura 2.27.

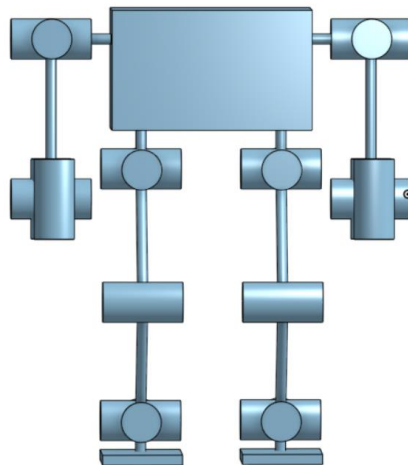


Figura 2.27 Etapa de aterrizaje

En la Figura 2.28 se muestra el diagrama de flujo de las rutinas de caminata lateral que se ejecutan en el programa principal.

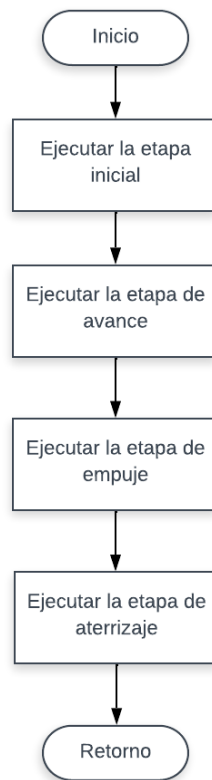


Figura 2.28 Diagrama flujo de rutinas de caminata lateral

2.3.2.3 Rutina para levantamiento frontal

Con el objetivo de desarrollar una rutina para que el robot pueda levantarse después de una caída frontal se ha realizado un análisis de las rutinas usadas por otros robots para lograr este movimiento. Es así que se obtuvo una rutina con cuatro etapas: etapa inicial, etapa de asentamiento, etapa de elevación y etapa de retorno.

La etapa de posición inicial consiste en poner al robot en una posición fija a partir de la cual se realizará el resto de la rutina, para lo cual se usa la posición mostrada en la Figura 2.29.

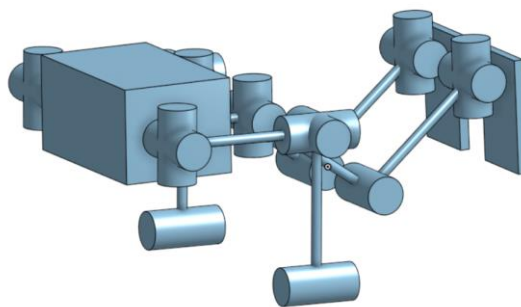


Figura 2.29 Etapa inicial

En la etapa de asentamiento se asientan los pies del robot en el piso y se mueven los brazos hacia adelante, pues estos servirán de apoyo para poder levantarse, para lo cual se realiza un cambio de posición de las articulaciones HI, HD, MI, MD, RI, RD, TI y TD, obteniendo la posición mostrada en la Figura 2.30.

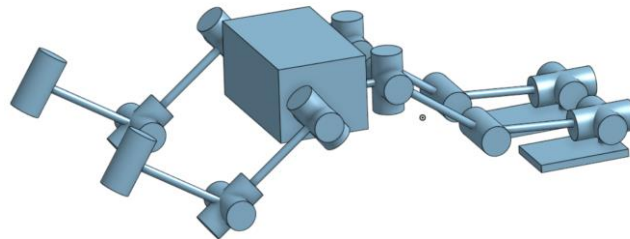


Figura 2.30 Etapa de asentamiento

La etapa de elevación consiste en levantar el cuerpo del robot realizando un ligero estiramiento de las piernas y los brazos, para lo cual se realiza un cambio de posición en las articulaciones BD, BI, PAI, PAD, RI y RD, con lo cual se obtiene la posición mostrada en la Figura 2.31.

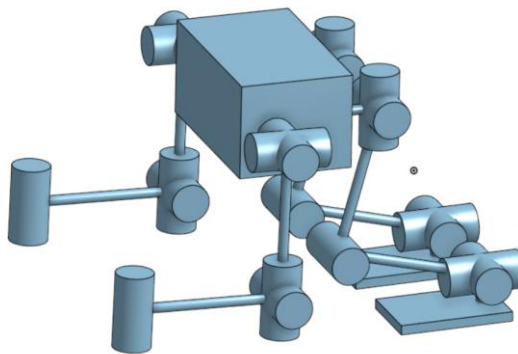


Figura 2.31 Etapa de elevación

Con la etapa de retorno se finaliza la rutina para levantarse del robot, la cual consiste en elevar completamente el cuerpo del robot, estirando los brazos del robot para conseguir un impulso y enderezando las piernas hasta que lleguen a una posición de equilibrio. Para lograr esta etapa se realiza el movimiento de BI, BD, MI, MD, RI, RD, TI y TD, obtenido la posición final mostrada en la Figura 2.32.

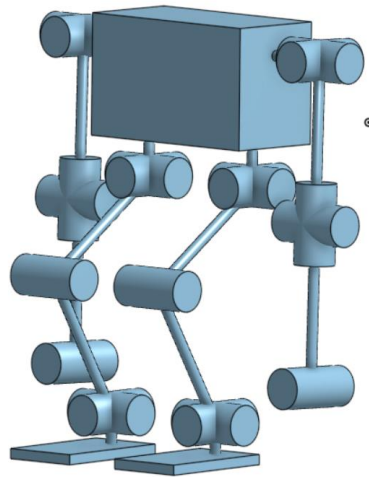


Figura 2.32 Etapa de retorno

En la Figura 2.43 se muestra el diagrama de flujo de la rutina para levantamiento frontal que se ejecuta en el programa principal.

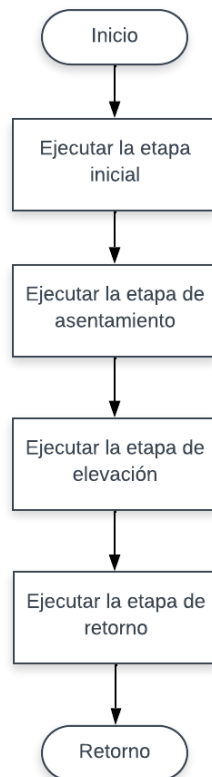


Figura 2.33 Diagrama flujo de rutina para levantamiento frontal

2.3.2.4 Rutina para levantamiento posterior

Al igual que en el caso de la rutina anterior, para desarrollar una rutina que le permita al robot recuperarse de una caída posterior se han analizado las rutinas de movimientos realizados por otros robots. La rutina desarrollada consta de cuatro etapas: etapa inicial, etapa de asentamiento, etapa de elevación y etapa de retorno.

La etapa inicial de esta rutina consiste en ubicar al robot en una posición inicial a partir de la cual se va a realizar el resto de la rutina. La posición utilizada es la que se muestra en la Figura 2.34.

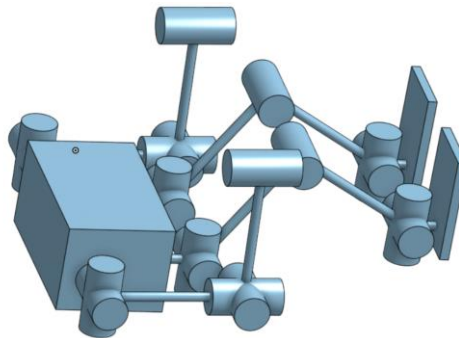


Figura 2.34 Etapa inicial

En la etapa de asentamiento se envían los brazos del robot hacia atrás, pues servirán como apoyo para que el robot pueda levantarse, y se recogen las piernas para preparar al robot para la siguiente etapa, para lo que se cambia de posición a las articulaciones HI, HD, PAI, PAD, RI y RD, obteniendo la posición mostrada en la Figura 2.35.

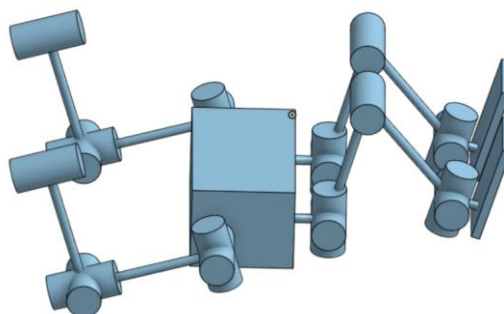


Figura 2.35 Etapa de asentamiento

En la etapa de elevación se realiza un estiramiento de piernas y brazos para elevar el cuerpo del robot hacia arriba y quedar en una posición en la que el robot se apoya en sus

cuatro extremidades, para lo cual se realiza un cambio de posición en las articulaciones BI, BD, MI, MD, RI y RD, obteniendo la posición mostrada en la Figura 2.36.

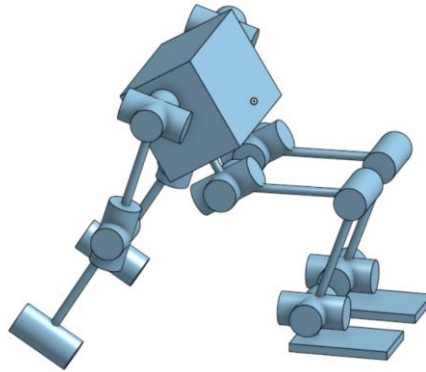


Figura 2.36 Etapa de elevación

En la etapa de retorno se completa la rutina para levantarse del robot, para lo cual se eleva completamente la estructura del robot al conseguir enderezar las piernas con el apoyo de los brazos, los cuales también se enderezarán por completo. Para realizar esta etapa es necesario realizar el cambio de posición en las articulaciones BI, BD, MI, MD, PAI, PAD, TI y TD, con lo cual se obtiene la posición final mostrada en la Figura 2.37.

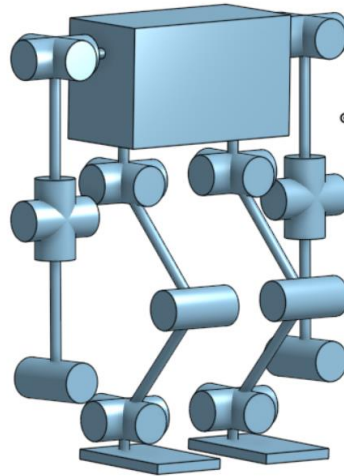


Figura 2.37 Etapa de retorno

En la Figura 2.38 se muestra el diagrama de flujo de la rutina para levantamiento frontal que se ejecuta en el programa principal.

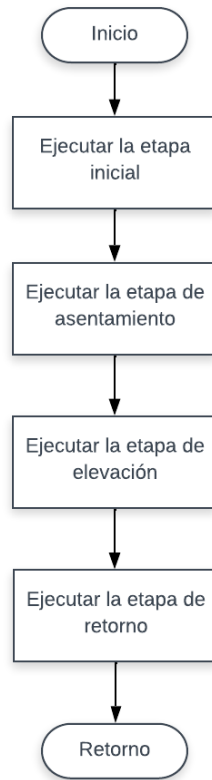


Figura 2.38 Diagrama flujo de rutina para levantamiento posterior

2.3.3 PROGRAMA DE LA APLICACIÓN MÓVIL

Se utiliza una aplicación móvil para realizar el control de los movimientos del robot, por lo que se diseñó la interfaz mostrada en la Figura 2.39, la cual está compuesta por un botón para realizar la conexión bluetooth y varios botones que activarán las rutinas de movimiento (caminata frontal, caminata lateral izquierda, caminata lateral derecha, levantamiento frontal y levantamiento trasero).

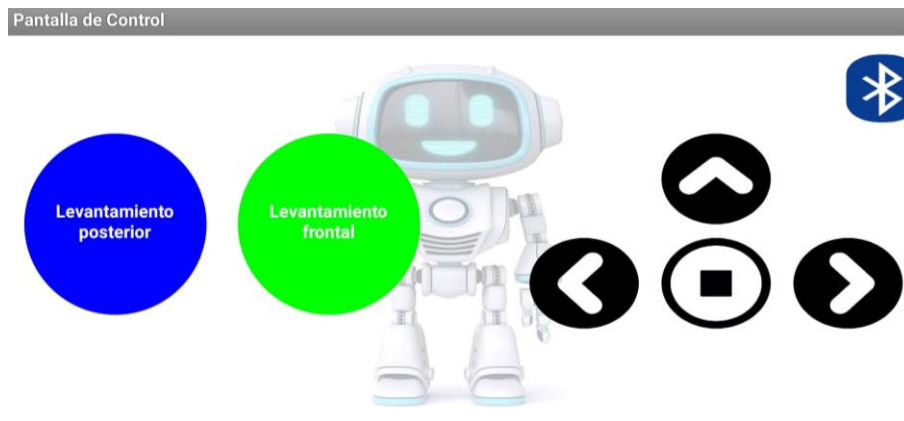


Figura 2.39 Interfaz de la aplicación móvil

El programa de la aplicación empieza realizando la conexión bluetooth con el dispositivo correspondiente. Posteriormente, cada vez que se presione uno de los botones se enviará un número que representa el comando de control. En la Figura 2.40 se muestra el diagrama de flujo del programa de la aplicación.

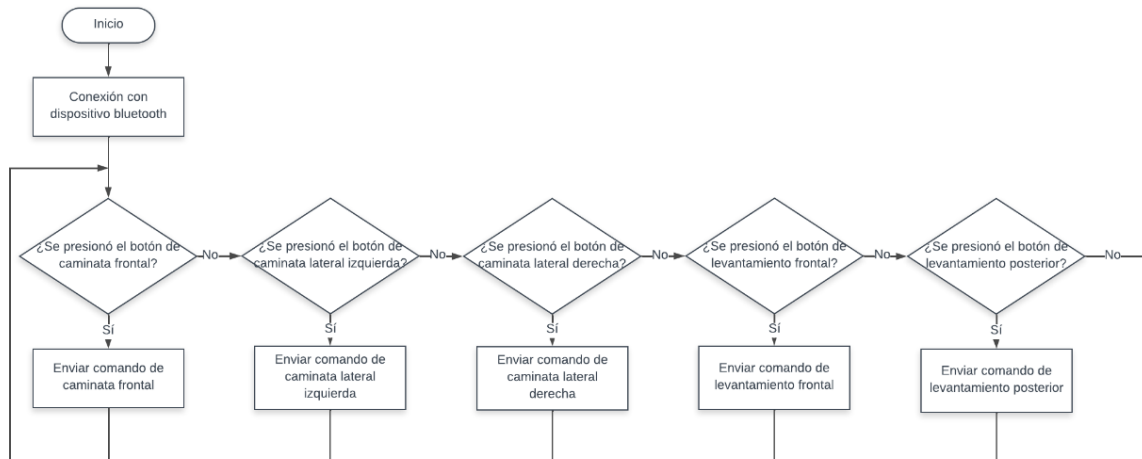


Figura 2.40 Diagrama de flujo del programa de la aplicación móvil

En el siguiente capítulo se va a realizar una recolección de los resultados obtenidos de las diferentes pruebas de funcionamiento del robot.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo se muestra los resultados obtenidos de las pruebas de funcionamiento del robot, además se incluyen las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo.

3.1 RESULTADOS

Con el objetivo de observar si se ha logrado los objetivos planteados en el trabajo se realizan una serie de pruebas de funcionamiento.

3.1.1 PRUEBAS INDIVIDUALES DE LAS RUTINAS DE MOVIMIENTO

En esta sección se mostrará mediante evidencia gráfica la ejecución de cada una de las rutinas de movimiento de manera individual.

3.1.1.1 Procedimiento de uso del robot humanoide

Para poner en marcha el robot humanoide de este trabajo es necesario realizar el siguiente procedimiento:

1. Encender el robot presionando el interruptor de encendido, el cual se ubica atrás de la pieza de la cabeza. En la Figura 3.1 se indica la ubicación del interruptor.



Figura 3.1 Ubicación del interruptor de encendido

2. Una vez encendido el robot, el LED del módulo bluetooth comenzará a parpadear.

3. Se debe esperar a que el robot adquiera la posición de inicio para empezar con el control del mismo.
4. Abrir la aplicación móvil para realizar la conexión.
5. Presionar el botón con el ícono de bluetooth en la interfaz de la aplicación y vincularse con el módulo bluetooth. En la Figura 3.2 se muestra la ubicación de este botón en la interfaz de la aplicación.

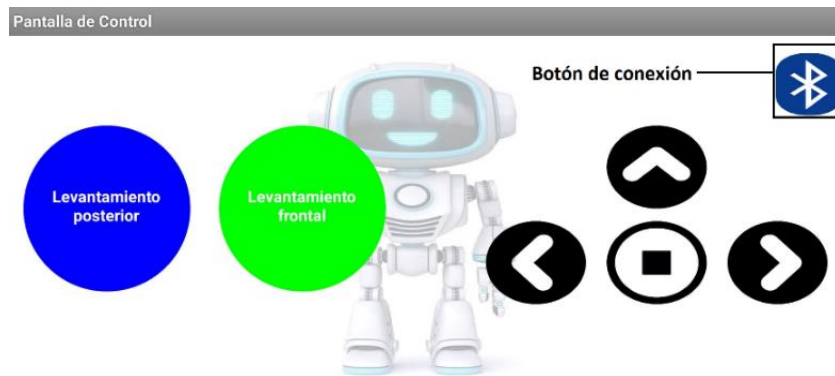


Figura 3.2 Ubicación botón de conexión bluetooth

6. Una vez se vincule el dispositivo móvil con el robot, el LED del módulo bluetooth permanecerá encendido.
7. Enviar los comandos para realizar la rutina de movimiento deseada. En la Figura 3.3 se indica con que botón se ejecuta cada rutina de movimiento.

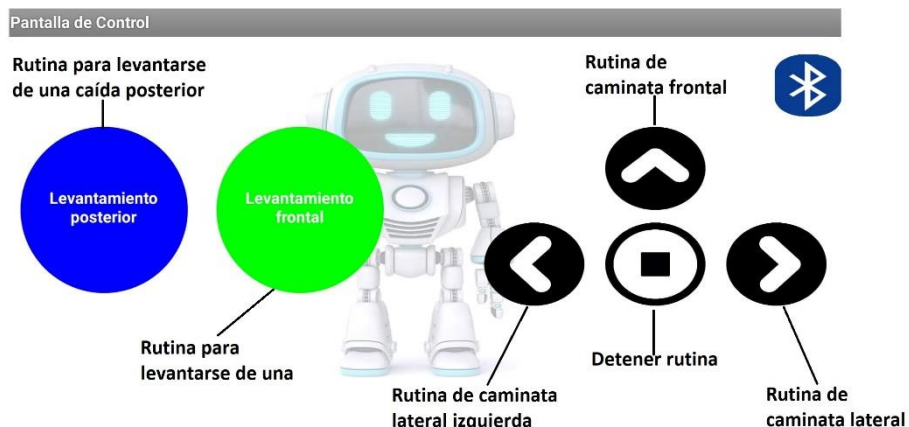


Figura 3.3 Uso de aplicación móvil

3.1.1.2 Rutina de caminata frontal

En la Figura 3.4 se muestra la rutina de caminata frontal realizada por el robot diseñado en este trabajo, con la cual se completa un ciclo completo de la caminata bípeda.

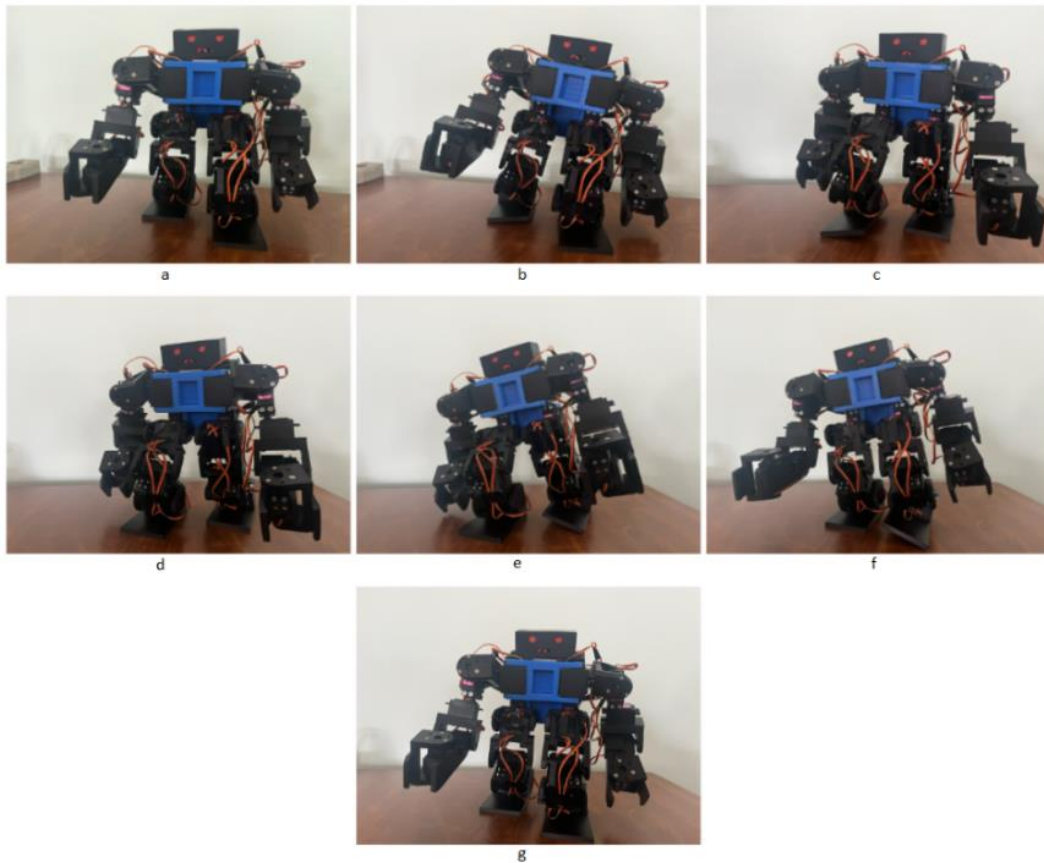


Figura 3.4 Rutina de caminata frontal: a) etapa inicial, b) etapa de despegue izquierda, c) etapa de avance izquierda, d) etapa de aterrizaje izquierda, e) etapa de despegue derecha, f) etapa de avance derecha, g) etapa de aterrizaje derecha

3.1.1.3 Rutina de caminata lateral

En la Figura 3.5 se muestra la rutina de caminata lateral hacia la izquierda realizada por el robot implementado en este trabajo.

Por otro lado, en la Figura 3.6 se muestra la rutina de caminata lateral derecha realizada por el robot.

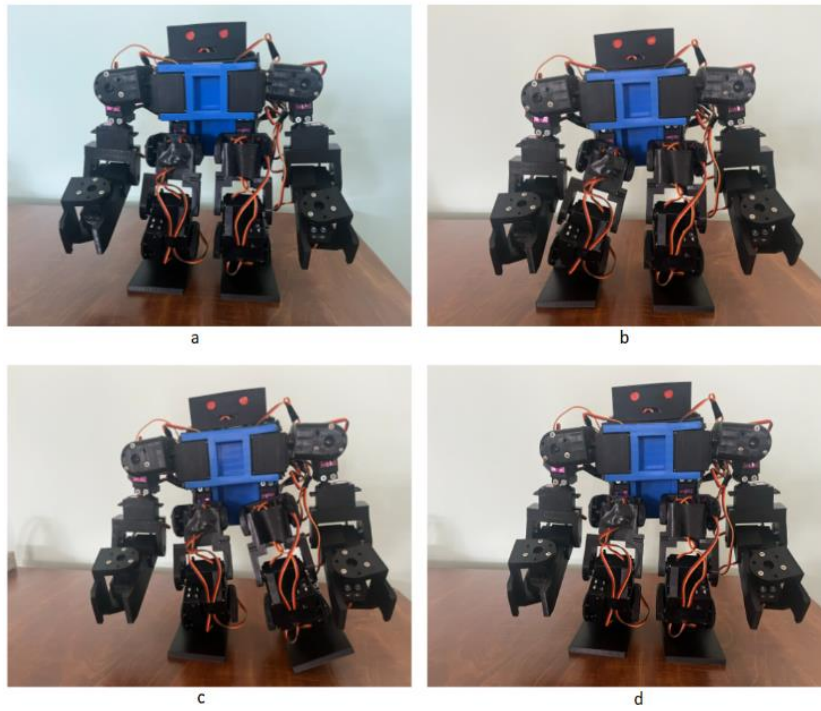


Figura 3.5 Rutina de camina lateral izquierda: a) etapa inicial, b) etapa de avance, c) etapa de empuje, d) etapa de aterrizaje

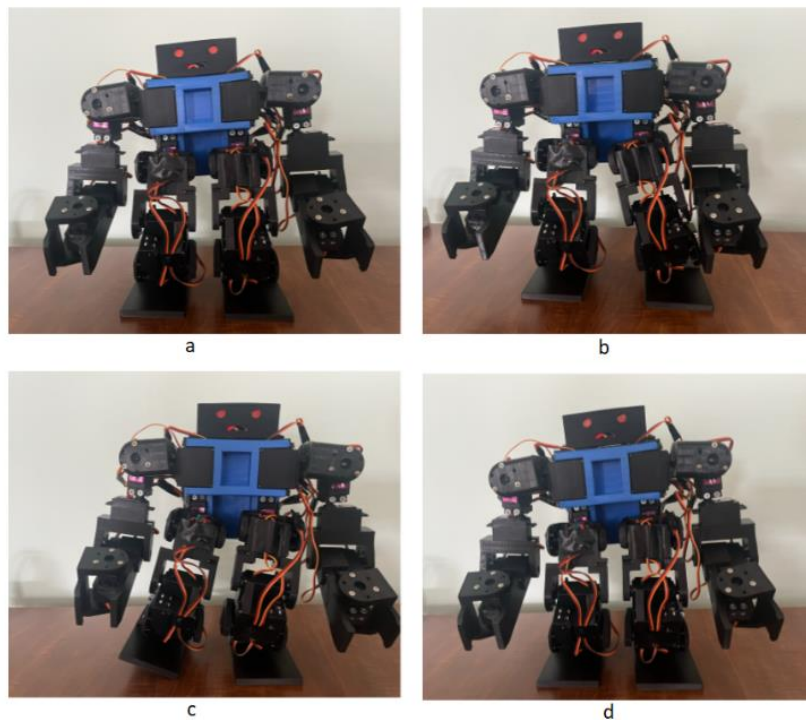


Figura 3.6 Rutina de camina lateral izquierda: a) etapa inicial, b) etapa de avance, c) etapa de empuje, d) etapa de aterrizaje

3.1.1.4 Rutina de levantamiento frontal

En la Figura 3.7 se presenta la rutina de levantamiento en caso de una caída frontal realizada por el robot implementado en el trabajo.

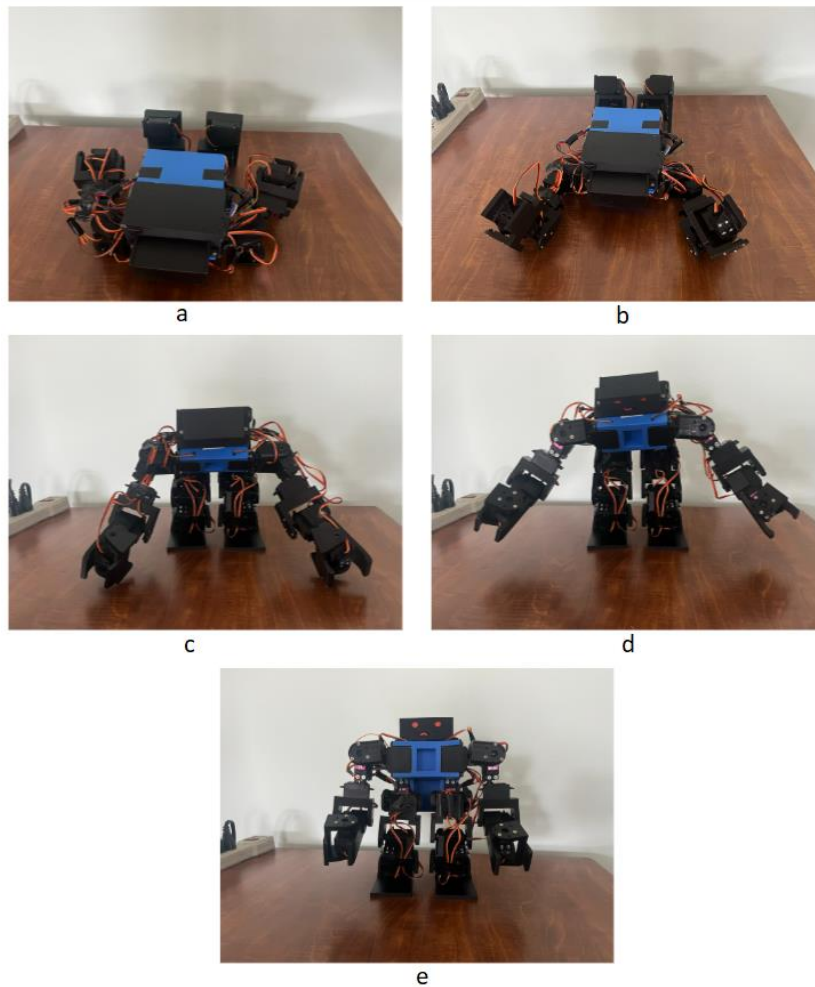


Figura 3.7 Rutina de camina lateral izquierda: a) etapa inicial, b) etapa de asentamiento, c) etapa de elevación 1, d) etapa de elevación 2, e) etapa de retorno

3.1.1.5 Rutina de levantamiento posterior

En la Figura 3.8 se muestra la rutina de levantamiento en caso de una caída posterior realizada por el robot implementado en este trabajo

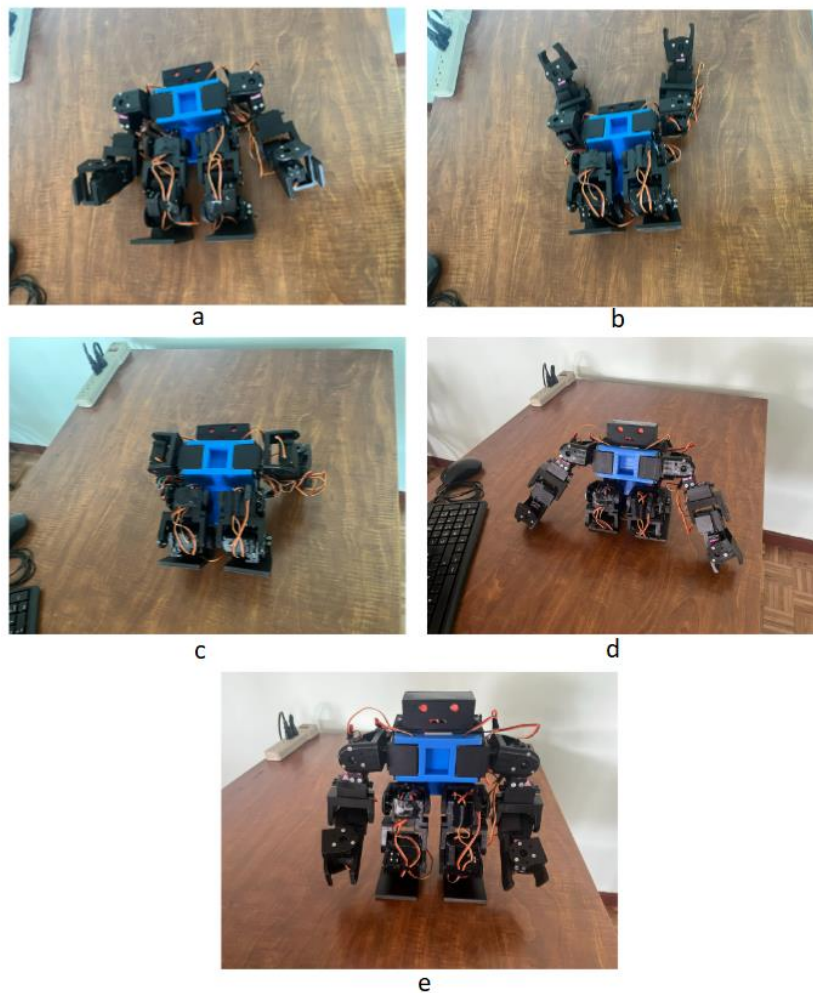


Figura 3.8 Rutina de camina lateral izquierda: a) etapa inicial, b) etapa de asentamiento, c) etapa de elevación, d) etapa de retorno 1, e) etapa de retorno 2

3.1.2 PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO EN UN AMBIENTE DE COMPETENCIA

Con el objetivo de comprobar el desempeño del robot construido en un ambiente de competencia se lo va a hacer competir con un robot comercial en una pista con las características establecidas en los reglamentos.

El robot comercial que se usa para realizar esta prueba es un Bioloid de la Marca ROBOTIS [19], el cual es ampliamente utilizado en este tipo de competencias por su estructura ligera y su velocidad de caminata.

Según los reglamentos revisados una pista para las competencias de esta categoría debe presentar las siguientes características:

- La pista debe estar dividida en carriles de 50 cm por líneas negras de mínimo 2 cm.

- La superficie de la pista es lisa.
- El largo de la pista varía de acuerdo a la competencia.

Por lo tanto, para realizar las pruebas de funcionamiento se creó una pista de 1.5 m de largo, con dos carriles de 50 cm cada uno. En la Figura 3.9 se muestra una imagen de la pista utilizada.



Figura 3.9 Pista para las pruebas de funcionamiento

Para comprobar el desempeño del robot implementado se lo hizo competir con las tres rutinas de caminata desarrolladas y se tomó el tiempo que se demoraron en completar la pista los dos en los tres casos.

En la Figura 3.10 se presenta una imagen de evidencia de las tres competencias realizadas para esta sección.

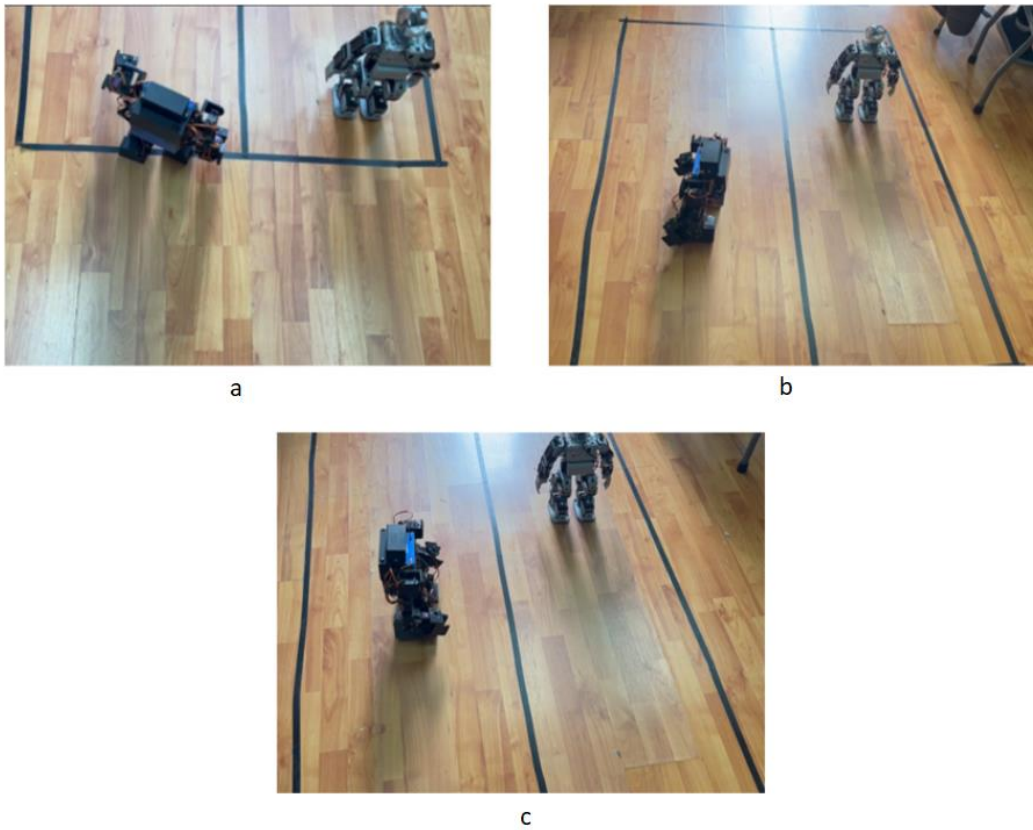


Figura 3.10 Carreras realizadas: a) Rutina de caminata frontal, b) Rutina de caminata lateral izquierda, c) Rutina de caminata lateral derecha

En la Tabla 3.1 se muestran los resultados de tiempo obtenidos por los dos robots en las tres competencias

Tabla 3.1 Tiempos obtenidos

Rutina utilizada	Tiempos obtenidos [min]	
	Robot implementado	Robot comercial
Caminata frontal	01:34:60	00:45:28
Caminata lateral izquierda	00:51:43	00:42:94
Caminata lateral derecha	00:56:99	00:46:43

Los tiempos logrados por el robot comercial son bastante cortos, pues es un robot cuyo diseño está orientado a competencias de velocidad. Por otro lado, con respecto a los tiempos obtenidos por el robot implementado, el tiempo logrado con la caminata frontal es

bastante alto, pues es complejo realizar una caminata bípeda frontal, por lo que toma más tiempo, mientras que con las caminatas laterales se obtuvieron tiempos bastante cercanos a los obtenidos por el robot comercial, debido a los movimientos simples que requiere una caminata lateral. Entonces, en base a estos tiempos obtenidos, la caminata lateral sería la mejor opción para competir en la competencia carrera de bípedos, pues incluso se podría mejorar la rutina para tener mejores tiempos.

3.1.3 LISTADO DE ELEMENTOS Y COSTOS

En esta sección se va a presentar el listado de elementos que se utilizaron para la implementación del prototipo, así como los costos en dólares americanos de cada uno de ellos. Con estos datos se va a calcular el costo total para la realización de este trabajo, tomando en cuenta el costo de ingeniería para el número de horas efectivas (80 horas).

En la Tabla 3.2 se muestra el listado de elementos utilizados con sus respectivos costos y el costo total del trabajo.

Tabla 3.2 Listado de elementos y costos

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Estructura mecánica de PLA	1	\$85	\$85
Arduino Nano	1	\$12	\$12
Servomotores MG996R	20	\$12,50	\$250
Módulo de control de servomotores PCA9685	2	\$9	\$18
Módulo Bluetooth HC-06	1	\$7,50	\$7,50
Batería LiPo Tcbworth	1	\$18	\$18
Módulo regulador de voltaje XL4015	1	\$6,40	\$6,40
Regulador de voltaje ASM1117 5.0	1	\$1,20	\$1,20
Resistencias SMD	3	\$0,25	\$0,75
Capacitores cerámicos SMD	3	\$0,25	\$0,75
Capacitores electrolíticos SMD	2	\$0,50	\$1
LED SMD	2	\$0,25	\$0,50
Pulsador SMD	1	\$0,10	\$0,10
Interruptor	1	\$0,40	\$0,40

Tira de zócalos	3	\$1	\$3
Placa baquelita de fibra de vidrio	1	\$7	\$7
Conector de alimentación	1	\$1,20	\$1,20
Costo de ingeniería	80	\$5	\$400
TOTAL			\$812,80

3.2 CONCLUSIONES

En esta sección se presentan las conclusiones obtenidas al final el trabajo de integración curricular.

- Para poder competir en una competencia de la categoría carrera de bípedos es necesario la creación de varias rutinas de movimientos, pues a parte de la rutina para caminata frontal, se deben crear rutinas para levantarse después de una caída, además las rutinas para caminata lateral pueden ayudar a mejorar el desenvolvimiento durante la competencia.
- Debido a la gran complejidad de una caminata bípeda, la rutina de caminata frontal requiere más tiempo para completarse que las rutinas de caminata lateral, las cuales son más sencillas, por lo que son más convenientes a la hora de participar en una carrera.
- El uso de un módulo para el control de los servomotores permite aligerar la carga del microcontrolador y aumentar la velocidad del programa pues la generación de PWM's para el movimiento de los servomotores pone mucha carga en el microcontrolador, la cual se elimina al asignar esa tarea al módulo, lo que permite usar una gran cantidad de servomotores sin afectar la velocidad del programa.
- La caminata bípeda es un proceso complejo, que a simple vista puede parecer fácil, sin embargo, conlleva una serie de movimientos coordinados de varias articulaciones que permiten conservar el equilibrio del cuerpo mientras se realiza el avance de una pierna.
- Una estructura mecánica ligera y delgada es ideal para un robot tipo carrera de bípedos, pues permite tener una mayor velocidad de movimiento del robot, además que disminuye la carga que deben mover los servomotores, por lo que permite un

movimiento de más articulaciones a la vez y por ende la realización de movimientos más complejos; sin embargo, hay que tener en cuenta también la estabilidad.

3.3 RECOMENDACIONES

En esta sección se presentan las recomendaciones obtenidas a partir de este trabajo de integración curricular.

- Usar una aplicación móvil para realizar el control a distancia del robot permite crear una interfaz de usuario que me facilite la selección de las rutinas de movimiento a utilizarse.
- Se recomienda para un trabajo a futuro, la utilización de una estructura más ligera, pues en las competencias de carrera de bípedos se prioriza la velocidad ante todo y este tipo de estructura sería más conveniente.
- Es recomendable crear un programa exclusivo para la calibración de los servomotores a partir de una aplicación móvil, pues esto agiliza el proceso de la selección de las posiciones para la creación de las rutinas.
- Cuando se trabaja con servomotores se recomienda separar la alimentación del sistema de control de la alimentación de los servomotores, debido a que estos producen mucho ruido que puede afectar al sistema de control.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Escuela Politécnica Nacional, «RESEÑA,» CONCURSO ECUATORIANO DE ROBÓTICA CER 2017, [En línea]. Available: <http://ciecfie.epn.edu.ec/cer/cer.htm>. [Último acceso: 10 febrero 2022].
- [2] Escuela Politécnica Nacional, «Reglamento para la categoría “Carrera de Bípedos”,» CONCURSO ECUATORIANO DE ROBÓTICA CER 2017, Quito, 2017.
- [3] Robot Games Zero Latitud°, «Reglamento para la Categoría: CARRERA DE HUMANOIDES,» Robot Games Zero Latitud° 7, Quito, 2020.
- [4] Club de Robótica ESPOCH, «CARRERA DE HUMANOIDES,» RIOTRONIC 2022, Riobamba, 2022.
- [5] ARDUINO, «Arduino Nano,» 30 junio 2021. [En línea]. Available: <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-nano?selectedStore=us>. [Último acceso: 9 mayo 2022].
- [6] NXP Semiconductors, «PCA9685 Product data sheet,» 2015.
- [7] Tower-Pro, «MG996R High Torque Metal Gear Dual Ball Bearing Servo,» 2019.
- [8] Naylamp Mechatronics, «MÓDULO BLUETOOTH HC05,» 3 agosto 2021. [En línea]. Available: <https://naylampmechatronics.com/inalambrico/43-modulo-bluetooth-hc05.html>. [Último acceso: 14 febrero 2022].
- [9] ROBOTIS, «ROBOTIS MINI - Manual,» 12 octubre 2017. [En línea]. Available: <https://manual.robotis.com/docs/en/edu/mini/>. [Último acceso: 22 junio 2022].
- [10] KICKSTARTER, «Super Anthony: The Battle Robot with 45 Kg Servo Force Punch,» 13 agosto 2018. [En línea]. Available: <https://www.kickstarter.com/projects/1957597055/super-anthony-the-battle-robot-with-45-kg-servo-fo/description>. [Último acceso: 22 junio 2022].
- [11] N. Sotomayor, Control Embebido - Dimensionamiento de fuente de alimentación, EPN - Quito, 2021.
- [12] TODOPRODUCTIVIDAD, «Cómo calcular la capacidad de las baterías para cada aplicación,» 2011 febrero 16. [En línea]. Available: <http://todoproduktividad.blogspot.com/2011/02/como-calculer-la-capacidad-de-las.html>. [Último acceso: 10 julio 2022].
- [13] PROMETEC, «LO QUE HAY QUE SABER PARA ELEGIR UNA BATERÍA LIPO,» 2 mayo 2018. [En línea]. Available: <https://www.prometec.net/elegir-bateria-lipo/#:~:text=Descargar%20una%20bater%C3%ADa%20por%20debajo,de%20salud%20de%20la%20bater%C3%ADa>. [Último acceso: 10 julio 2022].

- [14] INNOVATECH, «Bateria Lipo 14.8v 1500mah 25-30c Recargable Nueva Tcbworth,» 20 agosto 2022. [En línea]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-516952354-bateria-lipo-111v-1500mah-25-30c-recargable-nueva-tcbworth-_JM#position=1&search_layout=stack&type=item&tracking_id=84c48473-2c67-47b8-a383-0117406eb406. [Último acceso: 10 julio 2022].
- [15] ArduinoVe.com, «XL4015 Transformador Regulador Corriente DC-DC 5 A, 4-38 V, 1,25-32 V 2 Potenciómetros,» 20 diciembre 2020. [En línea]. Available: http://www.arduinove.com/index.php?route=product/product&product_id=587. [Último acceso: 14 febrero 2022].
- [16] Naylamp Mechatronics SAC, «TUTORIAL MÓDULO CONTROLADOR DE SERVOS PCA9685 CON ARDUINO,» 6 diciembre 2016. [En línea]. Available: https://naylampmechatronics.com/blog/41_tutorial-modulo-controlador-de-servos-pca9685-con-arduino.html. [Último acceso: 10 julio 2022].
- [17] J. Larriva, E. Guillermo, J. Trelles y O. Vele, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT BÍPEDO EXPERIMENTAL,» CORE, nº 8, pp. 138-152, 2006.
- [18] M. A. Herrera, «ENSAMBLAJE Y CONTROL DE UNA PLATAFORMA ROBÓTICA MEDIANTE UN PC,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2009.
- [19] ROBOTIS, «ROBOTIS Premium,» 29 septiembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.robotis.us/robotis-premium/>. [Último acceso: 11 agosto 2022].

5 ANEXOS

ANEXO I. Manual de usuario

ANEXO II. Diseños esquemáticos

ANEXO III. Piezas de impresión 3D

ANEXO IV. Piezas diseñadas

ANEXO V. Hoja de datos

ANEXO I

MANUAL DE USUARIO

I.1 KIT DE ROBOT HUMANOIDE

El robot humanoide está compuesto por los siguientes elementos para su funcionamiento:

- Robot humanoide.
- Módulo de transmisión Bluetooth.
- Aplicación móvil.

En la Figura I.1 se presentan los elementos mencionados.

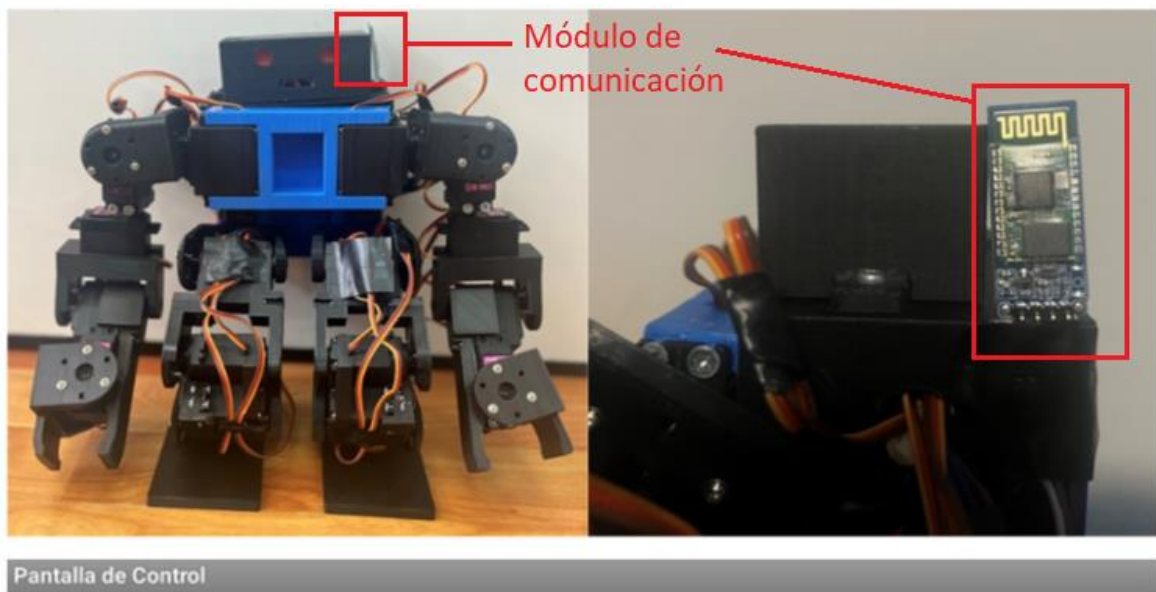


Figura I.1 Elementos del Robot Humanoide

I.2 REQUERIMIENTOS DE ALIMENTACIÓN

Para el funcionamiento del Robot Humanoide se alimenta el sistema de control y los servomotores con una batería tipo LiPo de 7,4 V y 1500 mAh. La batería se encuentra ubicada en el interior de la pieza de la cabeza del robot y para acceder a ella para cargarla simplemente se desplaza la tapa deslizable de la parte trasera de la cabeza. En la Figura I.2 se muestra la ubicación de la batería.



Figura I.2 Alimentación del sistema

Para realizar la carga de esta batería es necesario acceder a ella en la ubicación indicada y conectar a un cargador de baterías tipo LiPo.

NOTA: Se recomienda descargar como máximo hasta el 50%, pues no se garantiza el funcionamiento óptimo del sistema con la carga de la batería por debajo de este porcentaje.

I.3 PROCEDIMIENTO DE PUESTA EN MARCHA

Para usar el Robot Humanoide es necesario seguir el siguiente procedimiento para poner en marcha el sistema:

1. Encender el robot humanoide presionando el interruptor de encendido que se encuentra atrás de la pieza de la cabeza. En la Figura I.3 se muestra la ubicación de este elemento.



Figura I.3 Ubicación del interruptor de encendido

2. El LED del módulo bluetooth empezará a parpadear.
3. Esperar que el robot adquiera la posición de inicio.
4. Abrir la aplicación móvil para realizar el control del robot.
5. Presionar el botón con el ícono de Bluetooth en la aplicación y vincularse con el módulo bluetooth del sistema. En la Figura I.4 se muestra la ubicación del botón de conexión en la interfaz de la aplicación.

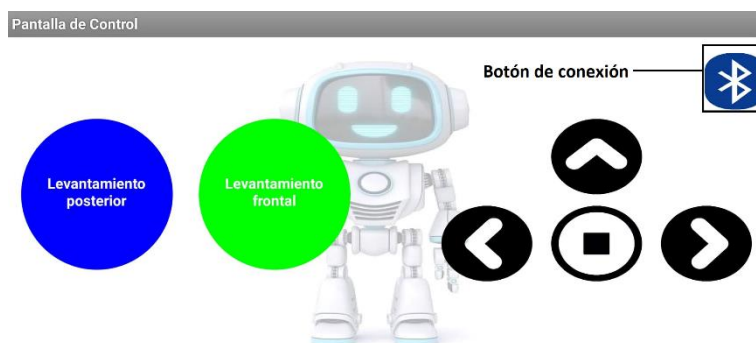


Figura I.4 Ubicación del botón de conexión bluetooth

6. Una vez vinculada la aplicación móvil con el robot, el módulo bluetooth permanecerá encendido.
7. Enviar comandos para realizar las rutinas de movimiento del robot.

I.3.1 Consideraciones importantes

Es importante tomar en cuenta las siguientes consideraciones para realizar con éxito la puesta en marcha del sistema.

- Es necesario activar la comunicación Bluetooth en el dispositivo móvil que se va a vincular con el robot.
- En caso de que no se conecten los dispositivos revisar si el módulo bluetooth está energizado visualizando los LEDs.
- El robot debe estar encendido para realizar la conexión con la aplicación.
- Tomar en cuenta el estado de la batería, pues se recomienda que, para el uso del robot, esta no debe estar por debajo del valor de profundidad de descarga elegido para el robot, que es de 50%.

I.4 PROCEDIMIENTO DE INSTALACIÓN DE LA APLICACIÓN MÓVIL

Se debe seguir el siguiente procedimiento para instalar la aplicación móvil:

1. Escanear el código QR mostrado en la Figura I.5.



Figura I.5 Código QR de la aplicación

2. Descargar el archivo de instalación de la aplicación.
3. Realizar la instalación por medio del archivo descargado.
4. Dar los permisos necesarios para la instalación.

NOTA: La aplicación móvil solo está disponible para dispositivos Android.

I.5 APLICACIÓN MÓVIL

La interfaz de la aplicación móvil está compuesta por botones, con los cuales se puede realizar las siguientes acciones

1. Realizar la conexión bluetooth.
2. El robot camina hacia adelante.
3. El robot camina hacia la izquierda.
4. El robot camina hacia la derecha.
5. El robot se levanta después de una caída frontal.
6. El robot se levanta después de una caída posterior.
7. Detener al robot.

En la Figura I.6 se señala la acción que realiza cada botón de la interfaz de la aplicación.

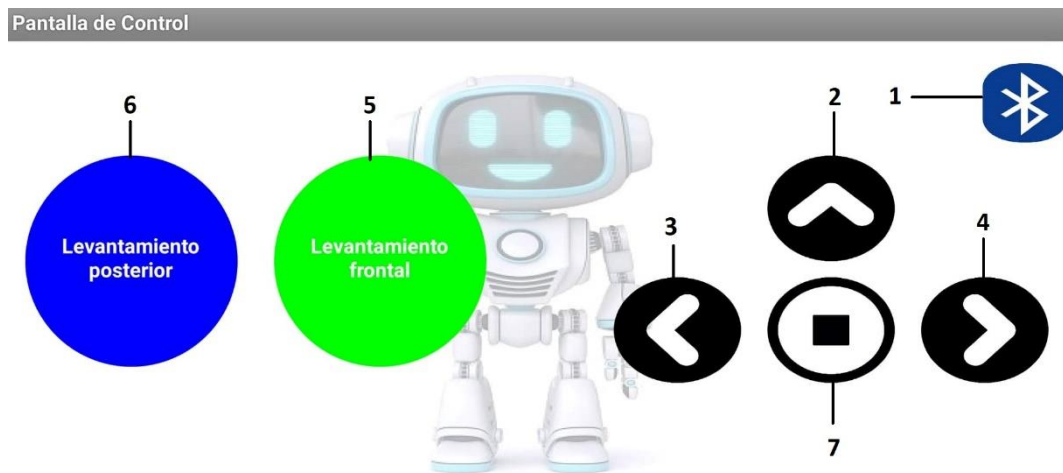


Figura I.6 Acciones de los botones de la aplicación móvil

I.6 IMPORTANTE

En caso de que el robot no realice las rutinas de movimiento seleccionadas en la aplicación, se debe verificar:

- El estado del interruptor de encendido, ya que, si está apagado el robot, no hará ninguna rutina, aunque se envíen los comandos.

- Que el módulo bluetooth esté funcionando correctamente, pues que esté encendido no significa que esté funcionando. En caso de no estar funcionando, se lo debe reemplazar.
- Que el módulo Bluetooth no haya vuelto a su estado de parpadeo, pues esto significa que se han desvinculado los dispositivos.
- El estado de carga de la batería, porque si está en un estado muy alto de descarga, el robot no podrá realizar las rutinas.

ANEXO II

DISEÑOS ESQUEMÁTICOS

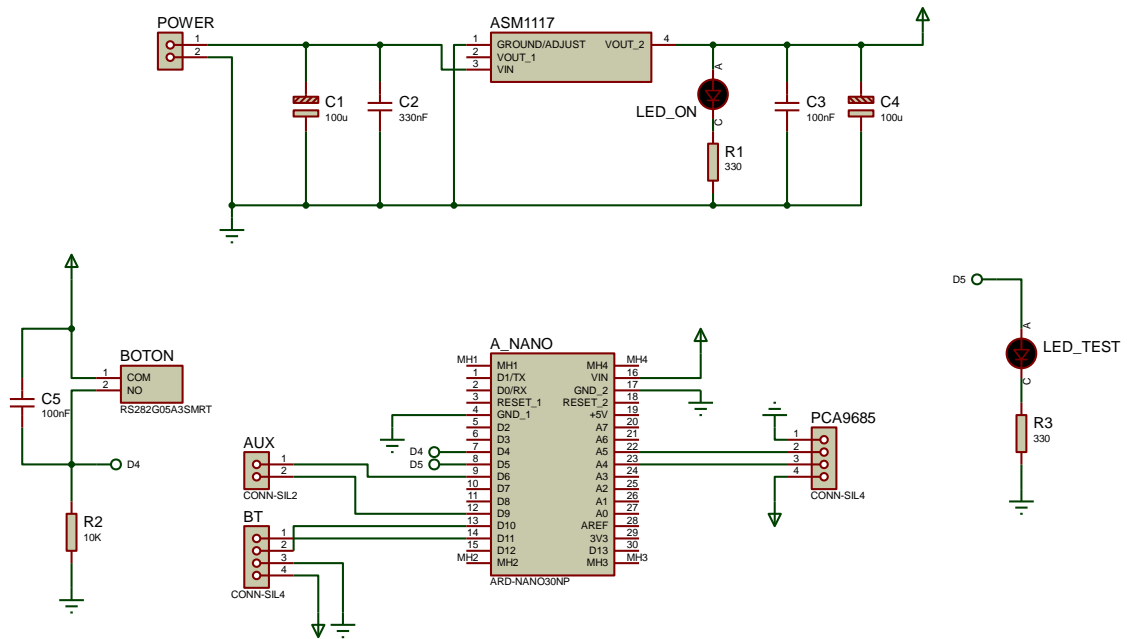


Figura II.1 Diagrama esquemático del circuito

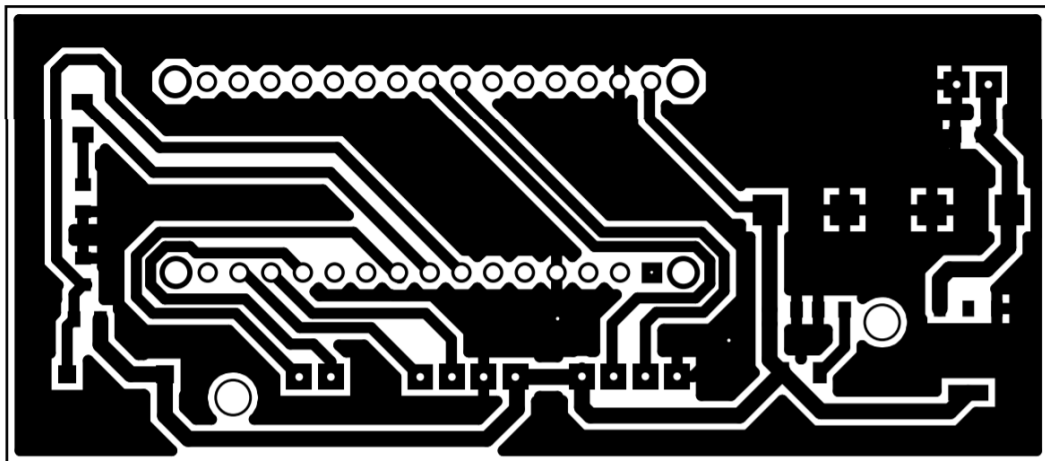


Figura II.2 Diseño de la PCB del circuito

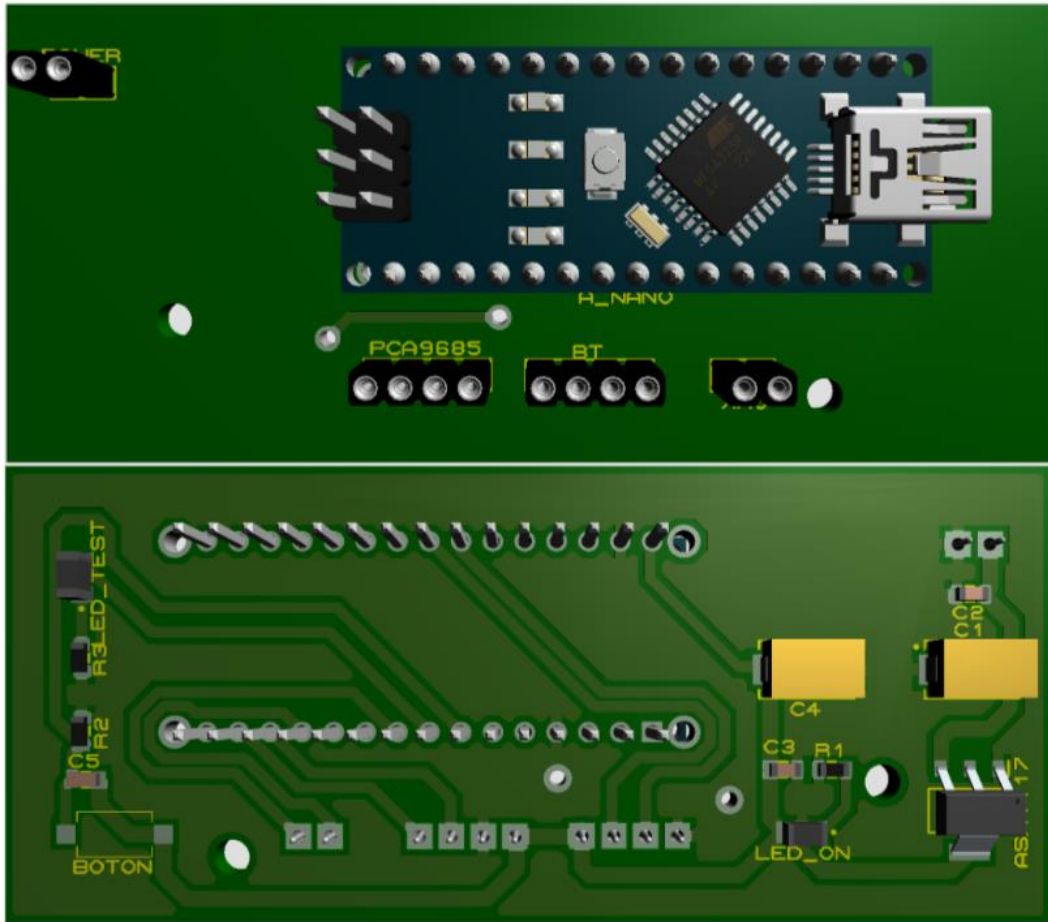


Figura II.3 Vista 3D de la PCB del circuito

Tabla II.1 Tiempos obtenidos

Elemento	Componente	Descripción
A_NANO	Arduino Nano	Sistema embebido
POWER	CONN-SIL 2 pines	Entrada para la fuente de alimentación
PCA9685	CONN-SIL 4 pines	Entrada para el controlador de servomotores pca9685
BT	CONN-SIL 4 pines	Entrada para el módulo bluetooth hc-05
AUX	CONN-SIL 2 pines	Entrada para señales auxiliares
C1	Capacitor electrolítico	Capacitor de filtrado
C2	Capacitor cerámico	Capacitor de filtrado
C3	Capacitor cerámico	Capacitor de filtrado
C4	Capacitor electrolítico	Capacitor de filtrado

C5	Capacitor cerámico	Capacitor para evitar rebote de BOTON
R1	Resistencia	Resistencia para LED_ON
R2	Resistencia	Resistencia para pull-up de BOTON
R3	Resistencia	Resistencia para LED_TEST
LED_ON	LED verde	LED que indica la energización del sistema
LED_TEST	LED azul	LED para uso auxiliar
BOTON	Pulsador	Pulsador para uso auxiliar
ASM1117	ASM1117 5.0	Regulador de voltaje a 5V

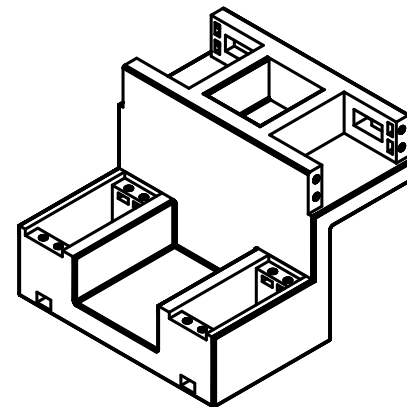
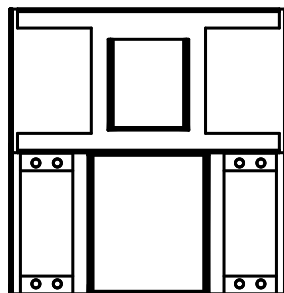
ANEXO III

PIEZAS DE IMPRESIÓN 3D

2

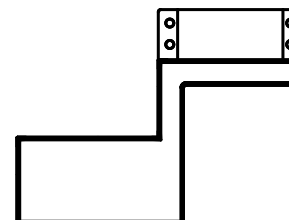
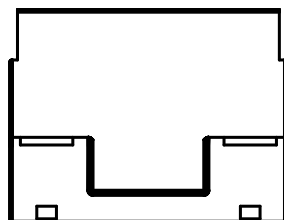
1

B



B

A



A

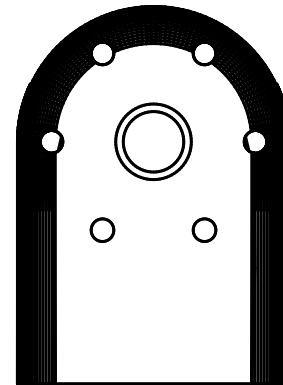
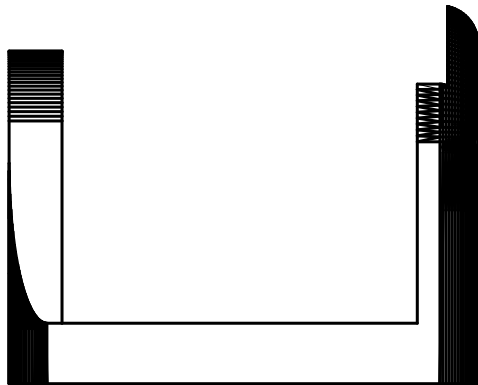
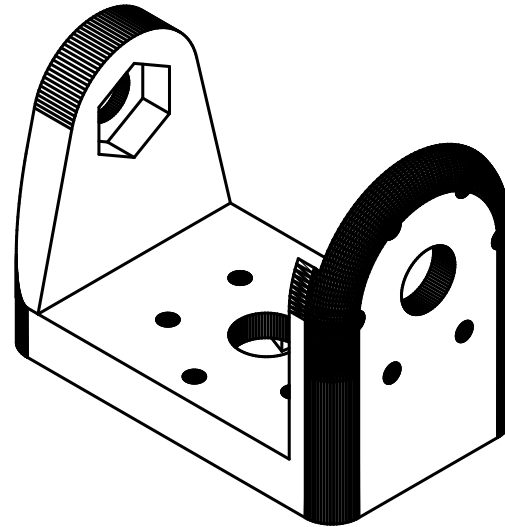
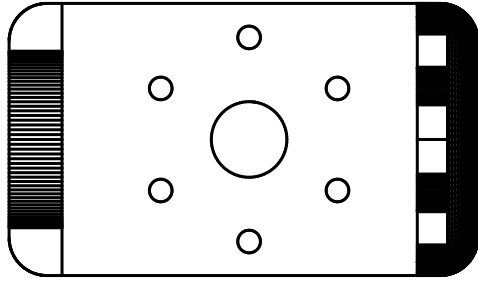
2

1

AUTOR	CHANI	Escuela Politécnica Nacional	
ESCALA	1:3	TITULO Pieza de cuerpo principal	
FECHA	07/02/2021	TAMAÑO	DWG NO.
MATERIAL	PLA	A	1 of 13

2

1



B

B

A

A

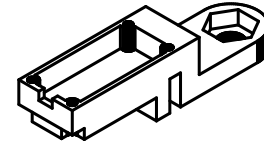
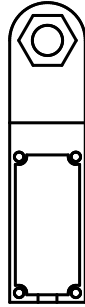
2

1

AUTOR	CHANI	Escuela Politécnica Nacional	
ESCALA	1:1	TITULO Pieza 1 - pierna	
FECHA	07/02/2021	TAMAÑO	DWG NO.
MATERIAL	PLA	A	2 of 13

2

1



2

1

AUTOR	CHANI	Escuela Politécnica Nacional	
ESCALA	1:2	TITULO Pieza 2 - pierna	
FECHA	07/02/2021	TAMAÑO	DWG NO.
MATERIAL	PLA	A	3 of 13

B

B

A

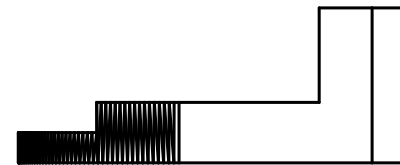
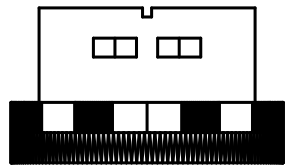
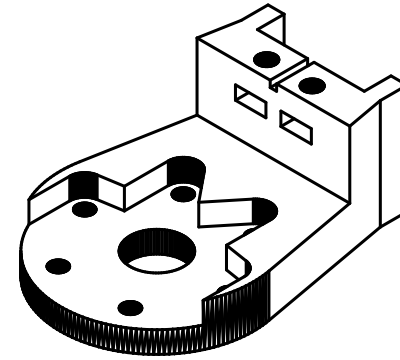
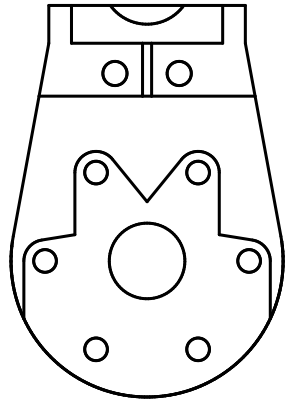
A

2

1

B

B



A

A

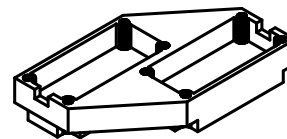
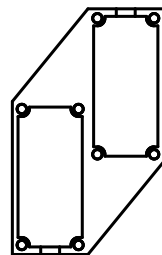
2

1

AUTOR	CHANI	Escuela Politécnica Nacional	
ESCALA	1:1	TITULO Pieza 3 - pierna	
FECHA	07/02/2021	TAMAÑO	DWG NO.
MATERIAL	PLA	A	4 of 13

2

1



2

1

AUTOR	CHANI	Escuela Politécnica Nacional	
ESCALA	1:2	TITULO Pieza 4 - pierna	
FECHA	07/02/2021	TAMAÑO	DWG NO.
MATERIAL	PLA	A	5 of 13

2

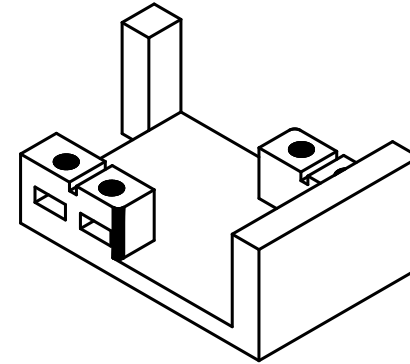
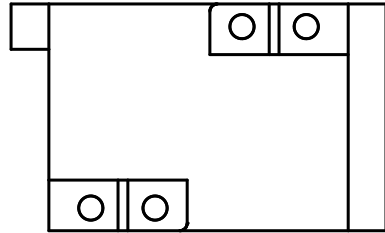
1

2

1

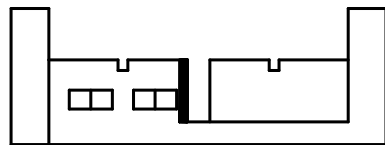
B

B



A

A



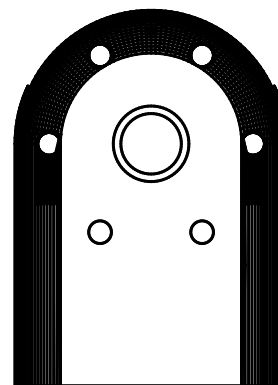
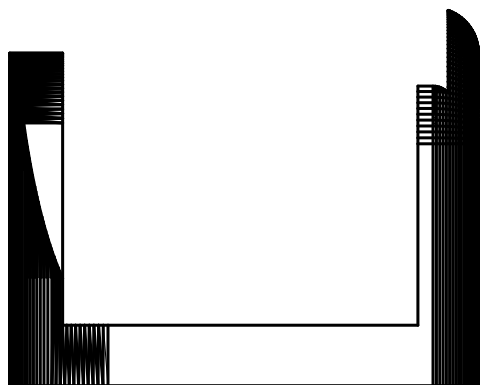
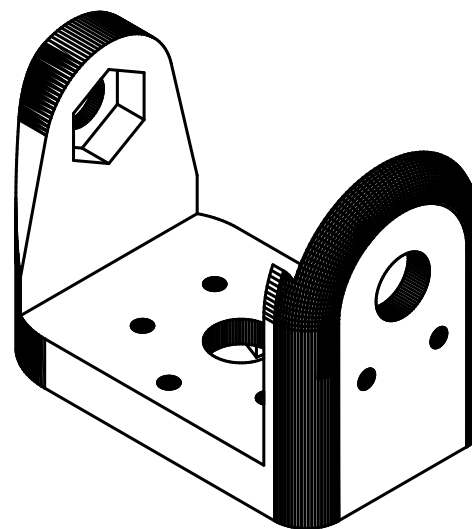
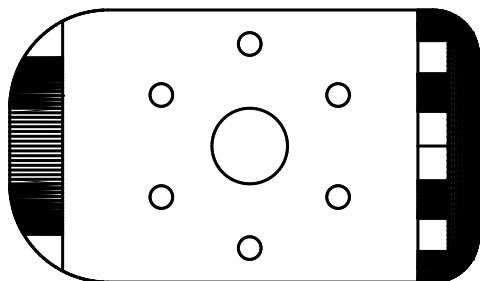
2

1

AUTOR	CHANI	Escuela Politécnica Nacional	
ESCALA	1:1	TITULO Pieza 5 - pierna	
FECHA	07/02/2021	TAMAÑO	DWG NO.
MATERIAL	PLA	A	6 of 13

2

1



B

B

A

A

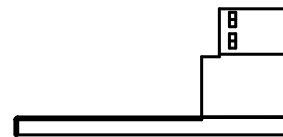
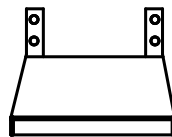
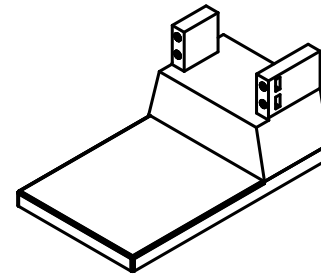
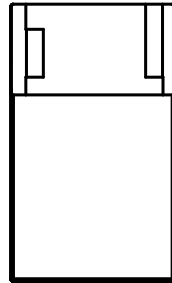
2

1

AUTOR	CHANI	Escuela Politécnica Nacional	
ESCALA	1:1	TITULO	
FECHA	07/02/2021	Pieza 6 - pierna	
MATERIAL	PLA	TAMAÑO	DWG NO.
		A	7 of 13

2

1



B

B

A

A

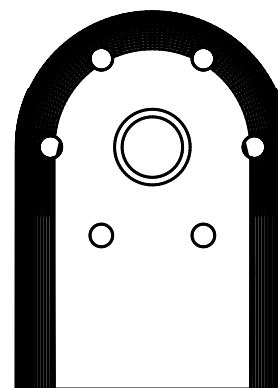
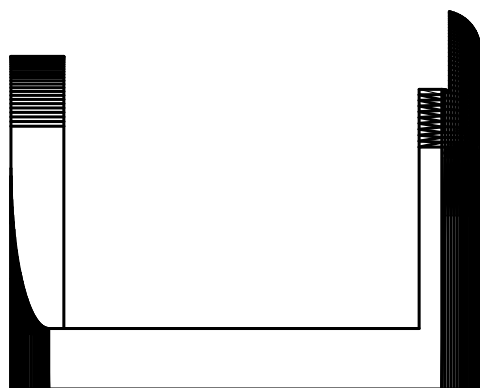
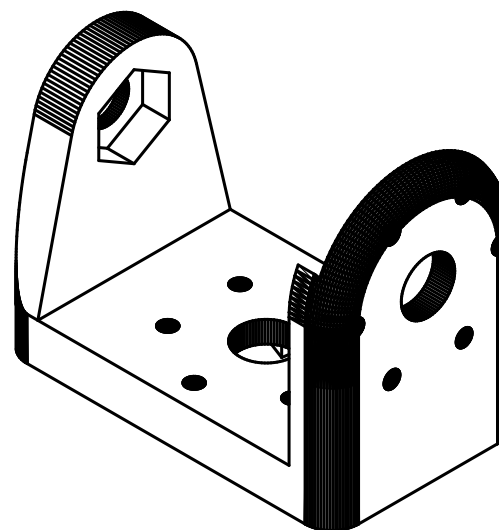
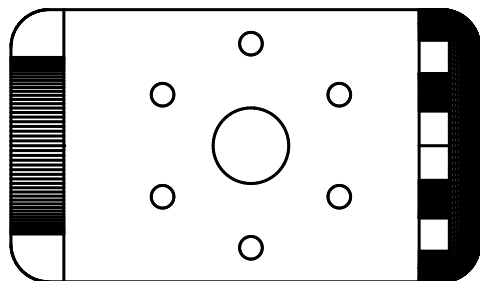
2

1

AUTOR	CHANI	Escuela Politécnica Nacional	
ESCALA	1:3	TITULO Pieza 7 - pierna	
FECHA	07/02/2021	TAMAÑO	DWG NO.
MATERIAL	PLA	A	8 of 13

2

1



AUTOR	CHANI	Escuela Politécnica Nacional	
ESCALA	1:1	TITULO	
FECHA	07/02/2021	Pieza 1 - brazo	
MATERIAL	PLA	TAMAÑO	DWG NO.
		A	9 of 13

2

1

B

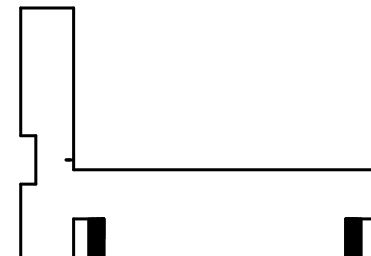
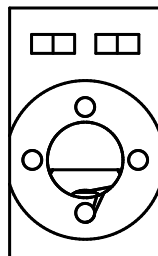
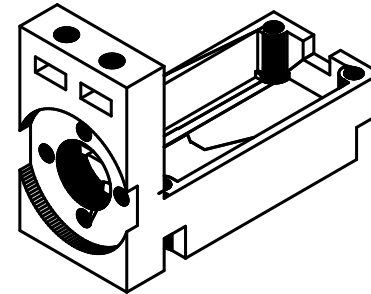
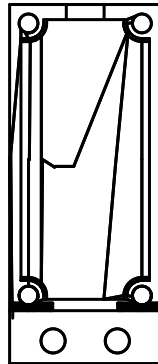
A

B

A

2

1



B

B

A

A

AUTOR	CHANI	Escuela Politécnica Nacional	
ESCALA	1:1	TITULO	
FECHA	07/02/2021	Pieza 2 - brazo	
MATERIAL	PLA	TAMAÑO	DWG NO.
		A	10 of 13

2

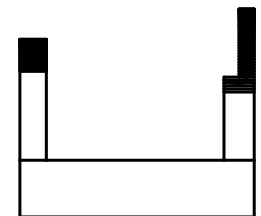
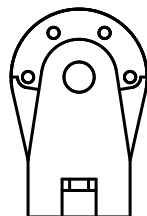
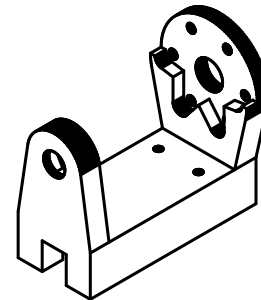
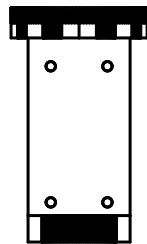
1

2

1

B

B



A

A

2

1

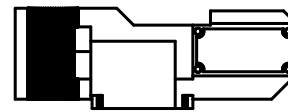
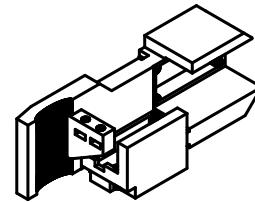
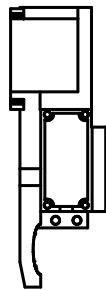
AUTOR	CHANI	Escuela Politécnica Nacional	
ESCALA	1:2	TITULO Pieza 3 - brazo	
FECHA	07/02/2021	TAMAÑO	DWG NO.
MATERIAL	PLA	A	11 of 13

2

1

B

B



A

A

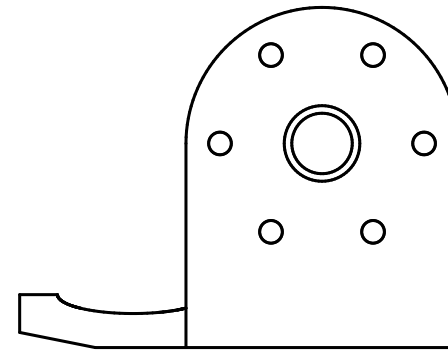
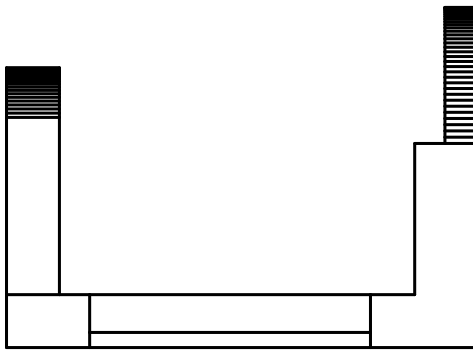
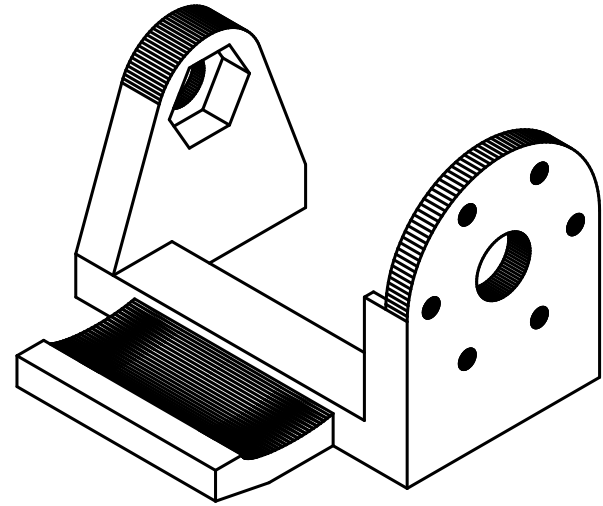
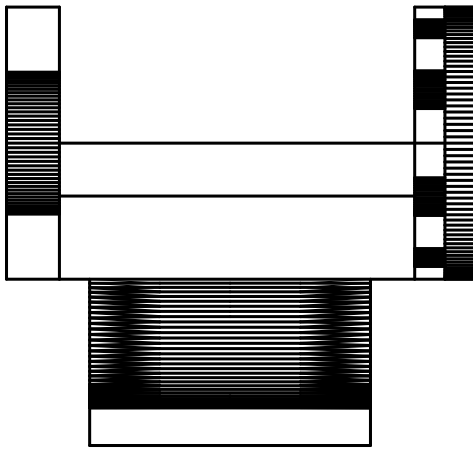
2

1

AUTOR	CHANI	Escuela Politécnica Nacional	
ESCALA	1:3	TITULO	
FECHA	07/02/2021	Pieza 4 - brazo	
MATERIAL	PLA	TAMAÑO	DWG NO.
		A	12 of 13

2

1



AUTOR	CHANI	Escuela Politécnica Nacional	
ESCALA	1:1	TITULO Pieza 5 - brazo	
FECHA	07/02/2021	TAMAÑO	DWG NO.
MATERIAL	PLA	A	13 of 13

2

1

B

B

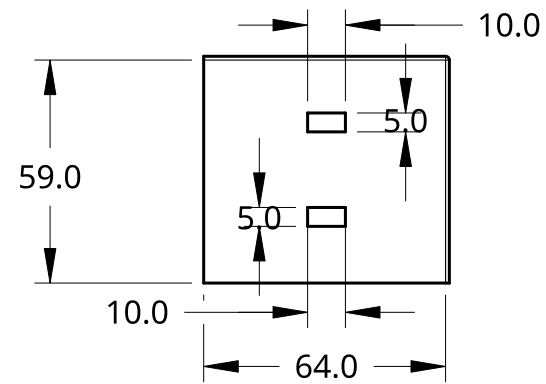
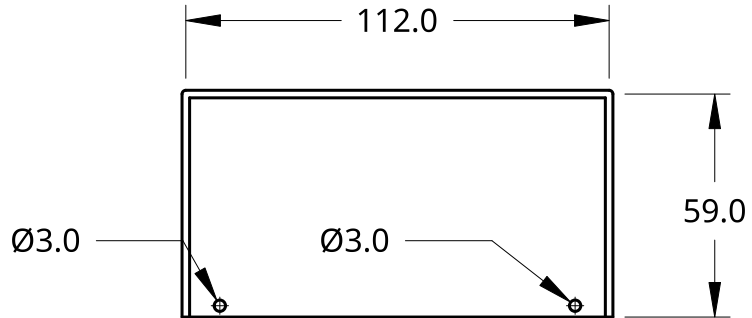
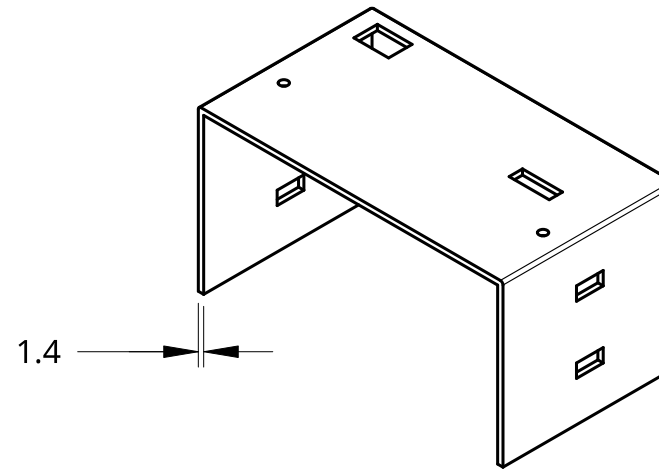
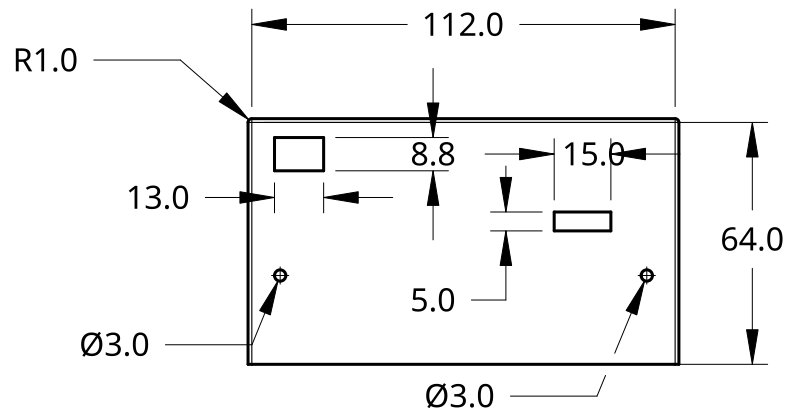
A

A

ANEXO IV
PIEZAS DISEÑADAS

2

1



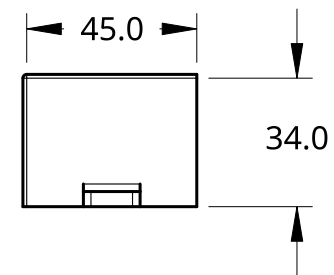
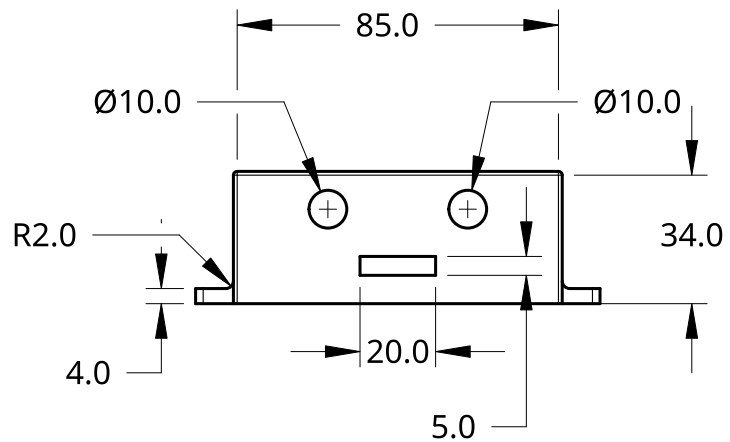
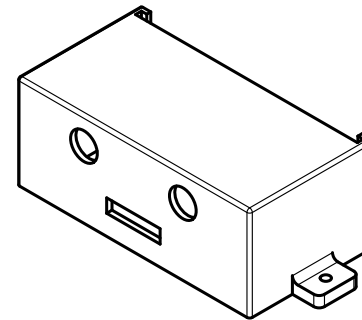
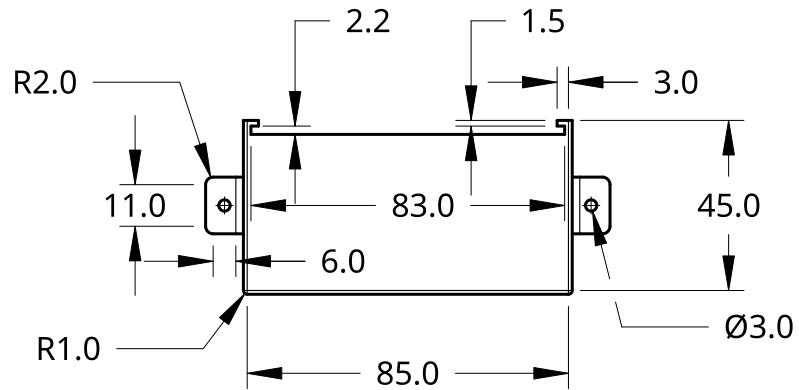
AUTOR	David Mena	Escuela Politécnica Nacional	
ESCALA	1:2	TITULO Pieza de tapa posterior	
FECHA	07/02/2021	TAMAÑO	DWG NO.
UNIDADES	Milímetros	A	1 of 3

2

1

2

1



AUTOR	David Mena	Escuela Politécnica Nacional	
ESCALA	1:2	TITULO Pieza de cabeza	
FECHA	07/02/2021	TAMAÑO	DWG NO.
UNIDADES	Milímetros	A	2 of 3

2

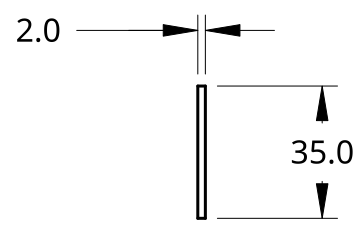
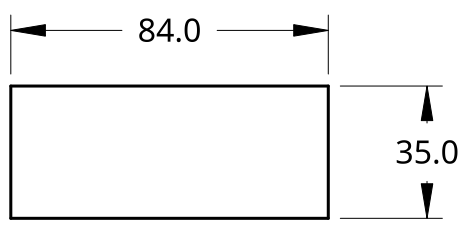
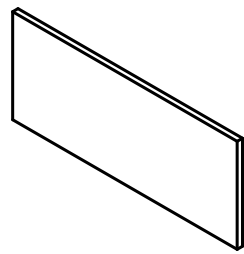
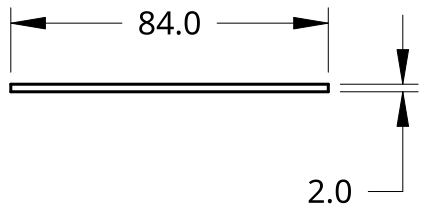
1

2

1

B

B



A

A

2

1

AUTOR	David Mena	Escuela Politécnica Nacional	
ESCALA	1:2	TITULO Pieza de tapa de cabeza	
FECHA	07/02/2021	TAMAÑO A	
UNIDADES	Milímetros	DWG NO. 3 of 3	

ANEXO V

HOJAS DE DATOS

DATASHEET

BLUETOOTH TO SERIAL PORT

MODULE

HC05



Overview

HC-05 module is an easy to use Bluetooth SPP (Serial Port Protocol) module, designed for transparent wireless serial connection setup.

Serial port Bluetooth module is fully qualified Bluetooth V2.0+EDR (Enhanced Data Rate) 3Mbps Modulation with complete 2.4GHz radio transceiver and baseband. It uses CSR Bluecore 04-External single chip Bluetooth system with CMOS technology and with AFH (Adaptive Frequency Hopping Feature). It has the

footprint as small as 12.7mmx27mm. Hope it will simplify your overall design/development cycle.

www.electronica60norte.com
electronica60norte@hotmail.com

Specifications

Hardware features

- Typical -80dBm sensitivity.
- Up to +4dBm RF transmit power.
- Low Power 1.8V Operation, 3.3 to 5 V I/O.
- PIO control.
- UART interface with programmable baud rate.
- With integrated antenna.
- With edge connector.

Software features

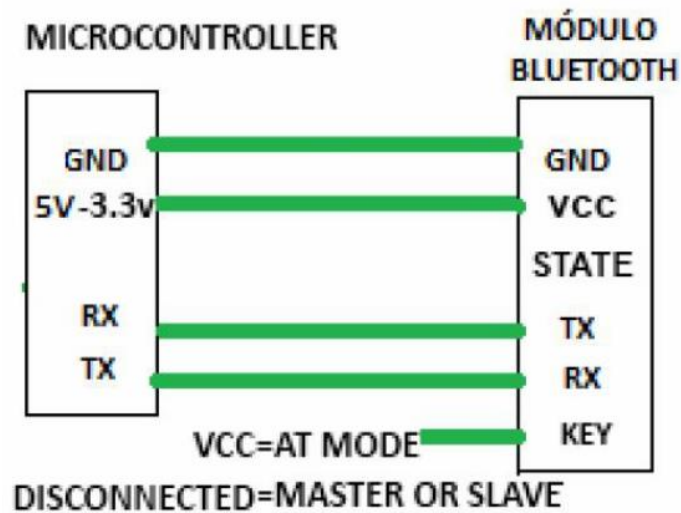
- Slave default Baud rate: 9600, Data bits:8, Stop bit:1,Parity:No parity.
- PIO9 and PIO8 can be connected to red and blue led separately. When master and slave are paired, red and blue led blinks 1time/2s in interval, while disconnected only blue led blinks 2times/s.
- Auto-connect to the last device on power as default.
- Permit pairing device to connect as default.
- Auto-pairing **PINCODE:"1234"** as default.
- Auto-reconnect in 30 min when disconnected as a result of beyond the range of connection.

www.electronica60norte.com
electronica60norte@hotmail.com

Pin out configuration



Typical Application Circuit



www.electronica60norte.com
electronica60norte@hotmail.com



PCA9685

16-channel, 12-bit PWM Fm+ I²C-bus LED controller

Rev. 4 — 16 April 2015

Product data sheet

1. General description

The PCA9685 is an I²C-bus controlled 16-channel LED controller optimized for Red/Green/Blue/Amber (RGBA) color backlighting applications. Each LED output has its own 12-bit resolution (4096 steps) fixed frequency individual PWM controller that operates at a programmable frequency from a typical of 24 Hz to 1526 Hz with a duty cycle that is adjustable from 0 % to 100 % to allow the LED to be set to a specific brightness value. All outputs are set to the same PWM frequency.

Each LED output can be off or on (no PWM control), or set at its individual PWM controller value. The LED output driver is programmed to be either open-drain with a 25 mA current sink capability at 5 V or totem pole with a 25 mA sink, 10 mA source capability at 5 V. The PCA9685 operates with a supply voltage range of 2.3 V to 5.5 V and the inputs and outputs are 5.5 V tolerant. LEDs can be directly connected to the LED output (up to 25 mA, 5.5 V) or controlled with external drivers and a minimum amount of discrete components for larger current or higher voltage LEDs.

The PCA9685 is in the new Fast-mode Plus (Fm+) family. Fm+ devices offer higher frequency (up to 1 MHz) and more densely populated bus operation (up to 4000 pF).

Although the PCA9635 and PCA9685 have many similar features, the PCA9685 has some unique features that make it more suitable for applications such as LCD or LED backlighting and Ambilight:

- The PCA9685 allows staggered LED output on and off times to minimize current surges. The on and off time delay is independently programmable for each of the 16 channels. This feature is not available in PCA9635.
- The PCA9685 has 4096 steps (12-bit PWM) of individual LED brightness control. The PCA9635 has only 256 steps (8-bit PWM).
- When multiple LED controllers are incorporated in a system, the PWM pulse widths between multiple devices may differ if PCA9635s are used. The PCA9685 has a programmable prescaler to adjust the PWM pulse widths of multiple devices.
- The PCA9685 has an external clock input pin that will accept user-supplied clock (50 MHz max.) in place of the internal 25 MHz oscillator. This feature allows synchronization of multiple devices. The PCA9635 does not have external clock input feature.
- Like the PCA9635, PCA9685 also has a built-in oscillator for the PWM control. However, the frequency used for PWM control in the PCA9685 is adjustable from about 24 Hz to 1526 Hz as compared to the typical 97.6 kHz frequency of the PCA9635. This allows the use of PCA9685 with external power supply controllers. All bits are set at the same frequency.
- The Power-On Reset (POR) default state of LEDn output pins is LOW in the case of PCA9685. It is HIGH for PCA9635.



The active LOW Output Enable input pin ($\overline{\text{OE}}$) allows asynchronous control of the LED outputs and can be used to set all the outputs to a defined I²C-bus programmable logic state. The $\overline{\text{OE}}$ can also be used to externally 'pulse width modulate' the outputs, which is useful when multiple devices need to be dimmed or blinked together using software control.

Software programmable LED All Call and three Sub Call I²C-bus addresses allow all or defined groups of PCA9685 devices to respond to a common I²C-bus address, allowing for example, all red LEDs to be turned on or off at the same time or marquee chasing effect, thus minimizing I²C-bus commands. Six hardware address pins allow up to 62 devices on the same bus.

The Software Reset (SWRST) General Call allows the master to perform a reset of the PCA9685 through the I²C-bus, identical to the Power-On Reset (POR) that initializes the registers to their default state causing the outputs to be set LOW. This allows an easy and quick way to reconfigure all device registers to the same condition via software.

2. Features and benefits

- 16 LED drivers. Each output programmable at:
 - ◆ Off
 - ◆ On
 - ◆ Programmable LED brightness
 - ◆ Programmable LED turn-on time to help reduce EMI
- 1 MHz Fast-mode Plus compatible I²C-bus interface with 30 mA high drive capability on SDA output for driving high capacitive buses
- 4096-step (12-bit) linear programmable brightness per LED output varying from fully off (default) to maximum brightness
- LED output frequency (all LEDs) typically varies from 24 Hz to 1526 Hz (Default of 1Eh in PRE_SCALE register results in a 200 Hz refresh rate with oscillator clock of 25 MHz.)
- Sixteen totem pole outputs (sink 25 mA and source 10 mA at 5 V) with software programmable open-drain LED outputs selection (default at totem pole). No input function.
- Output state change programmable on the Acknowledge or the STOP Command to update outputs byte-by-byte or all at the same time (default to 'Change on STOP').
- Active LOW Output Enable ($\overline{\text{OE}}$) input pin. LEDn outputs programmable to logic 1, logic 0 (default at power-up) or 'high-impedance' when $\overline{\text{OE}}$ is HIGH.
- 6 hardware address pins allow 62 PCA9685 devices to be connected to the same I²C-bus
- Toggling $\overline{\text{OE}}$ allows for hardware LED blinking
- 4 software programmable I²C-bus addresses (one LED All Call address and three LED Sub Call addresses) allow groups of devices to be addressed at the same time in any combination (for example, one register used for 'All Call' so that all the PCA9685s on the I²C-bus can be addressed at the same time and the second register used for three different addresses so that $\frac{1}{3}$ of all devices on the bus can be addressed at the same time in a group). Software enable and disable for these I²C-bus address.
- Software Reset feature (SWRST General Call) allows the device to be reset through the I²C-bus

- 25 MHz typical internal oscillator requires no external components
- External 50 MHz (max.) clock input
- Internal power-on reset
- Noise filter on SDA/SCL inputs
- Edge rate control on outputs
- No output glitches on power-up
- Supports hot insertion
- Low standby current
- Operating power supply voltage range of 2.3 V to 5.5 V
- 5.5 V tolerant inputs
- -40 °C to +85 °C operation
- ESD protection exceeds 2000 V HBM per JESD22-A114, 200 V MM per JESD22-A115 and 1000 V CDM per JESD22-C101
- Latch-up testing is done to JEDEC Standard JESD78 which exceeds 100 mA
- Packages offered: TSSOP28, HVQFN28

3. Applications

- RGB or RGBA LED drivers
- LED status information
- LED displays
- LCD backlights
- Keypad backlights for cellular phones or handheld devices