

**SISTEMA DE CONTROL DE EQUILIBRIO  
BASADO EN DINÁMICA SIMPLIFICADA PARA  
LA FASE DE BIPEDESTACIÓN ESTÁTICA DEL  
ROBOT BÍPEDO PROBIC DE TAMAÑO  
HUMANO.**



Universidad  
del Cauca

**Juan Camilo Males Castro  
Daniela Valencia Mellizo**

Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control  
*Popayán*



**SISTEMA DE CONTROL DE EQUILIBRIO  
BASADO EN DINÁMICA SIMPLIFICADA PARA  
LA FASE DE BIPEDESTACIÓN ESTÁTICA DEL  
ROBOT BÍPEDO PROBIC DE TAMAÑO  
HUMANO.**

**Juan Camilo Males Castro  
Daniela Valencia Mellizo**

Trabajo de grado presentado a la Facultad de Ingeniería la Electrónica y  
Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca para la obtención del título de:  
Ingenieros en Electrónica y Telecomunicaciones

Director:  
MsC. Jeison Tacué González  
Codirector:  
PhD. Diego A. Bravo Montenegro

Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control  
*Popayán*

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

Director: \_\_\_\_\_  
M.Sc. Jeison Tacué González

CoDirector: \_\_\_\_\_  
PhD. Diego A. Bravo Montenegro

\_\_\_\_\_  
Firma del Jurado

\_\_\_\_\_  
Firma del Jurado

Popayán, 23 de agosto de 2023

# Agradecimientos

En el cierre de esta etapa de aprendizaje y crecimiento, deseo expresar mi agradecimiento a quienes han sido pilares fundamentales en mi camino como profesional.

En primer lugar, quiero extender mi profundo agradecimiento a mis padres, Milena Mellizo Ruiz y Javier Rodolfo Valencia, cuyo respaldo, amor y sabiduría han sido la base de todo lo que he alcanzado. Su constante impulso me ha guiado a superar obstáculos y perseguir mis metas con determinación.

A mi familia, Nicolás, Ricardina, Evelio, Toribio, Maria E, Monica, Julian, Juan José y Juan Diego, quienes han sido un constante apoyo y han creído en mí.

A Juan Camilo Males Castro, mi compañero incondicional, por darle significado a cada paso de este camino compartido.

A mi estimado director y amigo, Jeison Tacué González, por su paciencia y su inquebrantable disposición para no solo llevarnos a la graduación, sino para lograr algo excepcional a lo largo de esta travesía.

A mi codirector, Diego A. Bravo, por compartir desinteresadamente sus habilidades investigativas e introducirnos a un campo lleno de posibilidades.

A mis apreciados profesores de la FIET, cuyo conocimiento y orientación han sido los cimientos sobre los cuales he construido mis habilidades profesionales.

A mis compañeros de estudios, en particular a Javier Fernández y Felipe Jojoa, quienes compartieron conmigo desafíos, descubrimientos y largas jornadas de estudio, transformando mi experiencia universitaria en algo excepcional.

A la Universidad del Cauca, por brindarme un espacio donde pude nutrir mi curiosidad y convertirla en habilidades concretas, y por su compromiso con la educación pública de calidad, lo cual ha influido significativamente en mi crecimiento profesional.

A todos aquellos que, de una manera u otra, han contribuido a mi desarrollo académico y personal, les expreso mi sincero agradecimiento por ser parte de este viaje.

Con profunda gratitud,

**Daniela Valencia Mellizo**

En primer lugar, quiero dedicar un agradecimiento especial a mis queridos padres, Fabiola Castro Muñoz y Henio Males Ruiz, cuyo amor, apoyo y sacrificio han sido la base fundamental de mi trayectoria académica. Desde mis primeros pasos hasta este momento de culminación, su apoyo inquebrantable y fe en mí han sido mi mayor motivación. Cada desafío que enfrenté se volvió más llevadero gracias a su orientación y palabras de aliento constantes.

A toda mi familia, sus palabras de ánimo y sus gestos de cariño me han impulsado a superar obstáculos y a seguir adelante incluso en los momentos más desafiantes.

A mi compañera, Daniela Valencia Mellizo, tu compromiso, colaboración y dedicación a este proyecto han sido una fuente constante de motivación y aprendizaje. Juntos, hemos enfrentado desafíos, debatido ideas y celebrado nuestros avances, creando un equipo que ha hecho que esta experiencia sea enriquecedora.

A nuestro director Jeison Tacué González y al codirector Diego Alberto Bravo, sus experiencias, paciencia, apoyo y dedicación han sido fundamentales para dar forma a nuestra investigación y guiar nuestros esfuerzos en la dirección correcta. Siempre estuvo dispuesto a escuchar nuestras ideas, brindar valiosos consejos y desafiarnos para alcanzar nuestro máximo potencial. Este logro no habría sido posible sin su mentoría y apoyo constante, y estoy profundamente agradecido por su influencia en mi formación.

No puedo dejar de mencionar a todos mis compañeros y amigos, en particular a Javier Fernández y Felipe Jojoa, por su amistad y colaboración que han sido un apoyo fundamental en todo este recorrido.

A mis profesores, cuya dedicación y pasión por la educación han sido una fuente constante de inspiración en mi camino académico. Su compromiso con la excelencia y su disposición para brindar apoyo cuando lo necesitaba han dejado una huella perdurable en mi aprendizaje.

Además, deseo reconocer a la Universidad del Cauca, por brindarme la invaluable oportunidad de cursar mis estudios superiores. Agradezco especialmente el compromiso constante de esta institución en fomentar la excelencia académica para una educación de calidad. Durante mi tiempo aquí, he sido testigo de un entorno académico enriquecedor y oportunidades de crecimiento.

A todas las personas que contribuyeron de alguna manera en la realización de este trabajo de investigación y en mi formación académica. Este logro no habría sido posible sin el apoyo de cada uno de estas personas.

Con profunda gratitud, **Juan Camilo Males Castro.**

## Resumen

En este documento se presenta el sistema de control de equilibrio basado en dinámica simplificada para la fase de bipedestación estática, propuesta para el prototipo de robot bípedo de tamaño humano (PROBIC). Para esto, se realizó en primer lugar una definición de los principales conceptos relacionados con la robótica bípeda, seguida de una revisión del estado del arte. Se continuó con el diseño del robot bípedo PROBIC, partiendo de los parámetros necesarios para establecer las dimensiones adecuadas del robot, seguido del modelado de cada una de las piezas constitutivas del mismo, empleando un software CAD; adicionalmente, se elaboraron los diagramas eléctricos y el software necesario para la implementación del prototipo. Una vez finalizada esta fase, se procedió con el ensamblaje de la estructura mecánica del robot bípedo.

Posteriormente, se abordó el modelo matemático del robot, a partir de los fundamentos matemáticos que sustentan los modelos cinemático y dinámico del robot, que proporcionan un análisis detallado de su comportamiento y, a su vez, permiten un control integral de sus movimientos.

Después de la construcción de la estructura del robot y su electrónica, y el cálculo de los modelos matemáticos, se continuó con la formulación de la estrategia de control para la bipedestación estática del robot, y su implementación. Finalmente, se definió un plan de pruebas que permita evaluar el sistema de control de equilibrio diseñado, para una inclinación en la superficie de soporte.

**Palabras Clave:** Robot bípedo, Control, Bipedestación estática, Dinámica simplificada, Centro de Masa.

## Abstract

Bipedal robots are complex systems that require sophisticated control algorithms to maintain balance. In this paper, we present a simplified dynamics-based balance control system for the static bipedal stance phase of a human-sized bipedal robot prototype. The system is based on a linear inverted pendulum model and uses a feedback controller to regulate the center of pressure of the robot.

The system was designed and implemented using a modular approach. The first step was to define key concepts related to bipedal robotics. This was followed by a state-of-the-art review of balance control algorithms for bipedal robots. The next step was to design the PROBIC bipedal robot prototype. This involved modeling each constituent part using CAD software and developing electrical diagrams and software for prototype implementation.

Once the mechanical structure of the robot was assembled, the mathematical model of the robot was developed. This involved deriving the mathematical foundations underpinning the kinematic and dynamic models of the robot. The mathematical model was used to analyze the behavior of the robot and to design the control strategy.

The control strategy was implemented using a feedback controller. The controller was designed to regulate the center of pressure of the robot such that it remains within a safe region. The controller was tested using a simulation environment and was found to be effective in maintaining balance.

The results of this research demonstrate the feasibility of using a simplified dynamics-based balance control system for the static bipedal stance phase of a human-sized bipedal robot prototype. The system is robust and can be implemented using a modular approach.

**Keywords:** Bipedal robot, Control, Static bipedal stance, Simplified dynamics, Center of Mass.



# Tabla de Contenido

<b>1. ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO.</b>	<b>11</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA . . . . .	11
1.2. OBJETIVOS . . . . .	12
1.2.1. Objetivo General . . . . .	12
1.2.2. Objetivos Específicos . . . . .	12
1.3. APORTES INVESTIGATIVOS . . . . .	13
1.4. MARCO TEÓRICO . . . . .	13
1.5. ESTADO DEL ARTE . . . . .	16
<b>2. EL ROBOT BÍPEDO PROPUESTO: DE LOS ESQUEMAS A LA REALIDAD CON DISEÑO, ELECTRÓNICA Y PROGRAMACIÓN.</b>	<b>22</b>
2.1. Dimensiones generales del robot bípedo . . . . .	22
2.2. Modelo CAD 3D . . . . .	23
2.2.1. Pieza Cadera Superior . . . . .	23
2.2.2. Pieza de acople entre la cadera y rodilla . . . . .	24
2.2.3. Pieza Articulación 2M . . . . .	24
2.2.4. Pieza eslabón de unión o sujeción . . . . .	25
2.2.5. Pieza Rodilla . . . . .	26
2.2.6. Pieza Separadores . . . . .	26
2.2.7. Pieza Pie . . . . .	27
2.2.8. Zapato . . . . .	27
2.3. Ensamble articular del modelo 3D . . . . .	28
2.3.1. Modelo 3D de la cadena articular completa . . . . .	28
2.3.2. Cadera . . . . .	29
2.3.3. Rodilla . . . . .	29
2.3.4. Tobillo . . . . .	30
2.3.5. Resumen . . . . .	30
2.4. Ensamble de la Estructura . . . . .	30
2.5. Software del Robot Bípedo . . . . .	31
2.6. Descripción Eléctrica del Robot . . . . .	32
2.6.1. Características Eléctricas de los Componentes del Robot . . . . .	32
2.6.2. Diseño de las placas de circuito impreso (PCB) . . . . .	35
<b>3. MODELO MATEMÁTICO DEL ROBOT</b>	<b>38</b>
3.1. Modelo geométrico directo (MGD) . . . . .	38
3.1.1. Simulación modelo geométrico directo . . . . .	42
3.2. Modelo geométrico inverso (MGI) . . . . .	44
3.3. Modelo dinámico simplificado . . . . .	44
<b>4. PROPUESTA DE CONTROL DE EQUILIBRIO PARA EL ROBOT PROBIC</b>	<b>47</b>
4.1. Formulación del Controlador . . . . .	47
4.2. Simulación Controlador . . . . .	48

4.3.	Implementación . . . . .	52
4.3.1.	Comunicación . . . . .	52
4.3.2.	Cálculo del modelo estático . . . . .	54
4.3.3.	Controlador . . . . .	56
4.3.4.	Sintonización del Controlador PID . . . . .	57
4.3.5.	Prueba del controlador ante inclinación superficie de soporte . . . . .	57
<b>5.</b>	<b>PLAN DE PRUEBAS</b>	<b>59</b>
5.1.	Desarrollo de la plataforma de inclinación . . . . .	59
5.2.	Caracterización de las Pruebas . . . . .	60
5.2.1.	Captura del Máximo Ángulo de Recuperación . . . . .	60
5.2.2.	Cálculo de la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) . . . . .	61
5.3.	Resultados de las Pruebas . . . . .	61
5.3.1.	Análisis y Resultados del Máximo Ángulo de Recuperación . . . . .	62
5.3.2.	Análisis y Resultados del Cálculo del RMSE . . . . .	63
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>66</b>
<b>7.</b>	<b>TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>68</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>69</b>

## Lista de Figuras

1.	Relación equilibrio, Centro de masa(CoM) y polígono de soporte [1]. . . . .	14
2.	Ejemplo de un esquema de un sistema de control. . . . .	15
3.	Evolución de ASIMO. . . . .	16
4.	ZMP. . . . .	19
5.	Robots humanoides TORO [2], Poppy [3] y ATLAS [4]. . . . .	21
6.	Cadena articular y referencia medidas establecidas por Drillins y Contini.	22
7.	Pieza base Cadera Superior. . . . .	23
8.	Pieza tapa Cadera Superior. . . . .	24
9.	Acople Muslos. . . . .	24
10.	Articulación 2M. . . . .	25
11.	Pieza Para Uniones. . . . .	26
12.	Pieza Rodilla. . . . .	26
13.	Pieza Separadores. . . . .	26
14.	Pieza Pie. . . . .	27
15.	Zapato. . . . .	27
16.	Planos anatómicos. . . . .	28
17.	Pieza Completa. . . . .	28
18.	Ensamble de la Cadera completa. . . . .	29
19.	Estructura de PROBIC y Bioloid. . . . .	31
20.	Esquema eléctrico básico. . . . .	32
21.	Caracterización sensor del motor. . . . .	33
22.	Esquema de la placa principal. . . . .	36
23.	Esquema de la placa para motores. . . . .	36
24.	Esquema de la placa de pies. . . . .	37
25.	Placas de circuito impreso: principal, motores y pies. . . . .	37
26.	Posición de ejes de coordenada para cada articulación. . . . .	38
27.	Modelo PROBIC Simulink Multibody. . . . .	42
28.	Simulación MGD en Simulink Multibody. . . . .	43
29.	Respuesta MGD por matrices de transformación homogénea. . . . .	43
30.	Diagrama de cuerpo libre para CoM. . . . .	45
31.	Modelo péndulo simple. . . . .	46
32.	Diagrama de Bloques Simulación. . . . .	48
33.	Diagrama de Bloques Controlador PID. . . . .	49
34.	Diagrama de Bloques Modelo Servo Motor. . . . .	49
35.	Diagrama de Bloques de un Motor DC. . . . .	50
36.	Diagrama de Bloques del Modelo Estático. . . . .	50
37.	Algoritmo bloque. . . . .	51
38.	Gráfica resultados simulación controlador. . . . .	52
39.	Diagrama de comunicaciones. . . . .	53
40.	Errores generados por la comunicación $I^2C$ . . . . .	54
41.	Valores de compensación . . . . .	55
42.	Gráfica Posición CoM. . . . .	57
43.	Gráfica Error. . . . .	58

44.	Gráfica Esfuerzo de Control. . . . .	58
45.	Plataforma de inclinación . . . . .	59
46.	Inclinación negativa y positiva, respectivamente. . . . .	60
47.	Gráfico de cajas y bigotes para máximo ángulo de inclinación . . . . .	63
48.	Gráfico de cajas y bigotes para RMSE . . . . .	64

## Lista de Tablas

1.	Movimientos articulares por ensamble. . . . .	30
2.	Distancias . . . . .	38
3.	Medidas para el Modelo Estático . . . . .	55
4.	Máximo Ángulo de Recuperación de Equilibrio de PROBIC. . . . .	62
5.	Datos del RMSE de PROBIC. . . . .	64

# 1. ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO.

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desarrollo de las estrategias de control de equilibrio para la robótica humanoide es un componente crítico investigado a través de los años, sus utilidades están dirigidas a todos los ámbitos donde las personas interactúan, y de mayor interés en el sector de la salud, mediante el desarrollo de dispositivos como órtesis para la rehabilitación del sistema músculo esquelético [5] y prótesis para la recuperación de funciones motoras, sin embargo, su desarrollo se ha topado con notables retos, debido a que su compleja estructura articular establece el Centro de Masa (CoM, del inglés Center of Mass) a una altura considerable, mientras que los pies en contacto con el suelo generan un polígono de soporte reducido dificultando garantizar plena estabilidad. Debido a esto, los robots bípedos presentan un carácter inestable que se incrementa conforme sea la estatura del robot, o dicho técnicamente cuanto más alejado esté el CoM del robot respecto al suelo; este ha sido uno de los principales retos a resolver, dado que para implementar funciones de marcha se debe garantizar con anterioridad la estabilidad máxima de partida, es decir, cuando el robot se encuentra en régimen transitorio que va desde una posición erguida, donde se prepara para dar su primer paso hasta caminar continuamente.

En relación al equilibrio estático, la comunidad científica ha planteado dos enfoques en busca de aumentar la solidez de la estabilidad para robots bípedos, el primer enfoque llamado compensatorio [1] que abarca los pasos siguientes después de sufrir una perturbación, y el segundo llamado anticipativo [1] que trata de generar una acción en espera de una perturbación y reducir el efecto de la misma, estos enfoques tienen como principales estrategias para recobrar el equilibrio manipular un conjunto diferente de articulación con el objetivo de llevar el CoM del robot a una posición de estabilidad superior, estas estrategias se denominan tobillo, tobillo-cadera y pasó, como su nombre lo indica, la primera consiste en manipular únicamente las articulaciones del tobillo, la segunda utiliza las articulaciones del tobillo y cadera conjuntamente, mientras que la última está basada en dar un paso. Sin embargo, para implementar tales estrategias se calculan modelos dinámicos y cinemáticos acordes a las dimensiones de cada robot, para lo cual se puede adoptar la metodología de un modelo completo [6] y lo más preciso posible, a costa de complejidad matemática, debido al amplio número de variables que intervienen en el sistema, el alto número de grados de libertad o DoF por sus siglas del inglés (Degree of Freedom) y pérdida de energía difícil de medir, requiere hardware de altas prestaciones y costos, además de una gran inversión de tiempo que no es compensada completamente por los resultados. En consecuencia de lo anterior, algunos investigadores han optado por modelos simplificados tales como: “Modelo péndulo invertido” [7] que considera el robot como un péndulo invertido donde el CoM del robot está representado en la masa del péndulo y las piernas del robot representan el eslabón que conecta la masa y el pivote, “Modelo péndulo lineal tridimensional 3DLIPM” [8] que linealiza las ecuaciones del modelo anterior y lo amplía a las tres dimensiones, y “Modelo Cart-Table” [9] que proporciona información de las inercias a diferencia de los modelos anteriores; estos permiten reducir la complejidad del sistema; sin embargo, estos modelos propuestos no son una solución rotunda

para todos los casos, la implementación de un modelo u otro en un prototipo conlleva a diferentes resultados, que dependen de las imprecisiones por la estructura y altura del robot, por ejemplo, en la Universidad del Cauca en trabajos previos se planteó comparar dos estrategias de control de equilibrio sobre un robot comercial de bajo tamaño, para el cual se propuso la comparación de un controlador de equilibrio basado en dos modelos diferentes, no obstante, se descubrió que los resultados reflejaron mejor comportamiento para uno de ellos, exactamente aquel que utilizó el modelo simplificado Cart-Table, y que además evidenció demasiadas discrepancias entre el modelo y el robot real. Por este motivo se han propuesto modificaciones a los modelos anteriores para solucionar problemas de adaptación de cada prototipo de robot.

Teniendo en cuenta que la elección del modelo y su correcta configuración de parámetros físicos, afecta considerablemente el cálculo del controlador y por tanto el desempeño de todo el sistema de control, que será implementado en el prototipo propuesto caracterizado por contar con una morfología y estructura distinta a los kits comunes encontrados en la academia; se resuelve plantear la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué características debe presentar el sistema de control de equilibrio basado en dinámica simplificada, cuando es aplicado al prototipo de robot bípedo de tamaño humano (PROBIC) en postura de bipedestación estática?

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo General**

Proponer un sistema de control de equilibrio basado en dinámica simplificada para la fase de bipedestación estática del prototipo de robot bípedo de tamaño humano (PROBIC).

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Calcular un modelo matemático que represente la dinámica del robot, a partir de las técnicas de modelado simplificado para robots bípedos.
- Formular una estrategia de control de equilibrio embebida en microcontrolador y PC, para la fase de bipedestación estática del robot bípedo propuesto.
- Evaluar el sistema de control de equilibrio diseñado para el robot bípedo mediante un plan de pruebas de inclinación de la superficie de soporte.

### 1.3. APORTES INVESTIGATIVOS

El control de equilibrio en un robot bípedo representa un desafío, debido a su gran complejidad, que radica en tratar de crear una representación fidedigna del ser humano, y para esto se debe considerar robots de peso significativo, altura y elevado número de grados de libertad, lo cual se encuentra en proceso de investigación y mejora continua.

La construcción de un robot que asemeja la movilidad de una persona tiene una amplia variedad de retos por cumplir, pero la capacidad de mantener el equilibrio es el primer paso para un robot bípedo funcional; en este punto se debe definir ¿Qué se considera mantenerse en equilibrio?, ¿Cuáles son los diferentes sistemas que deben actuar para mantener el equilibrio?, ¿Cómo se debe actuar ante una perturbación?. En la actualidad se han llevado a cabo diferentes investigaciones para abordar temas relacionados con el equilibrio y sus resultados han llevado a conocer diferentes conceptos relevantes como lo son el Punto de Momento Cero (ZMP), CoM, la importancia del modelo dinámico, cinemático del sistema, y de diseñar un sistema de control de equilibrio consistente en la fase de bipedestación estática, ya que es el punto de partida para la realización de movimientos más complejos.

Uno de los temas de discusión es el enfoque con que se aborda el modelo más adecuado para cada robot y a partir de éste poder controlar las funciones de equilibrio y marcha del robot. Existen dos modelos que se utilizan ampliamente en la literatura: El primero se basa en conocer, con la mayor precisión posible, el modelo dinámico del robot; esto se convierte en un desafío puesto que intervienen fenómenos como los momentos de inercia de los componentes, las pérdidas causadas por temperatura de los componentes eléctricos, los cambios en la superficie de soporte, además de considerar las afectaciones por tiempo de ejecución del algoritmo debido a su gran complejidad. El segundo se basa en utilizar modelos simples o simplificados en lugar de un modelo preciso, reduciendo así la complejidad al obtener el modelo y su ejecución en un microprocesador, pero esto genera limitaciones en la precisión del robot, que se intenta compensar con un sistema de control robusto.

En la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, se ha iniciado una línea de investigación sobre robótica bípeda, obteniendo avances importantes en el tema, por lo que es importante apoyar la continuidad en las investigaciones con el objetivo de brindar herramientas, propuestas de soluciones y conclusiones, con el fin de ofrecer conocimiento a todas las personas interesadas en este tema.

### 1.4. MARCO TEÓRICO

#### Robot bípedo

Un robot bípedo es un robot dotado de dos piernas para moverse, y puede tener una forma humanoide. Es una tecnología en desarrollo, que podría permitir a los robots caminar, saltar y correr como los humanos, y eventualmente ayudar a las personas en una variedad de tareas, además de los aportes de investigación asociados con la salud humana. [7].



## Bipedestación estática

Es una forma de ejercicio que implica mantenerse de pie sin moverse durante periodos prolongados de tiempo, se caracteriza por mantener un control efectivo del equilibrio, una alineación biomecánica adecuada, suficiente fuerza muscular y coordinación, con el objetivo de alinear el CoM al punto de reacción con el suelo. [10].

## Polígono de soporte

Un polígono de soporte, dentro del contexto de robótica bípeda, es una herramienta fundamental para el equilibrio y la estabilidad del robot, este se genera con la unión de los puntos en el suelo donde se encuentran los pies, calculando la envolvente convexa, determinando así el área del polígono de soporte. [7].

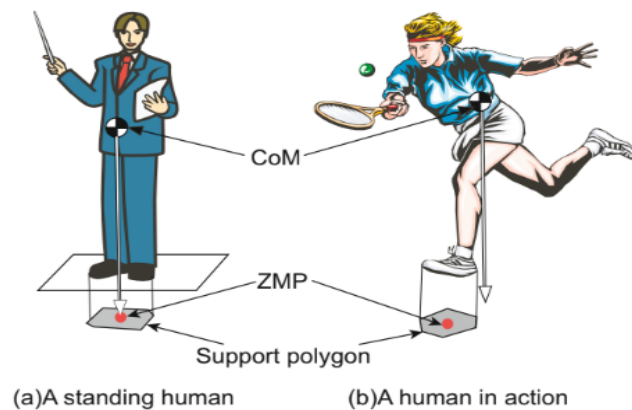


Figura 1: Relación equilibrio, Centro de masa(CoM) y polígono de soporte [1].

## Equilibrio

En el área de de la salud y movimiento humano, hace referencia a la capacidad de mantener una postura de manera controlada. Los dos principales factores que intervienen en el equilibrio de un cuerpo son; el centro de masa (CoM) y la superficie de soporte o apoyo, para que exista equilibrio en el sistema se debe cumplir que la línea del CoM se encuentre dentro del área de soporte [1].

## Estabilidad

La estabilidad en un robot bípedo, es la capacidad de mantener o recuperar el estado de equilibrio frente a perturbaciones, entendiéndose que se considera el robot estable, cuando el reflejo del CoM se encuentra en el centro del polígono de soporte. [1].

## Punto de Momento Cero (ZMP)

El ZMP es uno de los conceptos más usados en el control de robots bípedos, ya que se utiliza como un criterio de estabilidad, mediante su análisis es posible definir el estado

de equilibrio del robot; se define como el punto sobre el suelo donde se anulan las fuerzas (inercia y gravedad) ejercidas por el cuerpo y la posición del robot [7].

### Sistema de control para un robot bípedo

Un sistema de control para un robot bípedo, se encarga de ajustar y corregir los movimientos en tiempo real del robot, usando estrategias de realimentación o feedback (como es conocido), que emplean sensores que capturan la información necesaria para garantizar que el robot se desempeñe de la manera deseada. [11].

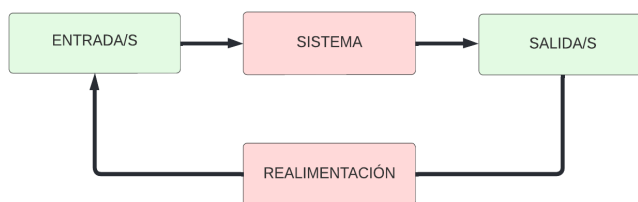


Figura 2: Ejemplo de un esquema de un sistema de control.

### Modelado matemático de un robot

Es una representación matemática de un robot real o virtual, hecha con el fin de estudiar, simular o predecir la dinámica del robot en relación con sus variables de interés, por ejemplo: torques, posiciones angulares, velocidades y aceleración. Esta representación debe intentar incluir una descripción detallada del robot, relación de articulaciones, eslabones en una cadena articular robótica y leyes físicas que gobiernan el movimiento. Los modelos de robots se utilizan en una amplia variedad de campos, desde la robótica educativa hasta la investigación científica y la ingeniería.

### Modelo geométrico

El desarrollo de robots está guiado por el estudio de su movimiento. Mediante el análisis del modelo geométrico, también conocido como cinemático, es posible calcular las posiciones, velocidades y aceleraciones de cada uno de los elementos que componen el robot, sin tener en cuenta fuerzas, torques, masas, volúmenes o interpenetración de cuerpos. [7]. Además se clasifica en dos modelos:

- Geométrico directo: toma como entradas las posiciones articulares  $(\Theta_x \ \Theta_y \ \Theta_z)$  y a partir de ellas calcula la posición cartesiana del efector final  $(x, y, z)$ , que este caso particular corresponde al pie del robot.
- Geométrico inverso: recibe como entrada las posiciones cartesianas deseadas  $(x, y, z)$  y calcula las posiciones angulares  $(\Theta_x \ \Theta_y \ \Theta_z)$  necesarias para obedecer trayectorias en el espacio cartesiano.

## Modelo dinámico

El modelo dinámico relaciona el movimiento del robot y las fuerzas implicadas en el mismo. Establece relaciones matemáticas entre las coordenadas, su velocidad y aceleración, las fuerzas y pares aplicados en las articulaciones y los parámetros del robot (masas de los eslabones, inercias, etc). [7].

### 1.5. ESTADO DEL ARTE

El estudio de los movimientos humanos, principalmente la bipedestación o bipedismo, ha llamado la atención, generando gran curiosidad en los investigadores e ingenieros alrededor del mundo desde algunos siglos atrás, pero es sólo hasta las últimas décadas que dichos estudios han empezado a emerger y así transformar la teoría en práctica, usando la robótica como medio de implementación. Honda es una de las empresas pioneras en la investigación y desarrollo de robótica bípeda desde el año 1986. El primer prototipo desarrollado por esta compañía se orientó hacia la caminata estática y recta. Sin embargo, a medida que su investigación fue evolucionando se lograron resultados en caminata continua en línea recta. En la Figura 3 se muestra la evolución del robot “ASIMO”, el cual está en constante actualización. Se debe resaltar que su configuración permite un movimiento libre en entornos humanos como el desplazamiento en las escaleras, el cual fue la principal tarea a resolver, esto en razón de que la compañía después de años de experiencia en fabricación de motocicletas y carros, aceptó el nuevo desafío de movilidad [12].

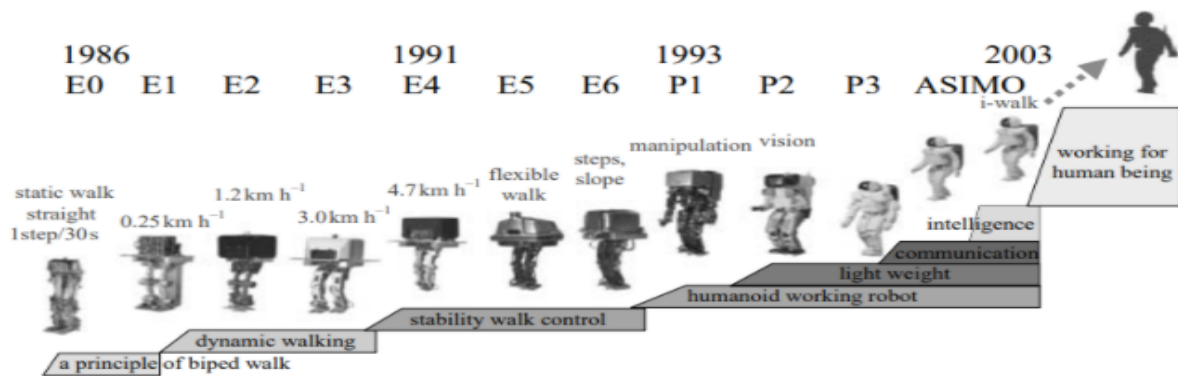


Figura 3: Evolución de ASIMO.

Proyectos como el de Honda fueron un punto de partida para el desarrollo de investigaciones que buscan obtener un robot que represente de manera fiel las capacidades motoras de las personas. Los primeros avances se centraron en desarrollar una representación que describa todos los elementos que intervienen en la movilidad; a partir de esto se pueden obtener los modelos matemáticos que representan la dinámica de robots bípedos. Dichos modelos se dividen en dos grupos dependiendo de la complejidad de su estructura mecánica y el alto número de grados de libertad. El primero se denomina “dinámica completa”, se identifica por su elevada complejidad e intenta caracterizar la mayor parte de las variables para una representación fidedigna del sistema (como los momentos de inercia y las pérdidas por fricción de los cuerpos, las pérdidas de los actuadores y conductores); esto

implica modelos matemáticos complejos, requerimientos en elementos de alto coste y sobreesfuerzos en modelar cada uno de los componentes del sistema. Por este motivo se han buscado ayudas computacionales, como se realizó con e-Robot en 2011 [13] donde se utilizó el programa de modelado mecánico Solid Works y la herramienta de cálculo numérico MATLAB con el objetivo de encontrar las ecuaciones de movimiento aproximadas con mayor brevedad. Por otra parte, surge el segundo grupo denominado “modelo simplificado”, que busca subsanar los problemas de complejidad incluyendo sólo las variables esenciales para favorecer otros aspectos, como la velocidad de cálculo y la controlabilidad, afrontando imprecisiones y posibles errores que se presentan al no considerar todas las aspectos que analiza un modelo preciso.

Dentro de los modelos simplificados, el modelo para el control de equilibrio más simple de un robot humanoide es el péndulo invertido bidimensional [7]. Este modelo representa el robot mediante una masa concentrada o el centro de masa (CoM) que se encuentra vinculada al suelo mediante una junta; el resultado de este modelo es una ecuación no lineal, por tanto se debe realizar una aproximación lineal y posteriormente se calcula un controlador. Para superar este problema, Kajita en 2003, linealiza el modelo asumiendo variaciones del péndulo invertido suficientemente pequeñas; el resultado es uno de los modelos más famosos utilizados en robótica humanoide, denominado “modelo de péndulo invertido lineal tridimensional (3DLIPM)” [1]. Se han desarrollado muchas mejoras y nuevos modelos para agregar más información sobre el cuerpo del robot o para abordar la falta de información, una de ellas es pensar el robot como un péndulo invertido doble para considerar las articulaciones del tobillo y cadera, otra como un péndulo invertido triple para las articulaciones del tobillo, rodilla y cadera como en [14] o considerando la cadera y las dos piernas por separado como en [15].

Los modelos simplificados de péndulo invertido fueron de gran utilidad para aplicaciones de control de equilibrio estático, sin embargo, no proporcionan información sobre las aceleraciones e inercias del cuerpo, lo cual genera problemas durante las tareas de marcha. Kajita en [9] asume este problema con el desarrollo del modelo simplificado “carro-mesa” donde el investigador propone asumir las extremidades inferiores de la locomoción del robot como una mesa con soporte y superficie, sobre la cual se desplaza un móvil imitando el balanceo del centro de masa (CoM) del robot; este concepto ayudó a desarrollar un modelo simplificado de la dinámica donde se incluyen la información de las velocidades y aceleraciones del cuerpo del robot proporcionadas por unidades de medición inercial (IMU) [16]. Adicionalmente, este modelo se ha usado en la investigación de

El principal objetivo en el desarrollo de los modelos mencionados es establecer una dinámica representativa aceptable del robot que permita posteriormente generar trayectorias de marcha y diseñar lazos de control de equilibrio; ya sea estático de pie, caminando o, aún más interesante, realizando acciones complejas como correr o saltar. Anteriormente se empleaba como referencia el centro de masa (CoM) del robot, sin embargo, este concepto no proporciona información útil sobre el estado de equilibrio corporal. Para corregir esta situación, se introdujo el concepto ZMP( Zero Moment Point) como primera y principal herramienta desarrollada para describir el equilibrio del cuerpo. El punto de momento cero (ZMP) fue introducido en 1968 por Miomir Vukobratović en [17], el cual define el punto en contacto con el suelo donde no se produce ningún momento de inercia

horizontal, es decir, donde la suma de las fuerzas horizontales se anula. Este concepto fue utilizado por primera vez para el cálculo de las trayectorias de marcha para el robot WL-10RD en 1984 [18]; de igual manera, fue fundamental para el desarrollo del robot Yabiro [19], diseñado en la Universidad Politécnica de Valencia alrededor del 2003, como primer prototipo de plataforma robusta para la investigación de sistemas de control.

El estudio del ZMP proporcionó dos criterios fundamentales para determinar el estado de equilibrio. Como primero se determinó que para garantizar el equilibrio del robot en postura estática la coordenada ZMP debe situarse dentro del polígono de soporte del robot, en caso contrario, el cuerpo humanoide puede perder el equilibrio y caer, donde el polígono de soporte comprende el área formada entre los márgenes donde se apoya los pies y la extensión entre los mismos. Como segundo el ZMP indica la coordenada necesaria para llevar el sistema a una posición de equilibrio, siendo este punto donde resulta más difícil que el sistema pierda su estabilidad. Adicionalmente, este criterio destacó por la simplicidad de cálculo, pues es posible usar sensores de presión o fuerza-torque (FSR) como se llevó a cabo en [20], donde se obtiene a partir de una suma ponderada de vectores de fuerza generados por sensores de presión ubicados en los vértices de los pies del robot. Estudios posteriores sobre el ZMP, señalan posibles mejoras dirigidas a compensar errores que se generan al usar este criterio con técnicas de modelo simplificado, como en [20] en el cual se propone un denominado “modelo péndulo invertido lineal dinámico (DLIPM)” el cual establece añadir un comportamiento de resorte y amortiguador al sistema, con el objetivo de mejorar el comportamiento de sobre-impulsos en estado transitorio y la desviación de estado estacionario; más adelante, se lleva a cabo una investigación acerca de las formas convencionales del uso del ZMP, donde en [9] se estudia usar “preview control theory” con el objetivo de compensar un error que genera el ZMP debido a la diferencia existente entre un modelo simple y otro multicuerpo.

Con el desarrollo del criterio de estabilidad ZMP se podían diseñar trayectorias que garantizaran la estabilidad en la marcha, pero al implementarlas se detectaron problemas de perturbaciones inesperadas antes de iniciar las trayectorias, por lo que mantener una postura estable es el primer problema con el que debe lidiar el robot antes de realizar tareas de caminata, con el fin de corregir estos problemas se desarrollaron sistemas de control de equilibrio que tenían como retos lidiar con perturbaciones inesperadas como fuerzas push-recovery (fuerza externa de empuje) [20] o inclinaciones en la superficie de soporte; para dar solución a esto se utilizan dos metodologías que buscan reducir lo máximo posible las caídas, el primer enfoque llamado compensatorio que abarca los pasos siguientes después de sufrir una perturbación, y el segundo llamado anticipativo que trata de generar una acción en espera de una perturbación y reducir el efecto de la misma, adicionalmente se han propuesto métodos que utilizan ambos enfoques para conseguir los mejores resultados ante perturbaciones fuertes [1].

Mediante estas dos metodologías y teniendo en cuenta los movimientos humanos, se desarrollan las estrategias de tobillo, cadera y paso como los métodos más utilizados para la compensación de estabilidad ante perturbaciones para robots bipedos [10], [21]. Para perturbaciones de baja intensidad se utiliza la estrategia de tobillo, donde el cuerpo puede considerarse como un péndulo rígido, y los ajustes de equilibrio se realizan principalmente en las articulaciones de los tobillos del robot. La estrategia de la cadera se

aplica cuando aumenta la perturbación externa y la estrategia del tobillo no es suficiente para mantener el equilibrio, al usar esta estrategia, el robot puede mover su cadera de forma independiente o en combinación con la estrategia del tobillo, considerando el robot como un péndulo doble invertido. Finalmente la estrategia de pasos se utiliza cuando las correcciones posturales anteriores resultan insuficientes y es necesario ajustar la base de apoyo. Con el objetivo de mejorar los resultados de estas estrategias se propone en [22], implementar de manera independiente las tres estrategias para ser aplicadas cuando presenten los mejores resultados, o en [23] se propone implementar una combinación de las tres estrategias dependiendo de la intensidad de las perturbaciones, en la que primero se aplica la estrategia de tobillo, después aplicar la estrategia de tobillo y cadera conjuntamente cuando la intensidad de la perturbación aumenta o la estrategia de tobillo no es suficiente, y finalmente las tres estrategias cuando la perturbación es de alta intensidad.

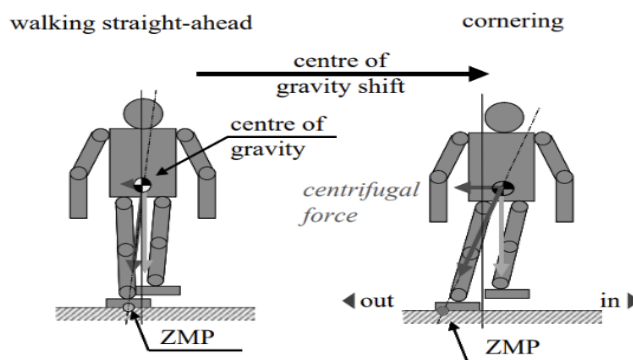


Figura 4: ZMP.

Estas estrategias están orientadas al control de equilibrio de pie (fase bipedestación estática), ya que los robots humanoides a diferencia de los robots convencionales, están orientados a realizar tareas en superficies móviles o irregulares, lo que hace necesario su implementación en conjunto de un sistema de control de equilibrio que optimice la estabilidad del robot. En cuanto al control de equilibrio se han realizado investigaciones en función del control de posición y el control de fuerza.

El primer enfoque de control basado en la posición consiste en mantener las articulaciones del robot en aquellas posiciones que previamente se consideran estables, por lo que el control se basa en conocer y mover las articulaciones a los ángulos deseados. El segundo enfoque basado en el control de fuerzas consiste en calcular el CoM mediante sensores de fuerza o FSR, con el objetivo de llevarlo a un punto de estabilidad; para el control de equilibrio, se sabe que los métodos de control de fuerza tienen varias ventajas sobre el control de posición, principalmente en términos de facilidad de cálculo y componentes sencillos, pues para un control de posición óptimo se deben conocer los ángulos y posiciones exactas de las articulaciones.

En el control de fuerza, se han realizado varios estudios basados en la teoría de la pasividad [24] que calculan los pares conjuntos necesarios para generar las fuerzas de contacto, que a su vez producen la fuerza y el momento de inercia deseados en el centro de masa

(CoM) del humanoide. Usando este enfoque, el humanoide puede mantener el equilibrio mientras esté en contacto físicamente con la superficie, produciendo la fuerza adecuada en el CoM. Por ejemplo, al establecer el CoM deseado, la fuerza de contacto producida por la tarea de manipulación de la parte superior del cuerpo puede compensarse generando las fuerzas de contacto apropiadas en los pies. Las leyes de retroalimentación simple [25] y el Modelo de Control Predictivo (MPC) [26], se ha propuesto calcular la fuerza deseada en el CoM. Estos métodos establecen que la referencia deseada es proporcional a la diferencia entre los estados actuales del robot (por ejemplo, posición, velocidad, y el impulso del CoM) y una configuración de referencia fija (FRC).

Sin embargo, este enfoque es bastante simplista en comparación con el control de equilibrio empleado por los humanos, que tienen la capacidad innata de mantener el equilibrio cambiando su CoM basado en sus propias experiencias, a diferencia de sus contrapartes humanoides. El control del equilibrio humano se lleva a cabo combinando varias estrategias de equilibrio y el ajuste postural que permite la recuperación de manera progresiva al predecir y reaccionar a las perturbaciones del equilibrio, esto se logra mediante el aprendizaje neuromuscular complejo que permiten al humano mantener el equilibrio cambiando la configuración de referencia relacionada con el entorno. Recientemente se han realizado varios estudios, para brindarle a los robots humanoides habilidades motoras pre-programadas que se acerquen a la complejidad humana para el equilibrio [27], pero estas habilidades motoras que dependen del contexto y son altamente no lineales, por lo que aún no se han implementado en algoritmos de control humanoide. Pero con el avance en las tecnologías de la inteligencia artificial (AI), se ha comenzado a investigar su adaptación considerándola una alternativa para alcanzar las capacidades humanas, como en [28].

En 2008 se desarrolla el algoritmo de marcha para el robot NAO [29] el robot fue construido por la compañía francesa Aldebaran Robotics, tiene una altura de 58cm, usa el ZMP basado en el péndulo invertido con la finalidad de encontrar el centro de masa a medida que este va cambiando a lo largo de la marcha y así obtener una caminata estable y robusta. Más adelante, en Dortmund, Alemania, se realiza una investigación con el fin de diseñar un nuevo patrón de marcha, en el cual se usan funciones continuas y diferenciables para realizar su modelo, y se usa nuevamente el criterio ZMP para el equilibrio dinámico del robot bípedo NAO; es importante resaltar que a diferencia de patrones propuestos convencionales, los cuales consisten en caminar con la rodilla doblada (bent-knee walking pattern [30]), éste usa un movimiento tridimensional en la parte superior del robot, lo cual genera que NAO pueda caminar con la rodilla estirada casi por completo, como lo haría un humano a velocidades bajas y medias. Por otra parte, también se presenta un método para el control de la postura basado en la realimentación sensorial y éste es modificado en tiempo real, para conseguir estabilizar el robot [31]. Finalmente en la investigación se lleva a cabo una comparación entre los patrones de marcha, el convencional y el propuesto, se realiza un análisis en los resultados que se obtienen del consumo de energía empleado para cada patrón y se comprueba que el nuevo patrón propuesto mejora la eficiencia del robot tanto al caminar, como respecto al consumo de energía.

Además de las investigaciones para cumplir ciertas tareas humanas, se han realizado investigaciones que buscan integrar la morfología humana a los robots bípedos, como se realizó con la plataforma Poppy, donde se tienen en cuenta características como forma de

pies humanos, forma de cadera para mejorar estabilidad y componentes como resortes que ayudan en los movimientos de las articulaciones [32]. Entre otros grandes proyectos de investigación se resalta TORO (TORque-controlled humanoid RObot), robot humanoide desarrollado por el Instituto de Robótica y Mecatrónica DLR en Alemania que es usado para la investigación del control básico del equilibrio, cuenta con 39 grados de libertad y hace uso de las unidades de accionamiento LWR de bajo peso controladas mediante torque. Estas incorporaciones permiten integrar en TORO un sistema de control robusto y de fácil adaptación frente a las mejoras [2].

En el continente americano, comienza uno de los proyectos más prometedores en la industria de la robótica. Se trata de la creación del robot humanoide bípedo ATLAS, construido por Boston Dynamics, empresa estadounidense de ingeniería y robótica, financiado por DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency). Atlas alcanza una velocidad de 2.5 m/s y cuenta con 28 grados de libertad, lo que le permite movilizarse por superficies irregulares, siendo esto uno de los principales objetivos, debido a que el robot fue diseñado para ser capaz de cumplir misiones de búsqueda y rescate. A diferencia de otros proyectos, este ha continuado su evolución tanto en hardware como en software, donde se ha extendido su desarrollo no solo a mejorar el control de sus piernas y brazos, sino también del control en su torso, siendo capaz de calcular la energía necesaria para llevar a cabo saltos tanto frontales como laterales, logrando saltos de 40 cm sin necesidad de realizar pausas. Uno de los avances más importantes para que Atlas pueda lograr este desempeño es la implementación de la visión, la cual usa sensores de profundidad para identificar su entorno y objetos en él y así lograr movimientos precisos [33].



Figura 5: Robots humanoides TORO [2], Poppy [3] y ATLAS [4].

En la Figura 5, se observa el robot TORO a la izquierda que se caracteriza por su altura cercana a 1.9 metros; en el centro el robot poppy, cuenta con pies de forma humana; y finalmente el robot ATLAS a la derecha, con la capacidad de atravesar pistas de obstáculos.



## 2. EL ROBOT BÍPEDO PROPUESTO: DE LOS ESQUEMAS A LA REALIDAD CON DISEÑO, ELECTRÓNICA Y PROGRAMACIÓN.

Este capítulo describe el proceso de diseño, construcción estructural, electrónico y firmware del robot bípedo PROBIC, desde los criterios de diseño (dimensiones), los modelos en 3D del mismo, la electrónica que lo conforma y el software de programación.

### 2.1. Dimensiones generales del robot bípedo

Se determinan los parámetros necesarios para establecer el tamaño de cada eslabón articular del robot, los cuales corresponden a un robot de tamaño humano, tomando como base la metodología sugerida por los autores: Drillins y Contini en [34], donde se definen las relaciones estadísticas entre las longitudes del cuerpo humano en función de su estatura.

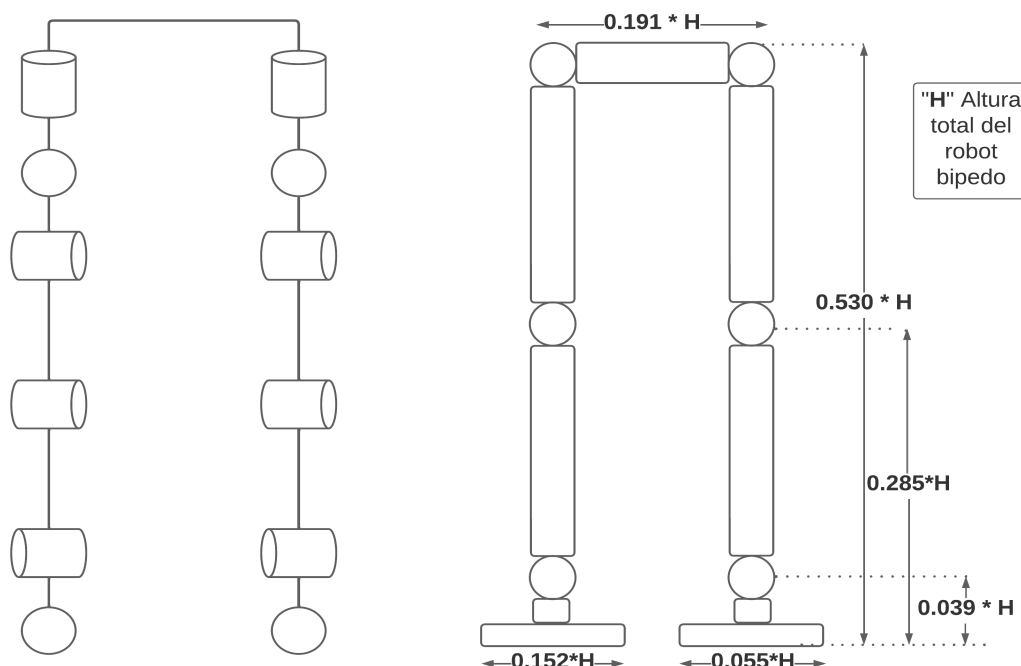


Figura 6: Cadena articular y referencias medidas establecidas por Drillins y Contini.

Con ayuda de la Figura 6, que resume y extrae las relaciones longitudinales entre los eslabones que unen las articulaciones del cuerpo humano basados en [35], se procede a hallar las medidas correspondientes al tren inferior del robot para una altura del cuerpo completo  $H = 150$  cm, como se puede observar a continuación:

$$\begin{aligned} Cadera &= (0,191) \cdot H \\ Cadera &= 28,65\text{cm} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Fémur &= (0,530 - 0,285) \cdot H \\ Fémur &= 36,75\text{cm} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Fíbula &= (0,285 - 0,039) \cdot H \\ Fíbula &= 36,9cm \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} AnchoPie &= (0,055) \cdot H \\ AnchoPie &= 8,25cm \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Tobillo &= (0,039) \cdot H \\ Tobillo &= 5,85cm \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} LargoPie &= (0,152) \cdot H \\ LargoPie &= 22,8cm \end{aligned} \quad (6)$$

Donde H corresponde a la altura completa del robot incluyendo pies, torso y cabeza. Por su parte, el ancho de la cadera calculada en la Ecuación 1, es equivalente al 19.1 % de la estatura total del robot H, la suma de las ecuaciones 2, 3, y 4, corresponde a la altura del robot construido (es decir, de pies a cadera).

## 2.2. Modelo CAD 3D

El modelado 3D de cada pieza se realizó en la herramienta SolidWorks, el cual es un software de Diseño Asistido por Computador (CAD), especializado en modelado mecánico, esto permite contar con una interfaz dedicada a la construcción estructural de un robot. A continuación, se presentarán las piezas:

### 2.2.1. Pieza Cadera Superior

Es la articulación que para trabajos futuros unirá el torso del robot con el tren inferior. Además en este espacio se empotran los componentes eléctricos mediante la placa principal de circuito impreso y batería. En las Figuras 7 y 8, se puede observar su diseño, siendo estas respectivamente; la base de soporte de la cadera y la tapa de protección para la misma.

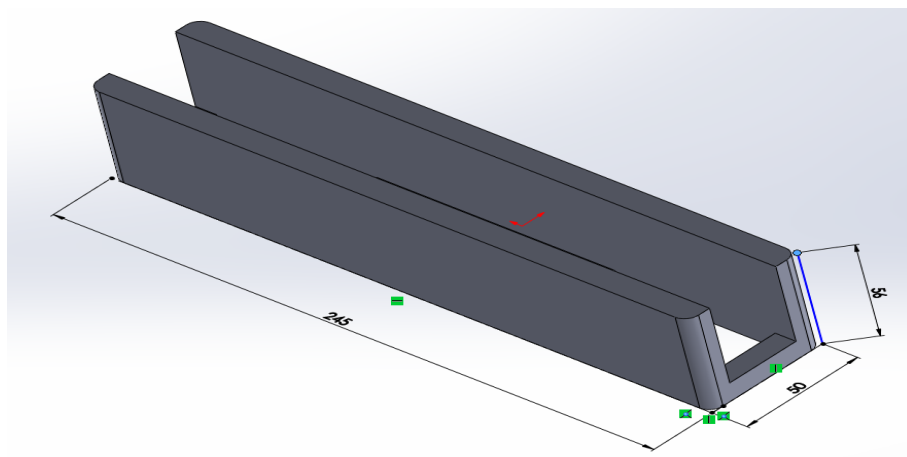


Figura 7: Pieza base Cadera Superior.

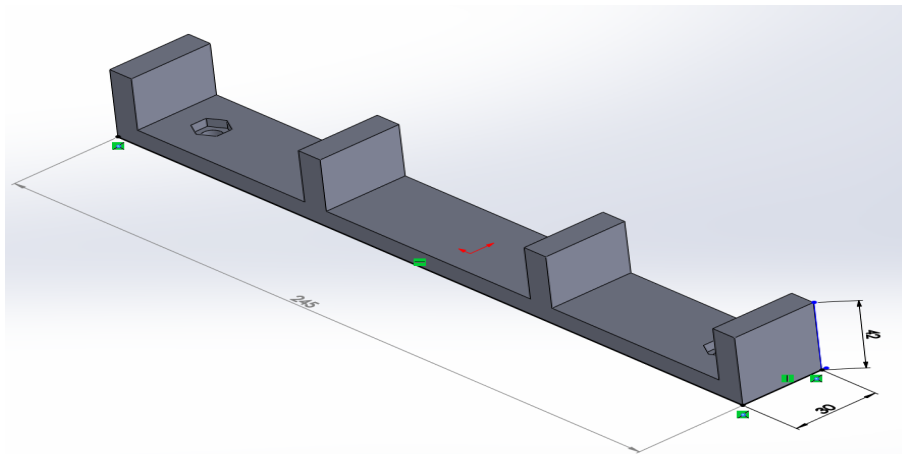


Figura 8: Pieza tapa Cadera Superior.

### 2.2.2. Pieza de acople entre la cadera y rodilla

Esta pieza permite conectar mecánicamente la pieza de la Cadera Superior con la Pieza Articulación 2M que se muestra en la Figura 10, además ayuda al movimiento que realiza la cadera, detallado en la siguiente sección.

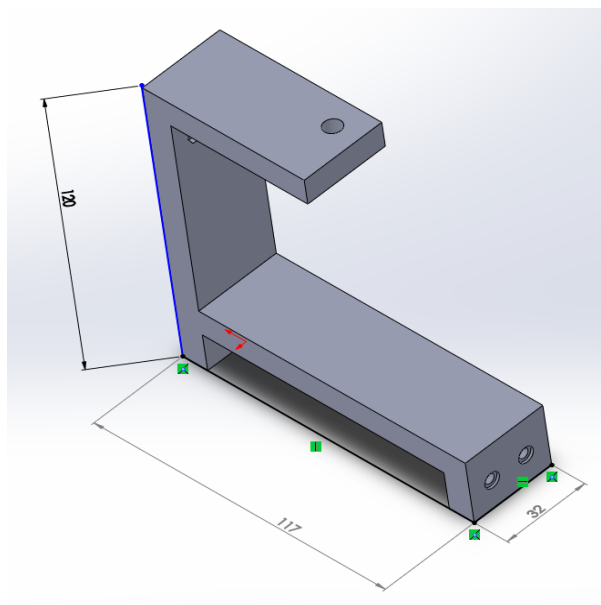


Figura 9: Acople Muslos.

### 2.2.3. Pieza Articulación 2M

Esta pieza se trata de la unión de dos motores cuyos ejes se encuentran perpendicularmente situados respecto a su eje de rotación, para realizar movimiento en dos planos. Esta articulación es usada en la parte baja de la cadera en cada pierna, y también como articulación de tobillo. A parte de los dos motores, esta robusta pieza encapsula una placa PCB

denominada “Placa Motores”, cuya funcionalidad se detalla en la sección “Descripción Eléctrica del Robot”. La Figura 10 corresponde a la pieza 2M con los motores acoplados.

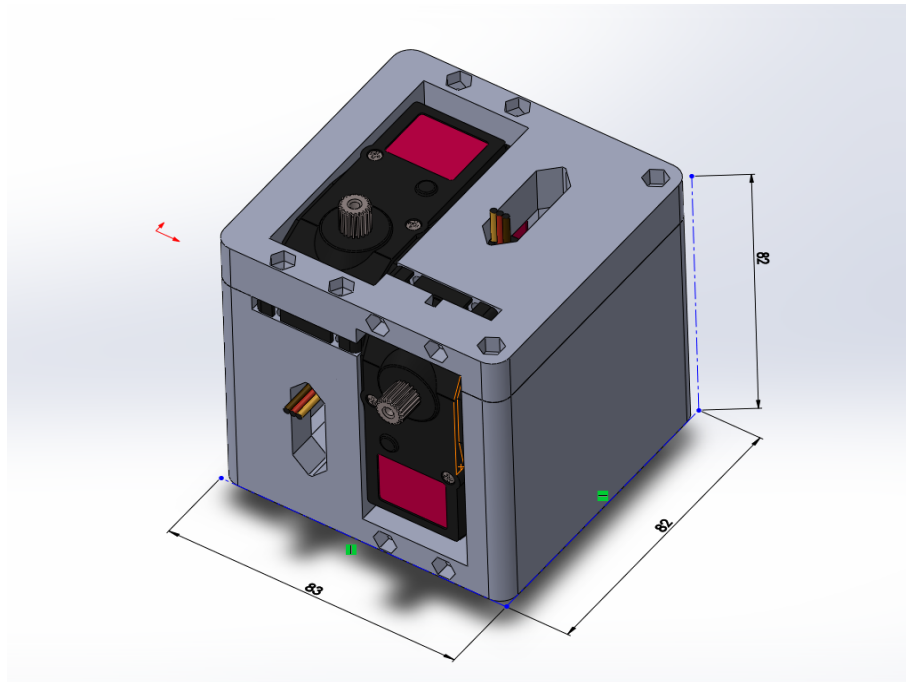


Figura 10: Articulación 2M.

#### 2.2.4. Pieza eslabón de unión o sujeción

Se trata de una barra o platina rectangular de aluminio de 3,16 mm de grosor y 2.54 cm (1 pulgada) de ancho, cortada en varias longitudes usadas para unir las articulaciones del robot:

- Unión Cadera A: 15 cm, une la parte superior exterior de la cadera con una articulación 2M.
- Unión Cadera B: 7 cm, une la parte superior interior de la cadera con una articulación 2M.
- Unión Muslo: 25.9 cm, une la articulación 2M de la cadera con la rodilla.
- Unión Pierna: 27 cm, une la rodilla con la articulación 2M del tobillo.
- Unión Tobillo: 6 cm, une la articulación 2M del tobillo con el pie.

En cada extremo se encuentran los agujeros para el acoplamiento con los motores o la estructura articular correspondiente. A continuación veremos un ejemplo de la misma:



Figura 11: Pieza Para Uniones.

### 2.2.5. Pieza Rodilla

La pieza correspondiente a la rodilla del robot, como se puede apreciar en la Figura 12, está diseñada para albergar en ella un motor y “Placa Motores”, además de brindar la solidez necesaria para realizar los movimientos que un robot humanoide exige al soportar la mayor parte del peso del robot estando este en postura de marcha.

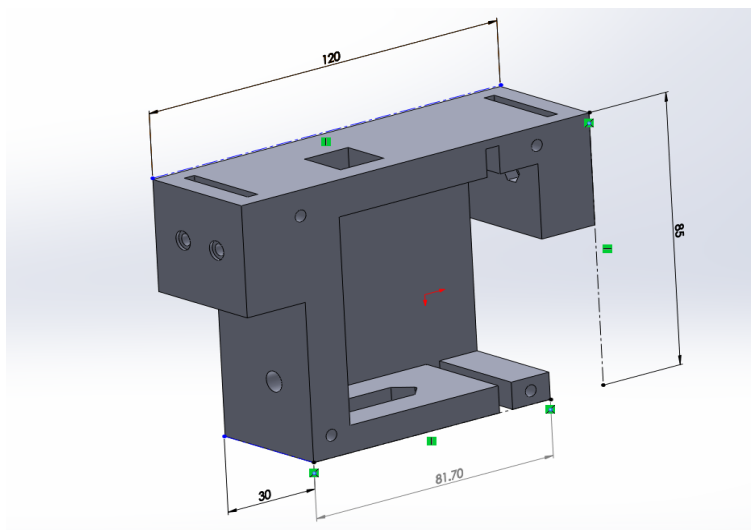


Figura 12: Pieza Rodilla.

### 2.2.6. Pieza Separadores

Esta pieza consiste en un cubo con un avellanado acorde a un tornillo M6, sirve para deslizar el movimiento que realizan los motores en los extremos de un mismo eje de rotación.

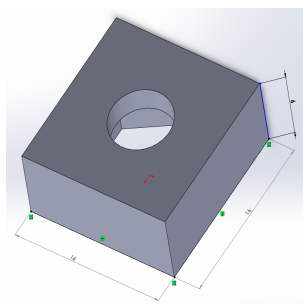


Figura 13: Pieza Separadores.

### 2.2.7. Pieza Pie

Esta pieza plana es la encargada de darle soporte al robot contra el suelo. En ella se encuentran sensores de presión, que permiten encontrar el ZMP.

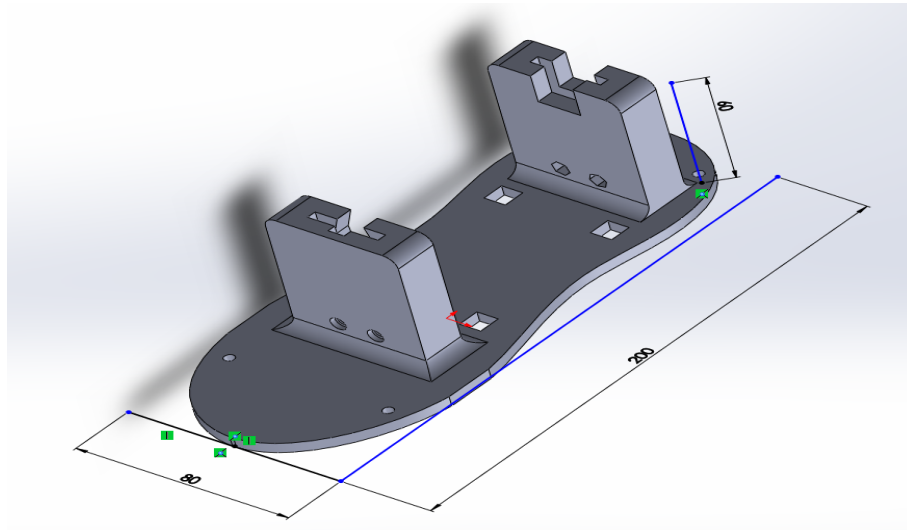


Figura 14: Pieza Pie.

### 2.2.8. Zapato

Esta pieza se encarga del acondicionamiento de los sensores para asegurar su correcto funcionamiento. Se pueden observar figuras en forma de volcán resaltadas en la pieza, las cuales están diseñadas para estar en contacto directo con dichos sensores. Estas formas permiten una detección precisa de los cambios de presión, garantizando así un rendimiento óptimo de los mismos.

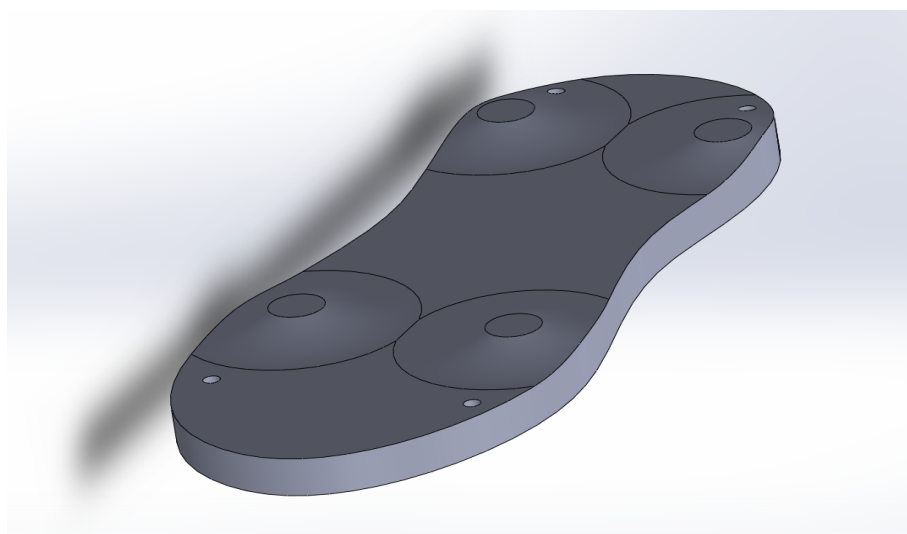


Figura 15: Zapato.

### 2.3. Ensamble articular del modelo 3D

Este ítem se enfoca en describir los movimientos articulares que realiza el robot, con el fin de facilitar la lectura. A continuación, presentamos una ilustración extraída de [36], donde se describen los planos anatómicos de un bípedo.

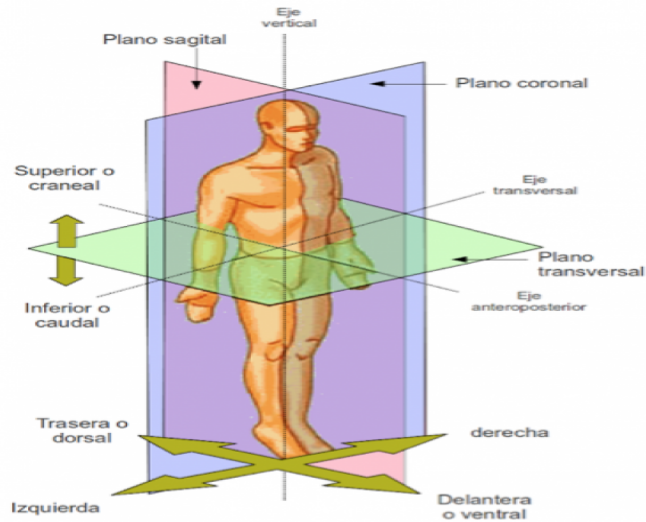


Figura 16: Planos anatómicos.

#### 2.3.1. Modelo 3D de la cadena articular completa

En la Figura 17 se aprecia la estructura del tren inferior del robot bípedo construida con la unión de las piezas anteriormente descritas, la cual es la necesaria para el desarrollo del proyecto.

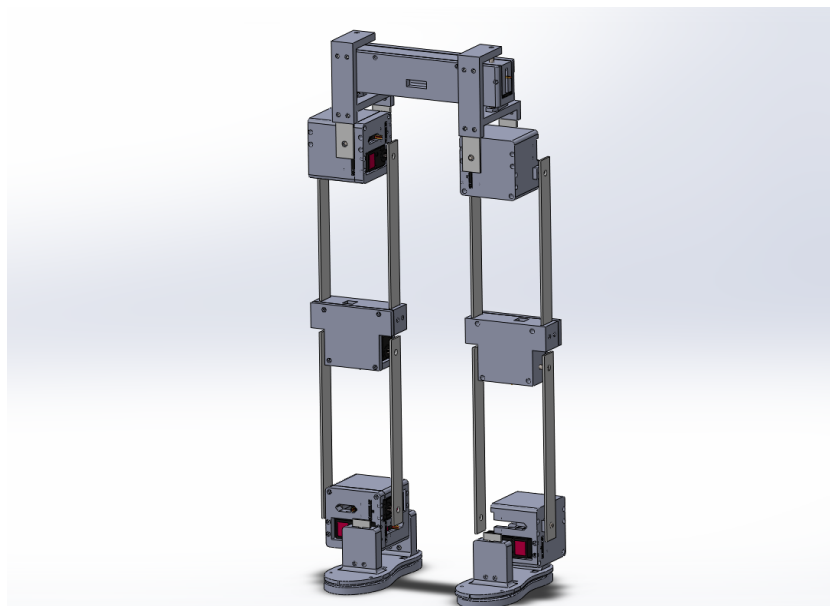


Figura 17: Pieza Completa.

### 2.3.2. Cadera

Es conocido, por los estudios realizados al ser humano, que la cadera permite la movilidad en tres dimensiones de la siguiente manera:

- Flexión y Extensión: Dentro del plano sagital y sobre el eje transversal, es decir, hace un movimiento hacia adelante y hacia atrás del cuerpo, capaz de mover toda la extremidad.
- Abducción y aducción: Dentro del plano coronal o frontal y el eje anteroposterior, en otras palabras, la extremidad realiza un movimiento lateral.
- Rotación interna y externa: Dentro del plano transversal y sobre el eje vertical o longitudinal, es decir, cuando la extremidad rota desde la parte superior de la cadera.

Para imitar la función de la cadera humana, se unen las piezas propuestas en la anterior sección denominadas; “Cadera Superior” (base y tapa), “Acople Muslos” y 2 piezas de “Articulación 2M” como se muestra en la Figura 18, esta unión forma la cadera completa, la cual cuenta con 3 DoF a cada lado (es decir 6 DoF en la cadera completa para ambas extremidades) esto permite a cada eslabón, el cual corresponde a una de las piernas del robot, tres planos de movimiento.

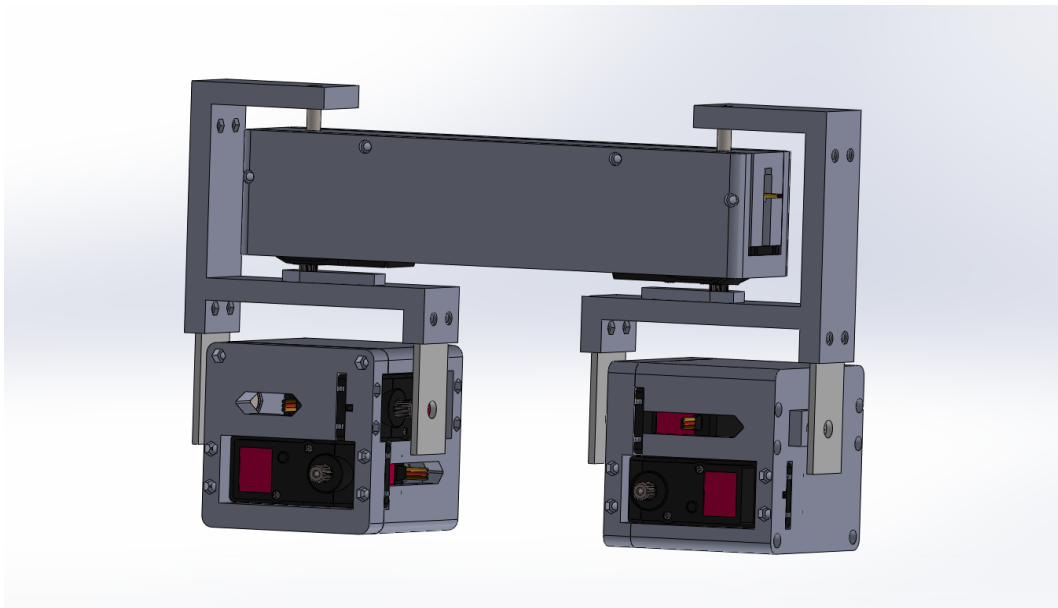


Figura 18: Ensamble de la Cadera completa.

### 2.3.3. Rodilla

Esta articulación tiene 1 DoF, que permite el movimiento de flexión / extensión con un rango de oscilación de 0-130 grados similar al de la rodilla humana.



### 2.3.4. Tobillo

La articulación del tobillo, que está ubicada en la parte inferior de cada extremidad del robot, permite dos movimientos: Flexión plantar y dorsal (movimientos hacia abajo y hacia arriba respectivamente) dentro del plano sagital e inversión y eversión (movimientos laterales) en el plano coronal o frontal.

### 2.3.5. Resumen

Resumen			
Articulación	DoF/pierna	DoF total	Movimiento/s
Cadera	3	6	- Flexión/Extensión - Abducción / Aducción - Rotación interna / externa
Rodilla	1	2	- Flexión/Extensión
Tobillo	2	4	- Flexión Dorsal / Plantar - Inversión / Eversión
Total	6	12	

Tabla 1: Movimientos articulares por ensamble.

## 2.4. Ensamble de la Estructura

Las secciones anteriores de este capítulo son una guía para la implementación de la estructura, gracias a los diseños CAD, creados conforme a las medidas establecidas previamente, y siguiendo la Figura 17 se tiene presente el orden lógico de implementación. A continuación, se presentan en detalle todos los componentes que conforman la estructura mecánica articular del robot bípedo PROBIC.

### Piezas en PLA (impresión 3D)

- 1 Cadera Superior
- 2 Acoples Muslos
- 4 Articulaciones 2M
- 2 Rodillas
- 2 Pies
- 12 Separadores

### Piezas metálicas

- 16 Uniones
- 12 Tornillos M6
- 12 pieza roja motor
- 12 Tuercas de seguridad
- 36 Tornillos M3 de 1.2 cm
- 16 Tornillos M3 de 2 cm
- 12 Tornillos M3 de 2.5 cm
- 40 Tornillos M3 de 3 cm

En la Figura 19 se encuentra la estructura del robot PROBIC completa y la estructura de la plataforma comercial “BioiD” como elemento de comparación de escala de tamaño, considerando que este mide último, mide aproximadamente 0.4m.



Figura 19: Estructura de PROBIC y Bioloid.

## 2.5. Software del Robot Bípedo

En este apartado se describen las herramientas software utilizadas en el proceso de diseño, simulación e implementación del robot.

### Matlab / Simulink

El software MATLAB [37], ha sido utilizado como una herramienta en el proceso de diseño y simulación del robot bípedo. Gracias a su amplia gama de funciones matemáticas y su capacidad para realizar análisis numéricos complejos, MATLAB ha facilitado la modelización y simulación de los algoritmos de control, la cinemática y la dinámica del robot. [38], .

### Arduino IDE

La plataforma Arduino de hardware y software de código abierto, se utilizó en la implementación electrónica del robot bípedo. Mediante el uso de una de las placas arduino comerciales y su lenguaje de programación simplificado, se logró controlar los actuadores y sensores del robot, establecer la comunicación entre los componentes y ejecutar los algoritmos de control desarrollados previamente en MATLAB. La robustez y la comunidad facilitan la integración de hardware y software, acelerando el proceso de construcción del robot. [39].

## Kicad

El software Kicad de diseño electrónico de código abierto, ha sido empleado para la creación de los circuitos impresos y la simulación del diseño electrónico del robot bípedo. Con sus herramientas y su capacidad para generar archivos de fabricación estándar, ha permitido la creación de placas de circuito impreso personalizadas y de mínima dimensión para las necesidades específicas del robot. Con esta herramienta, se logró una integración sólida y efectiva de los componentes electrónicos en el prototipo final del robot. [40].

## 2.6. Descripción Eléctrica del Robot

En este apartado se explora en detalle el diseño electrónico, usado para abordar los desafíos de forma eficiente y funcional, pues se debe tener en cuenta que se desarrolló un sistema capaz de gestionar y regular los movimientos de los doce servomotores en paralelo con movimientos suaves y estables, se realiza la lectura y procesamiento adecuados de ocho sensores de fuerza FSR y un acelerómetro para obtener información en tiempo real del entorno, y además se realiza el cálculo de los modelos cinemático, dinámico y del sistema de control para la planificación de los movimientos.

### 2.6.1. Características Eléctricas de los Componentes del Robot

Para el desarrollo eléctrico del robot bípedo PROBIC, en primera instancia se realiza un análisis de requerimientos, en el cual se establecen las características necesarias para el correcto funcionamiento del bípedo. A continuación se presenta un esquema general del diagrama eléctrico del robot con los componentes elegidos y posteriormente una breve descripción de cada uno de estos.

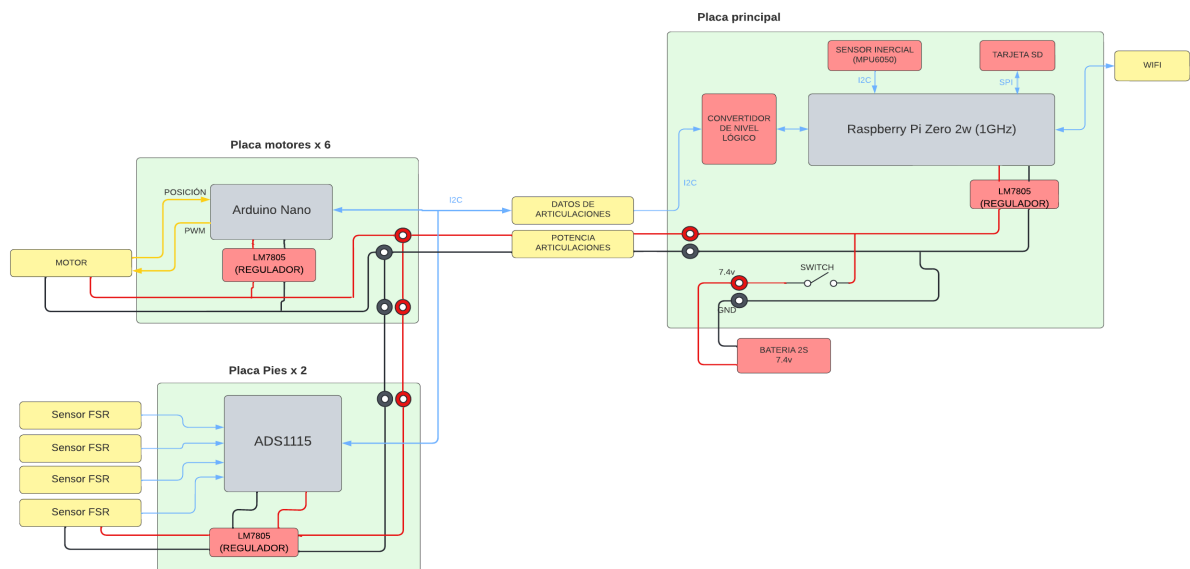


Figura 20: Esquema eléctrico básico.

## Generales

### LM7805

Son los reguladores seleccionados, como se puede observar en la Figura 20, serán usados en todas las placas y cuentan con las siguientes características:

- Voltaje de entrada entre 7 y 35 V.
- Temperatura de trabajo entre 0 y 125 °C.
- Voltaje de salida: 5 V.
- Corriente de salida: 1.2 A.

### Servo motores

Los DS5160SSG son los motores seleccionados por su relación alto torque / bajo peso, y cuentan con las siguientes características:

- Voltaje de funcionamiento: 6 V - 8,4 V.
- Dimensiones: 65 \* 30 \* 48 mm.
- Resistente al agua (IP67).
- Engranaje en acero inoxidable de alta precisión.
- Ángulo de orientación: máximo 180 grados.
- Velocidad: 0,15 seg /60 grados a 7,4 V.
- Relación de engranajes: 279.

Con el propósito de lograr los objetivos prácticos requeridos para nuestro proyecto actual, se procedió a efectuar modificaciones en los servomotores. Estas modificaciones permitieron obtener una salida adicional que se relaciona con la magnitud del potenciómetro. Mediante esta nueva medida, hemos logrado determinar con precisión el ángulo real de cada servomotor, información esencial para el próximo capítulo del proyecto, donde se lleva a cabo el modelado matemático. Para asegurar que los valores obtenidos se encuentren en términos de la variable deseada, se lleva a cabo una caracterización detallada de los sensores (Figura 21). Esta caracterización nos permite establecer las unidades reales con las cuales interactuamos en el desarrollo del proyecto, garantizando así resultados más precisos y coherentes.

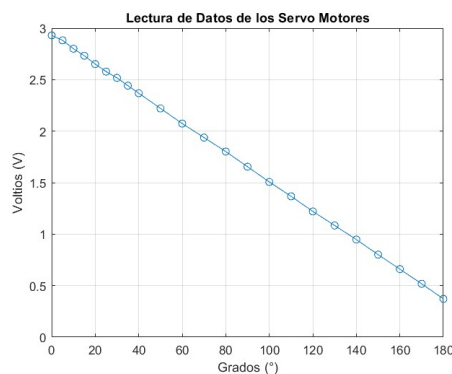


Figura 21: Caracterización sensor del motor.

## Placa principal

### Raspberry Pi Zero 2w

La Raspberry Pi Zero 2W es un ordenador de placa única, cuenta con las siguientes especificaciones técnicas:

- Procesador: CPU Arm Cortex-A53 de cuatro núcleos y 64 bits, con una frecuencia de 1 GHz.
- Conectividad: LAN inalámbrica IEEE 802.11b/g/n de 2,4 GHz, Bluetooth 4.2, BLE, antena incluida.
- Memoria: 512 MB LPDDR2.
- Potencia de entrada: 5 V CC 2,5 A.
- Temperatura de funcionamiento:  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $+70^{\circ}\text{C}$ .
- Dimensiones: 65mm x 30mm.
- Interfaces: Ranura para tarjeta microSD, mini puerto HDMI, conector de cámara CSI-2 y una huella despoblada para un encabezado GPIO de 40 pines compatible con HAT.

### Módulo MPU6050

Es un módulo basado en una Unidad de medición Inercial (conocido como IMU por sus siglas en inglés), incorpora un acelerómetro y un giroscopio. En los siguientes ítems se encuentran sus características más relevantes:

- Voltaje de operación de 3.3 V.
- Permite 6 grados de libertad (Para los 3 ejes del acelerómetro y del giroscopio).
- Integra un procesador digital de movimiento (DMP).
- Comunicación  $I^2C$ .
- Grados de escalas programables son: para el acelerómetro 2g/4g/8g/16g y para el giroscopio 250/500/1000/2000 *grados/s*.

### Módulo Conversor Nivel Lógico Bidireccional BSS138 4 CH

Es un dispositivo que convierte las señales de 4 pines de entrada de un nivel a otro, en este caso se utilizan las siguientes características:

- Convierte señales de 3.3V a 5V y viceversa.
- Resuelve problemas en el uso de la comunicación  $I^2C$  entre los pines de la placa principal (3.3v) y los pines de las placas de los motores (5V).

## Placa motores

Es implementada para controlar cada articulación y así evitar que la placa principal tenga sobreprocesamiento, adicionalmente mediante la comunicación serial permite reducir el número de conexiones en el robot.

## Arduino Nano

Es una placa de desarrollo basado en el ATmega328, y cuenta con las siguientes características:

- Procesador ATmega328 de 16 MHz
- Memoria: 2KB SRAM, 32KB flash 1KB EEPROM.
- Comunicaciones:  $I^2C$ , UART y SPI.
- Voltaje de entrada (recomendado): 7-12V
- Corriente DC por Pin I/O: 20mA.

## Placa Pies

### ADS1115

Convertidor analógico digital (ADC) de cuatro canales, cuenta con las siguientes características técnicas:

- Rango de voltaje de alimentación: 2,0 V a 5,5 V
- Precisión: 16 bits a 860 muestras / segundo a través de  $I^2C$
- Bajo consumo de corriente: 150  $\mu A$  (Modo de conversión continua)
- Velocidad de datos programable: de 8 SPS hasta 860 SPS
- Comunicaciones: Interfaz  $I^2C$

### Sensor de fuerza DF9-40

El Film Pressure Sensor (DF9-40) es el sensor elegido para medir las fuerzas distribuidas sobre extremos de cada pie del robot, cuenta con las siguientes características:

- Rango de medida de este sensor es de 0-5 kg
- Precisión: 22,5 % (rango de medida 85 %)
- Tiempo de respuesta de 1 ms
- Tensión de prueba de 3,3 Vcc
- Resistencia inicial de 10 M $\Omega$  (sin carga)

### 2.6.2. Diseño de las placas de circuito impreso (PCB)

Debido a las características específicas de los componentes anteriormente mencionados, es necesario realizar un diseño personalizado de la PCB. Para ello se emplea la herramienta KiCad, en primer lugar se realizan los diagramas electrónicos de las PCB y posteriormente se diseñan las pistas de cobre basadas en el anterior esquema con la misma herramienta. En la Figura 22 se puede apreciar el esquema de la placa principal, la cual es ubicada en la mitad de la Pieza Cadera Superior, Figura 7, su posición es ideal para la simetría del robot y la distribución de pesos equilibrada, ya que de esta, salen conexiones para ambas extremidades del mismo, esta placa procesa todas las señales de robot, entradas y salidas.

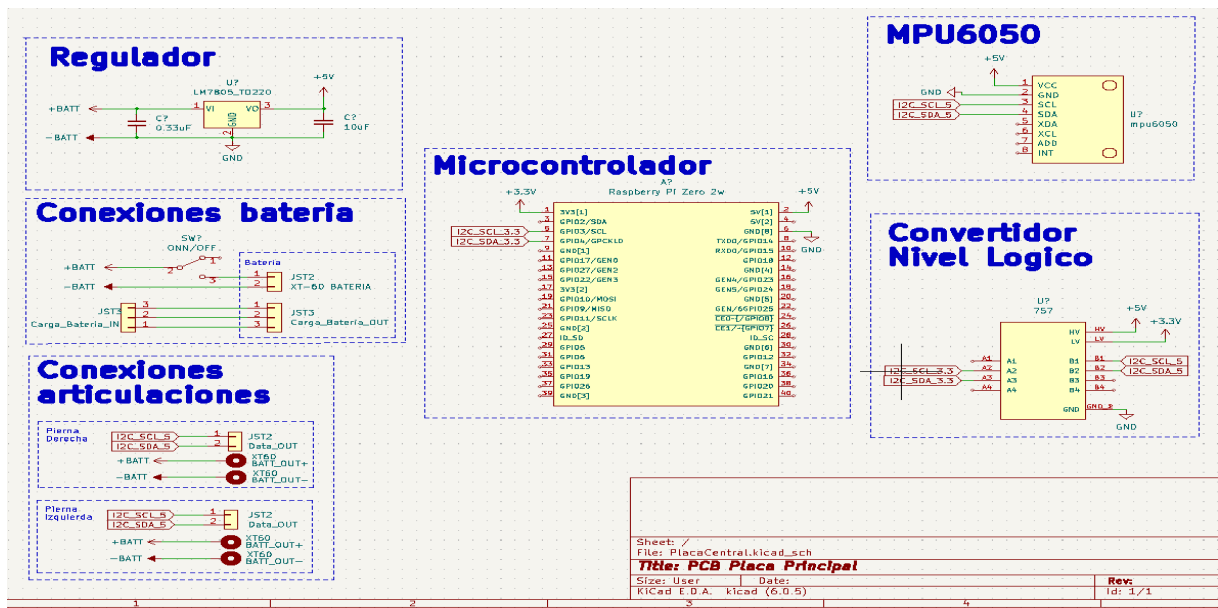


Figura 22: Esquema de la placa principal.

En el proyecto actual, se requieren seis placas para controlar los motores. Cada extremidad requiere tres placas: una para la cadera, que controla los tres motores en un lado de la misma; otra para la rodilla; y finalmente, una placa encargada de controlar los dos motores del tobillo. A continuación, se muestra el esquema de la placa.

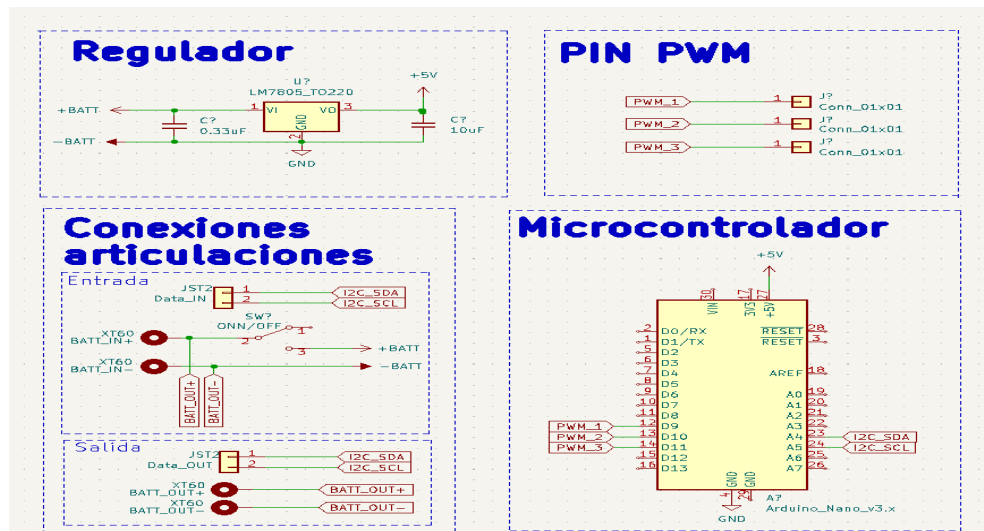


Figura 23: Esquema de la placa para motores.

En la “Placa pies” se encuentra un módulo convertidor analógico digital (ADC), el cual se encarga de recoger los datos de los sensores FSR ubicados en el zapato del robot y comunicarlos a la “Placa principal”.

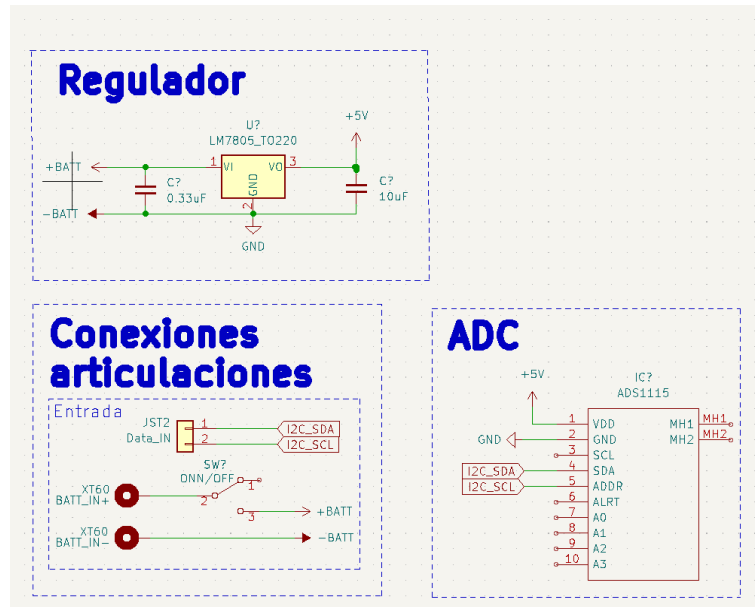


Figura 24: Esquema de la placa de pies.

Una vez se crearon todos los esquemas, se procedió a diseñar las placas de circuito impreso en la herramienta, se generan los archivos Gerber correspondientes a cada placa y estos son llevados a la herramienta CamBam, donde se obtiene el código G, el cual es usado en la máquina CNC industrial de la Universidad del Cauca, posteriormente se realiza la soldadura de los componentes eléctricos de cada placa y se estiliza cada placa.

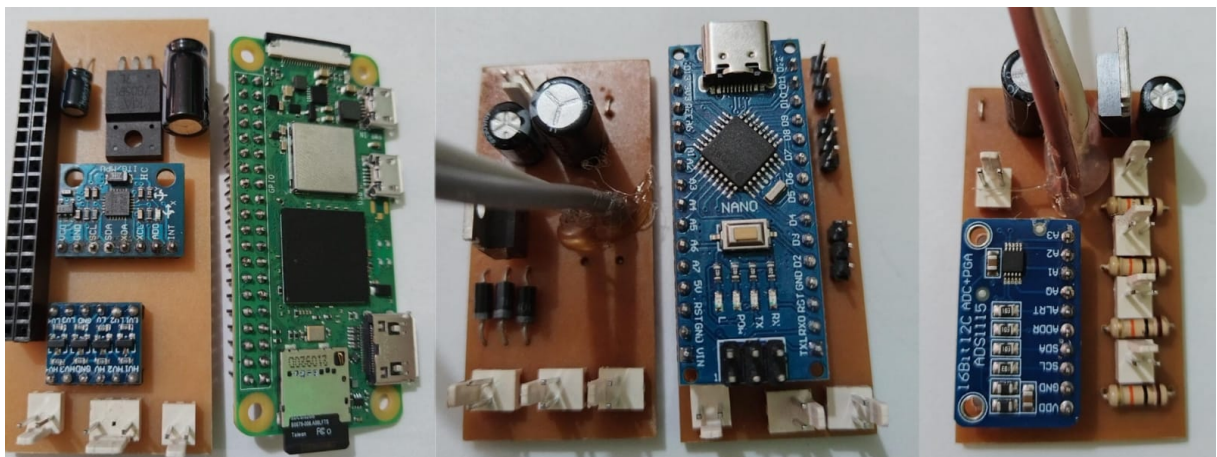


Figura 25: Placas de circuito impreso: principal, motores y pies.



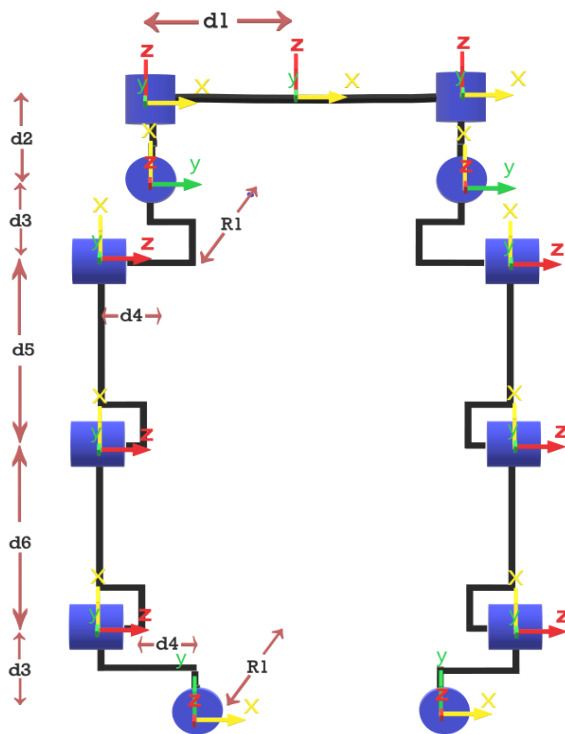
### 3. MODELO MATEMÁTICO DEL ROBOT

En este capítulo, se abordan los fundamentos matemáticos que sustentan los modelos cinemático y dinámico del robot. Estos modelos proporcionan un análisis detallado de su comportamiento, y a su vez, permiten un control completo de sus movimientos. Este capítulo será de utilidad para el presente proyecto al igual que futuros desarrollos sobre la plataforma.

#### 3.1. Modelo geométrico directo (MGD)

Con el objetivo de obtener la representación geométrica de las características físicas del robot, se hace uso del método de Matrices de Transformación Homogénea, el cual se basa en el análisis del sistema de coordenadas de cada eslabón y mediante productos matriciales sucesivos se obtiene la posición espacial del efector final, en este caso, representados por cada pie del robot, a partir de las posiciones articulares de rotación.

Como primer paso, se establecen los ejes de coordenada para cada actuador y las distancias que los separan, como se puede ver en la Figura 26 . Adicionalmente se selecciona el marco de referencia ( $X_o$ ,  $Y_o$  y  $Z_o$ ) del robot, que se encuentra ubicado en el centro de la cadera y el marco de referencia inercial ( $X_r$ ,  $Y_r$  y  $Z_r$ ) que se encuentra ubicado en el punto medio entre los pies del robot.



	Distancia (cm)
d1	10.1
d2	9.5
d3	3
d4	2
d5	27.5
d6	23
R1	2

Tabla 2: Distancias

Figura 26: Posición de ejes de coordenada para cada articulación.

Mediante la matriz de transformación  ${}^{j-1}T_j$  se pasa del marco de referencia  $j - 1$  al marco de referencia  $j$ , donde la matriz de rotación  ${}^{j-1}R_j$  denota la orientación del marco

de referencia  $j$  con respecto al marco de referencia  $j - 1$ , y el vector  ${}^{j-1}p_j$  denota la posición cartesiana del marco de referencia  $j$  con respecto al  $j - 1$ , esto se puede ver en las ecuaciones siguientes.

$${}^{j-1}T_j = \begin{bmatrix} {}^{j-1}R_j & {}^{j-1}p_j \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

A partir de los sistemas de coordenadas de cada articulación, se identifica sobre cuál de los ejes el actuador genera la rotación para obtener la matriz  ${}^{j-1}R_j$ , y el vector  ${}^{j-1}p_j$  se obtiene mediante las distancias que existen entre la articulación  $j - 1$  y  $j$  donde:

Rotaciones en el eje X:

$${}^{j-1}R_j = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta_j & -S\theta_j \\ 0 & S\theta_j & C\theta_j \end{bmatrix} \quad (8)$$

Rotaciones en el eje Z:

$${}^{j-1}R_j = \begin{bmatrix} C\theta_j & -S\theta_j & 0 \\ S\theta_j & C\theta_j & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Rotaciones en el eje Y:

$${}^{j-1}R_j = \begin{bmatrix} C\theta_j & 0 & S\theta_j \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\theta_j & 0 & C\theta_j \end{bmatrix} \quad (9)$$

$${}^{j-1}p_j = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \quad (11)$$

Donde:

$$S\theta_j = \sin \theta_j \quad C\theta_j = \cos \theta_j$$

Reemplazando las matrices de rotación y el vector 11 correspondiente a cada articulación en 7 se obtiene:

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & S\theta_1 & 0 & d_1 \\ -S\theta_1 & C\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta_4 & -S\theta_4 & 0 \\ 0 & S\theta_4 & C\theta_4 & -d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} C\theta_2 & 0 & -S\theta_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ S\theta_2 & 0 & C\theta_2 & -d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta_5 & -S\theta_5 & 0 \\ 0 & S\theta_5 & C\theta_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_4 \\ 0 & C\theta_3 & -S\theta_3 & -R_1 \\ 0 & S\theta_3 & C\theta_3 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} C\theta_6 & 0 & -S\theta_6 & -d_4 \\ 0 & 1 & 0 & -R_1 \\ S\theta_6 & 0 & C\theta_6 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Las ecuaciones de la 12 a la17 corresponden a las matrices de transformación para la cadena articular derecha.

Finalmente la transformación para pasar del marco de referencia 0 al marco de referencia de la articulación 6 (cadena articular derecha), se calcula en base a  ${}^0T_6$  tal que  $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ .

$${}^0T_6 = \prod_{j=1}^6 {}^{j-1}T_j = {}^0T_1 * {}^1T_2 * {}^2T_3 * {}^3T_4 * {}^4T_5 * {}^5T_6 \quad (18)$$

Remplazando las ecuaciones en 18, se obtiene:

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} N_{x,x} & O_{x,y} & A_{x,z} & P_x \\ N_{y,x} & O_{y,y} & A_{y,z} & P_y \\ N_{z,x} & O_{z,y} & A_{z,z} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Donde:

$$\begin{aligned} N_{x,x} = & \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) \cos(\theta_6) - \sin(\theta_6)(\cos(\theta_5)(\cos(\theta_4)(\sin(\theta_1) \sin(\theta_3)) \\ & + \cos(\theta_1) \cos(\theta_3) \sin(\theta_2)) + \sin(\theta_4)(\cos(\theta_3) \sin(\theta_1) \\ & - \cos(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3))) + \sin(\theta_5)(\cos(\theta_4)(\cos(\theta_3) \sin(\theta_1) \\ & - \cos(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3)) - \sin(\theta_4)(\sin(\theta_1) \sin(\theta_3) \\ & + \cos(\theta_1) \cos(\theta_3) \sin(\theta_2)))) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} O_{x,y} = & \cos(\theta_5)(\cos(\theta_4)(\cos(\theta_3) \sin(\theta_1) - \cos(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3)) \\ & - \sin(\theta_4)(\sin(\theta_1) \sin(\theta_3) + \cos(\theta_1) \cos(\theta_3) \sin(\theta_2))) \\ & - \sin(\theta_5)(\cos(\theta_4)(\sin(\theta_1) \sin(\theta_3) + \cos(\theta_1) \cos(\theta_3) \sin(\theta_2)) \\ & + \sin(\theta_4)(\cos(\theta_3) \sin(\theta_1) - \cos(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3))) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{x,z} = & -\cos(\theta_6)(\cos(\theta_5)(\cos(\theta_4)(\sin(\theta_1) \sin(\theta_3) \\ & + \cos(\theta_1) \cos(\theta_3) \sin(\theta_2)) + \sin(\theta_4)(\cos(\theta_3) \sin(\theta_1) \\ & - \cos(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3))) + \sin(\theta_5)(\cos(\theta_4)(\cos(\theta_3) \sin(\theta_1) \\ & - \cos(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3)) - \sin(\theta_4)(\sin(\theta_1) \sin(\theta_3) \\ & + \cos(\theta_1) \cos(\theta_3) \sin(\theta_2)))) - \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) \sin(\theta_6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_x = & d_1 + d_5(\sin(\theta_1) \sin(\theta_3) + \cos(\theta_1) \cos(\theta_3) \sin(\theta_2)) \\ & + d_3(\cos(\theta_5)(\cos(\theta_4)(\sin(\theta_1) \sin(\theta_3) + \cos(\theta_1) \cos(\theta_3) \sin(\theta_2)) \\ & + \sin(\theta_4)(\cos(\theta_3) \sin(\theta_1) - \cos(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3))) \\ & + \sin(\theta_5)(\cos(\theta_4)(\cos(\theta_3) \sin(\theta_1) - \cos(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3)) \\ & - \sin(\theta_4)(\sin(\theta_1) \sin(\theta_3) + \cos(\theta_1) \cos(\theta_3) \sin(\theta_2)))) \\ & - r1(\cos(\theta_5)(\cos(\theta_4)(\cos(\theta_3) \sin(\theta_1) - \cos(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3)) \\ & - \sin(\theta_4)(\sin(\theta_1) \sin(\theta_3) + \cos(\theta_1) \cos(\theta_3) \sin(\theta_2))) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \sin(\theta_5)(\cos(\theta_4)(\sin(\theta_1) \sin(\theta_3) + \cos(\theta_1) \cos(\theta_3) \sin(\theta_2)) \\
& + \sin(\theta_4)(\cos(\theta_3) \sin(\theta_1) - \cos(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3))) \\
& + d_6(\cos(\theta_4)(\sin(\theta_1) \sin(\theta_3) + \cos(\theta_1) \cos(\theta_3) \sin(\theta_2)) \\
& + \sin(\theta_4)(\cos(\theta_3) \sin(\theta_1) - \cos(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3))) \\
& - r_1 \sin(\theta_1) + d_3 \cos(\theta_1) \sin(\theta_2)]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_{y,x} = & - \sin(\theta_6)(\cos(\theta_5)(\cos(\theta_4)(\cos(\theta_1) \sin(\theta_3) \\
& - \cos(\theta_3) \sin(\theta_1) \sin(\theta_2)) + \sin(\theta_4)(\cos(\theta_1) \cos(\theta_3) \\
& + \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3))) + \sin(\theta_5)(\cos(\theta_4)(\cos(\theta_1) \cos(\theta_3) \\
& + \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3)) - \sin(\theta_4)(\cos(\theta_1) \sin(\theta_3) \\
& - \cos(\theta_3) \sin(\theta_1) \sin(\theta_2)))) - \cos(\theta_2) \cos(\theta_6) \sin(\theta_1)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
O_{y,y} = & \cos(\theta_5)(\cos(\theta_4)(\cos(\theta_1) \cos(\theta_3) + \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3)) \\
& - \sin(\theta_4)(\cos(\theta_1) \sin(\theta_3) - \cos(\theta_3) \sin(\theta_1) \sin(\theta_2))) \\
& - \sin(\theta_5)(\cos(\theta_4)(\cos(\theta_1) \sin(\theta_3) - \cos(\theta_3) \sin(\theta_1) \sin(\theta_2)) \\
& + \sin(\theta_4)(\cos(\theta_1) \cos(\theta_3) + \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3)))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_{y,z} = & \cos(\theta_2) \sin(\theta_1) \sin(\theta_6) - \cos(\theta_6)(\cos(\theta_5)(\cos(\theta_4)(\cos(\theta_1) \sin(\theta_3) \\
& - \cos(\theta_3) \sin(\theta_1) \sin(\theta_2)) + \sin(\theta_4)(\cos(\theta_1) \cos(\theta_3) \\
& + \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3))) + \sin(\theta_5)(\cos(\theta_4)(\cos(\theta_1) \cos(\theta_3) \\
& + \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3)) - \sin(\theta_4)(\cos(\theta_1) \sin(\theta_3) \\
& - \cos(\theta_3) \sin(\theta_1) \sin(\theta_2))))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_y = & d_5(\cos(\theta_1) \sin(\theta_3) - \cos(\theta_3) \sin(\theta_1) \sin(\theta_2)) \\
& + d_3(\cos(\theta_5)(\cos(\theta_4)(\cos(\theta_1) \sin(\theta_3) \\
& - \cos(\theta_3) \sin(\theta_1) \sin(\theta_2)) + \sin(\theta_4)(\cos(\theta_1) \cos(\theta_3) \\
& + \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3))) + \sin(\theta_5)(\cos(\theta_4)(\cos(\theta_1) \cos(\theta_3) \\
& + \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3)) - \sin(\theta_4)(\cos(\theta_1) \sin(\theta_3) \\
& - \cos(\theta_3) \sin(\theta_1) \sin(\theta_2)))) - r_1(\cos(\theta_5)(\cos(\theta_4)(\cos(\theta_1) \cos(\theta_3) \\
& + \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3)) - \sin(\theta_4)(\cos(\theta_1) \sin(\theta_3) \\
& - \cos(\theta_3) \sin(\theta_1) \sin(\theta_2))) - \sin(\theta_5)(\cos(\theta_4)(\cos(\theta_1) \sin(\theta_3) \\
& - \cos(\theta_3) \sin(\theta_1) \sin(\theta_2)) + \sin(\theta_4)(\cos(\theta_1) \cos(\theta_3) \\
& + \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3))) - r_1 \cos(\theta_1) + d_6(\cos(\theta_4)(\cos(\theta_1) \sin(\theta_3) \\
& - \cos(\theta_3) \sin(\theta_1) \sin(\theta_2)) + \sin(\theta_4)(\cos(\theta_1) \cos(\theta_3) \\
& + \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) \sin(\theta_3))) - d_3 \sin(\theta_1) \sin(\theta_2)
\end{aligned}$$

$$N_{z,x} = \cos(\theta_6) \sin(\theta_2) + \cos(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \cos(\theta_2) \sin(\theta_6)$$

$$O_{z,y} = \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \cos(\theta_2)$$

$$A_{z,z} = \cos(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \cos(\theta_2) \cos(\theta_6) - \sin(\theta_2) \sin(\theta_6)$$

$$P_z = -d_2 - d_3 \cos(\theta_2) - d_6 \cos(\theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_2) \\ - d_5 \cos(\theta_2) \cos(\theta_3) - d_3 \cos(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \cos(\theta_2) \\ - r_1 \sin(\theta_3 + \theta_4 + \theta_5) \cos(\theta_2)$$

### 3.1.1. Simulación modelo geométrico directo

Mediante la herramienta de simulación de Simscape Multibody de Matlab, es posible realizar el análisis cinemático de un sistema físico proporcionando las dimensiones y propiedades físicas de las piezas. En la Figura 27 se presenta el MGD del robot en la herramienta mencionada.

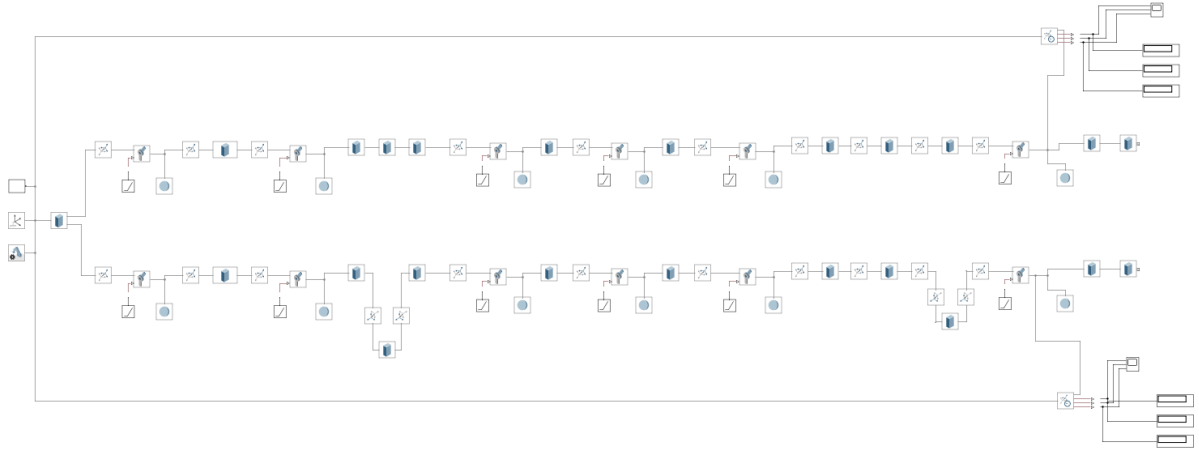


Figura 27: Modelo PROBIC Simulink Multibody.

Mediante el modelo realizado en la herramienta, se realiza la comprobación del correcto funcionamiento del MGD presentado anteriormente, pues al realizar diferentes simulaciones con posiciones articulares arbitrarias, se obtienen los mismos resultados para ambos modelos. En la Figura 28 se puede ver los resultados obtenidos en la herramienta y en la Figura 29 se pueden ver los resultados mediante el MGD.

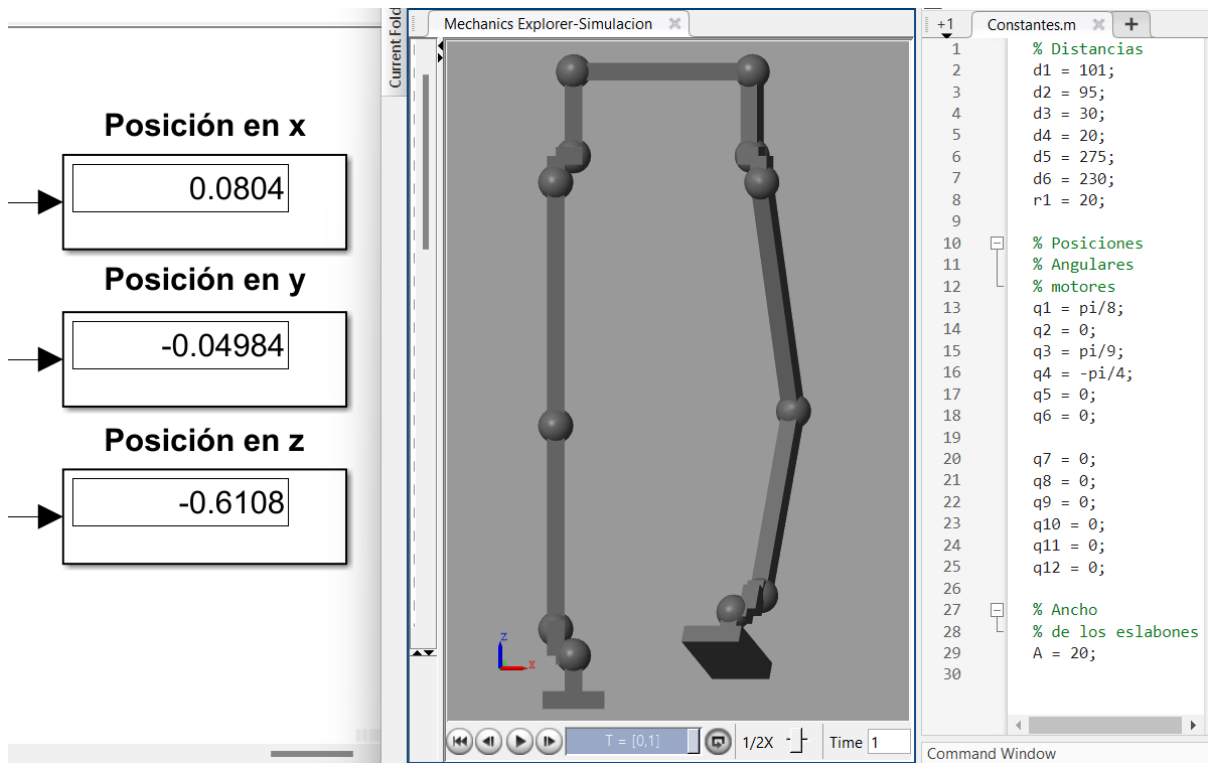


Figura 28: Simulación MGD en Simulink Multibody.

```

66     M0T1(1:3,4);
67     M0T2 = M0T1*M1T2;
68     M0T2(1:3,4);
69     M0T3 = M0T2*M2T3;
70     M0T3(1:3,4);
71     M0T4 = M0T3*M3T4;
72     M0T4(1:3,4);
73     M0T5 = M0T4*M4T5;
74     M0T5(1:3,4);
75     M0T6 = M0T5*M5T6

```

---

Command Window

```

M0T6 =

    0.9239    0.3468    0.1617    8.0354  Px
   -0.3827    0.8373    0.3904   -4.9845  Py
         0   -0.4226    0.9063  -61.0603  Pz
         0         0         0         1.0000

```

Figura 29: Respuesta MGD por matrices de transformación homogénea.

### 3.2. Modelo geométrico inverso (MGI)

El modelo geométrico inverso es utilizado para establecer las configuraciones articulares (en este caso particular, las 12 variables  $\theta_j$ ) necesarias para alcanzar una posición cartesiana deseada en el efector final, en este proyecto se refiere a cada uno de los pies. A diferencia del MGD, la solución de MGI no suele ser única, es por esto que se trata de encontrar una solución cerrada, es decir, se agregan ciertas limitaciones o restricciones para asegurar que la solución encontrada sea la más adecuada para el robot bípedo.

Existen varios métodos para encontrar la solución a este modelo, entre los cuales se encuentran: Método geométrico, método por matrices de transformación homogénea [41] y desacoplamiento cinemático o método de Pieper. Los primeros dos métodos son ampliamente usados para sistemas de hasta 3 DoF, sin embargo, para sistemas de mayor orden la complejidad matemática aumenta considerablemente, es por esto que para sistemas de 6 DoF, como lo es cada extremidad del robot, el desacople cinemático suele ser usado.

Para su desarrollo, se debe partir de las matrices de transformación homogénea, resultado del MGD, y se pueden ver expresadas en una visión general en la Ecuación 18 para la extremidad derecha; sus respectivos valores se encuentran en 19, el cual es el resultado de la multiplicación matricial de las ecuaciones 12 a la 17.

En primer lugar, se debe extraer la matriz de rotación  ${}^iR_j$  de las matrices mencionadas anteriormente y posteriormente calcular la matriz acumulada, es decir:

$${}^0R_6 = \prod_{j=1}^6 {}^{j-1}R_j = {}^0R_1 * {}^1R_2 * {}^2R_3 * {}^3R_4 * {}^4R_5 * {}^5R_6 \quad (20)$$

Seguidamente, se deben encontrar las variables  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  y  $\theta_3$ , que corresponden a la cadera del robot, para este proceso se emplean las inversas de las matrices.

### 3.3. Modelo dinámico simplificado

El modelo dinámico simplificado propuesto para el robot bípedo PROBIC consiste en analizar el CoM de todo el sistema a partir de cada uno de los cuerpos que lo componen, es decir, se calcula el CoM total aproximado a partir de las posiciones del CoM de las articulaciones y eslabones del robot. Para realizar este análisis, el robot se trata como una serie de péndulos acoplados con masas puntuales, lo cual permite una representación fidedigna del sistema real, ya que considera todas las articulaciones del robot, a diferencia de otros modelos, como el péndulo invertido simple e incluso el 3DLIPM, que no capturan la complejidad y las interacciones de todas las partes del robot.

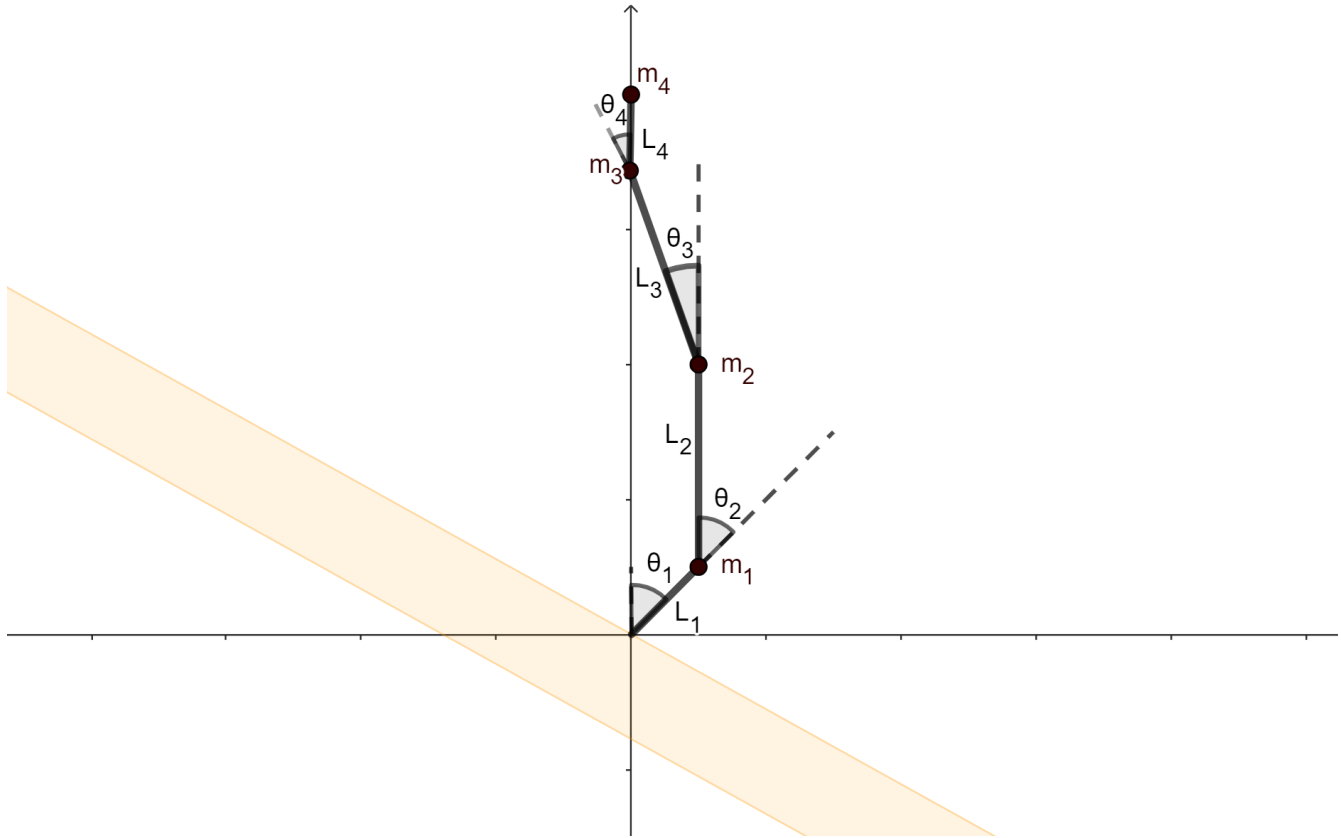


Figura 30: Diagrama de cuerpo libre para CoM.

Para el cálculo del CoM total se hace uso de la fórmula para sistemas de masas puntuales, que se puede observar en la Ecuación 21, donde  $m_i$  corresponde a su masa y  $\vec{r}_i$  es la posición de su CoM.

$$r_{CoM}^{\vec{}} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{r}_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (21)$$

La Figura 30 proporciona una clara visión del CoM de cada articulación, adicionalmente la ubicación de los ángulos requeridos para describir el comportamiento del CoM en el eje de profundidad Y, que fue establecido para realizar el análisis de control en este proyecto, ya que es en este eje, para el cual se implementó el control. Así que la Ecuación 21 se adapta de la siguiente forma:

$$Y_{CoM} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (22)$$

Donde:

$$y_i = y_{i-1} + l_i \sin\left(\sum_{j=1}^i \Theta_j\right) \quad (23)$$

Por tanto las ecuaciones quedan de la siguiente forma:



$$\begin{aligned}
y_1 &= L_1 \sin(\Theta_1) \\
y_2 &= L_1 \sin(\Theta_1) + L_2 \sin(\Theta_1 + \Theta_2) \\
y_3 &= L_1 \sin(\Theta_1) + L_2 \sin(\Theta_1 + \Theta_2) + L_3 \sin(\Theta_1 + \Theta_2 + \Theta_3) \\
y_4 &= L_1 \sin(\Theta_1) + L_2 \sin(\Theta_1 + \Theta_2) + L_3 \sin(\Theta_1 + \Theta_2 + \Theta_3) + L_4 \sin(\Theta_1 + \Theta_2 + \Theta_3 + \Theta_4)
\end{aligned}$$

con lo anterior:

$$\begin{aligned}
Y_{\text{CoM}} &= \frac{m_1[L_1 \sin(\Theta_1)] + m_2[L_1 \sin(\Theta_1) + L_2 \sin(\Theta_1 + \Theta_2)]}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4} \\
&+ \frac{m_3[L_1 \sin(\Theta_1) + L_2 \sin(\Theta_1 + \Theta_2) + L_3 \sin(\Theta_1 + \Theta_2 + \Theta_3)]}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4} \\
&+ \frac{m_4[L_1 \sin(\Theta_1) + L_2 \sin(\Theta_1 + \Theta_2) + L_3 \sin(\Theta_1 + \Theta_2 + \Theta_3) + L_4 \sin(\Theta_1 + \Theta_2 + \Theta_3 + \Theta_4)]}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4}
\end{aligned} \tag{24}$$

Además de calcular el CoM en el eje Y, es importante mencionar que el mismo procedimiento puede replicarse para determinar la ubicación del CoM en la dirección del eje X ( $X_{\text{CoM}}$ ). Siguiendo una metodología similar a la explicada previamente, se pueden considerar las masas y posiciones de las distintas partes del sistema en el plano XZ.

Con lo anterior, el robot se puede representar mediante un péndulo simple, como se observa en la Figura 31.

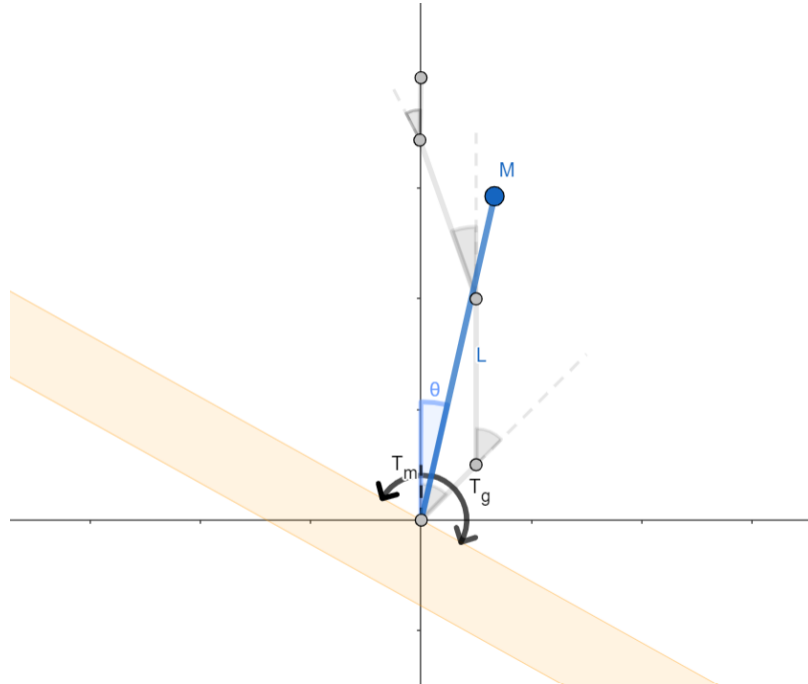


Figura 31: Modelo péndulo simple.

De la Figura 31, se realiza un análisis de torques en el punto de contacto con el suelo, dado en la Ecuación 25, donde  $\tau_m$  es el torque dado por los actuadores del robot y  $\tau_g$  es el torque en consecuencia del peso del robot,  $j$  el momento de inercia del sistema (de un péndulo simple) y  $\ddot{\theta}$  la aceleración angular.

$$j\ddot{\theta} = \tau_m - \tau_g \quad (25)$$

El torque  $\tau_m$  se representa en la ecuación 26, donde  $V$  es el voltaje de entrada del actuador y  $K_m$  es constante de torque propia del actuador.

$$\tau_m = K_m V \quad (26)$$

El torque  $\tau_g$  se representa en la ecuación 27, donde  $L$  es la longitud del péndulo,  $\theta$  el ángulo de posición del CoM en el eje Y con respecto al eje Z,  $m$  y  $g$  son la masa del robot y la aceleración de la gravedad respectivamente; los valores  $L$  y  $\theta$  se pueden obtener a partir del cálculo de la posición del CoM anteriormente mencionado.

$$\tau_g = Lmg \sin \theta \quad (27)$$

Reemplazando las ecuaciones 26 y 27 en 25, se obtiene la ecuación 28, correspondiente al modelo dinámico simplificado.

$$j\ddot{\theta} = K_m V - Lmg \sin \theta \quad (28)$$

Finalmente ya que se cuentan con actuadores tipo servomotores, se propuso realizar el controlador a partir de la ecuación 22, y no sobre la ecuación 28 del modelo dinámico, ya que los actuadores reciben posiciones angulares y no valores de voltaje específicamente.

## 4. PROPUESTA DE CONTROL DE EQUILIBRIO PARA EL ROBOT PROBIC

Después de haber construido la estructura del robot y su electrónica, calcular los modelos matemáticos en el capítulo anterior. A continuación, se procede con el controlador, se expone paso a paso su formulación, simulación e implementación para el robot bípedo real de tamaño humano PROBIC.

### 4.1. Formulación del Controlador

Con el objetivo de diseñar un sistema de control en fase de bipedestación estática adecuado para el robot propuesto, se decide considerar el CoM del robot como criterio de estabilidad y realizar el control sobre esta característica. Además, teniendo en cuenta que en el capítulo anterior se propuso un modelo estático que proporciona este criterio, se decide implementar un control basado en este modelo.

En cuanto a la estrategia de control, se optó por la estrategia de tobillo, ya que ésta se emplea comúnmente para gestionar perturbaciones de baja intensidad (como lo es en este contexto, donde el control del equilibrio se enfoca en la fase de bipedestación estática). La selección de esta estrategia se basa en la conclusión dada en [42], donde se demuestra

que las variaciones en el ZMP, generadas por cambios en la inclinación de la plataforma, se corrigen de manera más rápida y efectiva utilizando esta técnica.

Para llevar a cabo esta estrategia, es necesario realizar control sobre el motor que dirige el movimiento del robot a lo largo del eje Y en el tobillo. Con el fin de alcanzar este objetivo, se ha tomado la decisión de emplear un controlador PID, ya que éste se emplea extensamente en sistemas de control industrial, gracias a que puede ser aplicado de manera versátil en la mayoría de sistemas, además de su capacidades para aplicaciones en tiempo real, aspectos fundamentales en un robot bípedo.

En este sentido, se parte de la base conceptual de un controlador PID, que contempla los componentes esenciales del lazo de control, comprendiendo las acciones proporcional, derivativa e integral, al cual se le realizan dos modificaciones que mejoran el desempeño de la acción derivativa. La primera consiste en realizar la derivada de la salida en lugar del error, para evitar cambios instantáneos en el esfuerzo de control que se traducen en movimientos bruscos del robot y la segunda en limitar su amplitud para así, rechazar señales de ruido presentes en los actuadores eléctricos. De esta manera, se avanza hacia la sintonización de las constantes del controlador, donde se ha optado por emplear el método heurístico descrito en [43], como uno de los métodos de versátiles y de rápida puesta en marcha para robots industriales.

## 4.2. Simulación Controlador

Para simular el controlador PID del robot se empleó la herramienta Simulink de Matlab, donde el sistema está representado por bloques, los cuales pueden observarse de manera general en la Figura 32. El sistema cuenta con una referencia  $Y_{CoM}$  en la entrada, la cual es realimentada con la señal de la salida, restando ambas señales obteniendo así el error.

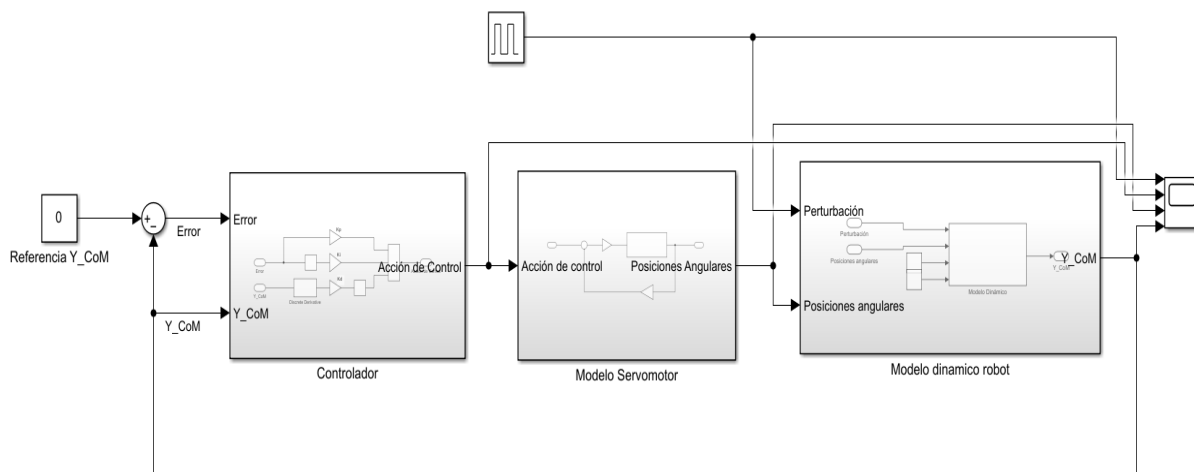


Figura 32: Diagrama de Bloques Simulación.

El primer bloque (Figura 33) que encontramos es referente al controlador de forma individual. Como se puede observar, el controlador PID aplica una acción derivativa,

limitada en amplitud, a la salida del sistema ( $Y_{CoM}$ ); finalmente, como salida de este subsistema (o bloque), se suman las tres acciones del PID.

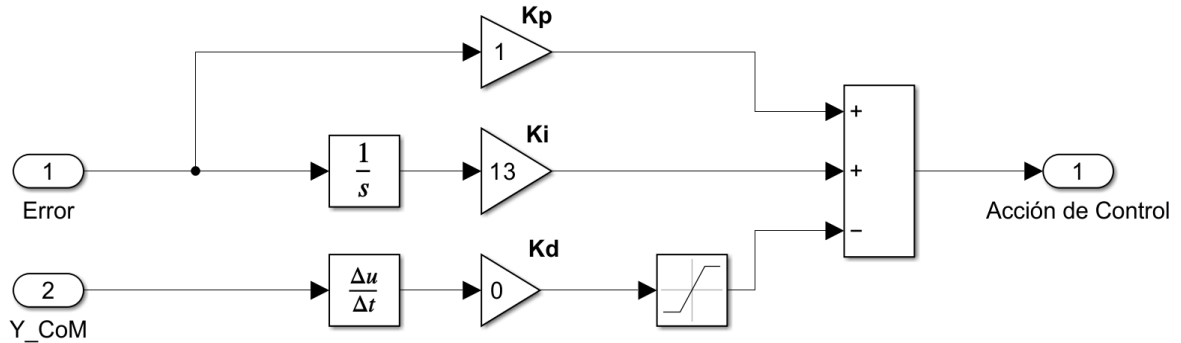


Figura 33: Diagrama de Bloques Controlador PID.

El siguiente bloque en el flujo del lazo de control se refiere a un modelo aproximado del servomotor, pues no se conocen las características electromecánicas del servomotor real (Figura 34), al cual le es aplicada la acción de control obtenida anteriormente, amplificando su señal antes de ser suministrada a otro bloque que representa un motor DC, y posteriormente realimentar el lazo con el potenciómetro interno.

En la Figura 35, encontramos los bloques que en conjunto representan un motor DC (desde la inductancia y resistencia interna) que limitan la corriente que fluye a través del motor, y cómo ésta es convertida en movimiento, generando un torque mecánico, que posteriormente es afectado por el momento de inercia que afecta directamente su velocidad y posición angular, además de considerar el coeficiente de fricción y la fuerza contra electromotriz o Back-EMF, para poder obtener una representación aproximada del sistema.

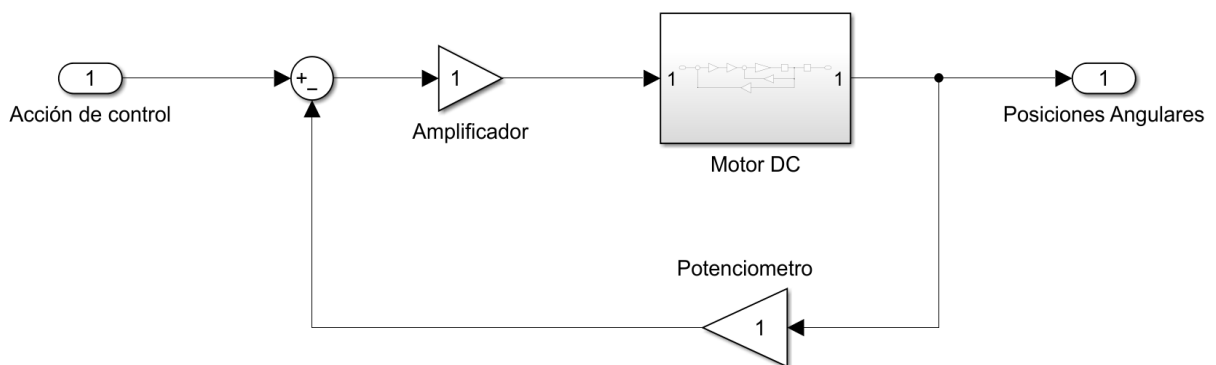


Figura 34: Diagrama de Bloques Modelo Servo Motor.

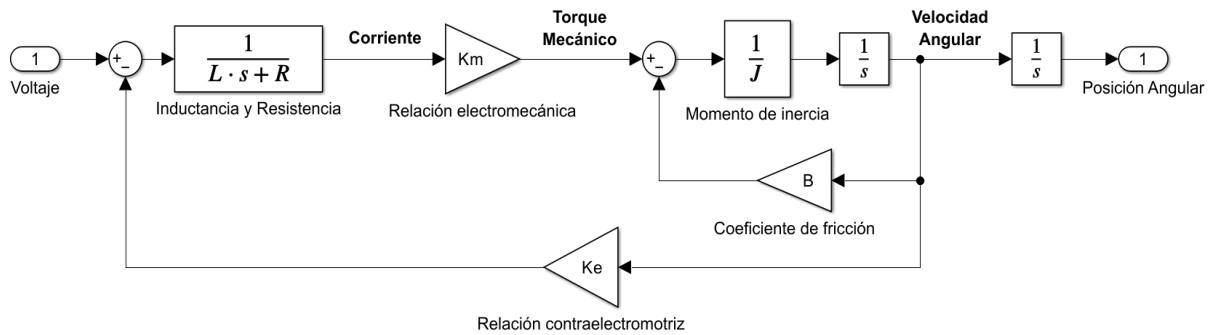


Figura 35: Diagrama de Bloques de un Motor DC.

Continuando el sistema, el bloque que representa la dinámica del robot, cuenta con cuatro entradas, las cuales corresponden a las variables  $\Theta_i$  del modelo simplificado propuesto en el anterior capítulo, aplicando la perturbación a la articulación del tobillo, la cual está representada por  $\Theta_1$  y las posiciones angulares resultantes del módulo del servomotor a la segunda articulación,  $\Theta_2$ , dejando las otras dos entradas constantes; finalmente, para facilitar la representación de este modelo, se usa un módulo llamado “Matlab Funtion” que permite incorporar código de Matlab en Simulink, en otras palabras, la Ecuación 24 es implementada en ese bloque, gracias al algoritmo presentado en 37.

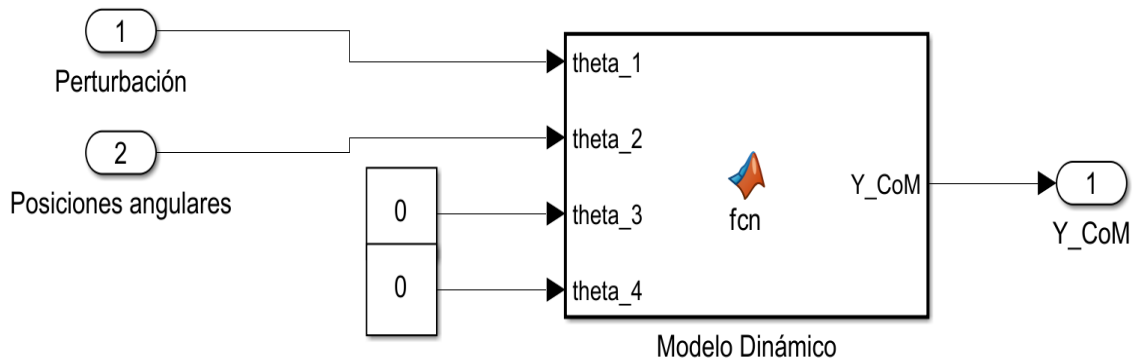


Figura 36: Diagrama de Bloques del Modelo Estático.

```

SimulacionControlador ▶ Modelo dinamico robot ▶ Modelo Dinámico
1  function Y_CoM = fcn(theta_1, theta_2, theta_3, theta_4)
2  % Vector de posiciones angulares
3  theta = [theta_1, theta_2, theta_3, theta_4];
4  % Vector de longitudes
5  L = [4, 24.5, 29, 11];
6  % Vector de posiciones de articulaciones
7  x = [0, 0, 0, 0];
8  % Calculo de posiciones de articulaciones
9  theta_sum = 0;
10 x_ant = 0;
11 |
12 for i = 1:length(theta) %Posición x anterior
13     if i == 1
14         x_ant = 0;
15     else
16         x_ant = x(i-1);
17     end
18
19     for j = 1:i %Sumatoria de angulos
20         theta_sum = theta_sum + theta(i);
21     end
22
23     x(i) = x_ant + L(i)*sin((pi*theta_sum)/180);
24 end
25
26 % Vector de pesos
27 weight = [500, 334, 500, 330];
28 % Centro de masa
29 Y_CoM = 0;
30 % Cálculo centro de masa
31 M_t = sum(weight);
32
33 for i = 1:length(x)
34     Y_CoM = Y_CoM + x(i)*weight(i);
35 end
36
37 Y_CoM = Y_CoM/M_t;

```

Figura 37: Algoritmo bloque.

Finalmente, una vez es implementado todo el sistema, se procede a simularlo. Para visualizar la salida se usa un display de señales llamado “Bloque Scope”, se realiza la sintonización de las constantes del controlador variándolas según lo refleja la salida, para así obtener el resultado deseado, como lo muestra la Figura 38, el cual consiste en lograr la rápida convergencia del error generado por la perturbación a cero.

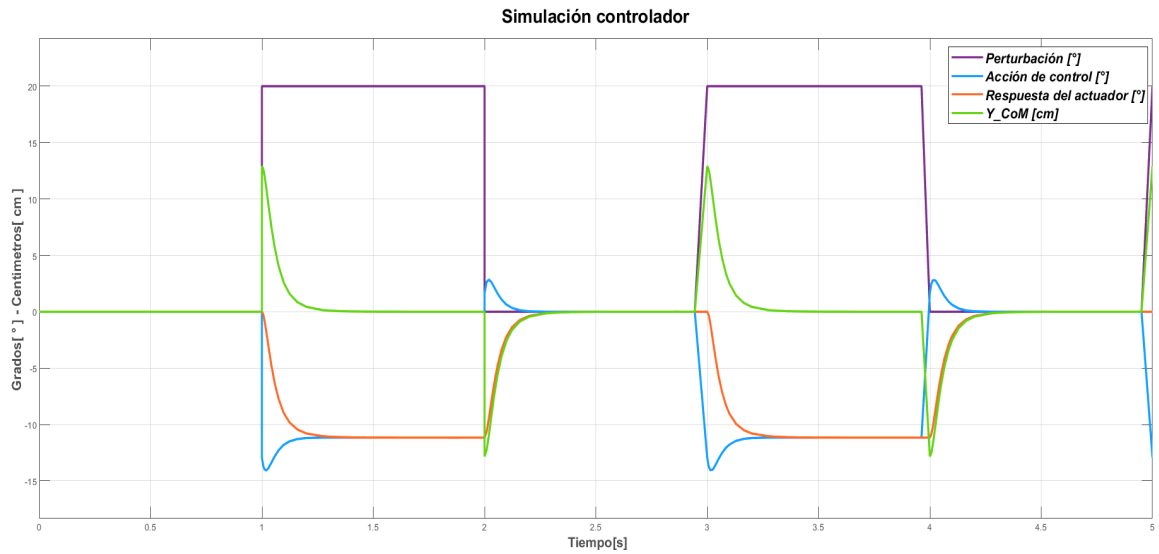


Figura 38: Gráfica resultados simulación controlador.

### 4.3. Implementación

En esta sección se encuentra todo el procedimiento necesario para que el controlador sea implementado en el robot PROBIC. Para tal fin, fue necesario realizar previamente una configuración de la comunicación del sistema interno y establecer la telemetría entre el robot y la interfaz gráfica, después se realizó el algoritmo para el cálculo del CoM del robot, y finalmente se implementó el controlador.

Los códigos a los que se hace referencia en este capítulo han sido recopilados y se encuentran disponibles en el siguiente enlace: [Repositorio del código](#)

#### 4.3.1. Comunicación

Para esta configuración, se desarrollaron los algoritmos correspondientes a la comunicación del sistema, la cual nos permite visualizar la información obtenida de forma eficaz. En la Figura 39 se puede observar el diagrama de comunicaciones implementado para el robot:

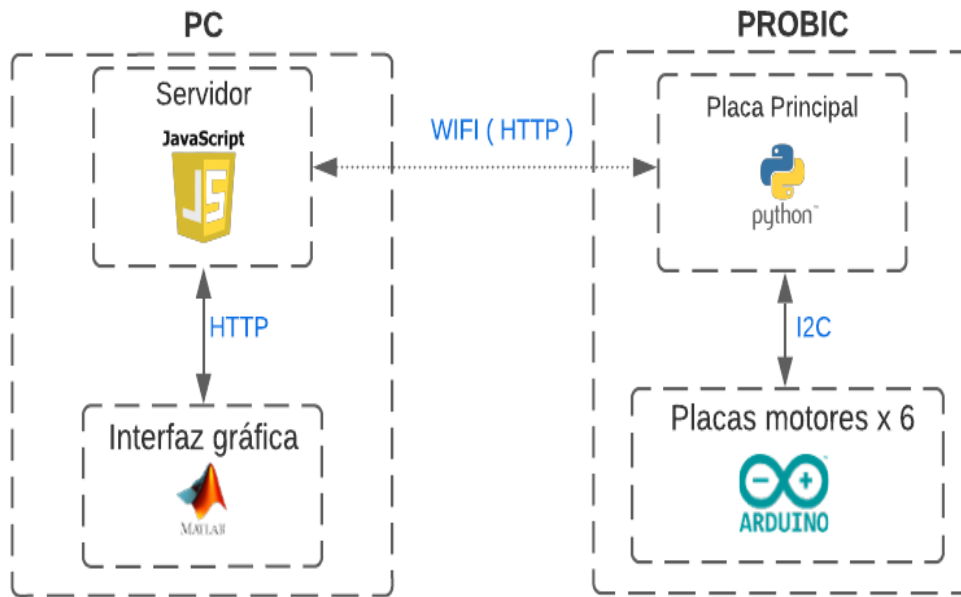


Figura 39: Diagrama de comunicaciones.

En primera instancia, se implementaron las comunicaciones internas del robot mediante el protocolo  $I^2C$ , entre la placa principal y las placas de motores, por lo que se desarrolló un algoritmo en Python y Arduino respectivamente. Además, se definen dos funciones cruciales para facilitar el intercambio de información en ambos entornos. Estas funciones se encargan de recibir y enviar solicitudes: desde la “Placas principal” para establecer valores en los actuadores y/o adquirir lecturas de los sensores; y en las “Placas motores”, para poner en movimiento los servomotores o transmitir los datos provenientes de los sensores.

Al realizar pruebas del funcionamiento de la anterior comunicación, se observó que en ciertas ocasiones se generan errores, los cuales se pueden ver en la figura 40. Al investigar la librería  $I^2C$  en Python, se observó que este error se genera cuando se envía una petición a un nodo con una dirección que no se encuentra en el bus, este error genera un pequeño movimiento indeseado, que afecta en pequeña medida el comportamiento del robot. Pero debido a que el error no ocurre siempre, se descartan errores de conexión o de pines de microcontroladores dañados, por esto se fórmula la hipótesis que se genera debido a interferencias.



```

Servomotor: 11 Error: [Errno 121] Remote I/O error
Servomotor: 12 Error: [Errno 121] Remote I/O error
Servomotor: 11 Error: [Errno 121] Remote I/O error
Servomotor: 3 Error: [Errno 121] Remote I/O error
Servomotor: 11 Error: [Errno 121] Remote I/O error
Servomotor: 11 Error: [Errno 121] Remote I/O error
Servomotor: 4 Error: [Errno 121] Remote I/O error
Servomotor: 11 Error: [Errno 121] Remote I/O error
Servomotor: 3 Error: [Errno 121] Remote I/O error
Servomotor: 10 Error: [Errno 121] Remote I/O error
Servomotor: 9 Error: [Errno 121] Remote I/O error
Servomotor: 4 Error: [Errno 121] Remote I/O error
Servomotor: 3 Error: [Errno 121] Remote I/O error
Servomotor: 9 Error: [Errno 121] Remote I/O error
Servomotor: 10 Error: [Errno 121] Remote I/O error

```

Figura 40: Errores generados por la comunicación  $I^2C$ .

En segunda instancia, se desarrollaron los algoritmos para el intercambio de datos entre el servidor y el robot. En este caso el servidor es el encargado de almacenar los estados de las variables del robot, es decir, el servidor se encarga de guardar las medidas de los sensores y las medidas de los actuadores del robot. El robot se encarga continuamente de enviar las medidas de los sensores al robot y solicitar los valores de los actuadores que se van a mover, esta comunicación se realiza a través de una red WIFI y mediante solicitudes HTTP.

Finalmente, se realizó la comunicación entre el servidor y una interfaz gráfica en Matlab. El servidor, al igual que la comunicación anterior, solo se encarga de almacenar los estados de sensores y actuadores. En la interfaz gráfica se solicitan y presentan los valores de los sensores, y además, se puede enviar solicitudes para mover los actuadores a una referencia.

#### 4.3.2. Cálculo del modelo estático

Como se mencionó previamente, se implementa el cálculo del modelo estático en la tarjeta principal, con el objetivo de obtener el  $Y_{CoM}$  y realizar su control. Esto se realizó mediante la implementación de un algoritmo que calcula la Ecuación 24 explicada en la sección 3.3. Para realizar este cálculo se deben caracterizar las longitudes y masas, las cuales se pueden ver representadas en la Tabla 3; además se deben conocer los ángulos de todas las articulaciones, pero debido a que en la estrategia de tobillo permanecen estáticas todas las articulaciones excepto las del tobillo que generan movimiento en el eje Y, se solicitan solo estos dos ángulos a los microcontroladores correspondientes y los demás ángulos se establecen en un “Offset” o valor predeterminado, donde el robot se encuentra erguido. Es importante tener en cuenta que el “Offset” de los servomotores en la simulación para la posición de bipedestación estática es cero, pero en el robot real estos ángulos no lo son.

i	L(cm)	m(g)
1	8.5	498.5
2	26.25	334
3	27.27	548.5
4	9.5	399

Tabla 3: Medidas para el Modelo Estático

Adicionalmente, se debe tener en cuenta, que se necesita la inclinación de la superficie de soporte, este ángulo no es posible obtenerlo mediante los ángulos de los servomotores, por lo que se utiliza el MPU ubicado en la cadera del robot, donde el ángulo requerido se puede calcular mediante el arco tangente de las componentes Y y Z de la gravedad, proporcionados por del MPU. Para mejorar las lecturas de MPU se activó el procesador de movimiento digital (DMP) integrado en el módulo.

Finalmente, para determinar los “Offset”, se utilizó una interfaz desarrollada en Matlab. Esta interfaz permite visualizar los ángulos de los sensores de los motores de todo el robot. Simultáneamente, en la terminal del sistema, se monitorea el ángulo de inclinación del sensor MPU. El propósito de este procedimiento era doble: en primer lugar, determinar el valor de compensación necesario para el sensor MPU; y en segundo lugar, establecer los ángulos que indican que el robot se encuentra en posición vertical y erguida.

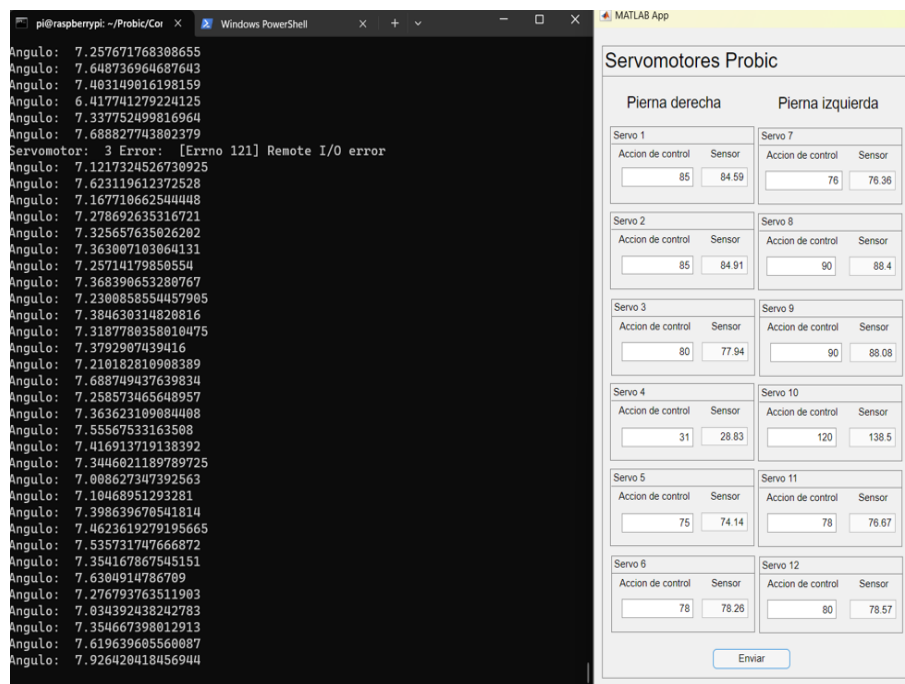


Figura 41: Valores de compensación

### 4.3.3. Controlador

En primer lugar, se decidió implementar el algoritmo de control propuesto en la tarjeta principal, con el objetivo de que el robot no necesite un ordenador externo para su funcionamiento y evitar los tiempos en la comunicación de robot con este. Y se utilizó el ordenador externo para presentar gráficas del estado del CoM, los sensores y actuadores.

Antes de describir el proceso realizado en la implementación del controlador, es importante aclarar que en simulación se realiza un proceso de modelado aproximado pues no se consideran aspectos que sí influyen en la implementación del robot, adicionalmente, el sistema simulado es de tiempo continuo, el cual no es posible implementar en dispositivos digitales como lo son las placas Raspberry pi y Arduino; esto genera discrepancias entre el comportamiento de la simulación y el robot real. Debido a lo anterior, al implementar las constantes de simulación, se obtuvo un funcionamiento inestable, por lo que se optó por realizar un proceso de sintonización manual.

Teniendo en cuenta lo anterior, se parte de la fórmula de control PID para tiempo continuo en la Ecuación 29, se pasa a tiempo discreto mediante el cambio de integral y derivada a métodos numéricos, donde se implementa la integral mediante el método trapezoidal, como se puede ver en la Ecuación 30 y la derivada mediante método numérico de primer orden hacia atrás, como se puede ver en la Ecuación 31. Reemplazando las ecuaciones 30 y 31 en 29, se obtiene la fórmula resultante para el control en tiempo discreto, en la Ecuación 32.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + \frac{de(t)}{dt} \quad (29)$$

Donde:  $u(t)$  es la acción de control del controlador,  $e(t)$  es el error.

$$\int_0^t e(t) dt = \sum_{i=0}^n \frac{e(k_i) + e(k_{i-1})}{2} \Delta T \quad (30)$$

$$\frac{de(t)}{dt} = \frac{e(k_n) - e(k_{n-1})}{\Delta T} \quad (31)$$

Donde:  $k_n$  es el instante actual,  $e(k_n)$  es medida del error en el instante  $k_n$ ,  $\Delta T = T(k_n) - T(k_{i-1})$  es la diferencia entre la medida del tiempo actual y el anterior.

$$u(k_n) = K_p e(k_n) + K_i \sum_{i=0}^n \frac{e(k_i) + e(k_{i-1})}{2} \Delta T + K_d \frac{e(k_n) - e(k_{n-1})}{\Delta T} \quad (32)$$

Finalmente, se establecen inicialmente todos los servomotores en sus "Offset", después se pasa el cálculo del  $Y_{CoM}$  y la referencia al controlador, su salida se suma con los "Offset" de los servomotores del tobillo, y se envían a los microcontroladores correspondientes para que corrijan la posición.

#### 4.3.4. Sintonización del Controlador PID

Como se indicó anteriormente se realiza una sintonización del controlador manual, mediante el método heurístico. Se comienza con un valor  $K_p = 1$ ,  $K_i = 0$  y  $K_d = 0$ , donde se obtuvo una respuesta inestable, por lo que se reduce  $K_p$  gradualmente hasta obtener un valor de  $K_p = 0,2$  con una respuesta estable con pequeñas oscilaciones entorno a la referencia. Se continuó cambiando el valor de  $K_d$  con el objetivo reducir las oscilaciones, hasta llegar a  $K_d = 0,01$ , siendo este el valor que disminuyó de mejor manera las oscilaciones. Finalmente se cambia el valor de  $K_i$  con el objetivo reducir el error de estado estacionario, donde se obtuvo un valor de  $K_i = 0,2$ , como la constante de mejor respuesta en estado estacionario.

#### 4.3.5. Prueba del controlador ante inclinación superficie de soporte

Como último paso en la implementación del controlador, se realizó una prueba donde se guardan los valores de salida o posición de CoM, el error del sistema y esfuerzo de control, para cada ciclo de control, esta prueba consiste modificar la inclinación de la superficie de soporte desde  $0^\circ$  hasta  $23^\circ$  gradualmente por un minuto. Los resultados de esta prueba se pueden observar en las Figuras 42, 43 y 44.

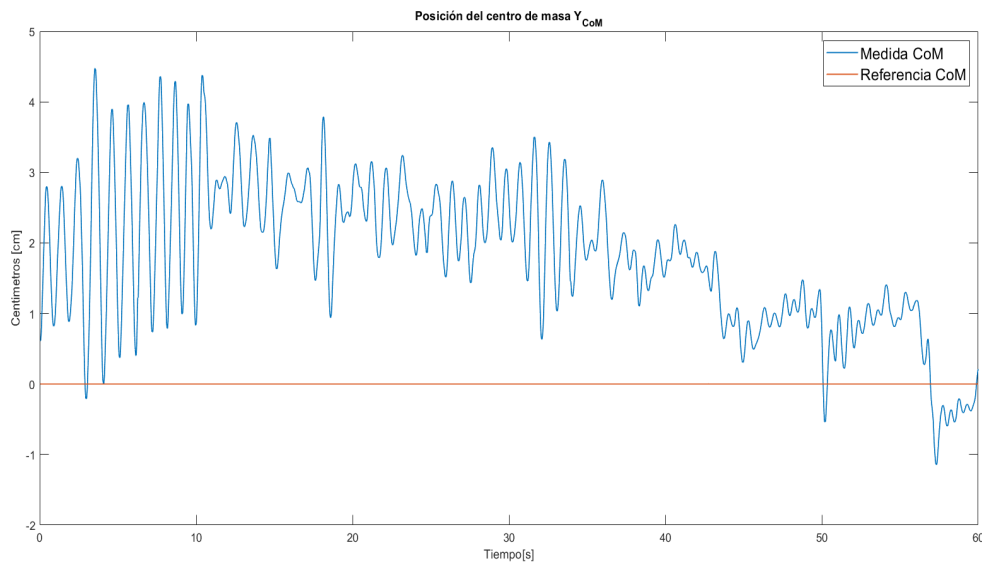


Figura 42: Gráfica Posición CoM.

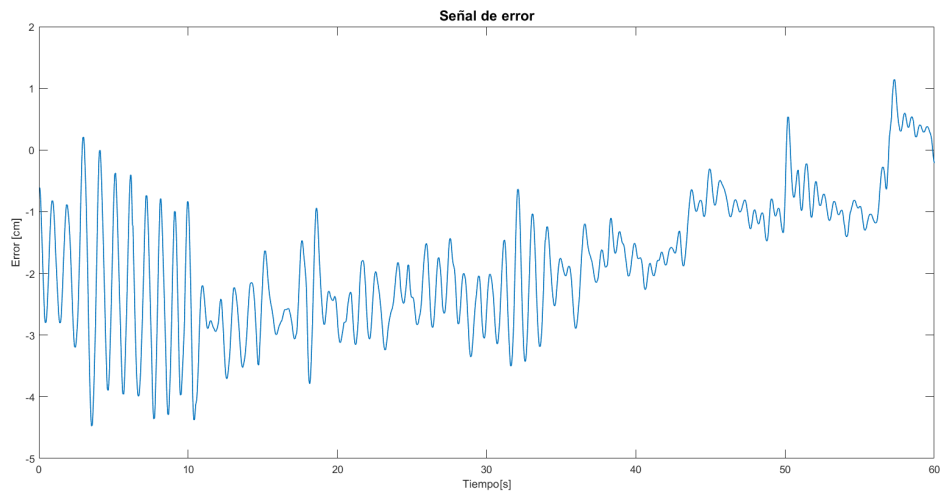


Figura 43: Gráfica Error.

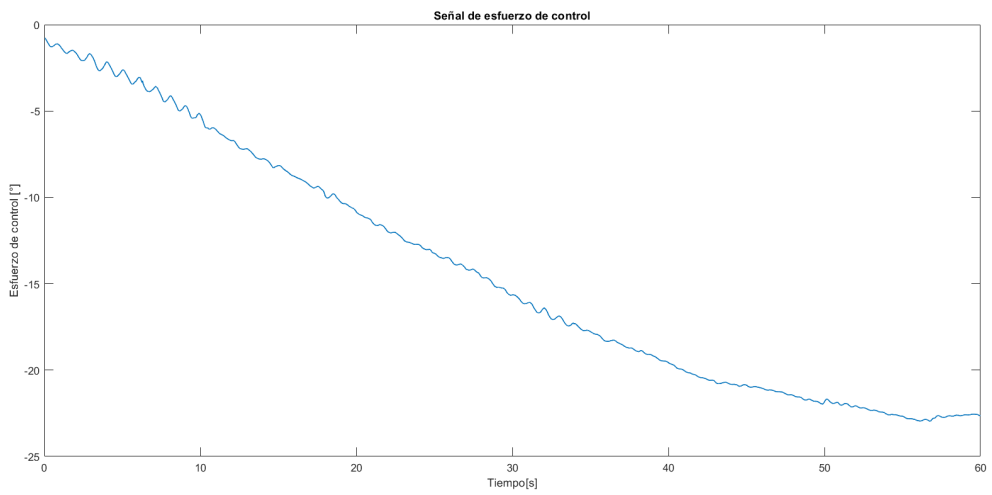


Figura 44: Gráfica Esfuerzo de Control.

## 5. PLAN DE PRUEBAS

En este capítulo se define el plan de pruebas que se llevó a cabo para evaluar el sistema de control de equilibrio diseñado para el robot bípedo PROBIC. En primer lugar se describe la plataforma sobre la cual se realizaron los experimentos, después se expone el diseño y ejecución del plan de pruebas donde se indica el número de experimentos, sus características, los indicadores para el análisis y otras consideraciones, finalmente se realizó un análisis de la información recolectada.

### 5.1. Desarrollo de la plataforma de inclinación

Como se ha mencionado anteriormente, para poner a prueba el controlador implementado en el robot, es necesario realizar una perturbación, realizada mediante una plataforma de inclinación, permitiendo variar la pendiente de la misma, afectando directamente la salida del sistema. Dicha variación debe ser corregida por la estrategia de control, de tal manera que este valor sea lo más cercano a cero, ya que este es el valor de referencia deseado.

En la Figura 45, podemos observar la estructura de dicha plataforma, la cual está compuesta por una base rectangular, hecha de madera cubierta de una lija. Esta base se encuentra sujeta con bisagras, que permiten el movimiento en el eje z, a una "L" de madera; para inclinar la base de forma constante, se usa un gato hidráulico. Adicionalmente, se posiciona un transportador para conocer el ángulo de inclinación de la plataforma.



Figura 45: Plataforma de inclinación

## 5.2. Caracterización de las Pruebas

Con el objetivo de analizar el sistema de control se decidió realizar dos tipos de experimentos. En el primero se analiza el máximo ángulo de inclinación y en el segundo el error cuadrático medio; para cada experimento se realizaron dos casos, cuando la superficie de soporte se inclina en sentido antihorario o con inclinación positiva y cuando lo hace en sentido horario o con inclinación negativa.

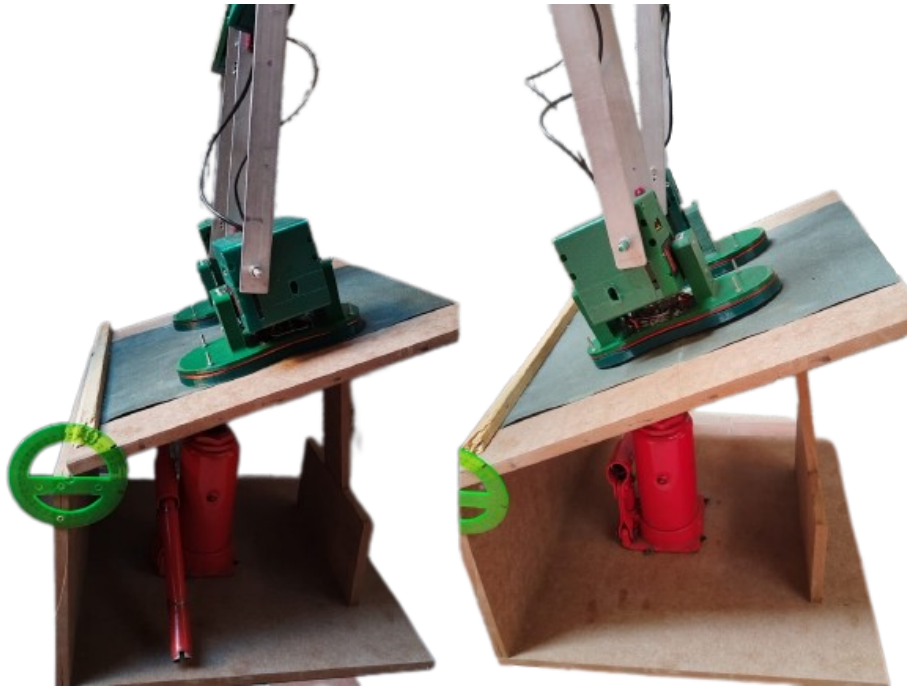


Figura 46: Inclinación negativa y positiva, respectivamente.

Como condiciones y pasos iniciales para ambas pruebas se consideró:

- Energizar el robot.
- La plataforma de soporte parte con  $0^\circ$  de inclinación.
- Conectar la placa principal al servidor.
- Se fijan las posiciones de cada una de las articulaciones del robot con el objetivo de que pueda mantener una posición de bipedestación estática.
- Inicializar el controlador.
- Empezar el tipo de experimento correspondiente.

### 5.2.1. Captura del Máximo Ángulo de Recuperación

El primer experimento a desarrollar se hace con el fin de encontrar el punto máximo en el cual la estrategia de control funcione correctamente, es decir, antes de que pierda el equilibrio y el robot caiga de la plataforma ya sea por pérdida de fricción con la superficie

o que falle el controlador, y así determinar la robustez del controlador, entendiendo que mientras el ángulo va aumentando o disminuyendo, dependiendo del caso, la dificultad de la prueba aumenta.

Para llevar a cabo esta prueba y obtener valores estadísticamente válidos se realizaron 30 repeticiones en total, 15 por cada caso de inclinación (positiva y negativa).

Para el caso de la inclinación negativa, el robot es ubicado orientado hacia el transportador de la plataforma, y posteriormente se usa el gato hidráulico para elevar la base de soporte. Se realiza el mismo proceso para el otro caso de inclinación, únicamente se modifica la orientación del robot.

### 5.2.2. Cálculo de la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)

La Raíz del Error Cuadrático Medio o RMSE, por sus siglas en inglés, permite comparar los datos reales de un sistema con respecto a su valor deseado o referencia; para el proyecto actual, estos valores se refieren al  $Y_{CoM}$  calculado durante el experimento y a su referencia que es cero. En otras palabras, esto nos ayuda a saber cuánta precisión tiene el controlador implementado.

Para calcular este parámetro, se usa la Ecuación 33:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (33)$$

Para lograr lo mencionado anteriormente, se implementa un código en Python. En este código, se almacenan los valores de error en cada iteración del ciclo de control en un vector. Cada ciclo de control tiene una duración de 1 minuto, durante el cual se registran los errores que se generan al inclinar la plataforma hasta un ángulo en el cual el robot no cae de la superficie, este se determina con base en los resultados del primer experimento y debe ser alcanzado en el tiempo que dura el ciclo. Al finalizar cada repetición, se calcula el RMSE utilizando la Ecuación 33, donde  $N$  es el número de iteraciones en la repetición (en este caso corresponde a 1857 muestras) y  $y_i - \hat{y}_i$  es el error en la iteración  $i$ .

Siguiendo este enfoque, al igual que en el experimento anterior, se realizaron un total de 30 repeticiones, 15 para cada caso de inclinación.

A través de este proceso, se obtienen valores numéricos que permiten evaluar el rendimiento del sistema de control bajo diferentes condiciones de inclinación.

### 5.3. Resultados de las Pruebas

Para obtener una comprensión precisa acerca de cómo se distribuyen los datos, se hace uso de un diagrama de caja y bigotes, este proporciona una representación visual que facilita identificar la distribución de los datos en términos de divisiones en cuartiles con respecto a la mediana como centro del diagrama, que representa el valor donde se encuentra el 50 % de las medidas, señalar los límites superior e inferior, su capacidad para detectar valores atípicos, es decir, datos que se alejan significativamente de la norma y



distorsionan la interpretación de los resultados destacando errores significativos durante las pruebas realizadas.

### 5.3.1. Análisis y Resultados del Máximo Ángulo de Recuperación

Los datos recolectados para la prueba de máximo ángulo de recuperación se pueden observar en la Tabla 4. Al realizar la toma de los datos para esta prueba se notaron las diferencias en el comportamiento para las dos inclinaciones. En la inclinación negativa el robot perdía el equilibrio al deslizarse sobre la superficie de soporte, lo que indica que el máximo ángulo de recuperación está condicionado por la fuerza de fricción entre los pies del robot y la superficie. Para la inclinación positiva el robot se caía al levantar la parte delantera de los zapatos de la superficie de soporte, lo que indica que el ángulo máximo lo condiciona el controlador, al no compensar la perturbación correctamente.

Repetición #	Inclinación Negativa	Inclinación Positiva
1	35°	30°
2	35°	31°
3	35°	31°
4	34°	29°
5	35°	30°
6	35°	31°
7	35°	30°
8	35°	31°
9	34°	30°
10	35°	30°
11	35°	31°
12	36°	30°
13	33°	31°
14	34°	30°
15	35°	30°

Tabla 4: Máximo Ángulo de Recuperación de Equilibrio de PROBIC.

A partir de esta tabla de datos, se construyó el gráfico de caja y bigotes que se puede observar en la Figura 47.

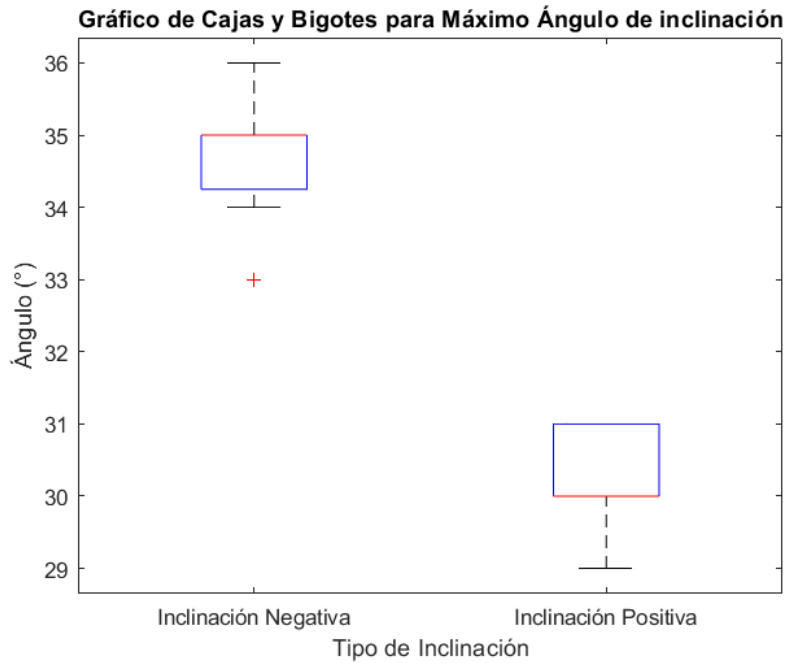


Figura 47: Gráfico de cajas y bigotes para máximo ángulo de inclinación

Al observar esta figura, lo primero que se puede notar es que se alcanzan valores más elevados para inclinaciones negativas en comparación con las positivas, donde su mediana es  $35^\circ$  y  $30^\circ$ , respectivamente. Además, se puede ver que la distribución de datos es distinta en ambas inclinaciones, lo que indica que el sistema presenta una respuesta diferente dependiendo del caso. Para el caso de inclinación negativa, la diferencia en el límite inferior y el primer cuartil es pequeña, además, la mediana es igual al tercer cuartil, lo que indica que al menos el 25% de los datos es exactamente  $35^\circ$  y se observa que el 75% de los datos se encuentra entre  $34^\circ$  y  $35^\circ$  grados de inclinación máxima, finalmente se puede ver que existe un valor atípico en  $33^\circ$ , que pudo ser generado por un sobre impulso al subir la plataforma. Para el caso de la inclinación positiva, el tercer cuartil corresponde con el límite superior, indicando que al menos el 25% de los datos es exactamente  $31^\circ$ , y la mediana corresponde con el primer cuartil, lo que indica que 75% de los datos se encuentra entre  $30^\circ$  y  $31^\circ$  grados de inclinación máxima.

### 5.3.2. Análisis y Resultados del Cálculo del RMSE

Los datos recolectados para la prueba de RMSE se pueden observar en la Tabla 5. Cabe aclarar que el ángulo que se eligió para la actual experimentación a raíz de los resultados obtenidos en el anterior ítem, fue de  $25^\circ$ , que corresponde a un valor en el cual se asegura que el robot no caerá de la superficie.

# Repetición	Inclinación Negativa	Inclinación Positiva
1	1.3768109404821631	1.4575293842542675
2	1.6328456058576258	1.6577857271715711
3	1.411143065613742	1.5110971645294143
4	1.3308937387947907	1.5416630504394918
5	1.523825163494448	1.4211180881306612
6	1.6528619319017654	1.4265043981521008
7	1.5678482640973203	1.3806905609972653
8	1.4394583701214977	1.4836851314611641
9	1.1127196428949795	1.2685535074188903
10	1.5748694131150208	1.0593840160906938
11	1.5002514892275276	1.5939646141247759
12	1.738474400228105	1.5591321113734518
13	1.546522454741075	1.976193977896071
14	1.8650717042551004	1.0977355914124586
15	1.5936853554789957	0.8964060026513102

Tabla 5: Datos del RMSE de PROBIC.

A partir de está tablas de datos, se construyó el gráfico de caja y bigotes que se puede observar en la Figura 48.

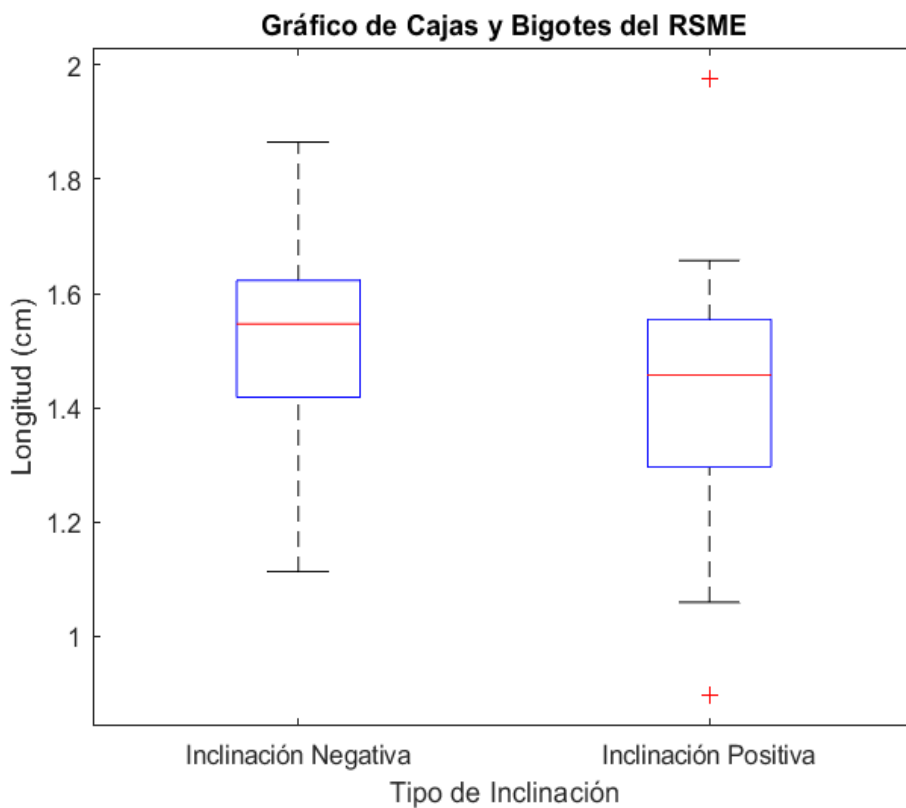


Figura 48: Gráfico de cajas y bigotes para RMSE

En esta figura, se puede observar que la mediana es de 1.54 cm para el caso de inclinación negativa y 1.45 cm para el caso de inclinación positiva, lo que indica que el sistema responde con menor error en el segundo caso. En el caso de inclinación negativa, los cuartiles están dispersos de manera similar, lo que indica que el error no tiende a un valor constante. En la inclinación positiva, el límite superior, el tercer cuartil y la mediana están más cerca, lo que indica que existe una tendencia hacia estos valores. Se observa la existencia de dos valores atípicos, en 1.97 y 0.89, que al igual que en el caso anterior, pueden ser ocasionados al aplicar velocidades más altas en el primer caso, y más uniformes en el segundo.

## 6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a lo largo de todo el proyecto, desde la implementación de la estructura y electrónica hasta la del controlador, llevaron a concluir lo siguiente:

- Se valida la eficacia del enfoque propuesto para el sistema de control de equilibrio en el robot PROBIC, en el entorno de las pruebas de inclinación de soporte realizadas. Estos experimentos han arrojado resultados satisfactorios en simulación e implementación, respaldando la capacidad del sistema de control para mantener y restablecer el equilibrio ante las perturbaciones.
- En la revisión de la literatura existente no se encontró evidencia de uso del modelo estático propuesto en el presente trabajo de grado. Esto constituye un enfoque novedoso en la investigación de modelos simplificados para robots bípedos, que lo cataloga como una alternativa con potencial de exploración, que puede profundizar y mejorar en trabajos futuros.
- El modelo propuesto estima el centro de masa del robot de forma simplificada, sin necesidad de recurrir al uso de matemáticas complejas con ecuaciones diferenciales de múltiples grados de libertad. Se comprueba su validez para el control de equilibrio en el robot propuesto, al incluirlo en el controlador y obtener resultados satisfactorios ante pruebas de inclinación de superficie de soporte. Además, de que cuenta con la posibilidad de mejorar su comportamiento al realizar estimaciones más precisas del CoM de sus componentes y añadiendo elementos que en esta investigación no se tomaron en cuenta.
- El máximo ángulo de recuperación de equilibrio en el sistema propuesto presenta valores más elevados para pendientes de signo negativo en comparación con pendientes de signo positivo. Este hallazgo sugiere una tendencia clara en la influencia de la pendiente en el límite del sistema, indicando que las condiciones para pendientes negativas favorecen una mayor amplitud en el ángulo de recuperación de equilibrio. No obstante, a pesar de esta observación, es necesario señalar que el mecanismo exacto detrás de esta diferencia en los resultados aún requiere una investigación profunda. Pues podría estudiarse la incidencia de la técnica de control por tobillo en la pendiente de inclinación que afecta el robot, incluso posible alternancia entre estrategias de control según la inclinación presente del mismo.
- Si bien un requerimiento fundamental para el correcto funcionamiento del robot es un tiempo de respuesta reducido, también se debe considerar que esta característica puede provocar que el sistema sea más inestable, al producirse oscilaciones y sobre impulsos por la rápida acción de los motores. Por tal motivo, es de crucial importancia ajustar y sintonizar el controlador PID del robot, para que sea capaz de manejar dichas oscilaciones y sobre impulsos en términos de la velocidad de reacción de los motores y la magnitud del error presente.
- El cálculo de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) en este proyecto resulta ser un indicador clave para la comparación con los resultados de investigaciones futuras,

puesto que los datos obtenidos de dicha métrica facilitan el análisis y comparación entre estrategias de control, siempre que estas se realicen respecto al centro de masa. Cabe destacar que, gracias al hecho de optar por almacenar los datos medidos con una buena resolución (gran cantidad de decimales), la comparación que se realice será más precisa.

- El sistema de control revela un rendimiento destacado en situaciones de inclinación positiva, donde se observan resultados más favorables en términos de RMSE. Por otro lado, es crucial resaltar la notable capacidad del sistema en cuanto al máximo ángulo de recuperación para el caso de inclinación negativa.
- El uso del protocolo de comunicaciones  $I^2C$  presentó problemas de interferencia, al emplearse en un contexto de múltiples nodos, como en este caso donde se cuenta con 9 nodos en total (6 de las placas de motores, 1 del MPU y 2 de las placas de sensores de fuerza). Estos problemas de interferencia son especialmente críticos, ya que pueden desencadenar una situación donde el robot realiza movimientos indeseados, afectando el comportamiento del sistema.

## 7. TRABAJOS FUTUROS

- Se plantea realizar una investigación para lograr un diseño más ergonómico para los pies del robot PROBIC. La idea es que esta nueva propuesta ayude a tener una mejor estabilidad y capacidad de equilibrio en comparación con la opción actual de pies rígidos y planos. Y una vez sean implementados en la estructura se repitan los experimentos analizados en el actual trabajo y se obtenga un mejor rendimiento en las pruebas.
- En el diseño de PROBIC, se incorporaron sensores FSR pero en la investigación estos no se utilizaron; se propone una investigación donde se compare el comportamiento del robot realizando un control mediante cálculo del ZMP con estos sensores y el sistema de control propuesto.
- Estudio de estrategias de control para la implementación de algoritmos de marcha en el robot propuesto PROBIC, especializadas para lograr movimientos coordinados y fluidos.
- La implementación sensores de voltaje y corriente, para tener la posibilidad de realizar investigaciones sobre el análisis de potencia eléctrica, y así proponer estrategias que logren una mejor eficiencia energética en el robot, como se realizó en [44], [45].
- Cambiar el sistema de comunicaciones  $I^2C$  a uno que se comporte mejor ante interferencias, como es el protocolo RS485 ahora conocido como TIA-485. Con el objetivo de corregir los problemas mencionados en la sección 4.3.1.
- Implementar en las placas de los motores un controlador exclusivo para cada servomotor, con el objetivo de obtener un comportamiento deseado y disminuir los problemas de oscilaciones que presenta el sistema de control propuesto.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. S. Pollock, B. R. Durward, P. J. Rowe, and J. P. Paul, “What is balance?” *Clinical rehabilitation*, vol. 14, pp. 402–406, 2000. [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10945424/>
- [2] J. Engelsberger, A. Werner, C. Ott, B. Henze, M. A. Roa, G. Garofalo, R. Burger, A. Beyer, O. Eiberger, K. Schmid, and A. Albu-Schäffer, “Overview of the torque-controlled humanoid robot toro,” *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, 2010.
- [3] PoppyStation. (2016) Poppy project - poppy humanoid. [Online]. Available: <https://www.poppy-project.org/en/robots/poppy-humanoid/>
- [4] BostonDynamics. (2016, 2) Atlas™ — boston dynamics. [Online]. Available: <https://www.bostondynamics.com/atlas>
- [5] OMS, “Trastornos musculoesqueléticos,” 2021. [Online]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/musculoskeletal-conditions>
- [6] R. Araya-Arroyo, “Diseño de una plataforma de control para las diferentes articulaciones de un brazo robótico,” *Instituto Tecnológico de Costa Rica*, 2007.
- [7] S. Kajita, H. Hirukawa, K. Harada, and K. Yokoi, “Introduction to humanoid robotics,” *Springer Tracts in Advanced Robotics*, vol. 101, 2014.
- [8] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Yokoi, and H. Hirukawa, “The 3d linear inverted pendulum mode: A simple modeling for a biped walking pattern generation,” *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 1, pp. 239–240, 2001.
- [9] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi, and H. Hirukawa, “Biped walking pattern generation by using preview control of zero-moment point,” *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 1620–1626, 2003.
- [10] D. N. Nenchev and A. Nishio, “Ankle and hip strategies for balance recovery of a biped subjected to an impact,” *Robotica*, vol. 26, pp. 643–653, 9 2008.
- [11] M. A. P. I. A. P. H. B. E. P. Berenguer, “introduccion a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo.”, 2007.
- [12] M. Hirose and K. Ogawa, “Honda humanoid robots development,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 365, pp. 11–19, 1 2007.
- [13] C. Hernández-Santos, R. Soto, and E. Rodríguez, “Design and dynamic modeling of humanoid biped robot e-robot,” *Proceedings - 2011 IEEE Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, CERMA 2011*, pp. 191–196, 2011.



- [14] M. González-Fierro, C. A. Monje, and C. Balaguer, “Fractional control of a humanoid robot reduced model with model disturbances,” *Cybernetics and Systems*, vol. 47, pp. 445–459, 8 2016.
- [15] S. Feng and Z. Sun, “Biped robot walking using three-mass linear inverted pendulum model,” *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 5314 LNAI, pp. 371–380, 2008. [Online]. Available: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-88513-9\\_40](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-88513-9_40)
- [16] E. V. Guerrero, E. R. Cózatl, and O. N. Aroche, “Instrumentación de un robot bípedo: Posición, presión e inercial,” *Congreso Nacional de Control Automático 2013*, pp. 16–18, 2013.
- [17] M. VUKOBRATOVIĆ and B. BOROVAC, “Zero-moment point — thirty five years of its life,” <http://dx.doi.org/10.1142/S0219843604000083>, vol. 1, pp. 157–173, 1 2012.
- [18] A. Takanishi, M. Ishida, Y. Yamazaki, and I. Kato, “The realization of dynamic walking by the biped walking robot wl-10 rd,” *Journal of the Robotics Society of Japan*, vol. 3, pp. 325–336, 1985.
- [19] M. Albero, F. Blanes, G. Benet, J. Simó, and P. Perez, “Yabiro: Prototipo de robot bípedo autónomo,” 2003.
- [20] S. Martinez, J. M. Garcia-Haro, J. G. Victores, A. Jardón, and C. Balaguer, “Experimental robot model adjustments based on force–torque sensor information,” *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 18, 3 2018. [Online]. Available: [/pmc/articles/PMC5877309/](https://pmc/articles/PMC5877309/)[https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5877309/](https://pmc/articles/PMC5877309/?report=abstracthttps://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5877309/)
- [21] B. E. Maki and W. E. McIlroy, “The role of limb movements in maintaining upright stance: The ‘change-in-support’ strategy,” *Physical Therapy*, vol. 77, pp. 488–507, 1997.
- [22] B. Stephens, “Humanoid push recovery,” *Proceedings of the 2007 7th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, HUMANOIDS 2007*, pp. 589–595, 2007.
- [23] H. Jeong, I. Lee, J. Oh, K. K. Lee, and J. H. Oh, “A robust walking controller based on online optimization of ankle, hip, and stepping strategies,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 35, pp. 1367–1386, 12 2019.
- [24] M. A. Armada, P. de González Santos, and M. W. Spong, “The passivity paradigm in the control of bipedal robots,” in *Climbing and Walking Robots: Proceedings of the 7th International Conference CLAWAR 2004*. Springer, 2005, pp. 775–786.
- [25] E. R. Westervelt, J. W. Grizzle, C. Chevallereau, J. H. Choi, and B. Morris, *Feedback control of dynamic bipedal robot locomotion*. CRC press, 2018.

- [26] P.-B. Wieber, “Trajectory free linear model predictive control for stable walking in the presence of strong perturbations,” in *2006 6th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. IEEE, 2006, pp. 137–142.
- [27] D. A. Bravo and C. F. Rengifo, “Generation from motion capture for a planar biped robot in swing phase,” *Ingeniería y Ciencia*, vol. 11, no. 22, pp. 25–47, Aug. 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17230/ingciencia.11.22.2>
- [28] J. H. Bong, S. Jung, J. Kim, and S. Park, “Standing balance control of a bipedal robot based on behavior cloning,” *Biomimetics 2022, Vol. 7, Page 232*, vol. 7, p. 232, 12 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2313-7673/7/4/232/htmhttps://www.mdpi.com/2313-7673/7/4/232>
- [29] I. M. Motoc, K. Sirlantzis, S. K. Spurgeon, and P. Lee, “Zero moment point/inverted pendulum-based walking algorithm for the nao robot,” *Fifth International Conference on Emerging Security Technologies*, 2014. [Online]. Available: <http://coalas-project.eu/>
- [30] J. Zhao, S. Schütz, and K. Berns, “Biologically motivated push recovery strategies for a 3d bipedal robot walking in complex environments h2r project view project development of carl-a compliant robotic leg featuring mono-and biarticular actuation view project biologically motivated push recovery strategies for a 3d bipedal robot walking in complex environments,” *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 2013. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/271548347>
- [31] J. Liu and O. Urbann, “Bipedal walking with dynamic balance that involves three-dimensional upper body motion,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 77, pp. 39–54, 3 2016.
- [32] M. Lapeyre, P. Rouanet, and P.-Y. Oudeyer, “The poppy humanoid robot: Leg design for biped locomotion,” *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2013. [Online]. Available: <https://hal.inria.fr/hal-00852858>
- [33] G. Thomas, T. Koolen, S. Bertrand, T. D. Boer, T. Wu, J. Smith, J. Engelsberger, and J. Pratt, “Design of a momentum-based control framework and application to the humanoid robot atlas,” *Article in International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 13, p. 1650007, 2016. [Online]. Available: [www.worldscientific.com](http://www.worldscientific.com)
- [34] R. Drillis, R. Contini, and M. Bluestein, “Body segment parameters,” *Artificial limbs*, vol. 8, no. 1, 1964.
- [35] D. Bravo, J. Tacué, F. Gutierrez, and J. Tabango, “Design and construction of a bipedal robot for gait experimentation,” *Journal de Ciencia e Ingeniería*, vol. 14, no. 2, pp. 11–23, 2022.
- [36] “Planos anatómicos y ejes corporales.” [Online]. Available: <https://anatolandia.blogspot.com/2013/10/planos-anatomicos.html>

- [37] Matlab, “Descripción del producto matlab - matlab & simulink - mathworks españa,” 2022. [Online]. Available: [https://es.mathworks.com/help/matlab/learn\\_matlab/product-description.html](https://es.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html)
- [38] A. Lopez, F. Gutierrez, J. Tacué, and D. Bravo, “Design and construction of a bipedal robot prototype for experimentation in balance tests during the static standing phase,” in *2021 IEEE 5th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, 2021, pp. 7–12.
- [39] Arduino, “What is arduino? — arduino,” 2018. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- [40] kiCad, “Introduction — 7.0 — english — documentation — kicad,” 2021. [Online]. Available: <https://docs.kicad.org/7.0/en/introduction/introduction.html>
- [41] F. C. Jiménez, “Análisis de mecanismos de eslabones espaciales empleando matrices homogéneas y parámetros de euler,” 2019.
- [42] D. F. E. Carvajal, Y. H. Muñoz, J. T. González, and C. F. R. Rodas, “Comparación entre dos estrategias de recuperación de equilibrio para un robot bípedo en fase de bipedestación estática,” 2021.
- [43] A. Vivas, *DISEÑO Y CONTROL DE ROBOTS INDUSTRIALES: TEORÍA Y PRÁCTICA*, 01 2019.
- [44] J. Tacué, C. Rengifo, and D. Bravo, “An experimental energy consumption comparison between trajectories generated by using the cart-table model and an optimization approach for the bioloid robot,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 17, no. 2, pp. 1–14, 2020.
- [45] J. Tacué, “Análisis comparativo del consumo de energía eléctrica en trayectorias de marcha offline para el robot bípedo bioloid,” Master’s thesis, Universidad del Cauca, 2018.