

# COMPARACIÓN ENTRE DOS ESTRATEGIAS DE RECUPERACIÓN DE EQUILIBRIO PARA UN ROBOT BÍPEDO EN FASE DE BIPEDESTACIÓN ESTÁTICA



Daniel Felipe Estrada Carvajal  
Yoniver Hoyos Muñoz

*Universidad del Cauca*  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control  
Popayán, 2022



# **COMPARACIÓN ENTRE DOS ESTRATEGIAS DE RECUPERACIÓN DE EQUILIBRIO PARA UN ROBOT BÍPEDO EN FASE DE BIPEDESTACIÓN ESTÁTICA**

Daniel Felipe Estrada Carvajal  
Yoniver Hoyos Muñoz

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

Director: M.Sc. Jeison Tacué González  
Codirector: PhD. Carlos Felipe Rengifo Rodas

*Universidad del Cauca*  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control  
Popayán, 2022

Nota de aceptación

---

---

---

---

Director: \_\_\_\_\_

M.Sc. Jeison Tacué González

Codirector: \_\_\_\_\_

Ph.D. Carlos Felipe Rengifo Rodas

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

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

Popayán, 3 de febrero de 2022

# Agradecimientos

## **Daniel Felipe Estrada Carvajal**

En primer lugar a quien mas debo agradecer es a mis padres Alejandro Estrada y Josefina Carvajal, sin quienes nada de esto hubiera sido posible, ellos siempre creyeron en mi y me permitieron esta oportunidad, por su apoyo y por siempre estar pendientes hasta alcanzar mi meta, muchas gracias.

A mi tía Elsa, por brindarme apoyo y motivación en todo mi camino a ser profesional.

A mis tíos y hermanos que a pesar de toda las burlas nunca dejaron de creer en mi.

A Ana Quinayas y Fabian Cobo por aceptarme en su casa como uno mas en su familia y soportarme en todo mi proceso de formación.

Claramente a mi tutor Jeison Tacué, por sus conocimientos, paciencia y dedicación para guiarme con este proyecto.

A mis compañeros Miguel Imbachí y Manuel Ramírez por hacer de la vida universitaria un momento inolvidable, por brindarme su amistad y apoyo incondicional.

A la Universidad del Cauca y su comunidad por su espacio y dedicación en formarme como profesional.

Y a todas las personas que han estado pendientes de mi en este proceso y que no alcanzo a mencionar.

Muchas Gracias.

## **Yoniver Hoyos Muñoz**

Primeramente quiero agradecer a mis padres Heridia Muñoz Muñoz y Reinel Hoyos Romero por todo el apoyo y comprensión a lo largo de mi carrera, por siempre estar pendientes de mi bienestar y ayudarme en cada paso que he dado.

A mi hermana, Alexandra Hoyos Muñoz por acompañarme a lo largo de los años y brindarme su presencia y respaldo a lo largo de mi carrera.

Agradecer a mis padrinos Alba Y Ruperto, por sus constantes palabras de animo y estar pendientes de mi y mis estudios a lo largo de mi vida.

Por el apoyo y amor brindado por mi abuela Maria Antonia Romero, quien ha estado siempre en los momentos mas importantes, dándome su consejo, comprensión y ayuda siempre.

A mi familia mas cercana que siempre estuvo pendiente de mi bienestar.

Gracias a mi director Jeison Tacué, por su paciencia y dedicación para guiarme a lo largo del proyecto de tesis.

A mi pareja Karol Yuliana Rodallega Trochez por brindarme su amor, comprensión y ayudarme a mejorar cada día.

A la universidad del Cauca por brindarme la oportunidad de desarrollarme como profesional a lo largo de la carrera, siendo el lugar donde crecí como persona y desarrolle amistades que me acompañan el día de hoy.

## Resumen

Este trabajo se realiza con el objetivo de comparar dos estrategias de recuperación de equilibrio basadas en *ZMP* (*Zero Moment Point*), con el fin de determinar bajo que condiciones cada una de ellas posee mejor comportamiento frente a la otra. Con esto en mente, se procede a desarrollar una nueva placa de control y adquisición de datos de bajo costo y software libre a fin de sustituir la arquitectura del controlador que posee actualmente la plataforma *Bioloid Premium Kit*. El nuevo sistema de control hace uso de sensores de presión resistivos para obtención de *ZMP*, medidores de voltaje y corriente, al igual que una comunicación inalámbrica por medio de un módulo *Bluetooth*.

Seguidamente, se obtienen modelos matemáticos simplificados a fin de disminuir la carga computacional al momento de realizar la simulación de la dinámica del robot, con base en estos se obtiene un controlador PID simulado en tiempo continuo para cada estrategia, discretizando dichos controladores con el objetivo de ser implementados en la tarjeta de control *arduino*. Sin embargo, al ejecutar los algoritmos de control de forma discreta estos se sintonizan de forma manual debido a que los modelos obtenidos no representan fielmente la dinámica del robot real.

Posteriormente se expresan los resultados en términos de los indicadores de comparación, además de la metodología a seguir al momento de realizar las pruebas de funcionamiento para garantizar que estas se desarrollen de forma uniforme, lo que permite evaluar, por medio de herramientas estadísticas, el comportamiento de cada estrategia según las características como la tasa de cambio en cada indicador.

**Palabras Claves:** Estrategia de control, controlador PID, bípedo, equilibrio, *Zero Moment Point*, modelo matemático simplificado, indicadores de comparación, inclinación positiva, inclinación negativa.

## Abstract

This work is carried out with the objective of comparing two equilibrium recovery strategies based on ZMP (*Zero Moment Point*), in order to determine under what conditions each of them has better behavior compared to the other. With this in mind, a new low-cost, free software control and data acquisition board is developed to replace the controller architecture currently supported by the Bioloid Premium Kit platform. The new control system makes use of sensors resistive pressure sensors to obtain ZMP, voltage and current meters, as well as wireless communication through a bluetooth module.

Next, simplified mathematical models are obtained in order to reduce the computational load when simulating the dynamics of the robot, based on these a simulated PID controller is obtained in continuous time for each strategy, discretizing said controllers with the objective of be implemented on the arduino control board. However, when executing the control algorithms in a discrete way, they are tuned manually because the models obtained do not faithfully represent the dynamics of the real robot.

Subsequently, the results are expressed in terms of the comparison indicators, in addition to the methodology to be followed when carrying out the performance tests to ensure that they are carried out in a uniform manner, which allows the evaluation of the behavior of the performance by means of statistical tools. each strategy according to characteristics such as the rate of change in each indicator.

**Keywords:** Control Strategy, PID Controller, Biped, Balance, Zero Moment Point, Simplified Mathematical Model, Comparison Indicators, Positive Tilt, Negative Tilt

# Tabla de contenido

<b>Lista de figuras</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>XII</b>
<b>1. Aspectos generales del proyecto.</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del problema . . . . .	1
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivo General . . . . .	2
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	3
1.3. Marco Teórico. . . . .	3
1.4. Estado del Arte . . . . .	7
<b>2. Diseño del Sistema de Control y Adquisición de Datos</b>	<b>12</b>
2.1. Robot bípedo <i>Bioid Premium Kit</i> . . . . .	12
2.2. Diseño de la nueva placa de control para el robot bípedo . . . . .	14
2.2.1. Comunicación de los motores <i>Dynamixel</i> con la nueva plataforma de control	16
2.2.2. Cálculo y medición del criterio de estabilidad <i>ZMP</i> para al robot bípedo <i>Bioid</i>	19
2.2.3. Medición de potencia eléctrica disipada por el robot . . . . .	25
2.2.4. Comunicación inalámbrica de la placa de control y la interfaz de ordenador .	28
2.2.5. Unidad de Medición Inercial MPU-6050 . . . . .	29
2.2.6. Reguladores de voltaje . . . . .	29

<i>TABLA DE CONTENIDO</i>	VII
2.2.7. Elaboración de la placa de circuito impreso (PCB) . . . . .	30
2.3. Interfaz gráfica de usuario . . . . .	32
<b>3. Estrategias de control</b>	<b>34</b>
3.1. Estrategia de tobillo . . . . .	34
3.1.1. Controlador de tobillo . . . . .	36
3.1.2. Implementación en la plataforma <i>arduino</i> del controlador PID para la estrategia de tobillo . . . . .	39
3.2. Estrategia de Cadera . . . . .	43
3.2.1. Controlador de cadera . . . . .	48
3.2.2. Implementación en la plataforma <i>arduino</i> del controlador PID para la estrategia de cadera . . . . .	50
<b>4. Definición del plan de pruebas e indicadores de comparación</b>	<b>54</b>
4.1. Desarrollo de la experimentación . . . . .	54
4.2. Indicadores de comparación . . . . .	58
4.2.1. Máximo ángulo de recuperación de equilibrio . . . . .	58
4.2.2. Potencia eléctrica . . . . .	59
4.2.3. Error acumulado . . . . .	60
4.2.4. Error cuadrático medio (RMSE) . . . . .	62
4.2.5. Esfuerzo de control . . . . .	62
<b>5. Comparación del funcionamiento de las estrategias de control de tobillo y cadera</b>	<b>64</b>
5.1. Cálculo de pendientes para los indicadores de comparación . . . . .	64
5.2. Análisis de distribución de datos para cada indicador de comparación . . . . .	67
5.2.1. Comparación del Máximo ángulo de inclinación . . . . .	67
5.2.2. Comparación del error acumulado . . . . .	70
5.2.3. Comparación del error cuadrático medio . . . . .	72
5.2.4. Comparación del consumo de energía . . . . .	75

5.2.5. Comparación del esfuerzo de control . . . . .	77
5.3. Prueba Estadística De Análisis De Varianza ANOVA . . . . .	80
<b>6. Conclusiones</b>	<b>85</b>
<b>7. Observaciones y trabajos futuros</b>	<b>87</b>
7.1. Observaciones . . . . .	87
7.2. Trabajos futuros . . . . .	88
<b>Bibliografía</b>	<b>89</b>

# Lista de figuras

1.1. Polígono de soporte . . . . .	4
1.2. Representación de las fuerzas que actúan sobre la superficie de apoyo del mecanismo. . . . .	6
1.3. Robots NAO, ASIMO y ATLAS. . . . .	8
1.4. Modelo <i>car-table</i> . . . . .	9
1.5. Casos donde no es posible usar la estrategia de paso. . . . .	11
2.1. Robot bípedo <i>Bioid</i> forma humanoide tipo A . . . . .	13
2.2. Conexión <i>Simplex</i> entre los motores <i>Dynamixel</i> y la plataforma <i>arduino</i> . . . . .	17
2.3. Conexiones del multiplexor . . . . .	19
2.4. Reacción del suelo sobre la planta del pie . . . . .	20
2.5. Sensores de presión resistivos . . . . .	21
2.6. Caracterización del sensor . . . . .	22
2.7. Ajuste polinomial de curva para los datos de caracterización de los sensores FSR . . . . .	24
2.8. Reflejo del <i>COM</i> haciendo uso del <i>ZMP</i> . . . . .	24
2.9. Módulo sensor de corriente . . . . .	26
2.10. Circuito utilizado para medir el voltaje . . . . .	27
2.11. Reguladores de voltaje . . . . .	30
2.12. Circuito de control . . . . .	31
2.13. Interfaz gráfica del usuario. Sistema de monitorio del ciclo de control del robot bípedo <i>Bioid</i> . . . . .	33

3.1. Modelo <i>cart-table</i> . . . . .	35
3.2. Modelo <i>cart-table</i> en bloques . . . . .	36
3.3. Respuesta en lazo abierto del modelo <i>cart-table</i> . . . . .	37
3.4. Diagrama en bloques <i>cart-table</i> con controlador PID . . . . .	38
3.5. Respuesta simulada del controlador . . . . .	38
3.6. Implementación del controlador PID en <i>arduino</i> . . . . .	39
3.7. Implementación de las mejoras de rendimiento al controlador PID en <i>arduino</i> . . . . .	41
3.8. Envío de la señal de control a los motores del robot encargados del movimiento del tobillo . . . . .	42
3.9. Péndulo invertido doble en un robot humanoide . . . . .	44
3.10. Simulación Modelo Simplificado de Péndulo Doble . . . . .	47
3.11. Resultados de Simulación en Simulink . . . . .	48
3.12. Diagrama en bloques Controlador PID en diferencias . . . . .	49
3.13. Respuesta Controlador PID en diferencias . . . . .	50
3.14. Implementación del controlador PID en <i>arduino</i> . . . . .	51
3.15. Implementación de la relación proporcional entre las dos señales de control para la estrategia de cadera . . . . .	52
4.1. Estructura diseñada para modificar el ángulo de inclinación de la superficie de soporte del robot . . . . .	55
4.2. Representación del robot en una superficie con pendiente positiva y negativa . . . . .	56
4.3. Posición inicial del robot para cada prueba de control . . . . .	57
4.4. Señales de voltaje, corriente y potencia obtenidas en una prueba con inclinación positiva . . . . .	60
4.5. Señales de error acumulado obtenidas con inclinación positiva y negativa . . . . .	61
4.6. Señales de error acumulado obtenidas con inclinación positiva y negativa . . . . .	63
5.1. Ajuste polinomial de variables a grado uno . . . . .	65
5.2. Comparación del máximo ángulo de inclinación con inclinación positiva de pendiente . . . . .	68

5.3. Comparación del máximo ángulo de inclinación con inclinación negativa de pendiente	69
5.4. Comparación del error acumulado con inclinación positiva de pendiente . . . . .	70
5.5. Comparación del error acumulado con inclinación negativa de pendiente . . . . .	71
5.6. Comparación del error cuadrático medio con inclinación positiva de pendiente . . .	73
5.7. Comparación del error cuadrático medio con inclinación negativa de pendiente . . .	74
5.8. Comparación del consumo de energía con inclinación positiva de pendiente . . . .	75
5.9. Comparación del consumo de energía con inclinación negativa de pendiente. . . .	76
5.10. Comparación del esfuerzo de control con inclinación positiva de pendiente . . . . .	78
5.11. Comparación del esfuerzo de control con inclinación negativa de pendiente . . . . .	79
5.12. Tabla ANOVA. . . . .	81

# Lista de tablas

2.1. Características de los motores Dynamixel AX-12A . . . . .	13
2.2. Requerimientos de la placa de control . . . . .	15
2.3. Características <i>Arduino Nano</i> . . . . .	16
2.4. Datos caracterización del <i>FSR</i> . . . . .	23
2.5. Características módulo sensor de corriente . . . . .	25
2.6. Caracterización sensor de corriente . . . . .	27
2.7. Características módulo <i>Bluetooth</i> . . . . .	28
5.1. Datos estrategia de Tobillo . . . . .	66
5.2. Datos estrategia de cadera . . . . .	66
5.3. Máximo ángulo de inclinación para cada estrategia . . . . .	67
5.4. Comparación máximo ángulo de inclinación con inclinación positiva de pendiente . . . . .	68
5.5. Comparación máximo ángulo de inclinación con inclinación negativa de pendiente . . . . .	69
5.6. Valores en cuartiles para el Error acumulado con inclinación positiva . . . . .	70
5.7. Valores en cuartiles para el Error acumulado con inclinación negativa . . . . .	72
5.8. Error cuadrático medio para cada estrategia . . . . .	72
5.9. Valores en cuartiles para el error cuadrático medio con inclinación positiva . . . . .	73
5.10. Valores en cuartiles para el error cuadrático medio con inclinación negativa . . . . .	74
5.11. Valores en cuartiles para la energía consumida por el robot con inclinación positiva . . . . .	76
5.12. Valores en cuartiles para la energía consumida por el robot con inclinación negativa . . . . .	77

5.13. Valores en cuartiles para el esfuerzo de control con inclinación positiva . . . . .	78
5.14. Valores en cuartiles para el esfuerzo de control con inclinación negativa . . . . .	79
5.15. Grupos e índices empleados para la aplicación de la prueba ANOVA con inclinación positiva . . . . .	80
5.16. Grupos e índices empleados para la aplicación de la prueba ANOVA con inclinación negativa . . . . .	80
5.17. Interpretación Tabla Anova. . . . .	82
5.18. Resultado de la aplicación de la prueba ANOVA para las muestras de consumo de energía con inclinación positiva . . . . .	82
5.19. Resultado de la aplicación de la prueba ANOVA para las muestras de ECM del error con inclinación positiva . . . . .	83
5.20. Resultado de la aplicación de la prueba ANOVA para las muestras de máximo ángulo de recuperación con inclinación positiva . . . . .	83
5.21. Resultado de la aplicación de la prueba ANOVA para las muestras de consumo de energía con inclinación negativa . . . . .	83
5.22. Resultado de la aplicación de la prueba ANOVA para las muestras de ECM del error con inclinación negativa . . . . .	84
5.23. Resultado de la aplicación de la prueba ANOVA para las muestras de máximo ángulo de recuperación con inclinación negativa . . . . .	84

# Capítulo 1

## Aspectos generales del proyecto.

En este capítulo se presentan las consideraciones iniciales del proyecto: establecer la razones que llevaron a redactar el documento, planteando la problemática a solucionar y el objetivo a lograr con el desarrollo del mismo. De igual manera, se define los conceptos necesarios para la adecuada interpretación del escrito, al igual que los resultados de la búsqueda bibliográfica realizada para fundamentar la redacción del proyecto de investigación.

### 1.1. Planteamiento del problema

Actualmente se ha acrecentado el interés en los robots bípedos, caracterizados por intentar imitar la locomoción humana; además de poseer mejor adaptabilidad a los entornos humanos, evitando cambios en la infraestructura actual, así mismo, cabe resaltar que estos robots tienen un gran potencial en el área de servicio y en la ejecución de actividades peligrosas [1]. Por otra parte, los robots bípedos se caracterizan por poseer un CoM (*Center of Mass*) ubicado a una altura considerable respecto al suelo; sumado a esto, utilizan únicamente dos puntos de apoyo lo cual genera un polígono de soporte de área considerablemente menor comparado, por ejemplo, con robots cuadrúpedos, esto da como resultado que la locomoción bípeda sea de naturaleza inestable [2] [3] [4], por lo tanto, la habilidad de mantener y recobrar el equilibrio en terrenos inclinados, irregulares y ante disturbios es de gran prioridad en el diseño y construcción de estos robots, tanto al caminar como al mantenerse el estado de bipedestación estática.

De acuerdo a estudios recientes acerca de robots bípedos se han identificado dos estrategias discretas para el control de postura estática en los planos frontal y sagital [5] [6]: la estrategia de tobillo y la estrategia de cadera; Las cuales debido a que el sistema bípedo original es de orden alto y además es no lineal, brindan un enfoque interesante al extraer las características dominantes del comportamiento dinámico completo del robot y simplificarlas, ayudando de esta

manera a entender el sistema reduciendo su orden, que a su vez es de gran ventaja para el control de bipedestación. Por su parte, la estrategia de tobillo se caracteriza por realizar una inclinación del cuerpo semejante al comportamiento de un péndulo invertido de un solo eslabón donde el punto de apoyo es el tobillo y dicha articulación es utilizada para el balance mientras el resto del cuerpo permanece fijo. Por otra parte, la estrategia de cadera posee una respuesta similar al modelo de un péndulo invertido de doble eslabón donde intervienen las articulaciones de cadera y tobillo; en esta estrategia el par de la articulación de cadera es utilizado para generar fuerzas horizontales que muevan el centro de masa a una posición estable [7] [5]. Hasta la fecha se han realizado diversos estudios en los que se han comparado estas técnicas en términos de la magnitud de fuerzas externas aplicadas como perturbaciones [6], el tiempo de estabilización, la suavidad de los movimientos generados [8] y la relación en respuesta al variar el par aplicado a las articulaciones [5], sin embargo, no existe una comparación de estas estrategias cuando un robot bípedo, como la plataforma Bioid, es sometido a la inclinación de la superficie plana de soporte mientras este se encuentra en postura estática de doble soporte. De acuerdo a lo anterior, en este proyecto se resuelve plantear la siguiente pregunta de investigación.

En el contexto de las estrategias de recuperación de equilibrio para robots bípedos en estado de bipedestación, ¿Bajo qué condiciones una estrategia de accionamiento de tobillo presenta mejor desempeño que la estrategia de cadera y viceversa, cuando ambas han sido sometidas a una prueba de inclinación de la superficie de soporte?

Adicionalmente, el grupo de investigación en Automática Industrial (A.I) de la Universidad del Cauca posee la plataforma comercial Bioid Premium Kit, la cual ha permitido a los estudiantes realizar estudios de pregrado y postgrado enfocados en el diseño, cálculo e implementación de trayectorias de referencia para la marcha bípeda aplicada en robots, no obstante, este robot posee limitaciones en la arquitectura hardware como la falta de sensores necesarios para la medición de las diferentes variables (velocidad, posición, fuerza de contacto etc.); de igual forma, su microprocesador no permite ejecutar algoritmos de control *online* durante los experimentos de marcha, lo cual imposibilita probar nuevas técnicas de control. Por consiguiente, con el desarrollo de este trabajo de grado se pretende mejorar algunas de las características en cuanto a hardware y software del robot en mención.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo General

Comparar dos estrategias de recuperación del equilibrio para un robot bípedo en fase de bipedestación estática que se perturba mediante la inclinación de su superficie de soporte.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Implementar dos estrategias de recuperación del equilibrio para el robot Bioloid Premium Kit, basadas respectivamente en accionamiento de cadera y tobillo.
- Especificar el protocolo experimental y los índices de desempeño que se utilizarán para la comparación entre las estrategias que se abordarán en el presente estudio.
- Determinar las condiciones bajo las cuales una estrategia basada en accionamiento de tobillo presenta mejor desempeño que su contraparte, y viceversa.

## 1.3. Marco Teórico.

### Equilibrio

Quando se habla de equilibrio cabe resaltar que dependiendo del sistema existen diferentes tipos: químico, térmico, mecánico, económico, estático, etc. Cuando se refiere al equilibrio en el actuar humano estos están relacionados mayormente a aspectos como la adopción y manutención de posturas. En [9] definen el equilibrio como:

*“La capacidad de mantener su propio cuerpo en una posición controlada y estable, por medio de movimientos compensatorios”*

Por otra parte desde el contexto biomecánico sabemos que:

*“Un cuerpo está en equilibrio cuando su centro de gravedad cae dentro de la base de sustentación” [10].*

Existen factores que intervienen en el equilibrio en todo momento, sin considerar perturbaciones como: el centro de gravedad, la fuerza gravitacional, fuerzas inerciales y el polígono de soporte, de esta forma se distinguen dos tipos de equilibrio: equilibrio estático y equilibrio dinámico.

### Equilibrio Estático

El equilibrio estático hace referencia a la manutención de la postura sin desplazamiento, esto quiere decir que se adopta una postura determinada donde el centro de gravedad (*COG*) esta situado sobre la base de apoyo y la proyección de este cae dentro del polígono de soporte, por lo que el *COG* se encuentra a una altura considerable adquiriendo una energía potencial con respecto a la base, esto implica que si la proyección del centro de gravedad se acerca demasiado a

los bordes el bípedo perderá el equilibrio y caerá debido a los momentos angulares sobre el límite del polígono de soporte (PS). Por tanto, entre mas centrado se encuentre la proyección del *COG* sobre el PS mas estable será la postura ya que la distancia a cualquier punto de desequilibrio sera mayor. [11].

## Estabilidad y equilibrio

La estabilidad es la capacidad de un cuerpo de mantenerse en un estado de equilibrio estático o dinámico ante perturbaciones, cuando el sistema es capaz de mantener el equilibrio ante la perturbación se dice que el sistema es estable, si por el contrario pierde el equilibrio se hablará que el sistema es inestable.

## Polígono de soporte (PS)

En bipedestación, el polígono de soporte (PS) esta conformado por el área comprendida entre los margenes del perímetro del apoyo de los pies, de esta manera es posible modificar la forma y el tamaño del PS variando la posición de los pies [12] figura 1.1 .



Figura 1.1: Polígono de soporte  
Tomado de [12].

## Centro de Masa (*CoM*)

El centro de masa de un sistema es una posición geométrica definida en relación a un objeto o sistema que dinámicamente se comporta como si en él estuviera aplicada la resultante de las fuerzas externas al sistema. Este punto es el promedio de la posición de todas las partes que conforman el sistema y se vuelve de utilidad cuando se requiere trabajar objetos de formas poco comunes de tal manera que toda su masa se reduce a un pequeño punto ubicado en su centro.

### Centro de presión (CoP)

Es el punto en el suelo que indica la cantidad de par aplicado en el tobillo, el cual debe mantenerse dentro del polígono de soporte para evitar que el pie gire sobre uno de los bordes, la relación entre el CoP y el par del tobillo se puede apreciar en la ecuación (1.1).

$$x_{CoP} = \frac{1}{mg} \tau_a \quad (1.1)$$

### Criterio de estabilidad de Punto de Momento Cero

El punto de momento cero se ha convertido en una herramienta estándar logrando un balance dinámico para la caminata y manipulación en robots bípedos. El ZMP se define como el punto en el suelo en el que el momento neto de las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad no tienen componentes a lo largo de los ejes horizontales [13]; Es decir:

$$\begin{aligned} M_x &= 0, \\ M_y &= 0 \end{aligned}$$

Primero es necesario considerar el mecanismo de locomoción en estado de soporte simple (Figura 1.2a) donde **R** es la fuerza de reacción total que ejerce el suelo sobre la planta, el pie también experimenta la reacción del suelo en el punto **P**, manteniendo todo el mecanismo en equilibrio.

Para facilitar el análisis es posible despreocupar la parte del mecanismo sobre el tobillo (punto **A**) y representar su influencia mediante la fuerza **FA** y el Momento **MA** (Figura 1.2b) donde el peso del propio pie actúa en su centro de gravedad (punto **G**). La tarea más importante de un mecanismo de locomoción durante la marcha es preservar su equilibrio dinámico, esto se logra asegurando que toda el área del pie y no solo el borde este en contacto con el suelo, de esta manera el pie se apoya libremente en el soporte y el único contacto con el entorno se realiza a través de la fuerza de fricción y la fuerza vertical de reacción del suelo [14].

Dado que la fuerza de fricción actúa en el punto de contacto del pie con el suelo y ya que este se encuentra en reposo, los componentes de la fuerza **R** y el momento **M** que actúan en el plano horizontal serán compensados por la fuerza de fricción. Por lo tanto, la fuerza de reacción horizontal ( $R_x, R_y$ ) representa la fuerza de fricción que equilibra la componente transversal de la fuerza **FA**, mientras que el momento de reacción vertical  $M_z$  representa el momento de las fuerzas de reacción de fricción que equilibra la componente vertical del momento **MA** y el momento inducido por la fuerza **FA** (Figura 1.2c), por lo tanto, al asumir que en el contacto pie-suelo no existen deslizamientos la fricción estática compensará los componentes de fuerza horizontal ( $R_x, R_y$ ) y el par de reacción vertical ( $M_z$ ).

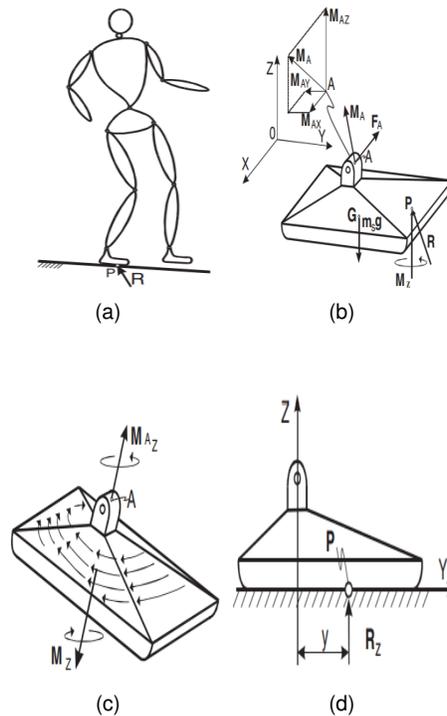


Figura 1.2: Representación de las fuerzas que actúan sobre la superficie de apoyo del mecanismo. Tomado de [14].

La fuerza de reacción vertical  $R_z$  representa la reacción del suelo que equilibra las fuerzas verticales, sin embargo, debido a la naturaleza unidireccional de la conexión entre el pie y el suelo los componentes horizontales de todos los momentos activos pueden compensarse solo cambiando la posición de la fuerza de reacción  $\mathbf{R}$  dentro del polígono de soporte, por tanto, la componente horizontal del momento  $\mathbf{MA}$  cambiará la fuerza de reacción a la posición correspondiente para equilibrar la carga adicional presentando un plano simple en  $yz$  (Figura 1.2.d); el momento  $MA_x$  se equilibra desplazando el punto de acción de la fuerza  $R_z$ , cuya intensidad se determina a partir de la ecuación de equilibrio de todas las fuerzas que actúan sobre el pie en la distancia correspondiente  $y$ . Es necesario enfatizar que todo el tiempo que la fuerza de reacción esté dentro del área cubierta por el pie el incremento en el momento del tobillo se compensará al cambiar la posición de esta fuerza, por lo que no existirán componentes horizontales de los momentos  $M_x$  y  $M_y$ , esta es la razón por la que en la Figura 1.2b en el punto  $\mathbf{P}$  solo existe la componente  $M_z$ .

Sin embargo, si el polígono de soporte real no es lo suficientemente grande como para abarcar la posición apropiada de la fuerza  $\mathbf{R}$  para equilibrar la acción de los momentos externos, la fuerza  $\mathbf{R}$  actuará en el borde del pie y la parte no compensada de la componente horizontal del momento de reacción causará la rotación del mecanismo alrededor del borde del pie resultando en el vuelco del mismo, por lo tanto, es posible afirmar que la condición necesaria y suficiente para que el mecanismo de locomoción se encuentre en equilibrio dinámico es situar el punto  $\mathbf{P}$  donde actúa

la fuerza de reacción del suelo, siendo la tarea básica del sistema de control mantener el ZMP dentro del polígono de soporte para evitar que se acerque demasiado a su borde, evitando la pérdida de equilibrio del sistema en general en el caso de una perturbación repentina [14] [15].

## 1.4. Estado del Arte

Desde tiempo remotos la humanidad ha soñado con generar máquinas capaces de imitar el comportamiento de una criatura inteligente, utilizando frecuentemente como referencia la conducta humana. Sin embargo, fue hasta el siglo XVI que en Europa y Japón la tecnología fue lo suficientemente avanzada para la construcción de prototipos automatizados, sentando las bases para la robótica moderna. Hoy en día llamamos robots a aquellas máquinas que incorporan algo de inteligencia computacional, aunque estas solamente han existido desde hace pocas décadas [16].

Los mecanismos humanoides han existido desde mucho tiempo atrás, siendo motivo de interés de grandes inventores a lo largo de la historia. Empezando con Leonardo Da Vinci y su mecanismo humanoide en 1495, los modelos no han hecho mas que avanzar en su búsqueda para representar el comportamiento humano. Entre 1768 y 1774, Pierre Jaquet-Droz y Henry Louis construyen los autómatas Jaquet-Droz [17], ya para el siglo XIX aparecen robots como el hombre de vapor creado por John Brainerd, seguido del hombre eléctrico desarrollado por Frank Reade Junior, además del robot ELEKTRO construido por Westinghouse Society en 1938 [18]. Más tarde, entre 1960 y 1990 se presenta un gran impulso en la creación de robots bípedos, especialmente en EEUU, Rusia, Francia y sobretodo en Japón [17], dando como resultado que en 1973 la universidad de Waseda en Tokio desarrollara el robot humanoide conocido como WABOT-1, capaz de comunicarse con las personas y caminar con sus extremidades inferiores, posteriormente, Sugano et al. desarrollan el WABOT-2, conocido como el "robot pianista"[19], lo que condujo a la creación del WABIAN-II [20], el primer robot completamente accionado que logró caminar con las rodillas estiradas.

Ya para el siglo XXI, el Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología Industrial Avanzada, AIST, logró grandes avances con la creación del HRP-2, considerado por algunos como el primer robot humanoide con tamaño humano que puede caerse y levantarse [21], posteriormente, se logró el desarrollo del robot humanoide HRP-3, el cual contaba con funciones a prueba de polvo y salpicaduras para los ejes de unión y dispositivos eléctricos, al igual que mejoraba la capacidad de manipular objetos presente en HRP-2 [22], desembocando en la creación del humanoide HRP-4, el cual mejora las características de sus predecesores en términos de costo y consumo energético [23].

En los últimos años se ha acrecentado el interés en la investigación de robots humanoides lo que permitió la creación de diversos prototipos para gran cantidad de usos; Robots como ASIMO [24], NAO [25] y SDR-4X [26], creados por HONDA, Aldebaran-Robotics y SONY respectivamente, han sido desarrollados para mejorar la experiencia de comunicación entre hombre y máquina,

permitiéndoles funcionar en el espacio vital humano, esto se puede observar en robots como NAO (figura 1.3a) y ASIMO (figura 1.3b) los cuales han implementado tecnologías de conectividad WiFi y Ethernet, reconocimiento facial y de voz, capacidad de aprendizaje, escucha y habla, pero sin dejar de lado el control de marcha y equilibrio gracias a la utilización de modelos simplificados y criterios de estabilidad como el *ZMP* [27]. De igual manera, actualmente existen robots de gran altura y peso desarrollados para tareas de mayor esfuerzo como el transporte de materiales y la búsqueda y rescate de personas, además, gracias al aumento del uso de técnicas de control de par se ha logrado regular la fuerza de contacto de manera segura y precisa, ayudando al robot a mantener su equilibrio incluso si choca con objetos; Existen robots como TORO [28] y ATLAS[29] (figura 1.3c) que han logrado grandes avances en este campo, siendo el prototipo desarrollado por Boston Dynamics el que se lleva los mayores reconocimientos a nivel global, ATLAS ha alcanzado una gran versatilidad en exteriores y una excepcional capacidad de movimiento debido en gran parte por el uso de actuadores hidráulicos, llegando a realizar diversas acrobacias e incluso correr en un terreno irregular [30]. En 2018, el Instituto de Cognición Humana y de Máquinas (IHMC) realizó un gran avance al desarrollar un nuevo marco de control para todo el cuerpo que le permitía al robot caminar con las piernas estiradas, esto se logró al dejar ciertos movimientos como el de los pies del robot sin restricciones, logrando que los comportamientos naturales de la marcha emergieran por sí solos [28] [30].

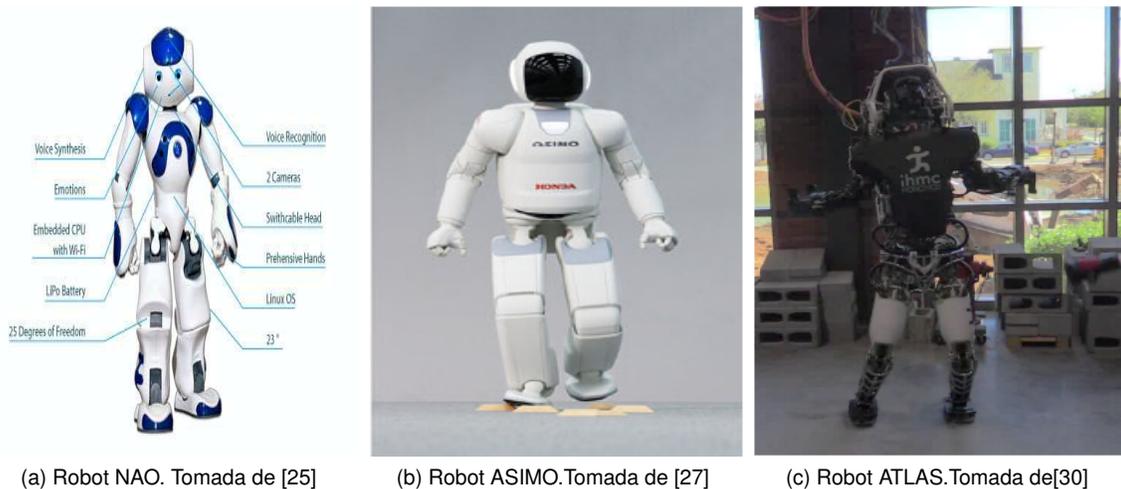


Figura 1.3: Robots NAO, ASIMO y ATLAS.

Igualmente, y gracias al creciente interés en el estudio de robots bípedos se han venido desarrollando equipos enfocados al análisis experimental en el campo de equilibrio bípedo y marcha humana, estos equipos están diseñados para brindar una apropiada plataforma de investigación, por lo que presentan un alto rendimiento, mantenimiento simple y un entorno de desarrollo familiar a precios asequibles. Robots como DARwIn-OP [31] y Bioloid [32] desarrollados por la empresa coreana Robotis, se caracterizan por su tamaño reducido y arquitectura versátil que permite la implementación de algunas técnicas de control sin la necesidad de desarrollar múltiples proto-

tipos, tanto DARwin-OP como Bioloid tienen una estructura modular basada en una red de bus serie y una arquitectura de PC estándar compatible con el protocolo DYNAMIXEL utilizado por los motores, sin embargo, DARwin-OP implementa nuevas tecnologías como Ethernet, Wifi, USB, parlante y cámara USB [33].

Muchos de estos robots han presentado grandes retos en su desarrollo ya que las estructuras ósea y muscular no pueden ser perfectamente representadas mediante un sistema robótico [17], siendo las pérdidas de equilibrio y las caídas quienes representan el mayor problema dentro de los sistemas bípedos, igualmente, la pequeña área de sustento y el alto centro de gravedad hacen que estos sistemas sean inestables por naturaleza y requieran por tanto un ajuste constante del balance [2] [3] [4]. Para abordar el reto de mantener el equilibrio en bípedos aparece como criterio de estabilidad el punto de momento cero o ZMP (*Zero moment point*), aplicado por primera vez con Vukobratovic, et.al. en [34] mostrando que este punto en un robot bípedo es afectado por la masa y la inercia del torso del robot. Asimismo, en 1984 se realizó la primera aplicación práctica del ZMP con el robot WL-10RD en la Universidad de Waseda en Tokio, Japón [14].

Con base en esto, en 1995 Kajita, et.al. presentan el “modelo lineal del péndulo invertido”, un nuevo esquema para el estudio de robots bípedos en dos dimensiones que aprovecha la extracción de una característica dominante de la dinámica de un bípedo dado que en el sistema bípedo original las dinámicas son de alto orden y no lineales; Esta simplificación del modelo permite ejecutar la estrategia de tobillo al dejar libre esta articulación [35], de igual manera, Kajita et.al. proponen el modelo de péndulo invertido en tres dimensiones, en este sistema ya no solo se modela el plano sagital (XZ) si nó que también se toma en cuenta el plano lateral (YZ) [36], igualmente, para el año 2003 introducen un nuevo método de generación de patrón de marcha basado en ZMP denominado *car-table* [37], en este la dinámica del robot se modela como un carro en movimiento sobre una mesa (Figura 1.4) donde para recuperar la posición de balance se calcula la aceleración necesaria en dirección contraria al disturbio [38].

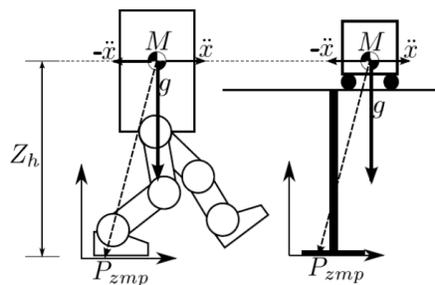


Figura 1.4: Modelo *car-table*  
Tomado de [38].

El avance de estos modelos abre espacio al desarrollo de la mayoría de estrategias de control, siendo ampliamente utilizados para control de estabilidad de postura erguida, caminata y movimientos a altas velocidades como se muestra en [36] [39] [40] [41], igualmente, el punto de momento cero se ha convertido en una herramienta estándar logrando un balance dinámico para

la caminata y manipulación en robots bípedos. El control de equilibrio permite mantener, lograr o restaurar el estado de balance en cualquier posición o actividad; además, este control de postura puede ser “reactivo”(compensatorio) o “predictivo”(anticipativo) e incluso una combinación de los dos [42]; por lo tanto, cuando se percibe una alteración en el estado de equilibrio el control de postura debe ser capaz de tomar una decisión y ejecutar una acción que permita retomar el estado de equilibrio. Inspirados en los humanos, una gran variedad de estrategias son utilizadas para tratar con disturbios; por ejemplo, el control de postura predictivo es una estrategia que envuelve un movimiento voluntario en anticipación a una perturbación prevista, para ello el cuerpo se acomoda y adopta una postura capaz de compensar el posterior desequilibrio controlado del cuerpo, en el caso del control de postura compensatorio o reactivo, este responde a un movimiento que sigue un disturbio imprevisto, por lo que técnicas como la de tobillo o cadera son las mayormente utilizadas, siendo estas comúnmente conocidas como respuestas de soporte fijo [43], sin embargo, es posible recurrir a otras estrategias como la rotación de los brazos, agarrarse de objetos, bajar el centro de gravedad o dar un paso para recobrar nuevamente el equilibrio, las cuales se consideran estrategias de cambio de apoyo [4] [42] [43].

Los avances mas recientes han incluido una combinación entre las estrategias de tobillo, cadera e incluso junto a la estrategia de paso; donde no se aplican jerárquicamente sino de acuerdo a un factor de ponderación [44]. En otros casos como en [45] las tres estrategias se aplican de forma secuencial, primero se aplica la estrategia de tobillo, de no ser suficiente se prosigue con la estrategia de cadera y si esto no basta se recurre a la estrategia de paso, Kiemel en [46] propone una estrategia combinada entre tobillo y cadera usando el modelo de péndulo invertido con volante, donde el par del volante se usa como una entrada extra de control en el robot humanoide *TUlip*; además, hace notorio ciertos casos donde no es posible aplicar la estrategia de paso, por ejemplo cuando hay un obstáculo en el piso en la dirección de la perturbación (figura 1.5a), cuando el robot se encuentra en fase de soporte simple y recibe una perturbación lateral (figura 1.5b) y el último caso es donde no existe una superficie de apoyo para dar el paso (figura 1.5c). En [47] proponen un modelo de control predictivo lineal (LMPC) que además considera los efectos de la inercia de la parte superior del cuerpo y la duración óptima del paso con el fin de generar respuestas similares a las humanas, para esto hacen uso de la combinación de las estrategias de cadera, tobillo y de paso, con duración de paso ajustable automáticamente.

De igual manera, en [48] los autores hacen una combinación entre el modelo *cart-table* y el modelo de doble integrador sobre el humanoide COMAN en entorno virtual, el uso combinado de estas dos técnicas permite obtener una respuesta basada en ZMP para el desplazamiento horizontal y generar un control de actitud rotacional que absorbe las perturbaciones externas al girar la parte superior del cuerpo del bípedo, de este modo, el sistema responde de acuerdo a la perturbación naturalmente con una estrategia similar a la de tobillo o la de cadera. En [49] los autores hacen uso del modelo *cart-table* junto al modelo de péndulo invertido lineal en 2D y 3D para generar un control activo de rechazo de perturbaciones (ADRC por sus siglas en inglés) sobre el robot Bioloid para levantar peso variable entre 1/3 y 2/3 del peso total del robot; también se ha avanzado en el estudio de exoesqueletos bípedos donde las articulaciones del tobillo se

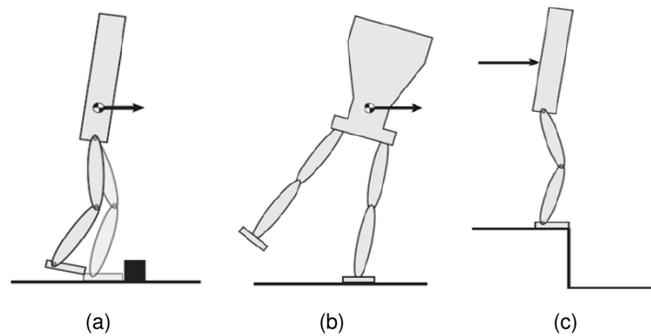


Figura 1.5: Casos donde no es posible usar la estrategia de paso.  
Tomado de [46]

accionan mediante actuadores de rigidez física variable, por lo tanto, si el objetivo es lograr un equilibrio activo, se utiliza un modelo bípedo abstraído y con volante de momento de torsión [50].

Por otra parte, en [51] proponen un rechazo activo de perturbaciones mediante la aceleración de las extremidades superiores, donde las uniones de los brazos se usan para manipular las fuerzas y momentos de soporte vertical, lateral y longitudinal, permaneciendo las articulaciones de las piernas en la trayectoria deseada, de forma similar, Kobayashi, Taisuke, et al. en 2015 proponen un método de balanceo de brazos para mejorar la estabilidad y la eficiencia, seleccionando una estrategia óptima de balanceo de brazos dependiendo de las condiciones en estado estático e inclusive en marcha [52]; posteriormente, en 2016, comparan dos estrategias con selección de algoritmo de equilibrio (SAL) Ro-SAL y Su-SAL, la primera implica el uso y la compensación del balanceo de la pierna mediante la rotación de la cadera y el movimiento del brazo, mientras que la estrategia Su-SAL, implica el soporte del seguimiento de trayectoria del centro de gravedad basado en un control predictivo [53].

Finalmente, los autores en [54] proponen un control de componente divergente de movimiento, que permite rechazar los disturbios mediante el levantamiento de una pierna manteniendo el centro de gravedad en equilibrio en fase de soporte simple mediante un balance de múltiples contactos.

## Capítulo 2

# Diseño del Sistema de Control y Adquisición de Datos

En este capítulo se presenta una descripción detallada de la propuesta *hardware* y *software* necesaria para la implementación de las dos estrategias de control sobre la plataforma *Bioid Premium Kit* y su posterior comparación. Inicialmente, se hace una descripción de la plataforma *Bioid Premium Kit*, para la cual es importante resaltar las características físicas y de instrumentación que servirán de base para el diseño de la nueva placa PCB en remplazo del controlador actual del robot. Con base en esta información, se realiza una descripción de los requisitos de diseño para el circuito impreso, siendo este el punto de partida para establecer los equipos a utilizar; como primer punto se establece el nuevo microprocesador utilizado para la programación del controlador, además de las consideraciones técnicas de los paquetes de librerías necesarios para poder manipular los motores del robot con la nueva plataforma; también se muestra el diseño del regulador de tensión en serie utilizado como fuente de alimentación del circuito de medición; además, se describir el diseño de los sensores de *ZMP*, corriente y voltaje, al igual que el funcionamiento del multiplexor, el sensor de orientación y el sistema de comunicación inalámbrica utilizado para el envío de datos desde el robot hacia la interfaz desarrollada en *Matlab* para almacenar y graficar las variables de comparación que intervienen en los experimentos de control de equilibrio desarrollados sobre el robot.

### 2.1. Robot bípedo *Bioid Premium Kit*

El robot bípedo *Bioid Premium* fue diseñado por la empresa surcoreana *Robotis* con el fin de ser una plataforma educativa de bajo costo completamente modular, teniendo un total de 29 ejemplares de robots diferentes que van desde robots con ruedas, hexápodos, cuadrúpedos, brazos

de robot y múltiples bípedos, incluidas las variantes de *Bioid Premium Humanoid*. El dispositivo cuenta con un controlador *CM-530*, un sensor giroscópico y de distancia, además de un control remoto inalámbrico, sin embargo, el controlador actual de la plataforma limita el desarrollo de proyectos de estudio avanzado, por lo que se decide retirar el procesador *CM-530* del cuerpo del robot y utilizar la estructura articular del robot en su forma humanoide tipo A observada en la figura 2.1.

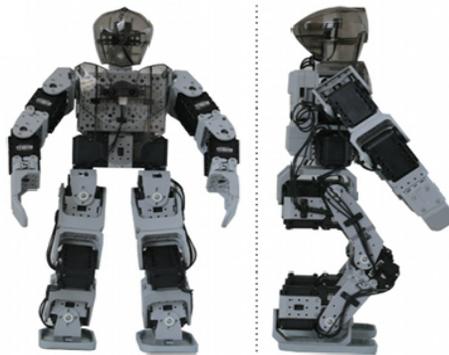


Figura 2.1: Robot bípedo *Bioid* forma humanoide tipo A

Descripción	Especificación
Velocidad de conexión	7843 bps - 1 Mbps
Peso	54.6g
Dimensiones (ancho x alto x ancho)	32mm x 50mm x 40mm
Resolución	0,29[°]
Rango de trabajo	0[°] a 300[°] / giro continuo
Relación de engranajes	254:1
Par	1.5 N*m (a 12V, 1.5A)
Temperatura de funcionamiento	-5 [°C] a +70 [°C]
Voltaje de entrada	9.0 a 12.0V( <b>Recomendado : 11.1V</b> )
Señal de control	Paquete digital
Tipo de protocolo	Half Duplex Asynchronous Serial Communication (8bit, 1stop, No Parity)
Conexión física	TTL Level Multi Drop Bus
ID	254 ID (0-253)
Feedback	Posición, Temperatura, Carga, Voltaje de Entrada, etc.

Tabla 2.1: Características de los motores Dynamixel AX-12A

La forma humanoide mostrada en la figura tiene un peso de 1.7 Kg, una altura total de 39.7 cm, un ancho de 19 cm y una profundidad de 10 cm. De igual manera, cuenta con 18 grados de libertad

(GDL), 12 en las extremidades inferiores y 6 en las superiores, donde cada articulación esta equipada con el servomotor *Dynamixel AX-12* cuyas características principales pueden observarse en la tabla 2.1.

## 2.2. Diseño de la nueva placa de control para el robot bípedo

Como se mencionó anteriormente la arquitectura cerrada del controlador CM-530 presente en la plataforma limita la implementación de estrategias de control diferentes a las programadas de fábrica, además de restringir la conexión y adaptación de sistemas de medición externos a los que ya posee por defecto, siendo necesario reemplazar este controlador por una tarjeta de circuito impreso capaz de soportar un nuevo controlador de código abierto y mas accesible; permitiendo la adecuación de los sensores necesarios para medición de las diferentes variables como *ZMP*, voltaje, orientación del robot y corriente. De igual manera, el circuito desarrollado debe posibilitar la manipulación de los actuadores *Dynamixel AX-12A*, además de poseer un sistema de conexión inalámbrica entre la placa y el ordenador encargado de la supervisión, almacenamiento y manipulación de los indicadores de comparación de cada estrategia.

Con el fin de que la nueva placa impresa cumpla con las diversas funcionalidades, es indispensable determinar los requerimientos físicos, eléctricos y de *software* que esta debe satisfacer, dichos requerimientos son el punto de partida para determinar las características de los instrumentos a utilizar y ayudan igualmente a determinar el diseño del circuito; obteniendo en la tabla 2.2 los requerimientos del circuito.

La nueva placa de control busca presentar una propuesta de diseño de bajo costo y con instrumentos de fácil obtención en el mercado, además debe tener un tamaño y peso reducido con el fin de no afectar la dinámica de modelos matemáticos utilizados para la simulación y control del robot, permitiendo sujetar la placa impresa en el mismo lugar del controlador *CM-530* actual, de igual manera, el circuito debe presentar un consumo de corriente y voltaje reducido en comparación al de los motores *Dynamixel AX-12A*, de esta manera se logra que el consumo energético de todos los componentes del sistema de control y adquisición de datos sea aparentemente despreciable y no afecte la medición de la corriente utilizada por el robot en cada estrategia de control. De igual modo, es importante considerar la compatibilidad entre los componentes ya que estos tendrán que ser manipulados bajo el mismo entorno de control, además de ser ubicados en un espacio reducido por lo que el funcionamiento de cada instrumento no debe afectar a los demás ni el funcionamiento del robot.

Descripción	Requerimiento
Peso	Menor a 100 gr
Dimensiones	Menores de 10 cm de ancho y alto.
Fuente de alimentación	Considerando la alimentación nominal del robot, la fuente de alimentación debe suministrar un mínimo de 11.1V y de 1A a 4A
Sensor de <i>ZMP</i>	Bajo costo, voltaje de operación menor a 11.1V, bajo consumo de corriente, rango de medición entre 0 y 2 Kg (según el peso del robot), tamaño reducido y compatibilidad con los demás componentes.
Sensor de corriente	Bajo costo, tamaño reducido, voltaje de operación menor a 11.1V, bajo consumo de corriente, rango de medición entre 0 y 5 amperios, además de compatibilidad con los demás componentes
Sensor de voltaje	Bajo costo, tamaño reducido, voltaje de operación menor a 11.1V, bajo consumo de corriente, rango de medición entre 0 y 12 voltios, además de compatibilidad con los demás componentes
Sensor de orientación	Bajo costo, tamaño reducido, voltaje de operación menor a 11.1V, bajo consumo de corriente y compatibilidad con los demás componentes
Comunicación inalámbrica	Bajo costo, tamaño reducido, voltaje de operación menor a 11.1V, bajo consumo de corriente, interfaz de comunicación serial, velocidad de transmisión elevada y compatibilidad con los demás componentes.
Controlador	Bajo costo, programable bajo código abierto, voltaje de operación menor a 11.1V, tamaño reducido, bajo consumo de corriente, velocidad de reloj elevada, mínimo 10 entradas analógicas para los sensores (considerando el cálculo de <i>ZMP</i> explicado mas adelante) y compatibilidad con los demás componentes.

Tabla 2.2: Requerimientos de la placa de control

### 2.2.1. Comunicación de los motores *Dynamixel* con la nueva plataforma de control

Al retirar el procesador *CM-530* que trae consigo el robot *Bioloid* es necesario encontrar una plataforma de remplazo que permita manipular el funcionamiento de los motores *Dynamixel* y además cumpla con los requerimientos del circuito para implementar las estrategias de control. Partiendo del hecho de que los motores incorporan un microcontrolador *ATmega8* que les permite una comunicación *Half-Duplex UART TTL*, es posible utilizar la plataforma *arduino* para manipular el funcionamiento de la estructura robótica a través de comunicación serial, aun así, para establecer la conexión de los motores con la placa *arduino* es necesario usar un paquete de librerías adicional llamado *DynamixelSerial*, la cual fue desarrollada por *Savage Electronics* con el objetivo de enlazar el protocolo de comunicación de los motores con el empleado por los puertos seriales de una placa *arduino*.

Teniendo en cuenta los requerimientos del circuito de control para el microcontrolador se elige una placa *arduino NANO* como placa de desarrollo *firmware* del proyecto, ya que permite cumplir las restricciones de espacio de instalación sobre el cuerpo del robot *Bioloid*, tiene bajo costo y es de fácil obtención en el mercado, además de cumplir con los requerimientos técnicos, como el número de conexiones digitales, voltaje de operación y velocidad de procesamiento, sin embargo, no tiene la cantidad de entradas analógicas necesarias para los sensores de la nueva plataforma, lo que es posible solucionar gracias a la implementación conjunta de un multiplexor como se explicara más adelante; con estas consideraciones en la tabla 2.3 se muestran las características de la placa *arduino NANO*.

Descripción	Especificación
Microcontrolador	ATmega328
Voltaje de operación	5 V
Velocidad de reloj	16 MHz
Pines de estradas analogicas	8
Corriente DC por pines I/O	40 mA (Pines I/O)
Voltaje de entrada	7-12 V
Pines digitales I/O	22 (6 de ellos son PWM)
Consumo de potencia	19 mA
Tamaño PCB	18 x 45 mm
Peso	7 g

Tabla 2.3: Características *Arduino Nano*

Ahora bien, para establecer la conexión física que permita la manipulación de los motores *Dynamixel* junto a cualquier plataforma *arduino* se opta por utilizar el diagrama de conexiones electrónico planteado por el creador de la librería *DynamixelSerial*; dicho circuito representa una conexión *Simplex* que permite una comunicación unidireccional desde la plataforma de control hacia los motores del robot; en la figura 2.2 se muestra el circuito utilizado.

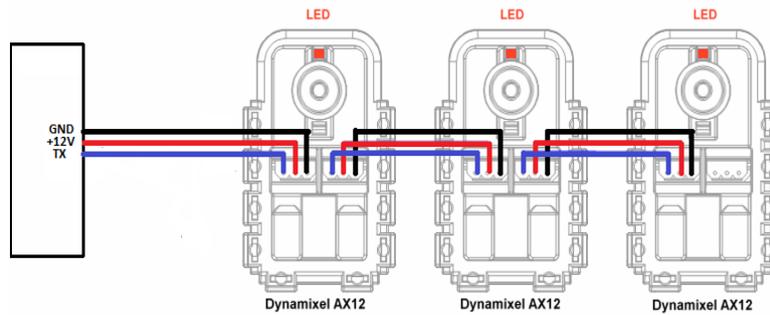


Figura 2.2: Conexión *Simplex* entre los motores *Dynamixel* y la plataforma *arduino*

Como se observa en la imagen, los motores poseen un puerto de comunicación tipo bus serial que permite manipular una gran cantidad de motores a través de un mismo pin de datos, ya que cada motor *Dynamixel* tiene establecido un identificador mediante el cual se envían las ordenes individualmente es posible utilizar el paquete de librerías para enviar dichas ordenes a cada motor por el puerto *Tx* de comunicación serial de *arduino*, de esta manera, se pueden realizar gran variedad de modificaciones en los actuadores del robot, tales como la capacidad de establecer la posición angular y el par de cada motor.

### Librería *DynamixelSerial*

La librería desarrollada para el control de los motores *Dynamixel* mediante la plataforma *arduino* brinda una amplia variedad de instrucciones que permiten modificar desde el id del motor o su temperatura límite de trabajo, hasta el máximo torque que el motor puede utilizar en su funcionamiento, por esta razón, es necesario mencionar los comandos utilizados en este proyecto con el fin de aclarar su función dentro del algoritmo de programación embebido en la placa de control, permitiendo dejar una guía para futuros proyectos.

- ***Dynamixel.setSerial(Serial)***: Permite establecer el puerto serial de la placa *arduino* a utilizar para la comunicación con los motores; para placas *arduino* UNO, NANO y MICRO la variable *serial* se reemplaza por *&Serial* ya que estos solo cuentan con un único puerto serie, sin embargo para la placa *arduino Mega* se puede elegir entre *&Serial1*, *&Serial2*, *&Serial3* según el puerto que se quiera usar.
- ***Dynamixel.begin(baudRate , DATACONTROL)***: Se utiliza para iniciar la comunicación serial de la placa *arduino*, permitiendo establecer un *baudRate* de 1 Mbps y el *DATACONTROL* utilizado para identificar el pin encargado de controlar la comunicación *Half-Duplex* entre los motores y el *arduino*, sin embargo en este proyecto no se establece este tipo de comunicación ya que no es necesario recolectar la información brindada por los motores.

- ***Dynamixel.move(id,position)***: permite rotar el eje del motor especificado por el id hasta una posición descrita mediante un valor digital de 10bits es decir, entre 0 a 1023, o su equivalente físico angular de 0 a 300°.
- ***Dynamixel.setMaxTorque(id,Torque)***: permite establecer a cada motor especificado por su id el máximo par de fuerza en un rango de 0 a 1023, este comando es importante a la hora de la sintonización del controlador ya que puede alterar la velocidad de respuesta del robot ante un disturbio.
- ***Dynamixel.moveSpeed(id,position,speed)***: permite rotar el eje de un motor especificado por el id, hasta una posición angular con velocidad preestablecida en un rango de 0 a 1023; al igual que la instrucción anterior es de vital importancia al momento de sintonizar el controlador.

### Multiplexor *CD74HC4067*

Uno de los mayores problemas al elegir la placa *arduino NANO* como controlador es que esta no cumple con el número de entradas analógicas necesarias; ya que como se explicará más adelante, para la medición del *ZMP* es necesario usar 8 sensores *FSR* que junto a la medición de voltaje y corriente implica que el controlador posea un mínimo 10 entradas analógicas para muestrear la totalidad de las señales, lo que sobrepasa las 8 entradas analógicas estándar de la placa *NANO*, teniendo en cuenta esto, se recurre al módulo *CD74HC4067* para duplicar las entradas analógicas del microcontrolador, cumpliendo de esta manera con los requisitos mínimos del circuito.

El *CD74HC4067* es un Multiplexor/Demultiplexor de 16 canales bidireccionales lo que permite dirigir una señal a múltiples salidas (*demux*) o viceversa; es posible considerarlo como un interruptor controlado digitalmente donde se leen 16 entradas analógicas direccionadas mediante 5 pines digitales de la placa *arduino*, 4 para establecer el canal de lectura y el último conectado a una entrada analógica de la placa a fin de recolectar la señal leída en el canal seleccionado. El módulo funciona con una alimentación de 2 a 6V, donde las tensiones de las señales de los dispositivos no pueden superar dicho voltaje, además, el dispositivo solo puede proporcionar un máximo de corriente de 20 mA lo cual podría ser un problema pero ya que este valor es similar al entregado por un pin de una placa *arduino NANO* se descartan dificultades para el proyecto.

En la figura 2.3 se muestran las conexiones del multiplexor, donde los pines C6 a C15 representan las conexiones de las 10 señales analógicas de los sensores; los pines S0, S1, S2, S3 van conectados respectivamente a las entradas digitales D12, D11, D8 y D7 del *arduino* para el control de flujo de datos, finalmente, la señal analógica de salida del multiplexor va conectada al pin A0 del microcontrolador permitiendo el muestreo de la señal para su posterior manipulación por medio de su funcionalidad ADC (*Analog Digital converter*).

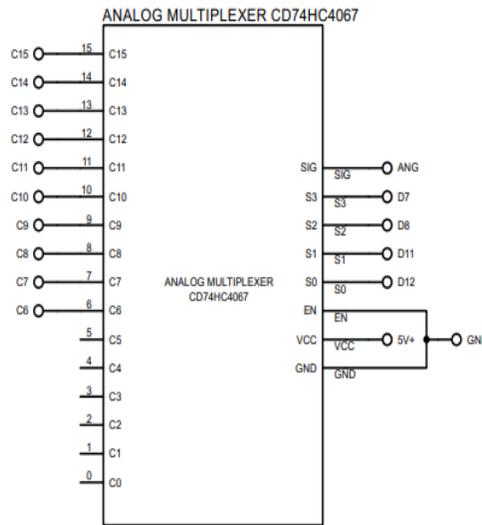


Figura 2.3: Conexiones del multiplexor

### 2.2.2. Cálculo y medición del criterio de estabilidad *ZMP* para al robot bípedo *Bio-loid*

Para conservar el equilibrio es necesario mantener la proyección al suelo del centro de gravedad dentro del polígono de soporte ya que cuanto mas alejado se encuentre este de los bordes del PS mas estable será, aquí es donde el *ZMP* juega un rol importante debido a que mediante este criterio es posible conocer la posición necesaria para llevar el sistema a una posición de equilibrio donde la suma de todas las fuerzas sea igual a 0; *Vukobratovic* y *Stepanenko* en 1972 dan un ejemplo de distribución de fuerza a lo largo del pie (figura 2.4a), dado a que la carga tiene el mismo sentido en toda la superficie del pie se puede reducir a la fuerza resultante  $\mathbf{R}$  cuyo punto de presión estará en los límites del pie; de esta manera es posible simplificar y observar que el *ZMP* se define como el punto de referencia ideal sobre el suelo para el centro de presión (*CoP*) de la fuerza de reacción del piso [55].

Particularmente conviene analizar a detalle la reacción del piso sobre el pie en tres dimensiones como se muestra en la figura 2.4b, esto supone que la fuerza de reacción del suelo esta actuando en un número finito de puntos de contacto  $\mathbf{p}_i (i = 1, \dots, N)$  para los cuales cada uno de los vectores de fuerza tiene la forma  $\mathbf{f}_i := [f_{ix}, f_{iy}, f_{iz}]^T$ , donde  $f_{ix}$ ,  $f_{iy}$  y  $f_{iz}$  son los componentes de la fuerza respecto a los ejes coordenados  $x$ ,  $y$  y  $z$  respectivamente; en consecuencia el *ZMP* se puede calcular como el promedio ponderado de todas las fuerzas de contacto respecto a cada eje de referencia:

$$\mathbf{p} = \frac{\sum_{i=1}^N \mathbf{p}_i f_{iz}}{\sum_{i=1}^N f_{iz}} \quad (2.1)$$

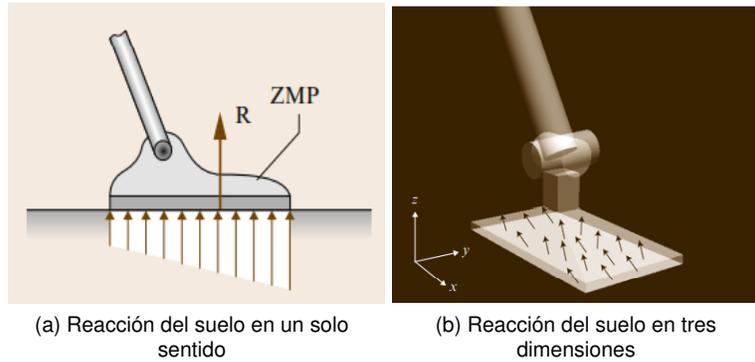


Figura 2.4: Reacción del suelo sobre la planta del pie  
Fuente [55].

Lo cual puede ser escrito de otra manera:

$$\mathbf{p} = \sum_{i=1}^N \alpha_i \mathbf{p}_i, \quad (2.2)$$

$$\alpha_i = \frac{f_{iz}}{f_z}, \quad (2.3)$$

$$f_z = \sum_{i=1}^N f_{iz} \quad (2.4)$$

Dado que un robot bípedo no puede adherirse a la superficie con sus suelas entonces se tiene:

$$f_{iz} \geq 0 \quad (i = 1, \dots, N) \quad (2.5)$$

Así es posible decir que:

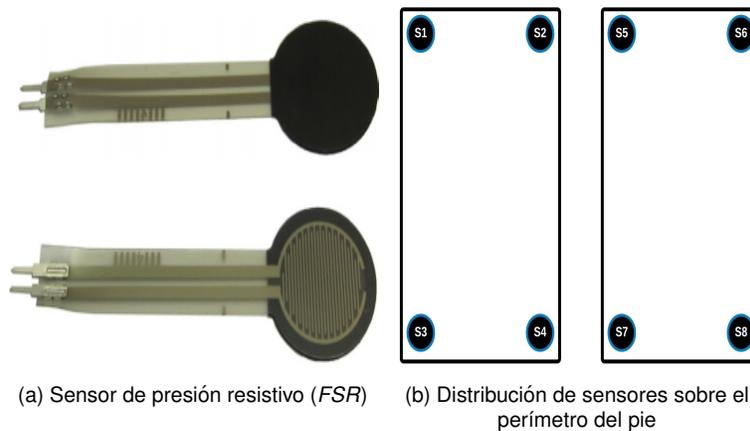
$$\left\{ \alpha_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, N), \sum_{i=1}^N \alpha_i = 1 \right\} \quad (2.6)$$

Los puntos que satisfacen las ecuaciones (2.2) y (2.6) conforman el polígono de soporte, por lo que es posible afirmar que el *ZMP* siempre existe dentro de este límite, en otras palabras, el *ZMP* nunca abandona el polígono de soporte como resultado de la restricción unilateral sobre la fuerza de reacción del piso.

### Medición del punto *ZMP* mediante sensores de presión resistivos

Para medir con precisión la posición del centro de presión y compararlo con respecto al *ZMP* de referencia se aprovecha que este depende de la fuerza promedio de contacto entre la suela

de los pies y el terreno, por tanto se dispone de ocho sensores de presión resistivos (figura 2.5a) distribuidos en cada vértice de la planta del pie del robot según la disposición mostrada en la figura 2.5b, de igual forma, la imagen 2.5c presenta 8 piezas circulares de material plástico adherente de 1 milímetro de grosor sobre cada uno de los sensores con el fin de mejorar su lectura, utilizando asimismo un material adhesivo para sujetar los FSR a los pies del robot.



(c) Instalación de los sensores en el robot real

Figura 2.5: Sensores de presión resistivos  
Fuente Propia.

Tomando en consideración las características físicas del robot y los requerimientos del circuito se elige el sensor de presión resistivo *DF9-40*, el cual entre sus diversas versiones se escoge un rango de medición de 0 a 2 Kg con una precisión de  $\pm 2.5\%$  (rango de medición 85%) ya que este es el que mejor se adecua al rango de peso del robot, igualmente, el *DF9-40* es un sensor bastante pequeño, con un grosor de 0.25 mm y un diámetro en su área de detección de 7.5 mm por lo que es adecuado para el tamaño de los pies del robot.

El proceso de lectura de la señal analógica brindada por cada sensor se hace a través del convertor analógico-digital (ADC) de *arduino* de manera que el nivel de tensión de la entrada se transforma en un valor digital con resolución de 10 bits, es decir en el rango de 0 a 1023; de igual forma, es indispensable establecer la relación matemática entre el valor digital y la masa colocada sobre los sensores, lo que hace necesario calcular la curva característica del sensor *DF9-40* mediante métodos experimentales de laboratorio. El circuito de la figura 2.6a es brindado por el fabricante y es el utilizado para realizar la caracterización del sensor, en él se tiene que  $V_+ = 3,3V$  y la resistencia fija  $RM = 10K\Omega$ ; mientras tanto, el amplificador operacional está configurado como seguidor de tensión, buscando así que la alta impedancia del arreglo aisle la resistencia  $RM$  de la baja resistencia del módulo convertor analógico, garantizando igualmente la correcta proporción del divisor de tensión, por lo tanto, variando la masa colocada sobre el sensor y obteniendo el valor medido por el ADC de *arduino* (ver tabla 2.4) es posible generar la curva característica del sensor (figura 2.6b).

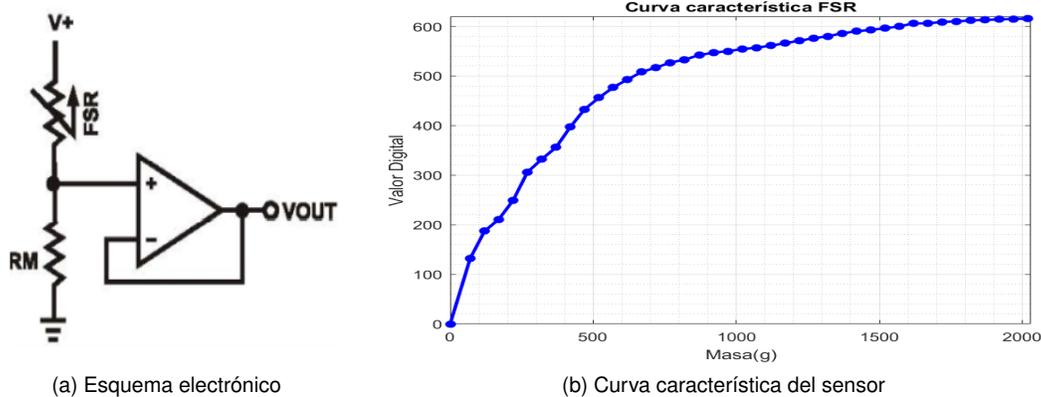


Figura 2.6: Caracterización del sensor  
Fuente Propia.

A partir de los datos suministrados por la tabla 2.4 se debe obtener una ecuación polinómica que describa con bastante precisión la relación entre el valor digital del voltaje medido por la placa de control y la masa correspondiente ubicada sobre el sensor, lo que se conoce como ajuste polinomial de curva; el cálculo de esta relación polinómica puede ser fácilmente realizado haciendo uso de la función *polyfit* de *MatLab*, la cual presenta los coeficientes para un polinomio  $p(x)$  de grado  $n$  que mejor se ajuste a los datos (en el sentido de los mínimos cuadrados). La función recibe como entrada los valores de  $x$ ,  $y$  y  $n$ , siendo  $x$  el valor digital correspondiente al voltaje entregado por los sensores FSR,  $y$  los valores de masa para cada medida y  $n$  el grado del polinomio que en este caso es 5, de esta manera, se obtiene como resultado los coeficientes del polinomio y un vector *mu* de dos elementos correspondientes a valores de centrado y escalado, los cuales son utilizados por *polyfit* para mejorar las propiedades numéricas tanto del polinomio como del algoritmo de ajuste; la ecuación (2.7) representa el polinomio encontrado por *Matlab* para representar la relación entre valor digital de voltaje y masa según los datos entregados por

los sensores FSR.

$$W(x) = 24,2161x^5 + 195,0131x^4 + 550,4752x^3 + 677,6467x^2 + 572,4295x + 616,8311 \quad (2.7)$$

Según la ecuación 2.7 para cada valor digital de entrada generado por el voltaje de los sensores de fuerza la función entrega el valor correspondiente de masa, sin embargo, ya que al momento del cálculo de los coeficientes se hace uso del vector  $mu$ , es necesario escalar los valores de entrada ( $int$ ) al momento de evaluar el polinomio; de esta manera  $x = \frac{int - mu(1)}{mu(2)}$  luego de remplazar los valores de  $mu$  queda definida de la siguiente manera:

$$x = \frac{int - 492,292682926829}{152,200072914312} \quad (2.8)$$

Masa (gr)	Valor ADC (0 - 1023)	Masa (gr)	Valor ADC (0 - 1023)
0	0	1070	557
70	132	1120	561
120	187	1170	566
170	211	1220	571
220	249	1270	576
270	306	1320	580
320	332	1370	586
370	356	1420	590
420	397	1470	593
470	433	1520	596
520	456	1570	600
570	477	1620	606
620	493	1670	606
670	508	1720	609
720	517	1770	610
770	527	1820	612
820	533	1870	613
870	542	1920	614
920	547	1970	615
970	550	2020	616
1020	554		

Tabla 2.4: Datos caracterización del FSR

De igual manera, es posible graficar la respuesta del polinomio obtenido haciendo uso de la función *polyval* de *Matlab*; dicho comando recibe como entradas los valores digitales de voltaje obtenidos en la caracterización, los coeficientes del polinomio y el vector  $mu$ , retornando los

valores de masa entregados por la ecuación (2.7), permitiendo obtener la gráfica 2.7.

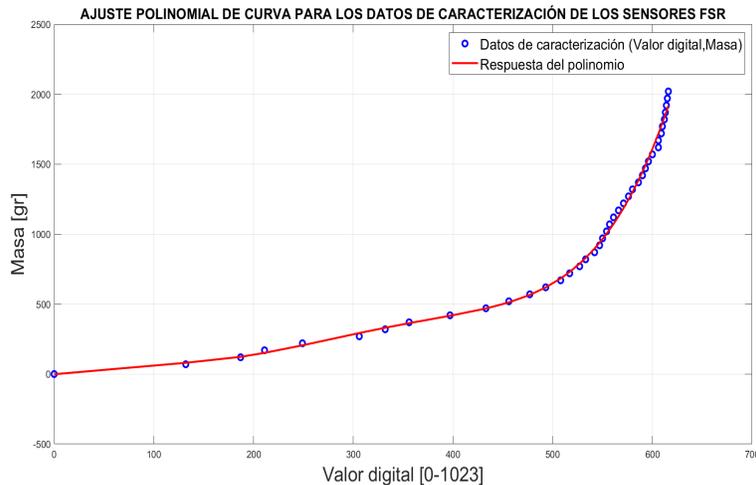


Figura 2.7: Ajuste polinomial de curva para los datos de caracterización de los sensores FSR

De esta manera, con el valor de la masa del objeto ubicado sobre cada sensor, sumado a la ecuación de caracterización por ajuste polinomial (2.7) para sensores y la ecuación de ponderado vectorial de *ZMP* (2.2) es posible conocer el punto exacto del *CoP* para el Robot *bioid*. Ahora bien, con el fin de obtener la certeza de este proceso se implementó el algoritmo completo sobre *arduino*, donde primeramente se hace la lectura de los sensores FSR y el multiplexor, se realiza el cálculo de las ecuaciones (2.7) y (2.2) y se envía el resultado por medio de una comunicación inalámbrica implementada con *Matlab* para la visualización del *ZMP*, obteniendo como resultado la figura 2.8 que representa gráficamente el movimiento del *CoM* reflejado en el *ZMP*, donde este valor se desplaza por el polígono de soporte según el movimiento del robot bípedo, el cual toma un valor negativo al momento de inclinarse hacia adelante y uno positivo al realizarlo hacia atrás.

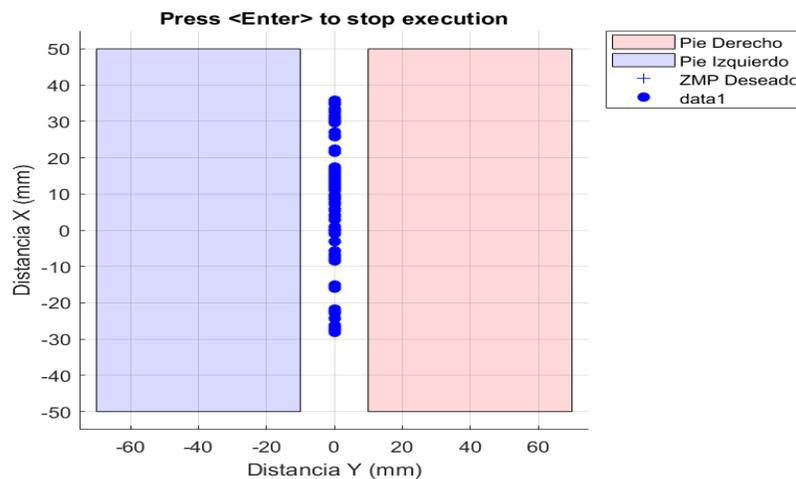


Figura 2.8: Reflejo del *COM* haciendo uso del *ZMP*

### 2.2.3. Medición de potencia eléctrica disipada por el robot

En un sistema de corriente continua como el presentado en este proyecto, la potencia eléctrica se define como el producto entre el diferencial de potencial en los terminales de alimentación del robot y la intensidad de corriente que pasa a través de la carga proveniente de la batería, en este caso es necesario realizar la medición tanto de corriente como de voltaje consumidos por el sistema durante las pruebas en equilibrio estático, permitiendo usar esta información como factor de comparación entre las estrategias de equilibrio.

#### Medición de corriente

La medición de corriente del sistema se ha desarrollado por medio del módulo *ACS712T* (figura 2.9a) basado en el circuito integrado de *Allegro MicroSystems*, dicho módulo permite medir la cantidad de corriente que fluye a través de un circuito de corriente alterna (AC) o directa (DC) por medio de un sensor de efecto *Hall* que provee un voltaje de salida proporcional al campo magnético generado por la corriente que fluye en el circuito, la elección de este módulo se debe a su reducido tamaño, bajo costo y la compatibilidad con la plataforma *arduino* lo que facilita la implementación en el circuito de medición y control; la tabla 2.5 muestra las características técnicas del sensor en su versión diseñada para una medición de corriente entre -5 y 5 amperios, suficiente teniendo en cuenta la corriente consumida por el circuito.

Descripción	Especificación
Voltaje de operación	4.5V 5.5V
Ancho de banda	80 kHz
Error Total Salida	1.5 % a TA = 25 °C
Resistencia interna	1.2 mΩ
Sensibilidad de salida	185 mV/A
Resolución	26mA
Tensión de salida	1,575V a 3,425V

Tabla 2.5: Características módulo sensor de corriente

El módulo de medición cuenta con 5 pines de conexión, 2 de ellos son para la alimentación de 5V, uno para la señal de salida de voltaje proporcional a la medición de corriente y los dos restantes se utilizan para conectar el sensor al circuito, en este caso, el pin positivo del sensor está conectado a la carga del sistema (instrumentos del controlador y robot *Bioid*) y el negativo al pin de tierra común, con lo cual se tiene el circuito en serie mostrado en la Figura 2.9b.

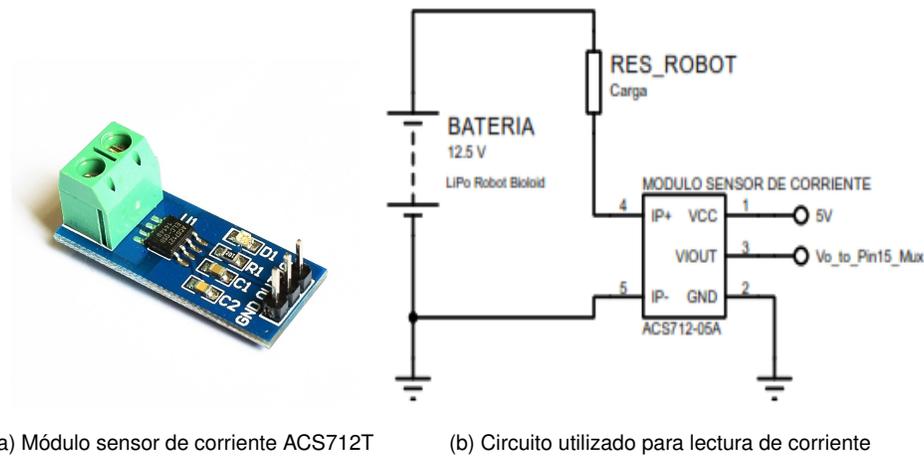


Figura 2.9: Módulo sensor de corriente

El módulo realiza el procesamiento de la señal por lo que la salida de voltaje entregada puede ser directamente conectada al multiplexor *CD74HC4067* y llevada al pin análogo del *arduino NANO*, de igual manera la señal de voltaje es procesada de acuerdo a la ecuación general brindada por el fabricante para encontrar la correspondiente señal de corriente medida por el sensor.

$$I = \frac{V_{ADC} - V_0}{sensibilidad} \quad (2.9)$$

La ecuación 2.9 muestra la formula general del fabricante para calcular el valor de corriente medido, donde  $V_{ADC}$  es el valor de voltaje entregado por el sensor,  $V_0$  el voltaje en circuito abierto y *sensibilidad* es una constante dada por el fabricante según la máxima capacidad de medición del mismo, sin embargo esta ecuación no presenta los mejores resultados al momento de calcular los valores de corriente, decidiéndose realizar una caracterización del sensor de forma similar a la usada en los sensores FSR con el fin de encontrar un polinomio matemático que represente idóneamente la señal entregada por el sensor; como primer punto para realizar dicho ajuste polinomial es necesario obtener datos de respuesta del sensor ante diversas mediciones de corriente, por lo que se utiliza una fuente de alimentación DC, un multímetro y diversas cargas intercambiables para obtener los datos plasmados en la tabla 2.6.

Con estos valores es posible usar la función *Polyfit* de *Matlab* donde  $x$  son los valores de voltaje entregados,  $y$  los datos de corriente medidas con el multímetro y  $n$  es igual a 1, dando como resultado el polinomio de grado uno expresado en la ecuación 2.10, capaz de representar la magnitud de corriente correspondiente a cada valor de voltaje entregado por el módulo sensor.

$$I = -5,3094V_{ADC} + 13,1731 \quad (2.10)$$

Tabla 2.6: Caracterización sensor de corriente

Corriente (A)	Voltaje(V)
0	2.480
0.48	2.392
0.75	2.340
0.77	2.337
0.84	2.322
1.49	2.200
2.74	1.965

### Medición de voltaje

Respecto a la medición de voltaje es necesario considerar que la fuente de alimentación utilizada entrega un voltaje de 12.5 V a su máximo de carga, lo cual hace imposible medir esta tensión por medio de los pines análogos de *arduinolos* cuales soportan un máximo de 5V; esto implica realizar un arreglo de resistencias en serie para formar un divisor de tensión resistivo, cuyos nodos externos están conectados a la fuente de alimentación y su nodo central va unido a un amplificador operacional en configuración de seguidor de tensión que empalma con la entrada 6 del multiplexor como se puede observar en el diagrama eléctrico representando en la figura 2.10.

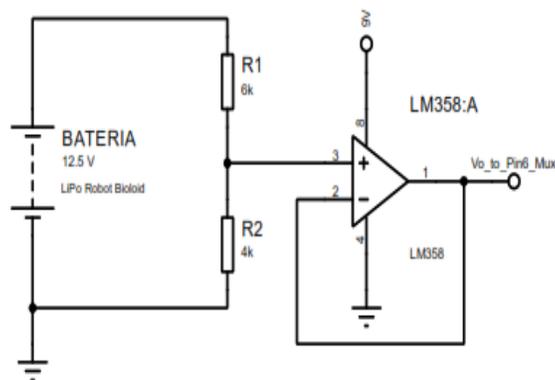


Figura 2.10: Circuito utilizado para medir el voltaje

Los valores de las resistencias se eligen teniendo en cuenta que el máximo voltaje de la batería es de 12.5V, teniendo en cuenta que se requiere que el voltaje entregado a la entrada análoga del *arduino* sea de 5V, se tiene que garantizar que esta condición de tensión se refleje sobre la resistencia R2, es decir que el 40 % del voltaje total de la batería debe reflejarse sobre esta resistencia, dando lugar a que en la elección de resistencias se deba mantener una relación de  $1R_2 : 1,5R_1$ . La importancia de añadir el arreglo de amplificador operacional radica en brindar un aislamiento entre la resistencia R2, el multiplexor y la baja impedancia de entrada en el módulo

conversor analógico digital del *arduino*, ya que si se conectase directamente la resistencia R2 y el módulo, el resultado del paralelo resistivo tendería hacia el de menor valor afectando la regla del 40% del voltaje total de la batería del robot, por esta razón se hace necesario añadir el seguidor de tensión al este tener una impedancia bastante grande comparada con R2, lo que garantiza la proporción de la regla establecida; de igual manera, en un amplificador que no tiene resistencias de realimentación el voltaje en la entrada es idéntico al obtenido en la salida, lo que no altera la medición de la batería y elimina las señales de ruido de alta frecuencia en la señal analógica.

#### 2.2.4. Comunicación inalámbrica de la placa de control y la interfaz de ordenador

Debido a la inestabilidad de los sistemas de control de equilibrio al igual que la dificultad en el modelado matemático de los mismos debido al gran número de factores a considerar, al momento de realizar experimentos en ambientes reales es indispensable reducir la incidencia de factores externos a los considerados en el modelo simulado y así garantizar el funcionamiento del controlador. Por esta razón, en este tipo de sistemas al momento de realizar una supervisión de las variables de control se opta por el diseño de sistema de comunicación inalámbrica, debido a su baja incidencia en el funcionamiento del robot eliminando cableado que limite su movilidad.

Teniendo en cuenta el objetivo general del proyecto, se diseña una comunicación inalámbrica que permita conectar el controlador *arduino* instalado en la nueva placa base de control y una interfaz desarrollada en *MATLAB*, buscando almacenar y graficar las variables de comparación. Dicha conexión es realizada por el módulo *Bluetooth HC-05* ya que gracias a su gran versatilidad facilita la comunicación serial entre ambas partes, además de que el bajo costo y su gran disponibilidad en el mercado cumple con los requisitos de la placa de control; la tabla 2.7 muestra las principales características del módulo *Bluetooth HC-05*

Descripción	Especificación
Voltaje de operación	3.6V - 6V DC
Consumo corriente	50mA
Bluetooth	V2.0+EDR
Frecuencia	Banda ISM 2.4GHz
Potencia de transmisión	4dBm, Class 2
Alcance	10 m
Interfaz comunicación	Serial TTL
Velocidad de transmisión	1200bps hasta 1.3Mbps

Tabla 2.7: Características módulo *Bluetooth*

Dentro de las características del módulo *Bluetooth* se tiene que permite una comunicación bidireccional, sin embargo para este proyecto solo se realiza una comunicación unidireccional desde la placa de control hacia *Matlab*, en la cual se envía de manera continua una trama de 4 datos

(medición de voltaje, medición de corriente, error acumulado y esfuerzo de control), cada valor es enviado por medio del comando *println()* imprimiendo los datos por el puerto serial al mismo tiempo que envía un carácter de nueva línea utilizado como separador entre los datos de la trama, de igual manera, se modificó la velocidad de transmisión por defecto del módulo de 9600bps a 115200bps, con el fin de mejorar la rapidez del envío de la trama de datos.

### 2.2.5. Unidad de Medición Inercial MPU-6050

La *IMU* sirve como un sensor de orientación y puede ser utilizado para el desarrollo de un controlador de equilibrio para el robot, sin embargo, tiene el inconveniente de ser muy lento en comparación a la respuesta de los sensores *FSR* por lo que no es utilizado en este proyecto, siendo agregado a fin de incluirlo en diversas aplicaciones a futuro.

Pasando a las características del dispositivo, el *IMU MPU6050* es un circuito integrado que combina un giroscopio y un acelerómetro de 3 ejes en el mismo chip teniendo un total de 6 grados de libertad (DoF). El integrado consume un máximo de 3.5mA de corriente, además cuenta con un regulador de tensión de 3.3V por lo que puede ser alimentado con 5V de placas *arduino*, igualmente, la obtención de los datos se puede realizar de manera sencilla gracias a su protocolo de comunicación I2C; el módulo incorpora un procesador interno (*DMP Digital Motion Processor*) que ejecuta complejos algoritmos de fusión de movimiento para combinar las mediciones de los sensores internos, evitando tener que realizar los filtros de forma exterior, de igual forma dispone de conversores analógicos digitales (ADC) de 16bits en todos los ejes.

### 2.2.6. Reguladores de voltaje

Luego de establecer los componentes electrónicos necesarios para la construcción del sistema de control implementado en la placa PCB, es posible determinar los requerimientos de corriente y voltaje para el circuito; teniendo en cuenta que uno de los requerimientos de elección para los instrumentos utilizados fue un voltaje de operación menor al de la batería del robot, es factible alimentar todo el circuito con la fuente de alimentación LiPo 2200mAH a 12V utilizada por los motores *Dynamixel*. Sin embargo, es posible que a pesar que los sistemas de adquisición y envío de datos tienen bajos requerimientos de potencia, la batería tenga problemas con las prestaciones del flujo de corriente o genere cambios bruscos de voltaje que podrían reiniciar la tarjeta de adquisición, afectar la medición de los sensores o interferir con la comunicación inalámbrica, por esta razón, se implementa un arreglo de reguladores de tensión y condensadores encargados de ajustar la entrada de voltaje para evitar el rizado de la fuente de alimentación, mejorando las prestaciones de corriente y tensión para alimentar cada instrumento del circuito con la potencia constante necesaria para su correcto funcionamiento.

Teniendo en cuenta las necesidades de potencia para cada instrumento se determina que es necesario dos reguladores, uno de 5V y otro de 9V, para los cuales se utiliza los reguladores integrados LM7805 y LM7809 conectados en un arreglo sencillo como el descrito en la figura 2.11, donde los 12V de entrada son regulados dentro del rango de operación de los diferentes instrumentos; en este sentido, tanto los motores del robot como la placa *arduino* se alimentan de los 12V entregados por la batería, los 9V del primer regulador son utilizados por los amplificadores operacionales utilizados en los sistemas de medición y los 5V del regulador restante se utilizan como entrada para el multiplexor, la conexión inalámbrica y los sensores de corriente y orientación.

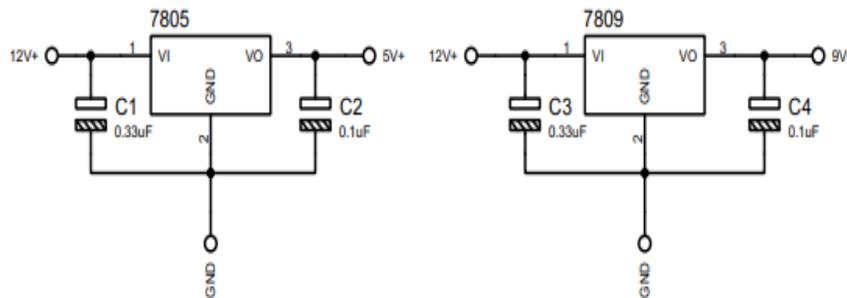


Figura 2.11: Reguladores de voltaje

### 2.2.7. Elaboración de la placa de circuito impreso (PCB)

Como punto final en el diseño de la nueva placa de control para el robot se tiene la elaboración del circuito impreso donde irán integrados todos los componentes electrónicos; la importancia de este diseño radica en que el PCB ejerce como placa guía para enrutar las conexiones de los instrumentos utilizados, permitiendo tener un circuito complejo en una placa impresa de tamaño reducido que puede ser fácilmente asegurada al robot; el diseño de la placa puede realizarse en diversos aplicativos para ordenador, pero en este caso se utiliza la herramienta *Proteus* debido a la facilidad de uso, su capacidad de simular el funcionamiento del circuito antes de su implementación y la posibilidad de usar equipos en su librería sin necesidad de comprarlos.

La herramienta *Proteus* cuenta con dos entornos diferentes llamados *ISIS* y *ARES*, el primero permite realizar un modelo esquemático del circuito de la placa de control obteniendo una representación digital de todas las conexiones necesarias para su funcionamiento, por otro lado, *ISIS* permite la elaboración de la placa PCB permitiendo la ubicación de las piezas y el enrutamiento de las mismas. Teniendo esto en cuenta, primero se realiza el modelo esquemático de los diseños planteados anteriormente para cada uno de los componentes de la placa, se establecen las conexiones necesarias y se verifica su funcionamiento de tal manera que al desarrollar el circuito impreso en *ARES* se tenga un circuito libre de errores. Posteriormente, se pasa al diseño de la



### 2.3. Interfaz gráfica de usuario

En esta parte del diseño del proyecto se aborda lo relacionado a la configuración utilizada en la toma de señales analógicas de los sensores para su manipulación dentro de la nueva placa de control, y el posterior envío de estos valores por medio de una comunicación serial *Bluetooth* entre el robot y el aplicativo de escritorio desarrollado en *Matlab*. Lo primero a considerar es que la entrada analógica del *arduino NANO* esta conectada a la salida del multiplexor, por lo que no se pueden tener todas las señales analógicas en el mismo instante de tiempo ya que este ultimo hace uso de un ciclo *for* para conmutar entre las señales conectadas, de esta manera en cada iteración del ciclo se obtendrá el valor de 0 a 1023 de una señal analógica diferente, por lo tanto, se crea un vector de datos que agrupa las señales de entrada en cada iteración y posibilita la manipulación de cada señal por separado, obteniendo las 8 entradas analógicas de los sensores FSR evaluadas en el polinomio característico de la señal con el fin de hallar el valor de masa correspondiente, permitiendo realizar el cálculo del *ZMP* del robot al igual que la normalización a voltios y amperios de las señales de corriente y voltaje.

Ahora bien, es necesario determinar que tipo de datos serán enviados a la interfaz gráfica del ordenador; dado que el objetivo de este trabajo es realizar una comparativa entre las estrategias de control se opta por almacenar los datos mas relevantes que permitan analizar el comportamiento de cada técnica, dentro de este grupo se tiene la potencia eléctrica, el error acumulado, el esfuerzo de control, el error cuadrático medio (*RMSE*) y el máximo ángulo de inclinación, los cuales se conocen como indicadores de comparación y serán explicados a detalle mas adelante en el capítulo 4. Luego de determinar los datos a enviar es necesario conocer como se obtienen; por ejemplo, la potencia eléctrica se obtiene como el producto de multiplicar los datos de los sensores de corriente y voltaje, por tanto es necesario el envío de estas señales para su cálculo en *Matlab*; por otro lado, los valores de esfuerzo de control y error acumulado se obtienen de la implementación del controlador en *arduino* por lo que su cálculo es explicado en el capítulo 3, siendo este ultimo el utilizado para el cálculo del *RMSE*; por ultimo, se tiene el máximo ángulo de inclinación, el cual se obtiene de manera externa y no se almacena por medio del aplicativo *software*. Teniendo en cuenta lo anterior se envían los datos a la interfaz en *Matlab* por medio de comunicación serial *Bluetooth* establecida a una velocidad de 115200 *bps* en cada tiempo de muestreo  $T_s$  (tiempo empleado por el controlador para la ejecución de todas las funciones del algoritmo de control).

El aplicativo *software* de escritorio consiste en una interfaz gráfica desarrollada sobre el *Toolbox Guide* de *Matlab* con el fin de facilitar la conexión serial entre el robot y el ordenador, además de permitir graficar los datos enviados en cada tiempo de muestreo a lo largo del ciclo de control, facilitando la observación en todo momento del comportamiento del controlador y la posibilidad de almacenar los datos de los indicadores de comparación; esta interfaz posee cuatro ejes gráficos, uno para las señales de voltaje y corriente, otro para potencia, un tercero para error acumulado y el ultimo para esfuerzo de control como se muestra en la figura 2.13

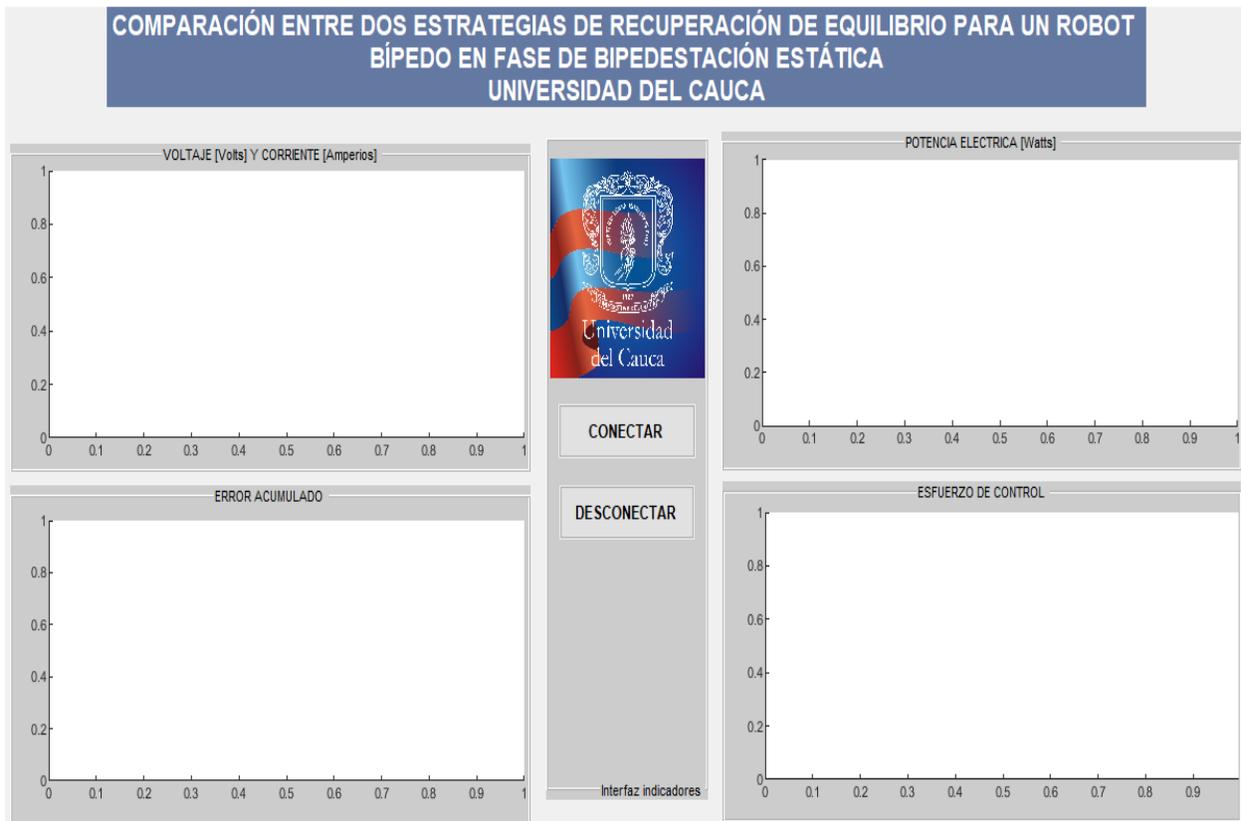


Figura 2.13: Interfaz gráfica del usuario. Sistema de monitorio del ciclo de control del robot bípedo *Bioid*

## Capítulo 3

# Estrategias de control

Este capítulo describe el modelado matemático desarrollado para las estrategias de tobillo y cadera a fin de realizar una simulación aproximada de la dinámica real de un sistema bípedo, además, se propone una implementación virtual de un controlador PID para la estrategia de tobillo y un control en diferencias para la técnica de cadera, los cuales son desarrollados mediante la herramienta de simulación matemática *Simulink* con el objetivo de observar el comportamiento de los modelos obtenidos y estimar su funcionamiento en el robot real, de igual manera, en cada sistema de control simulado se realiza la explicación del modelo de control implementado en la plataforma *arduino*.

### 3.1. Estrategia de tobillo

La estrategia de tobillo es la primera estrategia a la que se recurre comúnmente bajo perturbaciones pequeñas; el principio de esta estrategia se basa en bloquear todas las articulaciones a excepción de la del tobillo, donde se aplica un par en esta articulación con el fin de regresar el *CoM* a la posición de referencia. Cuando únicamente se deja libre la articulación del tobillo el sistema se comporta con un grado de libertad por lo que es muy similar modelo *cart-table* (Figura 3.1a); donde la masa  $m$  del carro representa la masa total del robot y su ubicación  $x$  hace referencia a la proyección del *CoM*, así mismo, la base de apoyo de la mesa simboliza el polígono de soporte tanto en fase de apoyo simple como doble, siendo esta igual a la planta del pie del robot cuando este se encuentra en fase de apoyo simple, además cuando se presenta un disturbio este aleja el carro de la posición deseada generando así mismo una aceleración ( $\ddot{x}$ ) en dirección de la misma.

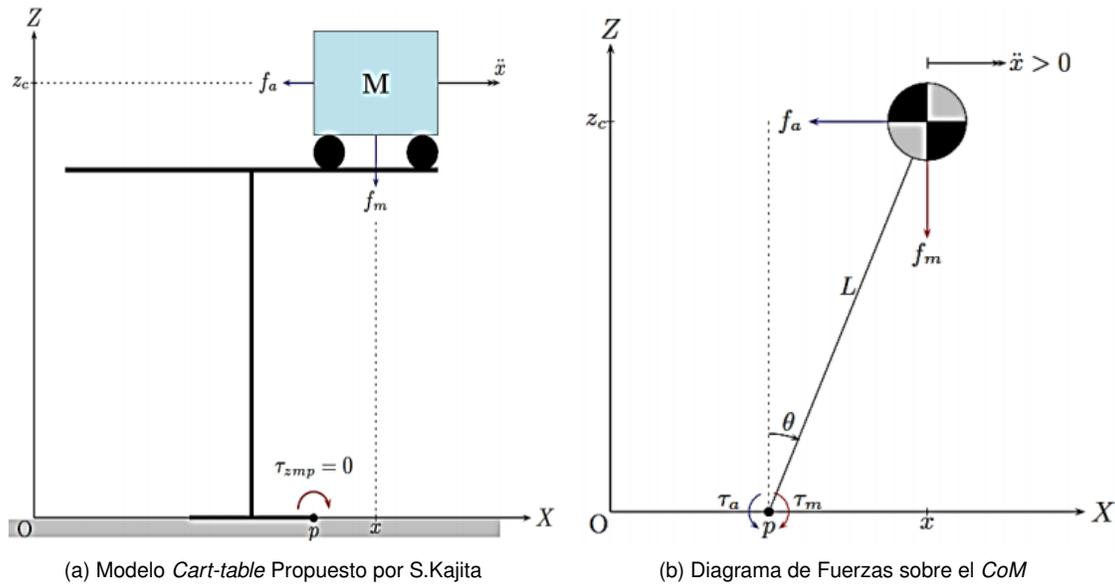


Figura 3.1: Modelo *cart-table* propuesto por [37]

Para generar el modelo de la planta es necesario analizar las fuerzas que actúan en el sistema (Figura 3.1b), donde la fuerza  $F_m = mg$  es consecuencia del peso del robot en sentido contrario al eje Z; así mismo, es indispensable mantener una altura constante  $Z_c$  por lo que se genera una fuerza contraria al movimiento de la perturbación del robot  $F_a = m\ddot{x}$ , siendo estas dos fuerzas ( $F_m$  y  $F_a$ ) las causantes de que exista un par de palanca  $\Gamma_m$  y  $\Gamma_a$  al rededor del punto  $p$ ; Por tanto el momento generado por  $F_m$  es:

$$\begin{aligned}\Gamma_m(p) &= LF_m \sin(\theta) \\ \Gamma_m(p) &= LF_m \frac{x-p}{L} \\ \Gamma_m(p) &= F_m(x-p)\end{aligned}\tag{3.1}$$

De igual manera el momento que genera la fuerza  $F_a$  es:

$$\begin{aligned}\Gamma_a(p) &= LF_a \cos(\theta) \\ \Gamma_a(p) &= LF_a \frac{Z_c}{L} \\ \Gamma_a(p) &= F_a Z_c\end{aligned}\tag{3.2}$$

Partiendo de las ecuaciones (3.1) y (3.2) se tiene que el momento resultante al rededor del punto  $p$  es:

$$\Gamma(p) = F_m(x-p) - F_a Z_c\tag{3.3}$$

$$\Gamma(p) = mg(x - p) - mZ_c\ddot{x} \quad (3.4)$$

Por ende existe un punto  $p$  donde  $\Gamma(p) = 0$  denominado punto de momento cero ( $P_{zmp}$ ), siendo este el punto donde no existen fuerzas que lo saquen de balance; por lo que reescribiendo se tiene:

$$\Gamma(P_{zmp}) = 0 = mg(x - P_{zmp}) - mZ_c\ddot{x} \quad (3.5)$$

Dado que la variable de interés es la posición en  $x$  es posible reescribir la ecuación (3.5) como:

$$\ddot{x} = (x - P_{zmp}) \frac{g}{Z_c} \quad (3.6)$$

Así la planta puede ser representada en el entorno *simulink* como lo indica la figura 3.2:

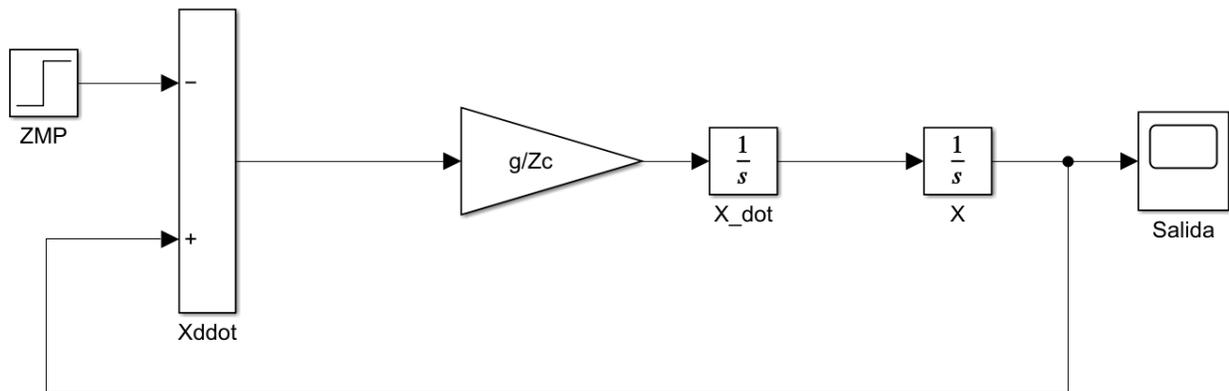


Figura 3.2: Modelo *cart-table* en bloques  
Fuente Propia.

La respuesta de la planta en lazo abierto es representada por la figura 3.3 donde se usan como parámetros  $g = -9,8m/s^2$  y  $Z_c = 0,25m$ , además se tiene como condición inicial  $x_0 = 0,1$

### 3.1.1. Controlador de tobillo

Para realizar el control de equilibrio del robot utilizando la estrategia de tobillo se hace uso de un controlador Proporcional, Integral y Derivativo (PID); dicho controlador busca eliminar de manera rápida y precisa el error estacionario entre la señal de control y la referencia, en este sentido se busca que al utilizar este controlador se reduzca la diferencia entre el *ZMP* deseado (0 en el eje X) y el *ZMP* calculado por los sensores *FSR*, asegurando el equilibrio del robot. El controlador PID es utilizado ampliamente en sistemas de control industrial, gracias a la capacidad de aplicarlo en forma general a la mayoría de sistemas, además de permitir realizar modificaciones a la estructura general ampliando mucho más su uso.

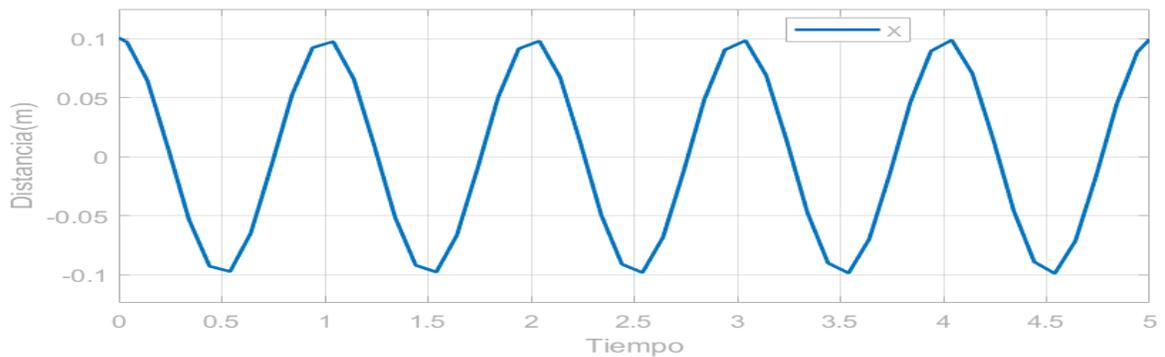


Figura 3.3: Respuesta en lazo abierto del modelo *cart-table*  
Fuente Propia.

Como su nombre lo indica, el controlador PID cuenta con tres términos que se aplican simultáneamente a la señal del error de manera que cada término brinda una respuesta diferente ante las perturbaciones de la señal, lo que aporta características individuales al valor de salida del controlador. La ecuación 3.7 representa la estructura matemática general del controlador en tiempo continuo.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.7)$$

Donde  $u(t)$  es la salida del controlador,  $e(t)$  es la señal del error y las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  representan las ganancias ajustables a cada sistema donde se use el controlador, permitiendo que cada término de la suma añada características a la salida del controlador; el primer término se conoce como acción proporcional y tiene el efecto de reducir el error en estado estacionario respecto a una referencia fija, pero puede hacer que la salida sea oscilatoria retrasando el tiempo de estabilización; el segundo término representa una acción integral que tiene el efecto de eliminar el error de estado estable que no se haya eliminado con la acción proporcional, aunque al depender del error acumulado la respuesta transitoria puede ser más lenta, por último, la acción derivativa tiene el efecto de aumentar la estabilidad del sistema reduciendo el sobre impulso y mejorando la respuesta transitoria, pero puede amplificar las señales de ruido. Cada acción tiene sus ventajas y desventajas pero al ser combinadas estas se complementan brindando un control bastante robusto, sin embargo, para lograr un control óptimo es importante la sintonización adecuada de las ganancias del controlador y así maximizar o disminuir el efecto de cada término según sea necesario.

Teniendo en cuenta lo anterior, al sistema de la figura 3.2 se le implementa un controlador PID a fin de simular la acción de este sobre la planta, agregando un disturbio en forma de un pulso a fin de observar la robustez del mismo (Figura 3.4), además hay que considerar que no hay fuerzas de atracción entre la base del pie del robot y el suelo lo que significa un gran problema debido a esta

limitación unilateral; en caso de que el par requerido en el tobillo sea demasiado grande la base del pie se despegará del suelo de forma significativa llevando el sistema a la inestabilidad, por tanto es necesario tener en cuenta esta limitación y establecer los límites que puede alcanzar el desplazamiento mediante  $Zita = [-0,05, 0,05]$ ; ya con estas consideraciones es posible sintonizar el controlador de manera automática mediante la herramienta *PID tuner* en *Matlab*, lo que elimina el problema de la sintonización de las ganancias facilitando la simulación, dando como respuesta lo mostrado en la Figura 3.5.

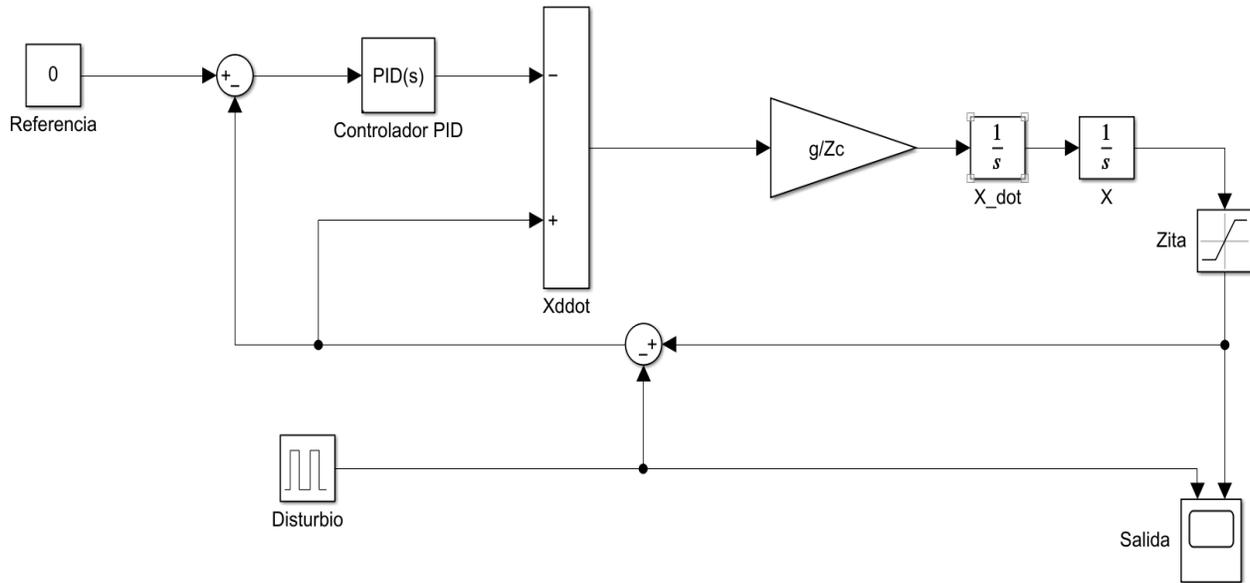


Figura 3.4: Diagrama en bloques *cart-table* con controlador PID Fuente Propia.

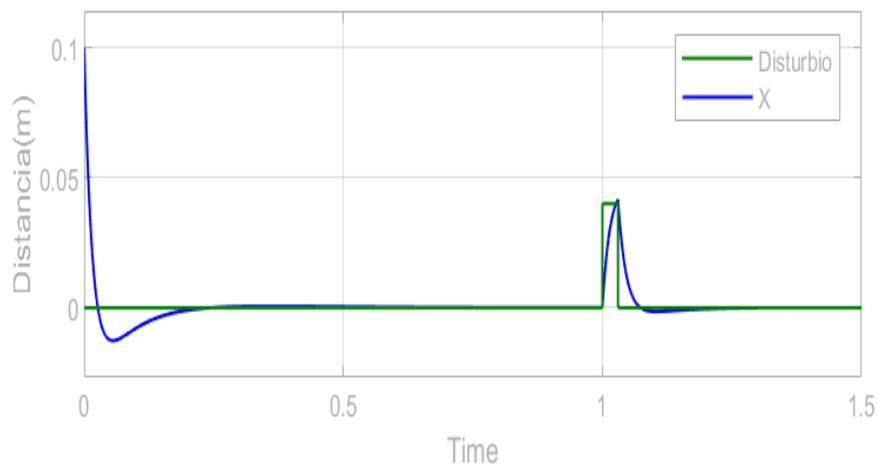


Figura 3.5: Respuesta simulada del controlador Fuente Propia.

### 3.1.2. Implementación en la plataforma *arduino* del controlador PID para la estrategia de tobillo

Antes de presentar el procedimiento realizado para la implementación del controlador, es importante aclarar que a pesar de establecer un sistema de control PID a través de las herramientas de simulación de *Matlab*, al implementar este controlador en el robot bípedo este no funcionó de la forma esperada, llegándose a desarrollar diferentes implementaciones del controlador buscando utilizar el sistema simulado en el robot real, lo que resulto imposible debido al comportamiento oscilante del mismo ante pequeñas variaciones del error. De acuerdo con la literatura consultada, esto se debe en gran medida a que al momento de realizar las simulaciones los modelos matemáticos no lograron representar en su totalidad la dinámica de las variables y componentes que influyen en el sistema real. La falta de modelado del comportamiento de factores como las pérdidas por fricción y calor o la no simulación matemática de los actuadores se justifica teniendo en consideración el objetivo general del proyecto, ya que se busca la comparación de las estrategias de control y no el diseño y evaluación de controladores, sin embargo, luego de observar los resultados obtenidos en la simulación, se puede concluir que un controlador tipo PID es capaz de mantener el equilibrio del robot para la estrategia de tobillo por lo que es posible implementar el controlador en el sistema real, no obstante, esto acarrea varias dificultades debido a las diferencia entre los modelos matemáticos utilizados para la simulación y el comportamiento real del robot, además, el sistema simulado es de tiempo continuo, el cual no es posible implementar en un dispositivo digital como la placa *arduino*.

Teniendo en cuenta lo anterior se desarrolla un controlador PID basado en la ecuación 3.7, para lo cual se procede a codificar la salida del controlador en la plataforma *arduino*, realizando las respectivas aproximaciones en tiempo discreto para la derivada e integral utilizadas en la ecuación, además de aplicar modificaciones en la acción proporcional para cumplir con los requerimientos de los actuadores reales; dando como resultado el código expresado en la figura 3.6

```
1  int Control ;
2  Error = Reference - Output;
3  Uproporcional = Offset + ( Kp * Error);
4  Uderivativo   = Kd* ((Error - ErrorAnt)/Tm);
5  ErrorAcum = ErrorAcum + ((Tm/2)*(ErrorAnt + Error));
6  Uintegral = Ki*ErrorAcum;
7  Control = Uproporcional + Uderivativo + Uintegral;
8  Control = constrain(Control, 0, 1023);
9  ErrorAnt = Error;
10 OutputAnt = Output;
```

Figura 3.6: Implementación del controlador PID en *arduino*

En la línea 2 de la figura se puede observar el cálculo del error  $e(k) = Ref - Output$ , donde al valor de referencia se le resta el valor de salida del sistema, es decir el ZMP calculado con los FSR, por otro lado, en la línea 3 se hace el cálculo de la acción proporcional del controlador ( $K_p e(t)$ ) multiplicando la ganancia proporcional por la señal del error, sin embargo, en los casos que el ZMP calculado sea mayor que el valor de referencia se tendría un error negativo por lo que los motores no podrían funcionar al solo activarse con señales positivas; por esta razón, se hace uso de un valor de *Offset*, el cual es el valor de posición para la articulación del tobillo en estado de genuflexión, siendo este el valor intermedio de posición que el actuador permite sin problemas en el movimiento del robot; añadiendo esta constante la acción proporcional queda definida por la ecuación 3.8, donde el cálculo del valor de *Offset* sera explicado mas adelante al tener también relación con el envío de la señal de control a cada motor.

$$U_p(k) = Offset + K_p e(k) \quad (3.8)$$

En la línea 4 se representa la acción derivativa ( $K_d \frac{\partial e(t)}{\partial t}$ ) utilizando la aproximación en tiempo discreto para la derivada, en este caso, la predicción se realiza mediante la extrapolación del error de control en la dirección de la tangente a la curva correspondiente en un intervalo de tiempo definido  $Tm = 40ms$ , por lo tanto, se usa el valor de error en el intervalo actual ( $e_{k_0}$ ) y el valor del intervalo anterior ( $e_{k-1}$ ).

$$U_D(k) = K_d \frac{\Delta e(k)}{\Delta(k)} = K_d \frac{e_{k_0} - e_{k-1}}{Tm} \quad (3.9)$$

Las líneas 5 y 6 representan la acción integral ( $K_i \int e(t) d(t)$ ) calculando el área bajo la curva de la señal de error a lo largo de la totalidad del ciclo de control; en este caso, es necesario utilizar una transformación bilineal o transformación de Tustin, además de la regla del trapecio para aproximar la integral de tiempo continuo a tiempo discreto para cada intervalo de tiempo. Al ser una integral, el termino *ErrorAcum* representa el sumatorio del área bajo la curva en los intervalos anteriores por lo que se puede utilizar como un indicador de error acumulado del sistema, es decir:

$$ErrorAcum(k) = ErrorAcum(k) + \frac{Tm}{2} (e_{k-1} + e_{k_0}) \quad (3.10)$$

Por tanto la acción integral corresponde a:

$$U_i(k) = K_i ErrorAcum(k) \quad (3.11)$$

En la línea 7 se suma la acción de control de los tres términos, sin embargo, el rango de entrada a los actuadores es de 0 a 1023, por lo que se hace una normalización del valor de control en el rango de los actuadores.

A pesar que la implementación presentada en la figura 3.6 funciona adecuadamente para mante-

ner el equilibrio, aun hay modificaciones que son posibles realizar para mejorar el funcionamiento del controlador. En este caso se recurre a realizar dos modificaciones, la primera busca eliminar el fenómeno conocido como *derivative kick*, generado por variaciones rápidas en la señal de referencia que se magnifican por la acción derivativa y se transforman en sobreimpulsos indeseados sobre la señal de salida del controlador, sin embargo, si se tiene en cuenta que la derivada del error es igual a la derivada de la referencia menos la derivada de la salida, se puede solucionar este fenómeno al considerar que la derivada del error es igual a la derivada negativa de la salida cuando el valor de referencia es constante. Así la ecuación (3.9) cambia y se adapta de la siguiente manera:

$$U_D(k) = K_d \frac{Out_{k_0} - Out_{k-1}}{T_m} \quad (3.12)$$

Por otro lado, la segunda modificación se desarrolla a fin de poder realizar cambios en la sintonización del controlador mientras este se ejecuta sin tener baches indeseados en la señal de salida. Según la ecuación del controlador PID se puede deducir que la única que su interpretación varía si el valor sintonización cambia es la acción integral, ya que si en algún momento a lo largo del funcionamiento del controlador la ganancia integral cambia todo el error acumulado se multiplica por el nuevo valor, lo que no es adecuado en búsqueda de que este cambio se efectúe solo en el tiempo que se requiere y no en los valores pasados. Ahora bien, con el fin de solucionar este problema se añade el valor de  $K_i$  al cálculo de la integral (Ecuación (3.13)), lo que permite que el error se multiplique por el valor de ganancia en cada intervalo por separado, por lo que la variación de la sintonización solo afecta el sistema para ese instante en específico dando una salida mas suave y sin sobresaltos. La figura 3.7 representa la implementación de estos cambios en el controlador PID de *arduino*.

$$U_i(k) = ErrorAcum(k) + K_i \frac{T_m}{2} (e_{k-1} + e_{k_0}) \quad (3.13)$$

```

1  int Control ;
2  Error = Reference - Output;
3  Uproporcional = Offset + ( Kp * Error);
4  Uderivativo   = Kd* ((Output - OutputAnt)/Tm);
5  ErrorAcum = ErrorAcum + (Ki* ((Tm/2) * (ErrorAnt + Error)));
6  Uintegral = ErrorAcum;
7  Control = Uproporcional - Uderivativo + Uintegral;
8  Control = constrain(Control, 0, 1023);
9  ErrorAnt = Error;
10 OutputAnt = Output;
11 return Control;

```

Figura 3.7: Implementación de las mejoras de rendimiento al controlador PID en *arduino*

Como se observa en la figura 3.7 las modificaciones se implementan de manera sencilla; derivando la salida para corregir el *derivative kick*, al igual de modificar el signo de la línea 7 en la suma de las acciones de control; igualmente, para la segunda modificación se integra el valor de  $K_i$  en la ecuación para el cálculo de la integral y se elimina de la línea 6, afectando su obtención en cada instante y no el de errores anteriores.

Posteriormente, se realiza el envío de la señal de control calculada a los motores encargados de realizar el movimiento identificados con los id 15 y 16, sin embargo, el movimiento de estos motores es completamente contrario entre si, ya que para que el motor 15 corrija una inclinación de la superficie similar al subir una colina, es necesario que la señal de control enviada aumente para que el robot se incline hacia adelante tal y como lo haría un ser humano en la misma situación; lo que es totalmente opuesto para el motor 16, en el cual la señal de control enviada debe disminuir para corregir esta misma inclinación. Ahora bien, teniendo en cuenta la ecuación 3.7 para la obtención del esfuerzo de control y la figura 2.8 representando el comportamiento del *ZMP*, se puede suponer que la salida del controlador aumente frente una inclinación positiva que traslade la posición del *ZMP* hacia adelante del robot, obteniendo que para una entrada al sistema negativa el esfuerzo de control aumente, estableciendo que el controlador PID debe funcionar en un proceso de acción inversa, por lo que solo el motor 15 realizaría el movimiento adecuado para corregir el equilibrio del robot, sin embargo, para el motor 16 es necesario realizar una corrección matemática como la mostrada en la línea 2 de la figura 3.8, donde la señal de control enviada al motor 16 se obtiene de la resta entre 1023 (máximo valor digital permitido por *arduino* para la señal de control) y la salida calculada por el PID, obteniendo así un nuevo esfuerzo de control inverso que garantiza un comportamiento de los dos motores en la misma dirección frente a la salida entregada por el controlador.

```

1   Control_15 = Control;
2   Control_16 = 1023-Control;
3   Dynamixel.moveSpeed(15, Control_15, 100);
4   Dynamixel.moveSpeed(16, Control_16, 100);

```

Figura 3.8: Envío de la señal de control a los motores del robot encargados del movimiento del tobillo

Seguidamente, es necesario determinar el valor de *Offset* utilizado por el controlador PID, el cual se puede identificar como la posición intermedia del actuador de tobillo cuyo sentido de giro frente a la variación de la señal de control sea similar al comportamiento humano en presencia del mismo tipo de pendiente. Como se explico anteriormente, el sentido de giro del motor 15 es el que cumple con el comportamiento de la señal de control para corregir el equilibrio; lo que permite determinar el valor de *Offset* en 606 para el rango de 0 a 1023, siendo este la posición del motor 15 al momento de establecer la postura de genuflexión para el robot.

Finalmente, se hace el envío de las señales de control a cada motor por medio del comando *Dynamixel.moveSpeed()*, donde se tiene el id, el esfuerzo de control y la velocidad de movimiento

de cada motor; la velocidad expresada en las líneas 3 y 4 de la figura 3.8 será establecida al momento de la sintonización del controlador PID explicada mas adelante.

### Sintonización del controlador PID para la estrategia de tobillo

Luego de la implementación del controlador en *arduino* el siguiente paso a realizar es la sintonización del mismo y de esta manera determinar las constantes  $K_p$ ,  $K_d$  y  $K_i$ ; como se explico anteriormente no fue posible utilizar las constantes del controlador hallado por simulación, por lo que se recurre a una sintonización manual por medio de los métodos heurísticos mostrados en la sección 6.4.1 de [56], sin embargo, es necesario esclarecer que al ser un PID que funciona en un proceso de acción inversa el signo de las constantes del controlador debe ser negativo para todos los parámetros; teniendo en cuenta lo anterior, se inicia el proceso colocando la constante  $K_p$  en -1 y las  $K_d$  y  $K_i$  en cero, obteniendo que el sistema reaccione de forma inestable, y al contrario de lo que dice el procedimiento, al aumentar este valor el sistema se hace mas inestable, decidiéndose por disminuir gradualmente la constante hasta llegar a un valor cercano a -0.2, en el cual se tiene un sistema oscilante con pequeños indicios de estabilidad.

Ahora bien, con el objetivo de mejorar la respuesta del robot se disminuye la velocidad de giro de los motores 15 y 16, buscando reducir la inestabilidad causada por el movimiento excesivo del robot al momento de corregir el equilibrio, obteniendo una respuesta mas suave ante cada cambio de posición de los motores. A partir de lo anterior, es posible aplicar el paso 3 de la metodología y modificar gradualmente el valor de  $K_d$  llegando a un valor de  $K_d = -2,2$  que redujo de mejor manera las oscilaciones de la señal de control; de igual manera, se modifica la constante  $K_p$  a un valor de  $-0,15$  que permite disminuir aun mas el error del sistema, finalmente se realiza la sintonización de la constante  $K_i$  con el fin de reducir el error de estado estacionario, obteniendo un valor de  $K_i = -0,0002$  como la constante de mejor desempeño en el controlador.

## 3.2. Estrategia de Cadera

Para la estrategia de cadera se parte del péndulo invertido doble (Figura 3.9), donde el robot es representado mediante dos eslabones de longitud ( $L_1$  y  $L_2$ ) y dos masas ( $M_1$  y  $M_2$ ) con el fin de simular las articulaciones de tobillo ( $\theta_1$ ) y cadera ( $\theta_2$ ).

$$x_1 = -L_1 \sin(\theta_1) \quad (3.14)$$

$$y_1 = L_1 \cos(\theta_1) \quad (3.15)$$

$$x_2 = L_2 \sin(\theta_2) - L_1 \sin(\theta_1) \quad (3.16)$$

$$y_2 = L_2 \cos(\theta_2) + L_1 \cos(\theta_1) \quad (3.17)$$

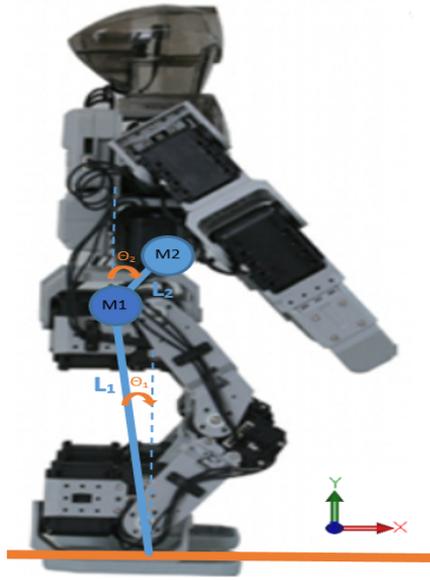


Figura 3.9: Péndulo invertido doble en un robot humanoide  
Fuente Propia.

Se calcula la energía cinética  $E_c$  y potencial  $E_p$  del sistema:

$$E_c = \frac{1}{2}m_1(\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + \frac{1}{2}m_2(\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) \quad (3.18)$$

$$E_p = g(m_1y_1 + m_2y_2) \quad (3.19)$$

Derivando las ecuaciones (3.14) (3.15) (3.16) (3.17) con respecto al tiempo se obtiene:

$$\dot{x}_1 = -L_1\dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) \quad (3.20)$$

$$\dot{y}_1 = -L_1\dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) \quad (3.21)$$

$$\dot{x}_2 = L_2\dot{\theta}_2 \cos(\theta_2) - L_1\dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) \quad (3.22)$$

$$\dot{y}_2 = -(L_2\dot{\theta}_2 \sin(\theta_2) + L_1\dot{\theta}_1 \sin(\theta_1)) \quad (3.23)$$

Para el cálculo de la energía cinética se reemplaza las ecuaciones (3.20) (3.21) (3.22) y (3.23) en (3.18):

$$E_c = \frac{1}{2}m_1[(-L_1\dot{\theta}_1 \cos(\theta_1))^2 + (-L_1\dot{\theta}_1 \sin(\theta_1))^2] \\ + \frac{1}{2}m_2[(L_2\dot{\theta}_2 \cos(\theta_2) - L_1\dot{\theta}_1 \cos(\theta_1))^2 + (-(L_2\dot{\theta}_2 \sin(\theta_2) + L_1\dot{\theta}_1 \sin(\theta_1)))^2]$$

$$\begin{aligned}
E_c = & \frac{1}{2}m_1[L_1^2\dot{\theta}_1^2(\cos^2(\theta_1) + \sin^2(\theta_1))] + \frac{1}{2}m_2[L_2^2\dot{\theta}_2^2(\cos^2(\theta_2) + \sin^2(\theta_2)) \\
& + L_1^2\dot{\theta}_1^2(\cos^2(\theta_1) + \sin^2(\theta_1)) - 2L_1L_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2(\cos(\theta_1)\cos(\theta_2) - \sin(\theta_1)\sin(\theta_2))]
\end{aligned} \quad (3.24)$$

Simplificando las expresiones trigonométricas de la ecuación (3.24) y agrupando se obtiene finalmente la ecuación de la energía cinética del sistema (ecuación(3.25))

$$E_c = \frac{1}{2}[L_1^2(m_1 + m_2)\dot{\theta}_1^2 + L_2^2m_2\dot{\theta}_2^2 - 2L_1L_2m_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)] \quad (3.25)$$

En cuanto a la energía potencial se reemplaza las ecuaciones (3.15) y (3.17) en (3.19):

$$\begin{aligned}
E_p &= g(L_1m_1 \cos(\theta_1) + L_2m_2 \cos(\theta_2) + L_1m_2 \cos(\theta_1)) \\
E_p &= g(L_2m_2 \cos(\theta_2) + L_1(m_1 + m_2) \cos(\theta_1))
\end{aligned} \quad (3.26)$$

Para hallar el modelo matemático del sistema se hace uso del Lagrangiano el cual se define como:

$$\mathcal{L} = E_c - E_p \quad (3.27)$$

Reemplazando las ecuaciones (3.26) y (3.25) en (3.27) se obtiene:

$$\begin{aligned}
\mathcal{L} &= \frac{1}{2}[L_1^2(m_1 + m_2)\dot{\theta}_1^2 + L_2^2m_2\dot{\theta}_2^2 - 2K_1\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)] \\
&\quad - g(L_2m_2 \cos(\theta_2) + L_1(m_1 + m_2) \cos(\theta_1))
\end{aligned} \quad (3.28)$$

Dado que el sistema posee dos grados de libertad es posible formular mediante la expresión (3.28) las ecuaciones de Euler-Lagrange:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_1} = \Gamma_a \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_2} = \Gamma_h \quad (3.30)$$

Donde  $\Gamma_a$  y  $\Gamma_h$  son el par generado por los motores de las articulaciones de tobillo y cadera respectivamente; además no se tienen en cuenta pérdidas de energía por ninguna fuente (calor, mecánicas, fricción, etc), por lo que se procede a resolver para  $\Gamma_a$ :

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_1} = L_1^2(m_1 + m_2)\dot{\theta}_1 - L_1L_2m_2\dot{\theta}_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_1} \right) = L_1^2(m_1 + m_2)\ddot{\theta}_1 - L_1L_2m_2(\ddot{\theta}_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) - \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)) \quad (3.31)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_1} = L_1L_2m_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + gL_1(m_1 + m_2) \sin(\theta_1) \quad (3.32)$$

Reemplazando las ecuaciones (3.31) y (3.32) en (3.29) y reduciendo:

$$\Gamma_a = L_1[(m_1 + m_2)(L_1\ddot{\theta}_1 - g \sin(\theta_1)) + L_2m_2\dot{\theta}_2^2 \sin(\theta_1 + \theta_2) - L_2m_2\ddot{\theta}_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)] \quad (3.33)$$

Desarrollando de igual manera para  $\Gamma_h$ :

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_2} = \dot{\theta}_2 L_2^2 m_2 - \dot{\theta}_1 L_1 L_2 m_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_2} \right) = \ddot{\theta}_2 L_2^2 m_2 - L_1 L_2 m_2 (\ddot{\theta}_1 \cos(\theta_1 + \theta_2) - \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1 + \theta_2) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)) \quad (3.34)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_2} = \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 L_1 L_2 m_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + g L_2 m_2 \sin(\theta_2) \quad (3.35)$$

Reemplazando las ecuaciones (3.34) y (3.35) en (3.30) y reduciendo:

$$\Gamma_h = L_2 m_2 [\ddot{\theta}_2 L_2 - g \sin(\theta_2) + \dot{\theta}_1^2 L_1 \sin(\theta_1 + \theta_2) - L_1 \ddot{\theta}_1 \cos(\theta_1 + \theta_2)] \quad (3.36)$$

Representando las ecuaciones (3.33) y (3.36) de forma matricial es posible apreciar mejor el sistema como se muestra en la ecuación (3.37), donde  $K_1 = L_1(m_1 + m_2)$ ,  $K_2 = L_1 L_2 m_2$  y  $K_3 = L_2 m_2$ ; este sistema es comúnmente conocido como modelo dinámico inverso (ecuación (3.38)) siendo  $\mathbf{A}$  la matriz de inercia,  $\mathbf{Q}$  el vector de fuerzas de gravedad y  $\mathbf{C}(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}$  la matriz que representa las fuerzas centrífugas y de Coriolis (debida a la rotación de la Tierra e inercia dada la aceleración centrípeta del sistema) [56].

$$\begin{bmatrix} \Gamma_a \\ \Gamma_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 K_1 & -K_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ -K_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & L_2 K_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & K_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \dot{\theta}_2 \\ K_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \dot{\theta}_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} g K_1 \sin(\theta_1) \\ g K_3 \sin(\theta_2) \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

$$\Gamma = \mathbf{A}(\theta)\ddot{\theta} + \mathbf{C}(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + \mathbf{Q}(\theta) \quad (3.38)$$

Donde;

$$\mathbf{A}(\theta) = \begin{bmatrix} L_1 K_1 & -K_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ -K_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & L_2 K_3 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C}(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} 0 & K_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \dot{\theta}_2 \\ K_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \dot{\theta}_1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad \mathbf{Q}(\theta) = - \begin{bmatrix} g K_1 \sin(\theta_1) \\ g K_3 \sin(\theta_2) \end{bmatrix}$$

A partir de la ecuación (3.38) se despejan  $\ddot{\theta}_1$  y  $\ddot{\theta}_2$  (ecuación (3.39)), además, para llevar a cabo

la simulación matemática mediante la herramienta simulink y facilitar la visualización de las variables en lazo abierto, se añade un vector columna unitario  $\mathbf{F}_r$  que representa un coeficiente  $b$  de resistencia que simula un entorno viscoso multiplicando a la velocidad angular ( $\dot{\theta}$ ) a fin de reducir su magnitud; por lo que reescribiendo la ecuación (3.39) se obtiene la ecuación (3.40), siendo esta la que describe el Modelo Dinámico Directo (MDD) del sistema.

$$\ddot{\theta} = \mathbf{A}^{-1}(\Gamma - \mathbf{C}(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} - \mathbf{Q}(\theta)) \quad (3.39)$$

$$\ddot{\theta} = \mathbf{A}^{-1}(\Gamma - \mathbf{F}_r\dot{\theta} - \mathbf{C}(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} - \mathbf{Q}(\theta)) \quad (3.40)$$

El diagrama en *Simulink* que representa la ecuación (3.40) se muestra en la figura (3.10), la cual brinda como resultado las posiciones articulares (figura(3.11a)), siendo más importante aún para el caso de estudio la ecuación (3.16) que corresponde a la posición del centro de masa (figura(3.11b)).

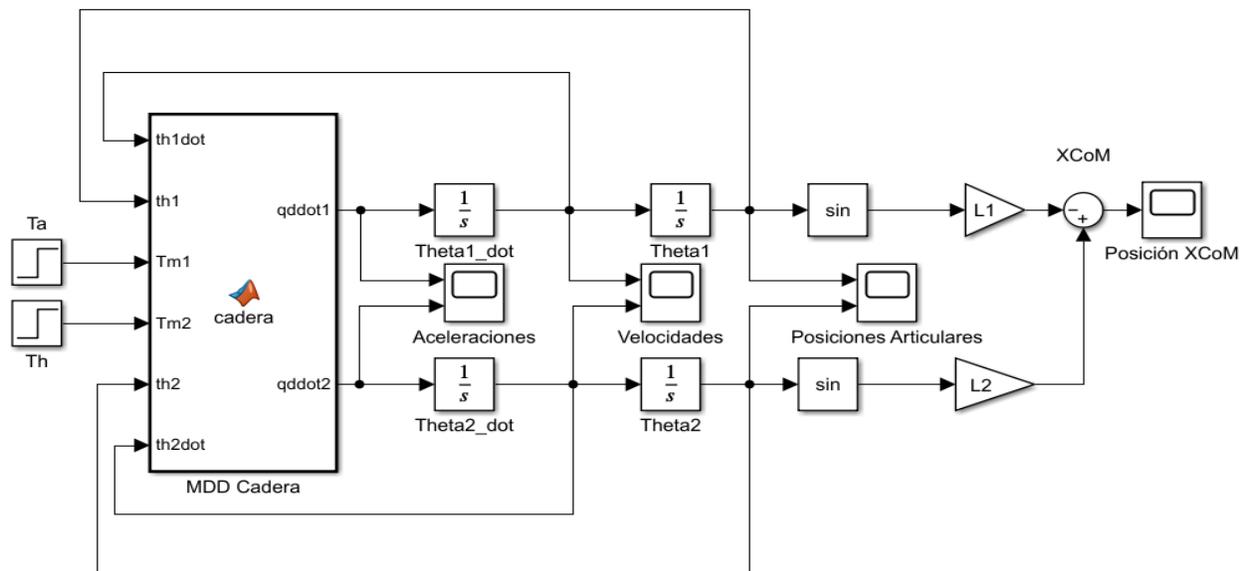
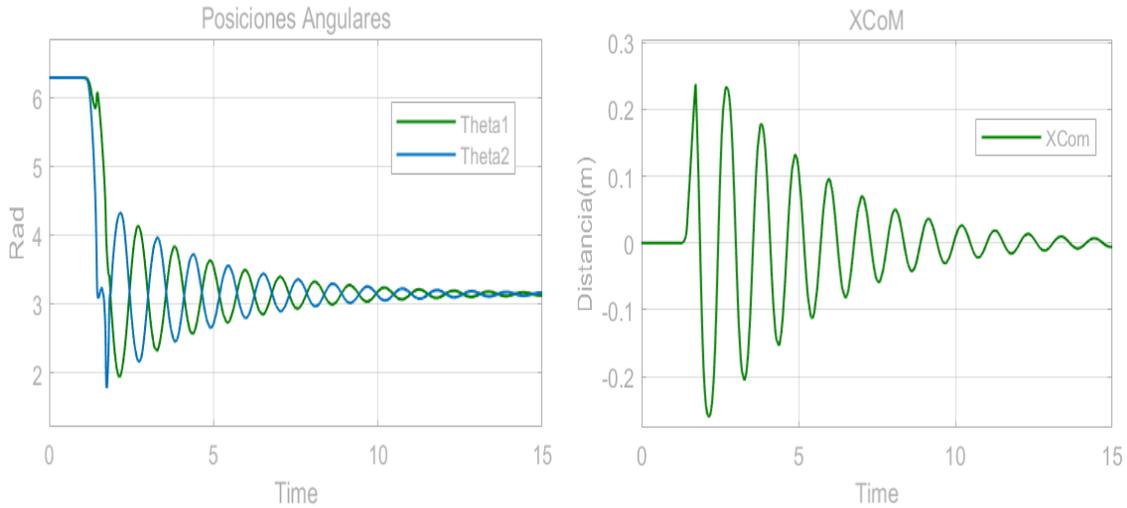


Figura 3.10: Simulación Modelo Simplificado de Péndulo Doble  
Fuente Propia.

Donde  $th_1$  y  $th_2$  corresponden a las posiciones articulares ( $\theta_1, \theta_2$ ),  $th_1dot$  y  $th_2dot$  son las velocidades angulares ( $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$ ) y  $T_{m1}$  y  $T_{m2}$  corresponden a las entradas externas del sistema, es decir el par aplicado en las articulaciones de tobillo y cadera respectivamente ( $\Gamma_a, \Gamma_h$ ); además  $qddot_1$  y  $qddot_2$  son las salidas del sistema equivalentes a la aceleración de las articulaciones ( $\ddot{\theta}_1, \ddot{\theta}_2$ ); para el caso en particular se toman como posiciones iniciales  $\ddot{\theta}_1 = \ddot{\theta}_2 = \dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 = 0$  y  $\theta_1 = \theta_2 = 2\pi$ , correspondientes a una posición completamente vertical del péndulo doble en su punto de equilibrio inestable, además de tener parámetros  $L_1 = 0,2m$ ,  $L_2 = 0,08m$ ,  $m_1 = 0,1Kg$ ,  $m_2 = 1,6Kg$ ,  $b = 0,04Kg\,m^2/s$  y  $g = 9,8m/s^2$ .



(a) Variación de las Posiciones Articulares de Tobillo y Cadera

(b) Variación de la Posición del CoM

Figura 3.11: Resultados de Simulación en Simulink  
Fuente Propia.

### 3.2.1. Controlador de cadera

Para el controlador de cadera del modelo mostrado en la Figura 3.10 se propone un controlador PID de forma similar al desarrollado en la estrategia de tobillo, pero dado que en este caso se tienen dos articulaciones se propone un controlador en diferencias donde cada articulación corrige la mitad del error, por lo tanto partiendo de la ecuación (3.16) cuando existe un desplazamiento del *CoM* ( $\Delta x$ ) se obtiene que:

$$\begin{aligned} x &= L_2 \sin(\theta_2) - L_1 \sin(\theta_1) \\ \Delta x &= L_2 \sin(\theta_2) - L_1 \sin(\theta_1) \end{aligned} \quad (3.41)$$

Dado que se requiere que cada articulación compense la mitad de la variación entonces:

$$\frac{\Delta x}{2} + \frac{\Delta x}{2} = L_2 \sin(\theta_2) - L_1 \sin(\theta_1) \quad (3.42)$$

Por tanto existe la reacción:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta x}{2} &= L_2 \sin(\theta_2) & \frac{\Delta x}{2} &= -L_1 \sin(\theta_1) \\ \frac{-L_1 \sin(\theta_1)}{L_2 \sin(\theta_2)} &: \frac{\frac{\Delta x}{2}}{\frac{\Delta x}{2}} \end{aligned}$$

$$\frac{-L_1 \sin(\theta_1)}{L_2 \sin(\theta_2)} : 1$$

$$\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} : \frac{-L_2}{L_1} \tag{3.43}$$

Al tener la relación brindada por la ecuación (3.43) es posible realizar un solo controlador que ejecute la acción de control para las dos articulaciones, donde la articulación de tobillo recibe el esfuerzo de control original mientras que la articulación de cadera responde a este esfuerzo de control multiplicado por la ganancia  $\frac{-L_2}{L_1}$ , lo que se aprecia de forma mas sencilla en la Figura 3.12.

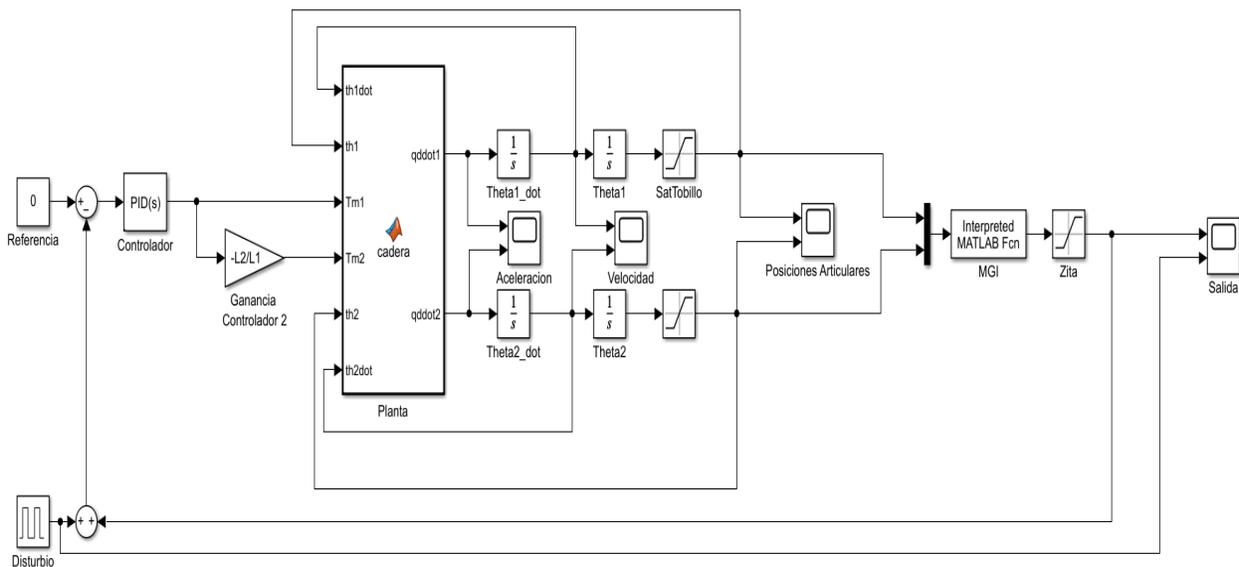


Figura 3.12: Diagrama en bloques Controlador PID en diferencias

Es necesario aclarar que a fin de reducir el cálculo matemático es común despreciar las fuerzas centrífugas y de Coriolis por tanto la matriz  $C = 0$ , de esta manera a partir de la Ecuación (3.40) se reduce así:

$$\ddot{\theta} = \mathbf{A}^{-1}(\Gamma - \mathbf{F}_r \dot{\theta} - \mathbf{C}(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} - \mathbf{Q}(\theta))$$

$$\ddot{\theta} = \mathbf{A}^{-1}(\Gamma - \mathbf{F}_r \dot{\theta} - \mathbf{Q}(\theta)) \tag{3.44}$$

Además dado que la variable de interés es la posición en x, es necesario transformar las posiciones angulares brindadas por la planta a posiciones cartesianas, por lo que se recurre a la ecuación (3.16) que describe ubicación actual del centro de masa, lo anterior esta representado en la figura 3.12 mediante el bloque MGI; de esta manera, con el nuevo modelo de planta brindado por la ecuación (3.44) se obtiene que la respuesta del sistema con el controlador propuesto es

la mostrada en la Figura 3.13, donde es posible observar que alcanza la estabilidad incluso frente un disturbio en la posición del centro de masa.

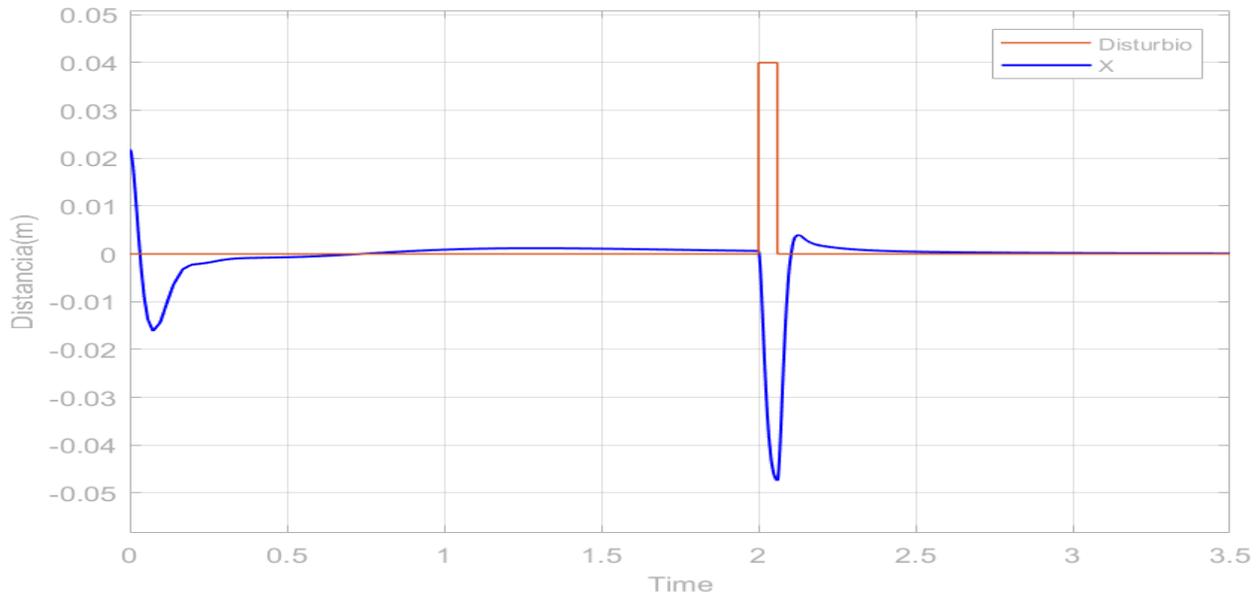


Figura 3.13: Respuesta Controlador PID en diferencias

### 3.2.2. Implementación en la plataforma *arduino* del controlador PID para la estrategia de cadera

Como se observó en las simulaciones realizadas en la plataforma *Simulink* de *Matlab*, el controlador PID es capaz de corregir el error generado por la pérdida de equilibrio del robot, por lo tanto, es posible implementar el controlador en la plataforma *arduino* siguiendo un procedimiento similar al realizado en la estrategia de tobillo.

Según lo planteado en la sección 3.2 se establece que para el controlador de la estrategia de cadera se requiere la implementación de dos señales de control, una encargada de mover las articulaciones del tobillo y la segunda enfocada en el movimiento de cadera, sin embargo, la ejecución de dos controladores PID sería contraproducente ya que elevaría la complejidad del mismo al tener que sintonizar dos controladores separados para que funcionen en conjunto, además de aumentar el tiempo de procesamiento del código; por esta razón, se lleva a cabo el esquema planteado en la figura 3.12 poniendo en práctica la relación expuesta en la ecuación (3.43), la cual establece la proporción entre las dos señales de control necesarias para la estrategia de cadera, donde la salida del controlador PID se envía a los motores de tobillo y la multiplicación de esta misma señal por la constante de proporción se destina a los actuadores de la cadera. Teniendo esto en cuenta, se genera un controlador PID similar al desarrollado en la estrategia de tobillo, donde se codifica la salida del controlador teniendo como referencia la ecuación (3.7) que permite

realizar las respectivas aproximaciones de tiempo discreto para la acciones derivativa e integral con un  $T_m = 60$  milisegundos, además, se realizan las modificaciones necesarias para corregir los baches en la señal de control al generar cambios en la sintonización y reducir la injerencia de fenómenos como el *derivative kick* en la salida del controlador, tal y como se puede observar en las líneas 4, 5 y 7 de la figura 3.14.

Sin embargo, se realiza una modificación a la acción proporcional del controlador con respecto al implementado en la estrategia de tobillo, eliminando el valor de *Offset* de la formula de control, ya que para el cálculo de la señal enviada a la cadera se necesita la salida del PID sin alteraciones debido a los actuadores.

```
1  int Control ;
2  Error = Reference - Output;
3  Uproporcional = ( Kp * Error);
4  Uderivativo   = Kd* ((Output - OutputAnt)/Tm);
5  ErrorAcum = ErrorAcum + (Ki* ((Tm/2) * (ErrorAnt + Error)));
6  Uintegral = ErrorAcum;
7  Control = Uproporcional - Uderivativo + Uintegral;
8  ErrorAnt  = Error;
9  OutputAnt = Output;
```

Figura 3.14: Implementación del controlador PID en *arduino*

Luego de realizar el cálculo de la señal de control, se procede a realizar su envío a los actuadores utilizando las mismas funciones de la librería *DynamixelSerial* usadas en la estrategia de tobillo, teniendo en primer lugar el envío de la señal de control a los dos motores de la articulación de tobillo, el cual es realizado de forma similar al explicado en la imagen 3.8 para la primera estrategia de control; sin embargo, es necesario tener en cuenta la modificación realizada a la acción proporcional del PID ya que esta solo afecta la señal de control utilizada para la articulación de cadera, siendo necesario que para el correcto funcionamiento del controlador junto a los actuadores de tobillo, se deba añadir nuevamente el valor de *Offset* eliminado de la ecuación de control, repitiendo la misma constante de 606 utilizada en la implementación del primer controlador. Finalmente, se realiza la corrección matemática planteada para el motor 16 y se normaliza la señal de control en el rango de 0 a 1023 como lo muestran las líneas 3 y 4 de la figura 3.15.

```

1  float Khip=- (5.3/17.7);
2  Control_15 = Offset1+Control;
3  Control_15 = constrain(Control_15,0,1023);
4  Control_16 = 1023- (Offset1+Control);
5  Control_16 = constrain(Control_16,0,1023);
6  ControlHip_12 = Offset2+(Khip*Control);
7  ControlHip_12 = constrain(ControlHip_12,0,1023);
8  ControlHip_11 = 1023- (Offset2+(Khip*Control));
9  ControlHip_11 = constrain(ControlHip_11,0,1023);
10 Dynamixel.moveSpeed(16,Control_16,100);
11 Dynamixel.moveSpeed(15,Control_15,100);
12 Dynamixel.moveSpeed(11,ControlHip_11,100);
13 Dynamixel.moveSpeed(12,ControlHip_12,100);

```

Figura 3.15: Implementación de la relación proporcional entre las dos señales de control para la estrategia de cadera

Por otro lado, para definir la acción que debe realizar la cadera es necesario considerar el control postural realizado por el cuerpo humano [57] ante diversas desestabilizaciones crecientes generadas por el ambiente, en otras palabras, se debe tener en cuenta que la reacción combinada de los músculos al contraerse aceleran el cuerpo hacia el origen permitiendo mantener el equilibrio [58]. De esta manera se puede realizar una analogía entre el comportamiento humano y el funcionamiento deseado del sistema, donde se busca que los motores 11 y 12 giren de tal manera que el tronco del robot se mueva hacia el centro del polígono de soporte ante cualquiera de las inclinaciones. Por esta razón, para determinar la señal de control enviada a la articulación de cadera se debe multiplicar la salida del PID mostrada en la figura 3.14 y la constante de relación expresada en la ecuación 3.43, donde los valores de  $L_1$  y  $L_2$  se hallan al realizar una medición física de la longitud de eslabones del robot, obteniendo una constante de proporción  $K_{hip}$  igual a  $-(5.3/17.7)$ .

Luego de hallar la señal de control para la articulación de cadera se procede a determinar el valor de *Offset* utilizado; como bien se dijo en la estrategia de tobillo, al considerar la ecuación 3.7 para obtener el esfuerzo de control y la figura 2.8 para el comportamiento del *ZMP*, se puede suponer que la salida del controlador aumente frente una inclinación positiva, lo que genera que el controlador funcione en un proceso de acción inversa. Por esta razón, si tenemos en cuenta el control postural del cuerpo humano y el sentido de giro de los actuadores de cadera, se puede observar que solo el motor 12 realiza el movimiento adecuado para corregir el equilibrio del robot, por lo que al recordar el concepto de *Offset* expresado para la estrategia de tobillo se determina que el valor utilizado sea 606; como se observa en la línea 6 de la figura 3.15 para el motor 12 la posición enviada se obtiene al multiplicar la salida del PID por la constante de proporción, la cual se suma al *Offset2* y se normaliza en la línea 7, sin embargo, para el motor 11 es necesario realizar una corrección matemática, donde al máximo valor digital permitido por *arduino* se le resta

la señal de control calculada para el motor 12, obteniendo en la línea 8 un esfuerzo de control inverso que permite a los actuadores tener el mismo sentido de giro frente a la misma salida del controlador. Finalmente, se envía la posición deseada correspondiente a cada motor de cadera y tobillo mediante el comando *Dynamixel.moveSpeed*.

### **Sintonización del controlador PID para la estrategia de cadera**

La sintonización del controlador PID se realiza con la misma metodología utilizada en la estrategia de tobillo, variando en primer lugar los valores de  $K_p$ , luego  $K_d$  y finalmente la constante  $K_i$ , sin embargo, luego de realizar pruebas de control con el robot, se observó que las variables de sintonización encontradas no eran muy diferentes a las utilizadas en la estrategia de tobillo por lo que se decide emplear los mismos valores en los dos controladores, obteniendo resultados de control óptimos en ambos casos.

## Capítulo 4

# Definición del plan de pruebas e indicadores de comparación

En este capítulo se establece el plan de pruebas para el desarrollo de la experimentación y se definen los indicadores de comparación necesarios para evaluar el comportamiento de las estrategias de control. En primer lugar, se presenta el proceso de experimentación donde se describe el plan de pruebas encargado de establecer el paso a paso para la toma de datos, la cantidad de pruebas realizadas con cada estrategia, el procesamiento de las señales almacenadas y demás consideraciones a tener en cuenta durante la recolección de información. Posteriormente, se presenta una descripción de los indicadores de desempeño utilizados, brindando una definición de cada uno de ellos al igual que la explicación de su importancia como puntos de comparación, estableciendo la metodología para su medición, recolección y posterior análisis.

### 4.1. Desarrollo de la experimentación

Para el desarrollo de la experimentación es necesario la elaboración de una superficie de inclinación cuya estructura permita modificar la pendiente de manera controlada a lo largo del ciclo de control de las dos estrategias (figura 4.1).

La estructura presentada en la figura 4.1 está compuesta por una base cuadrada de madera que sirve de soporte para dos pilares ubicados en esquinas contrarias de la base; por medio del diseño e impresión 3D se ubican soportes sobre los pilares con el objetivo de sostener dos rodamientos que sirven de guía para una varilla lisa sobre la que se ubica la base circular de madera, de igual manera, se imprime un mecanismo utilizado para manipular la inclinación de la superficie circular por medio de una varilla roscada. Por otro lado, con el fin de aumentar la fricción entre los pies del robot y el plano se adhirió un material áspero a la base circular y así

evitar posibles deslices del robot ante una inclinación pronunciada; de igual manera, los cambios en el ángulo de la superficie son seguidos por un potenciómetro unido a la varilla lisa y sujetado a uno de los soportes impresos, generando una variación del voltaje en las resistencias leída por una placa *arduino MEGA* que envía el valor de *pwm* correspondiente a través del puerto serial hacia el computador, este se encarga de realizar la interpolación entre el valor recibido y el ángulo de inclinación de la base, mostrando el resultado a través del *Monitor Serie* de *arduino*.

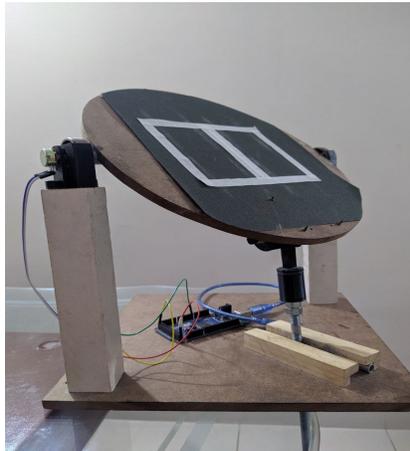


Figura 4.1: Estructura diseñada para modificar el ángulo de inclinación de la superficie de soporte del robot . Fuente propia.

Posteriormente, es necesario establecer el plan de pruebas que garantice la homogeneidad en los ciclos de control para cada una de las estrategias; para esto se debe asegurar que cada prueba se realice de manera idéntica, estableciendo las condiciones iniciales y el paso a paso a seguir, facilitando el análisis de los indicadores de comparación y disminuyendo la incidencia de otras variables externas que perturban el funcionamiento del controlador.

Para realizar las pruebas es necesario establecer como primera medida las condiciones iniciales para la experimentación, para esto se fijan las posiciones de cada una de las articulaciones del robot con el objetivo de que pueda mantener una posición de genuflexión, de esta manera el robot puede ser posicionado sobre la base de soporte circular de la plataforma sin perder el equilibrio, de igual manera, la superficie de soporte debe estar completamente perpendicular al robot en ángulo de inclinación de  $0^\circ$ , permitiendo que el bípedo siempre descansa sobre el centro de la base circular siendo este el punto de partida de cada prueba realizada.

Luego de tener el punto de partida se establece el tipo de experimentación a realizar, partiendo en determinar el número de pruebas y la forma de obtención de los datos; en este punto es importante considerar que la fricción entre la base y el robot limita en gran medida el máximo ángulo de inclinación a la que la base puede llegar sin que el robot se deslice de la plataforma y caiga, lo que puede afectar la toma de datos de los indicadores de comparación; debido a este problema se establece un valor de pendiente de  $35^\circ$  en el cual el robot no cae de la superficie, permitiendo realizar las pruebas sin el riesgo de alterar los datos recolectados por la pérdida de

fricción, sin embargo, uno de los indicadores de comparación requerido es el máximo ángulo de inclinación que cada estrategia de control puede sobrellevar sin perder el equilibrio, por lo que no tendría sentido tomar los valores hasta un valor constante en cada prueba. En consecuencia, se ejecutan dos tipos de experimentos, el primero se ejecuta hasta los  $35^\circ$  para recolectar los datos de potencia eléctrica, error acumulado, RMSE y esfuerzo de control, dicha experimentación se realiza 30 veces para cada una de las estrategias de control, donde 15 se ejecutan con una inclinación positiva de la superficie, es decir la definida al medir un ángulo entre 0 y 89 grados en sentido contrario a las manecillas del reloj desde el plano horizontal de la plataforma, simulando el subir una colina (figura 4.2a); y 15 se desarrollan con inclinación negativa, determinada por un ángulo negativo al medir en sentido horario desde el plano horizontal, similar al bajar una colina (figura 4.2b).

Por otro lado, la segunda experimentación solo recolecta los datos del máximo ángulo alcanzado ya que se realizan hasta que el robot cae de la plataforma, sea generado por un mal funcionamiento del controlador o una pérdida de fricción con la superficie, en esta prueba solo son necesarias 20 repeticiones para cada una de las estrategias, 10 con una inclinación positiva y 10 con un valor negativo.

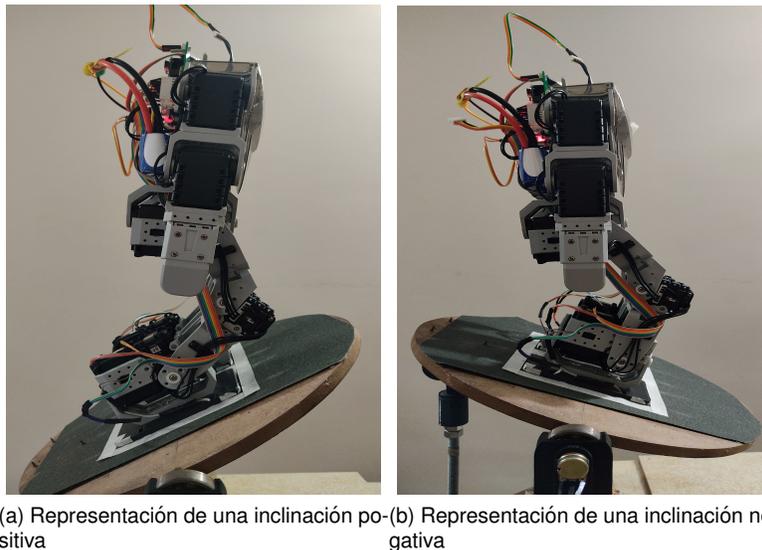


Figura 4.2: Representación del robot en una superficie con pendiente positiva y negativa

Seguidamente, se determina el paso a paso a desarrollar en cada prueba para cualquiera de las estrategias de control, garantizando que cada una se realice de forma homogénea y facilitando los datos necesarios para el análisis comparativo. En primer lugar, para la experimentación hasta un ángulo fijo se realiza el siguiente procedimiento:

1. Se descarga el código de la estrategia correspondiente a la placa *arduino*, luego se enciende el dispositivo, se ubica en posición de genuflexión de manera automática y se coloca en el

centro de la superficie circular con una inclinación inicial de  $0^\circ$  (figura 4.3), una vez ubicado el robot sobre la superficie se procede a realizar la conexión vía *bluetooth* del robot y la interfaz en *Matlab* para la recolección de los datos de cada indicador.

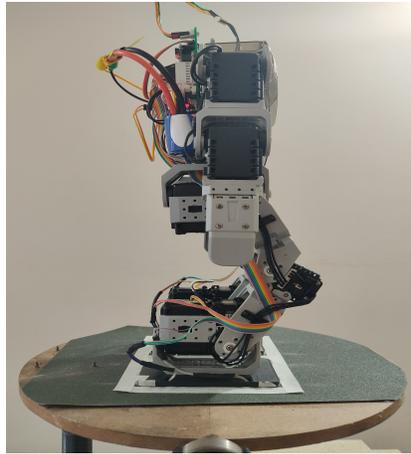


Figura 4.3: Posición inicial del robot para cada prueba de control

2. Se procede a modificar manualmente la superficie de soporte de manera que su inclinación sea positiva; en este punto, es importante modificar el ángulo de la superficie de manera controlada y suave, además de realizar cada prueba en un mismo intervalo de tiempo de 50 segundos a fin de homogeneizar los datos de los indicadores. En el momento que el ángulo de inclinación llegue a  $35^\circ$  se da por terminada la prueba y se detiene la toma de datos en la interfaz de *Matlab*, guardando los valores obtenidos en el computador.
3. Luego de realizadas las 15 pruebas con una inclinación positiva, se pasa a tomar las 15 pruebas restantes modificando la superficie para tener una inclinación negativa.
4. Al finalizar las 30 pruebas de una estrategia se repite el paso 1 con el método de control restante.

Los datos en cada prueba se almacenan dentro de un archivo *.mat* de *Matlab* que permite su manipulación; es necesario recalcar que en las pruebas sobre la estrategia de tobillo se recortan los vectores en 1251 datos por prueba mientras que para la estrategia de cadera se toman 834 datos, esto es realizado a fin de garantizar que se cumpla con el tiempo de cada prueba de 50 segundos ( $50,040s$  para ser mas precisos). Lo anterior se debe a la diferencia de tiempos de muestro entre los dos métodos, ya que para el controlador de tobillo se toma un valor cada menos tiempo se almacena un mayor numero de datos en el vector que para el de cadera.

En segundo lugar, se desarrolla el plan de pruebas para obtener el máximo ángulo de inclinación, en el cual:

1. Se descarga el código de la estrategia correspondiente a la placa *arduino*, luego se enciende el dispositivo, se ubica en posición de genuflexión de manera automática y se coloca en el centro de la superficie circular con una inclinación inicial de  $0^\circ$ . Una vez ubicado, se procede a abrir el *Monitor Serie* de *arduino* para observar el ángulo leído por la placa.
2. Se modifica el ángulo de inclinación de la superficie para una pendiente positiva hasta que el robot pierda el equilibrio y caiga de la estructura; en este punto se toma el máximo valor observado en el *Monitor Serie* y se almacena manualmente en una tabla de *Excel*.
3. Luego de realizadas las 10 pruebas con inclinación positiva se efectúan las 10 restantes modificando la superficie para tener una inclinación negativa.
4. Al finalizar las 20 pruebas de una estrategia se repite el paso 1 con el método de control restante.

## **4.2. Indicadores de comparación**

A fin de comparar y evaluar el desempeño de las estrategias de control es necesario establecer indicadores que permitan valorar los parámetros de cada estrategia de manera más clara y precisa. A continuación, se definen los diversos indicadores utilizados, además de brindar una explicación de su importancia para la comparación de las estrategias.

### **4.2.1. Máximo ángulo de recuperación de equilibrio**

Uno de los parámetros de comparación más importantes a establecer es el máximo ángulo de recuperación de equilibrio para cada estrategia de control, es decir, la inclinación máxima que alcanza la superficie de soporte donde cada estrategia es capaz de mantener el balance del robot bípedo antes de que este caiga de la plataforma; el fin de realizar esta medición es estimar la robustez de cada estrategia ante perturbaciones y ruidos presentes en el sistema físico, además de evaluar su desempeño al corregir las variaciones de la señal de salida provocadas por el movimiento del plano de soporte del robot.

La medición del ángulo máximo alcanzado se realiza por medio de una modificación en la inclinación de la superficie de soporte del robot, a fin de generar una variación en la variable de salida del sistema (ZMP), dicha variación debe ser corregida por la estrategia de control de tal manera que este valor sea lo más cercano a cero. A medida que el ángulo de inclinación aumenta la dificultad del robot para mantener el equilibrio va incrementando al punto máximo donde el robot no se puede mantener en pie y cae, este valor de pendiente se considera el máximo ángulo de recuperación de equilibrio, siendo de gran ayuda al establecer los límites del controlador y el robot. En este punto es importante acotar que la fricción presente entre la superficie y el bípedo

puede alterar el resultado de la medición, ya que para un ángulo de inclinación pronunciado el robot puede caer debido a una pérdida de fricción y no a un mal funcionamiento del controlador, por lo que esto puede ser un limitante a la hora de establecer el máximo rango posible de control.

#### 4.2.2. Potencia eléctrica

Uno de los mayores problemas a la hora de implementar controladores en robots bípedos es el elevado consumo de potencia eléctrica para su funcionamiento, ya que tanto los motores en la estructura como demás instrumentos incorporados para el movimiento del robot, consumen una gran cantidad de energía que solo es posible proveer por medio de una alimentación cableada o gracias a baterías que en muchos casos son demasiado grandes y pueden afectar el funcionamiento del equipo. El problema radica en lograr la eficiencia energética del robot, pudiéndose desempeñar adecuadamente por un largo periodo de tiempo sin verse limitado por una fuente cableada que reduzca su rango de aplicación.

A pesar de los avances en la creación de baterías más pequeñas y duraderas estas aun no son suficientes para suplir la demanda energética de un robot bípedo por largos periodos de tiempo, lo que limita el rango de aplicación de estos equipos; es por esto que cuando se experimenta con estrategias de control es necesario considerar la potencia eléctrica empleada por el robot, lo que implica establecer un sistema que permita conocer el consumo energético a lo largo de toda la ejecución de control y así evaluar la eficiencia de la técnica.

Para un sistema de corriente continua, la potencia se define como la cantidad de energía entregada o absorbida por un elemento en un tiempo determinado, en otras palabras, se establece como el producto de la diferencia de potencial entre los terminales y la intensidad del flujo de electrones que pasa a través del dispositivo. Teniendo en cuenta esto, es necesario conocer los valores de corriente y de voltaje consumido por el robot, para lo cual se recurrió a los sensores descritos en el capítulo 2, cuyos valores de respuesta son enviados vía *bluetooth* a la interfaz construida en *Matlab* a fin de realizar el escalado de la señal y calcular el valor de potencia eléctrica consumida, permitiendo graficar y almacenar el consumo energético de cada estrategia para su comparación y análisis en cada ciclo de control.

En la figura 4.4a se visualiza la gráfica de voltaje obtenida para una prueba realizada con la estrategia de tobillo en una inclinación positiva; en ella se puede observar que a pesar de ser una señal con presencia de ruido esta no varía en gran medida, manteniéndose en un rango de 4.91 a 5 voltios a lo largo de la prueba. De igual manera, la imagen 4.4b muestra la gráfica de corriente para la misma prueba, teniendo nuevamente una señal con ruido pero con pequeñas variaciones entre 0.9 y 1.35 amperios; finalmente, la ilustración 4.4c representa la señal de potencia eléctrica obtenida al multiplicar los valores de corriente y voltaje mostrados en las gráficas anteriores.

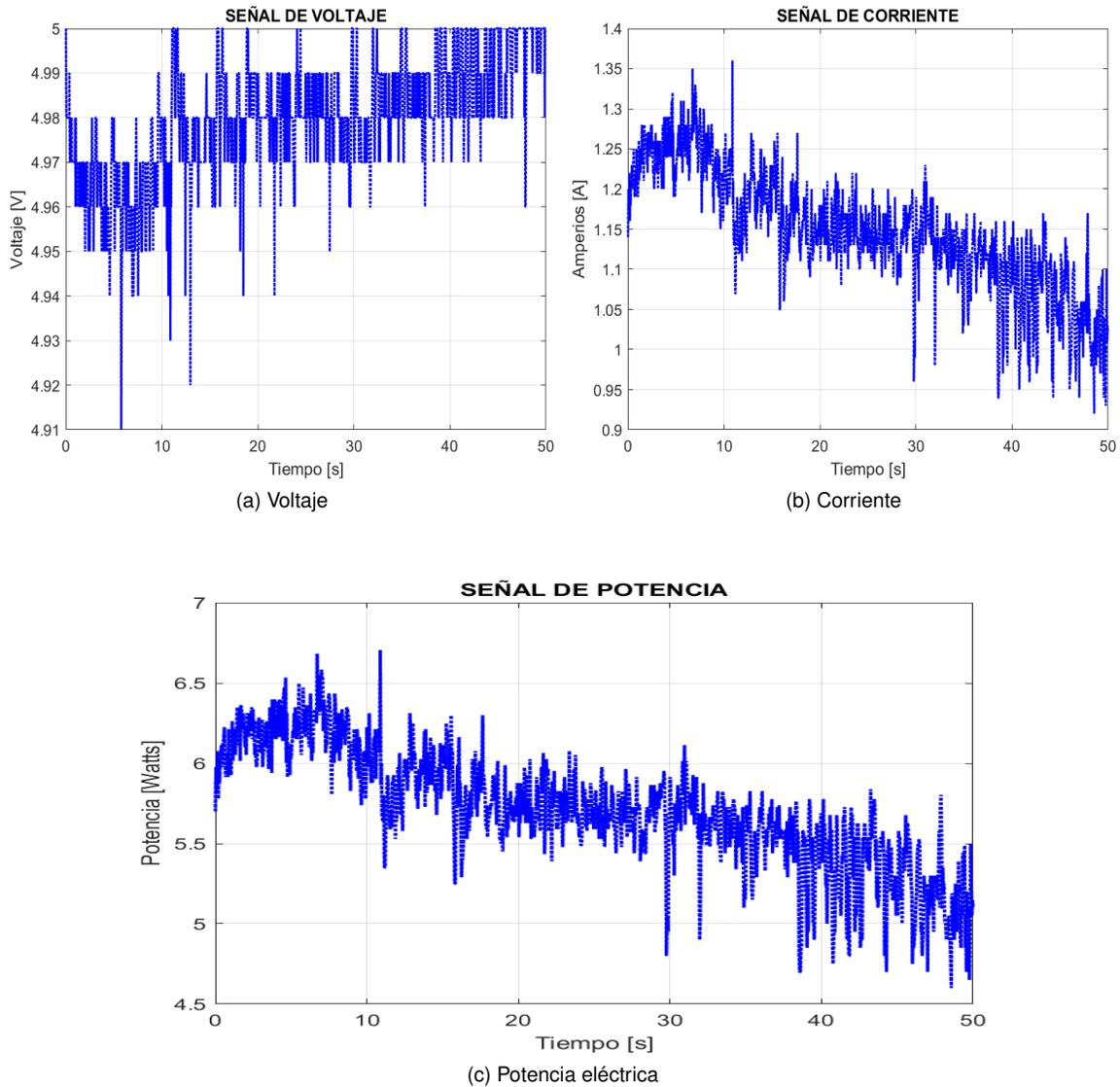


Figura 4.4: Señales de voltaje, corriente y potencia obtenidas en una prueba con inclinación positiva

### 4.2.3. Error acumulado

Al implementar el controlador *PID* discreto en la plataforma *arduino*, es necesario establecer un tiempo de muestreo para limitar que la señal de salida cambie su valor cada cierto periodo constante, esto con el fin de tener un comportamiento más preciso del sistema y evitar una saturación en la comunicación de la placa; igualmente, al ser un sistema de lazo cerrado en cada intervalo de tiempo se realiza el cálculo del error entre el valor de referencia deseado y la salida actual del proceso, dicho valor servirá de entrada al controlador para calcular el esfuerzo de control necesario. La importancia de calcular este valor radica en observar como la estrategia de control actúa

frente al error y si está cumpliendo su función de minimizar la diferencia entre la salida deseada y la actual.

Ahora bien, se podría pensar en comparar el error presentado en un intervalo de tiempo en específico lo que no sería del todo fiable ya que este cálculo puede ser afectado por diversos factores, ya sea una falla en la lectura de sensores, problemas con el computo de algunas variables o algún agente externo que afecte el valor de la señal de salida en dicho intervalo, por lo tanto, comparar esta diferencia presentada en las dos estrategias sin tener en cuenta el comportamiento de la señal a lo largo de toda la ejecución de control limita demasiado su análisis, siendo necesario hacer uso de un nuevo parámetro como el error acumulado (*ErrorAcum*), el cual se define como el sumatorio de todos los errores instantáneos presentes durante la ejecución de la estrategia de control; dicho valor permite realizar una comparación entre las estrategias y observar cual tiene una mejor mitigación total del error.

El *ErrorAcum* es importante para hallar la magnitud de la acción integral afectando directamente su comportamiento, por lo que su cálculo está incluido en el bucle del controlador *PID*; así pues, para su medición como parámetro de comparación simplemente se recolectó este valor a lo largo del ciclo de control en ambas estrategias y se envió vía *bluetooth* a la plataforma en *Matlab*, donde se dibuja y se almacena para su posterior análisis.

En la figura 4.5a se puede observar como el error acumulado aumenta a lo largo del ciclo de control para una inclinación positiva, esto se debe a que al realizar el calculo del error para este tipo de pendiente se tiene un valor negativo de *ZMP* medido por los sensores, obteniendo un valor positivo de error en cada muestra. Por el contrario, para la imagen 4.5b se tiene el error para una inclinación negativa, donde el *ZMP* tiene un valor positivo generando un valor negativo de error acumulado en cada iteración.

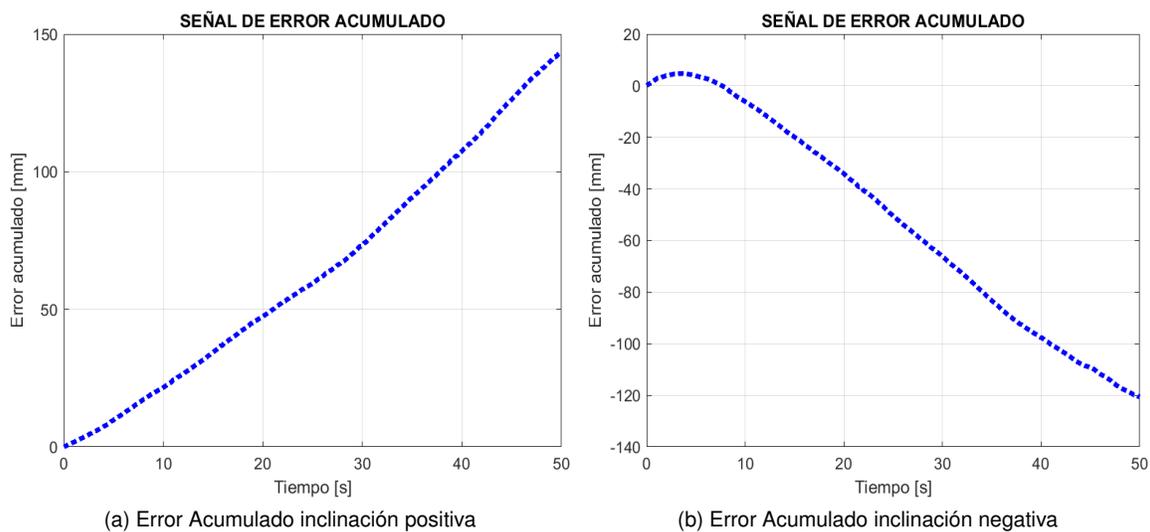


Figura 4.5: Señales de error acumulado obtenidas con inclinación positiva y negativa

#### 4.2.4. Error cuadrático medio (RMSE)

Luego del cálculo del error acumulado es posible obtener un nuevo parámetro de comparación llamado error cuadrático medio (ECM), el cual permite medir la cantidad de error que hay entre dos conjuntos de datos; es decir, compara un valor predicho o estimado y un valor conocido, permitiendo saber que tan distintos son los datos reales de un sistema con respecto a los valores deseados. En este sentido, el primero hace alusión al dato obtenido en el cálculo del ZMP a través de los sensores FSR y el segundo se establece como la referencia del sistema de control, lo que permite comparar que tan diferentes son los datos de ZMP leídos con respecto a los valores deseados por el controlador.

El error cuadrático medio puede ser calculado gracias a la ecuación (4.1), donde  $y_i$  hace alusión al valor de referencia deseado por el sistema y  $\hat{y}_i$  se considera el valor real medido por los sensores, de igual manera  $N$  se define como el número total de datos, es decir el número total de iteraciones del controlador en 50 segundos.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4.1)$$

Como se observa en la expresión anterior la importancia de este parámetro radica en que permite realizar una comparación dato a dato, donde en cada iteración del ciclo de control se realiza la resta entre el valor deseado y el real, el cual se eleva al cuadrado, se suma entre sí y se divide entre el número total de datos para obtener un único dato de medición de la diferencia entre el valor de referencia con respecto al medido por los sensores; esto significa que entre más pequeño sea dicho valor menor será la desigualdad entre los dos valores lo que permite suponer que estrategia corrige de mejor manera la pérdida de equilibrio.

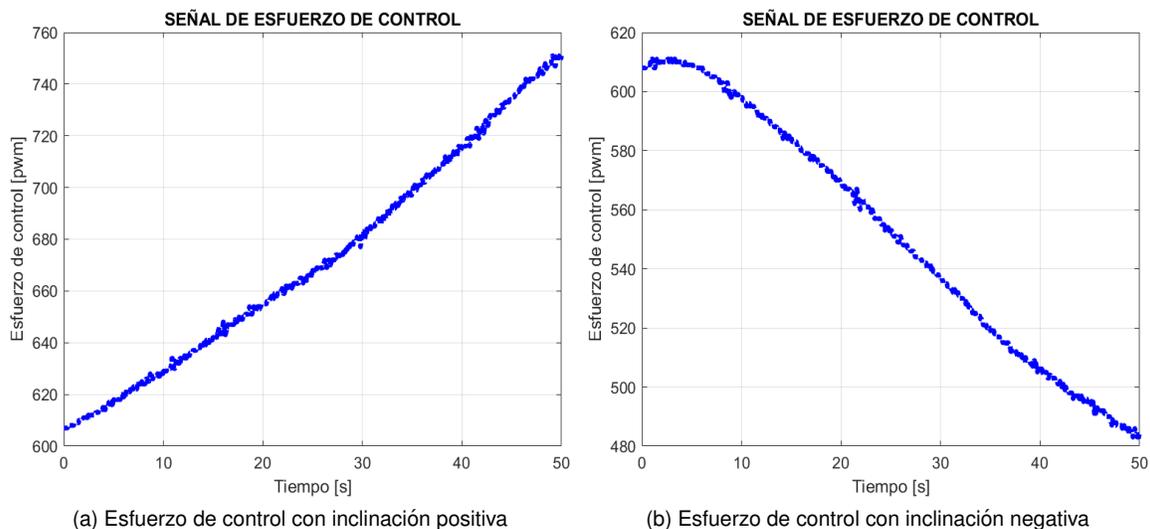
#### 4.2.5. Esfuerzo de control

Como se dijo anteriormente, durante cada uno de los intervalos de muestreo se realiza el cálculo del error instantáneo del sistema entregado al controlador, quien a su vez calcula el esfuerzo adecuado para que los actuadores corrijan el desequilibrio. Con esto en mente, el esfuerzo de control no es más que el resultado entregado por el PID en cada intervalo de tiempo, cuyos valores a lo largo de una ejecución de control se convierten en una señal que permite analizar el funcionamiento del sistema ante dichas variaciones.

La importancia del esfuerzo de control como parámetro de comparación radica en permitir visualizar posibles anomalías en la señal del controlador que pueden afectar el comportamiento de los actuadores, ya que identificar posibles sobre impulsos de la señal facilita observar que

estrategia responde de forma mas suave y robusta ante algún disturbio. De igual manera, la acción de control es un indicador de rapidez del controlador, ya que ayuda a observar el retardo existente entre la detección del error y el punto en que este es corregido; este aspecto es de gran importancia a la hora de evaluar el comportamiento de una estrategia de control, debido a que una respuesta lenta limitaría la magnitud de las posibles alteraciones externas que el PID podría sobrellevar sin perder el equilibrio.

Ahora bien, para la medición del parámetro de comparación se toma el valor de salida del controlador en *arduino* para cada uno de los instantes de tiempo y se envía por medio del dispositivo *bluetooth* hacia la interfaz desarrollada en *Matlab*, esto permite recolectar los datos individuales y graficarlos de tal manera que se obtenga la totalidad de la señal a lo largo de la ejecución de la prueba de control de equilibrio.



(a) Esfuerzo de control con inclinación positiva

(b) Esfuerzo de control con inclinación negativa

Figura 4.6: Señales de error acumulado obtenidas con inclinación positiva y negativa

En la figura 4.6a se observa el comportamiento del esfuerzo de control a lo largo de una inclinación positiva, donde la señal inicia en el valor de *Offset* y aumenta a lo largo de la prueba. De igual manera, en la imagen 4.6b se puede visualizar que para una inclinación negativa el esfuerzo de control inicia en el mismo valor pero este disminuye a lo largo de los 50 segundos.

## Capítulo 5

# Comparación del funcionamiento de las estrategias de control de tobillo y cadera

Este capítulo contiene la parte final del proyecto enfocada en la comparación y análisis de los datos obtenidos en la ejecución del plan de pruebas para las dos estrategias de control. En primer instancia se presenta el cálculo de energía consumida por el robot a partir de la señal de potencia eléctrica, seguido del computo de la pendiente para las señales de error acumulado, esfuerzo de control y energía consumida; finalmente se realiza el análisis estadístico de los datos obtenidos para los indicadores de comparación hallados en cada prueba realizada.

### 5.1. Cálculo de pendientes para los indicadores de comparación

Inicialmente se debe realizar el cálculo de la energía total utilizada por el robot en cada prueba, para ello es necesario medir el área bajo la curva de la señal de potencia eléctrica durante el ciclo de control por medio del método de integración trapezoidal (ecuación (5.1)) a fin de obtener la energía en cada intervalo de potencia; considerando un tiempo de muestreo  $T_m$  de  $40ms$  para la estrategia de tobillo y de  $60ms$  para la de cadera.

$$Energia(k) = Energia(k) + \frac{T_m}{2}(P_{k-1} + P_{k_0}) \quad (5.1)$$

Teniendo en cuenta el cálculo de energía consumida, se puede observar que junto a parámetros de comparación como el error acumulado y el esfuerzo de control son variables acumulativas, lo que permite calcular la razón de cambio de estas señales mediante su pendiente; para esto se

aproximan dichas gráficas a un polinomio de grado uno mediante el comando *Polyfit* de *Matlab*, donde el primer parámetro es la señal de tiempo, el segundo el vector de datos del indicador de comparación y el ultimo el grado del polinomio, obteniendo así gráficas como las mostradas en la figura 5.1.

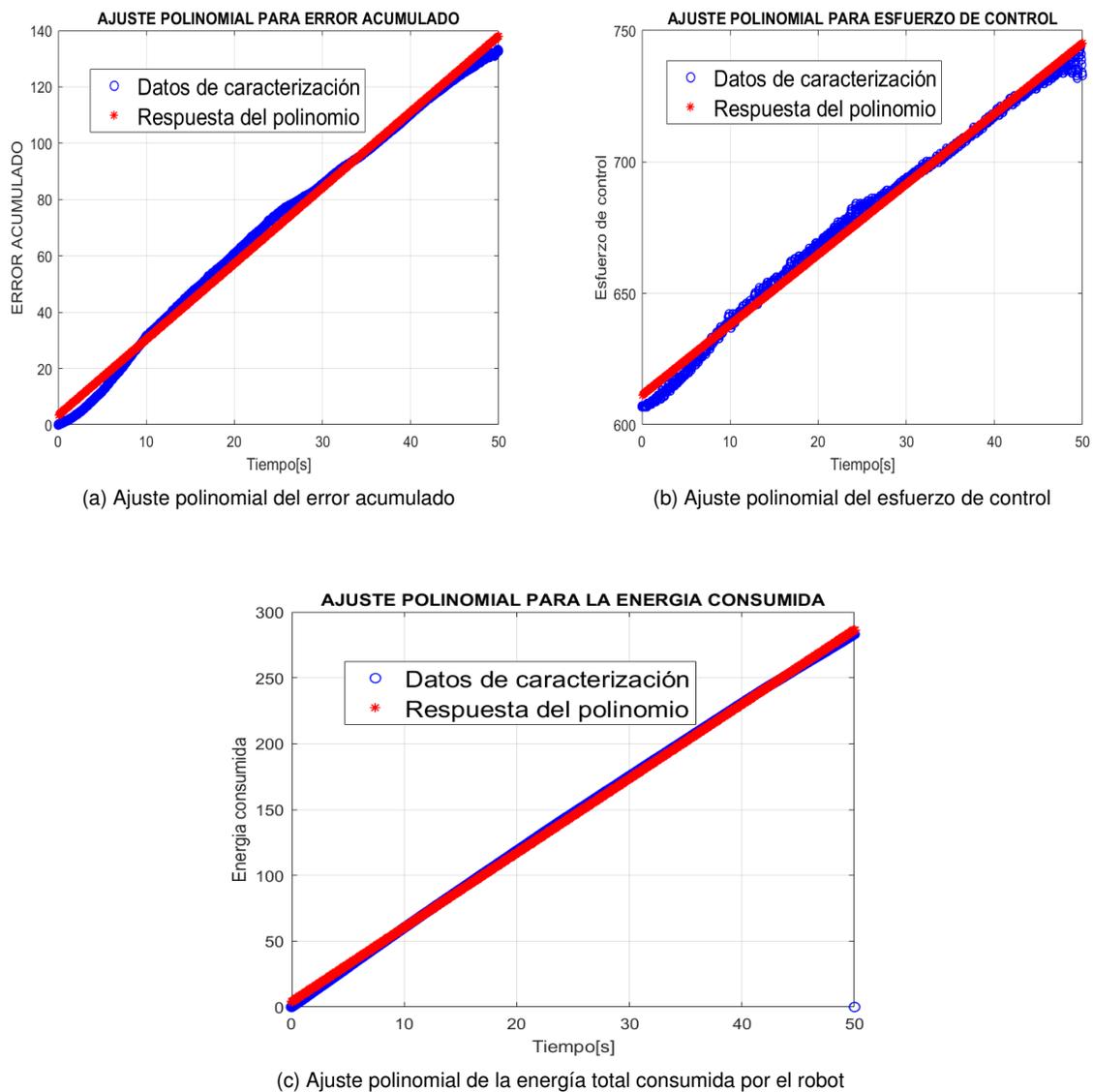


Figura 5.1: Ajuste polinomial de variables a grado uno

Con este método se procede a calcular la pendiente para cada uno de los indicadores de comparación obtenidos de las pruebas, registrando los resultados en las tablas 5.1 para la estrategia de tobillo y 5.2 para la de cadera.

Estrategia de Tobillo							
Pendiente con Inclinación positiva				Pendiente con Inclinación negativa			
# Prueba	Energia	Error	E.Control	# Prueba	Energia	Error	E.Control
1	5.6887	2.8768	2.9035	1	4.9949	-2.8375	-2.8668
2	6.0797	2.8157	2.8264	2	5.2454	-3.0302	-2.9948
3	5.6353	3.0133	3.0255	3	4.5752	-2.6849	-2.7278
4	5.4518	3.0085	2.9970	4	4.3705	-2.4986	-2.5330
5	6.1587	3.0600	3.0943	5	4.7493	-2.6028	-2.6446
6	5.9116	3.0471	3.0945	6	4.7641	-2.4501	-2.4737
7	5.8893	2.9490	2.9742	7	4.5304	-2.3885	-2.4149
8	5.8725	3.0915	3.1027	8	4.6297	-2.3922	-2.4180
9	5.6674	3.1028	3.0884	9	4.8647	-2.4351	-2.4898
10	5.9849	2.5120	2.5605	10	5.1029	-2.6660	-2.6866
11	5.6515	2.8181	2.8570	11	5.2826	-2.4135	-2.4438
12	5.1656	2.6465	2.6724	12	5.2019	-2.2456	-2.2720
13	5.3752	2.8682	2.8847	13	4.861	-2.3884	-2.4150
14	5.2763	3.0939	3.0503	14	5.2924	-2.2245	-2.2400
15	5.6502	2.6928	2.6761	15	5.3345	-2.3939	-2.4248

Tabla 5.1: Datos estrategia de Tobillo

Estrategia de Cadera							
Pendiente con Inclinación positiva				Pendiente con Inclinación negativa			
# Prueba	Energia	Error	E.Control	# Prueba	Energia	Error	E.Control
1	5.4847	-3.2684	-3.2520	1	5.0544	3.0691	3.1072
2	6.0412	-3.0920	-3.1134	2	5.1984	2.7460	2.7711
3	5.3663	-2.9279	-2.9384	3	4.9670	3.0465	3.0106
4	5.4025	-3.2237	-3.2297	4	5.1605	2.8962	2.9066
5	5.1697	-2.8194	-2.8208	5	5.0507	2.8462	2.8397
6	5.6231	-3.1027	-3.0717	6	5.1594	2.9221	2.9143
7	5.7000	-3.1219	-3.1139	7	5.1123	2.6916	2.7033
8	5.4286	-3.0893	-3.0881	8	5.2187	3.0941	3.1018
9	4.9670	-3.5064	-3.5017	9	5.4478	2.5722	2.5702
10	5.4434	-3.0060	-3.0028	10	5.1635	2.8695	2.8637
11	5.3191	-3.4122	-3.4120	11	5.4533	3.0969	3.0837
12	5.4882	-2.7732	-2.7934	12	4.8522	2.7388	2.7631
13	5.5107	-3.1225	-3.1205	13	5.3650	2.8952	2.8924
14	5.4704	-3.1409	-3.1429	14	5.4862	2.8628	2.8555
15	5.5331	-3.2365	-3.2244	15	5.0269	2.9773	2.9753

Tabla 5.2: Datos estrategia de cadera

## 5.2. Análisis de distribución de datos para cada indicador de comparación

Para tener una idea clara de la distribución de los datos mostrados en las tablas 5.1 y 5.2 se recurre a una herramienta de la estadística descriptiva comúnmente utilizada, como es el diagrama de cajas y bigotes; esta permite observar los datos divididos en cuartiles, al igual que los límites superior e inferior y encontrar el rango intercuartil ( $RIC = Q_3 - Q_1$ ) a fin de observar la dispersión de los datos, sumado a esto, ayuda a evidenciar datos atípicos que podrían afectar la veracidad en las pruebas, puesto que este tipo de elementos no deseados afectan la representatividad de estadísticas muestrales comúnmente usadas como la media. De esta manera se procede a comparar los datos entre las dos estrategias en cada variable, tomando la inclinación positiva y negativa de forma independiente, sin embargo, es necesario recalcar que se toma los valores absolutos de las pendientes mostradas en las tablas, a fin de apreciar mejor los diagramas y conocer la razón de cambio independientemente del signo que estas posean.

### 5.2.1. Comparación del Máximo ángulo de inclinación

En primer lugar, se calcula el diagrama de cajas y bigotes para la comparación del máximo ángulo de inclinación, donde se utilizan los datos obtenidos en la segunda experimentación registrados en la tabla 5.3.

# Prueba	Estrategia de cadera		Estrategia de tobillo	
	Inclinación negativa	Inclinación positiva	Inclinación negativa	Inclinación positiva
1	48	43	49	44
2	46	41	49	45
3	45	45	47	44
4	45	44	47	43
5	46	41	48	46
6	46	41	47	44
7	44	43	46	44
8	45	41	47	44
9	43	41	46	43
10	44	41	45	46

Tabla 5.3: Máximo ángulo de inclinación para cada estrategia

### Análisis para una inclinación positiva

A partir de la tabla anterior se obtiene el gráfico de cajas y bigotes mostrado en la figura 5.2, asimismo los datos del diagrama se tabulan en la tabla 5.4.

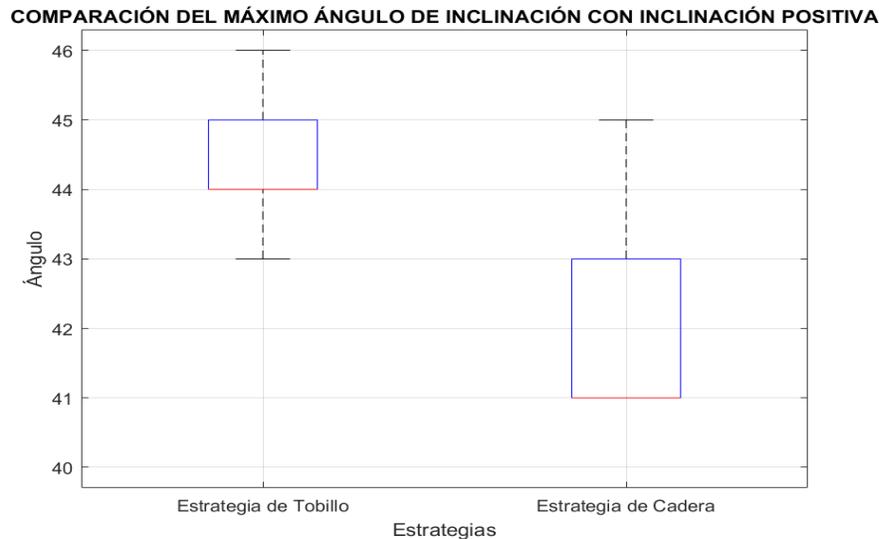


Figura 5.2: Comparación del máximo ángulo de inclinación con inclinación positiva de pendiente

	Tobillo	Cadera
Límite Inferior	43	41
Q1	44	41
Mediana	44	41
Q3	45	43
Límite superior	46	45
RIC	1	2

Tabla 5.4: Comparación máximo ángulo de inclinación con inclinación positiva de pendiente

Con la ayuda de la tabla 5.4 es posible notar como en la estrategia de tobillo tanto el primer cuartil  $Q_1$  como la mediana son iguales, lo que implica una clara tendencia de los datos hacia estos valores, por su parte, en la estrategia de cadera tanto el límite inferior como los cuartiles  $Q_1$  y  $Q_2$  son iguales a 41, lo cual representaría que al menos un 50% de los datos posee una tendencia hacia este valor, evidenciando claramente que para la estrategia de tobillo se alcanza un mayor ángulo de inclinación cuando la superficie de soporte se inclina de forma positiva.

## 5.2. ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE DATOS PARA CADA INDICADOR DE COMPARACIÓN<sup>69</sup>

### Análisis para una inclinación negativa

De igual manera a lo realizado para una inclinación positiva, a partir de la tabla 5.3 se obtienen el gráfico de cajas y bigotes mostrado en la figura 5.3, generando igualmente los datos tabulados en la tabla 5.5.

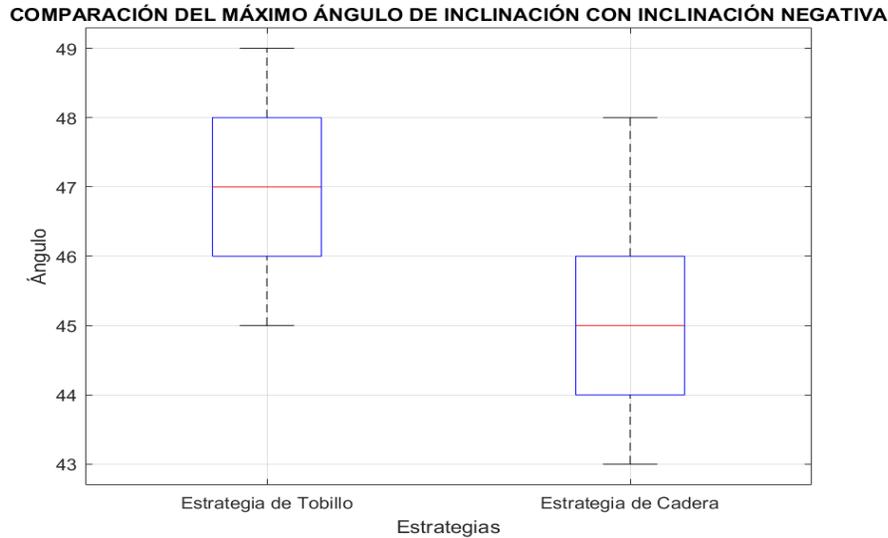


Figura 5.3: Comparación del máximo ángulo de inclinación con inclinación negativa de pendiente

	Tobillo	Cadera
Límite Inferior	45	43
Q1	46	44
Mediana	47	45
Q3	48	46
Límite superior	49	48
RIC	2	2

Tabla 5.5: Comparación máximo ángulo de inclinación con inclinación negativa de pendiente

Con la ayuda de la tabla 5.4 y el diagrama de cajas y bigotes es posible notar que los datos están uniformemente distribuidos para una inclinación negativa, evidenciando igualmente que los límites superiores del máximo ángulo de inclinación para cada estrategia difieren únicamente en 1 grado, siendo muy similares entre sí; sin embargo, tomando el límite inferior y la mediana es obvio inferir que en la estrategia de tobillo se alcanza un valor mayor en el ángulo de inclinación, notando así que la estrategia de tobillo funciona con valores superiores de pendiente.

### 5.2.2. Comparación del error acumulado

#### Análisis para una inclinación positiva

Para la comparación entre estrategias en cuanto al error acumulado con inclinación positiva se tiene en cuenta el diagrama de cajas y bigotes mostrado en la figura 5.4, además de los datos obtenidos a partir del gráfico contenidos en la tabla 5.6 .

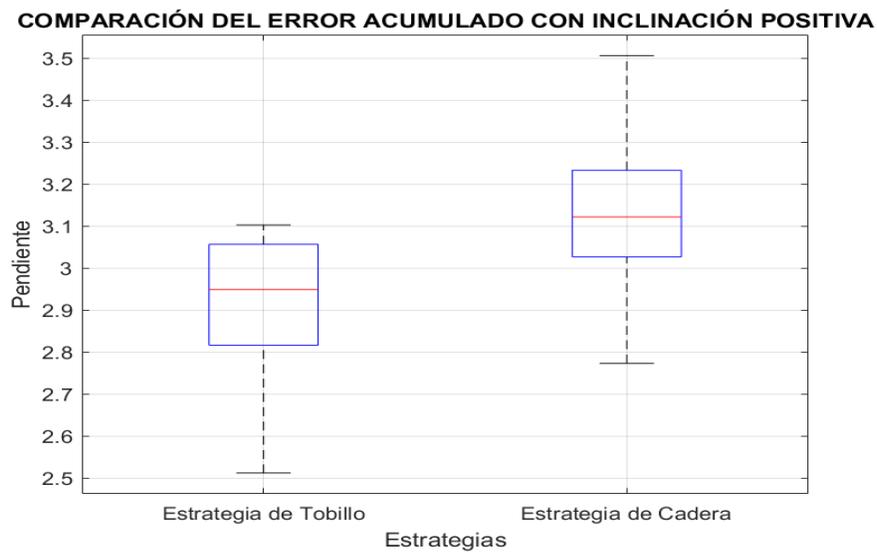


Figura 5.4: Comparación del error acumulado con inclinación positiva de pendiente

	Tobillo	Cadera
Límite Inferior	2,5120	2,7332
Q1	2,8163	3,0268
Mediana	2,9490	3,1219
Q3	3,0568	3,2333
Límite superior	3,1028	3,5064
RIC	0,2405	0,2065

Tabla 5.6: Valores en cuartiles para el Error acumulado con inclinación positiva

Visualmente es posible apreciar que para las dos estrategias los datos están distribuidos de forma uniforme ya que el valor de la mediana se encuentra muy cercano al centro de la caja, sin embargo, para la estrategia de tobillo es posible notar como el bigote superior es mucho mas corto que el inferior, significando esto que en el ultimo cuartil los valores se encuentran mas cercanos entre si, lo que es posible evidenciarlo en la tabla 5.6 la cual muestra que estos se mueven en un rango

## 5.2. ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE DATOS PARA CADA INDICADOR DE COMPARACIÓN<sup>71</sup>

entre  $(3,0568, 3, 1028]$ . Por otra parte, en la estrategia de cadera los bigotes son muy similares en tamaño mostrando que los datos están uniformemente distribuidos.

Con respecto a la mediana de las pendientes se nota como esta posee un valor menor para la estrategia de tobillo con respecto a la de cadera, esto quiere decir que en esta ultima el error crece más rápidamente a lo largo de los 50 segundos de la prueba, de igual forma se puede observar como los valores entre el límite inferior y la mediana en la estrategia de cadera están dentro del rango del primer cuartil y el límite superior de la estrategia de tobillo, dando a entender que en el 50 % de las pruebas de cadera los datos se comportan de forma similar al 75 % de los resultados obtenidos en la técnica restante.

### Análisis para una inclinación negativa

Para una pendiente negativa se obtiene el gráfico de cajas y bigotes mostrado en la figura 5.5, del cual se extraen los datos de la tabla 5.7

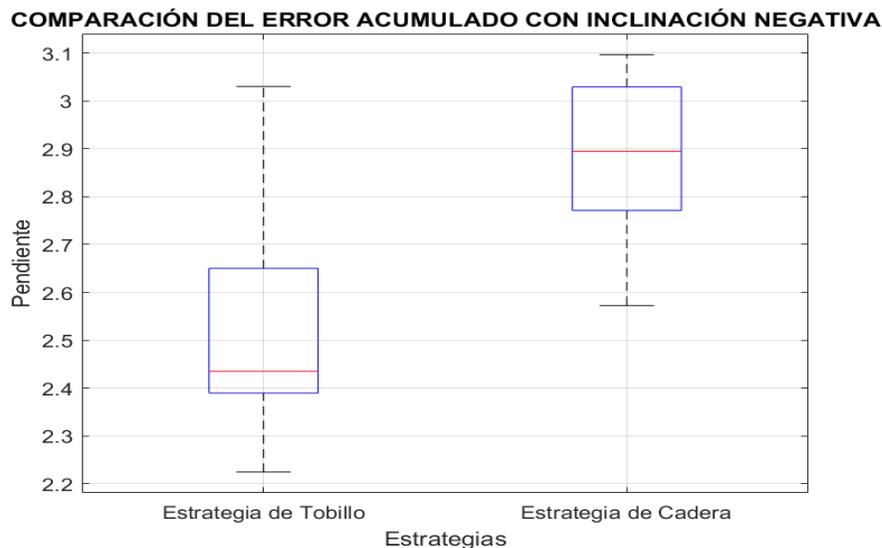


Figura 5.5: Comparación del error acumulado con inclinación negativa de pendiente

Realizando una inspección visual y teniendo en cuenta la tabla 5.7 se observa como para la estrategia de tobillo la mediana tiene una clara tendencia hacia los valores inferiores, lo que muestra igualmente que el bigote inferior es de menor tamaño en comparación al superior. Por su parte, la estrategia de cadera posee datos más uniformemente distribuidos, sin embargo el bigote superior es un tanto mas corto que el inferior, mostrando que el ultimo 25 % de los datos están muy cerca entre sí, además, el valor de la mediana para la estrategia de tobillo es menor contra la

	Tobillo	Cadera
Límite Inferior	2,2245	2,5722
Q1	2,3849	2,771
Mediana	2,4351	2,8952
Q3	2,6502	3,0292
Límite superior	3,0302	3,0969
RIC	0,2653	0,2582

Tabla 5.7: Valores en cuartiles para el Error acumulado con inclinación negativa

de cadera de forma similar a lo ocurrido cuando se realiza el experimento con inclinación positiva de la superficie de soporte.

### 5.2.3. Comparación del error cuadrático medio

Es posible calcular el *RMSE* por medio de una resta dato a dato del vector de error acumulado a fin de obtener el error del sistema en cada iteración, es decir, la señal deseada de ZMP menos los datos reales medidos por los sensores de presión. Con este resultado es posible utilizar la ecuación 4.1 para calcular el error cuadrático medio presente en cada uno de las pruebas, registrándolo en la tabla 5.8.

# Prueba	Estrategia de cadera		Estrategia de tobillo	
	Inclinación negativa	Inclinación positiva	Inclinación negativa	Inclinación positiva
1	0.1847	0.1882	0.1116	0.1224
2	0.1777	0.1780	0.1635	0.1160
3	0.1822	0.1783	0.1082	0.1208
4	0.1668	0.1886	0.1008	0.1186
5	0.1618	0.1757	0.1045	0.1272
6	0.1656	0.1885	0.0974	0.1283
7	0.1571	0.1910	0.0981	0.1214
8	0.1759	0.1799	0.0954	0.1181
9	0.1527	0.2015	0.1067	0.1173
10	0.1618	0.1796	0.1085	0.1129
11	0.1746	0.1962	0.0971	0.1189
12	0.1627	0.1706	0.0948	0.1102
13	0.1672	0.1819	0.0985	0.1179
14	0.1664	0.1803	0.0936	0.1238
15	0.1699	0.1850	0.1000	0.1190

Tabla 5.8: Error cuadrático medio para cada estrategia

## 5.2. ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE DATOS PARA CADA INDICADOR DE COMPARACIÓN<sup>73</sup>

### Análisis para una inclinación positiva

A partir de los datos de la tabla 5.8 se puede obtener el diagrama de cajas y bigotes mostrado en la figura 5.6 con su respectivo cuadro de los valores mas importantes del gráfico (tabla 5.9).

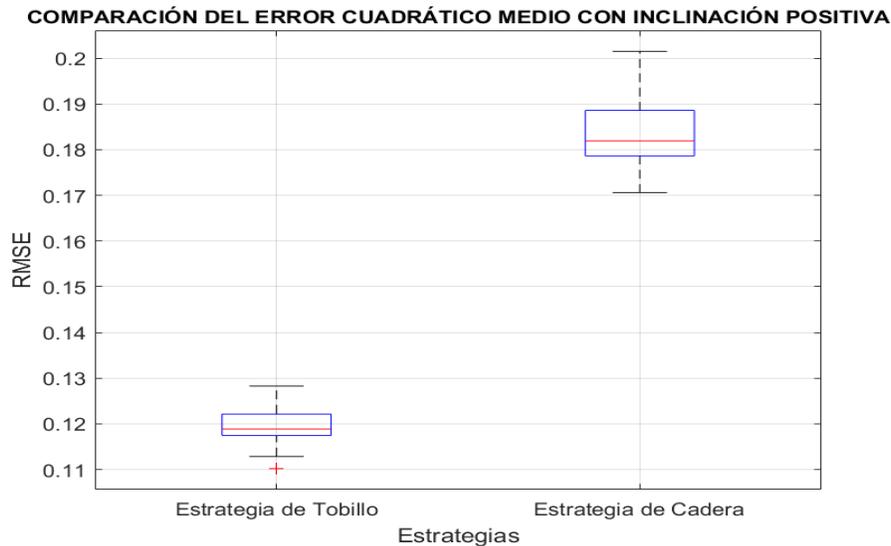


Figura 5.6: Comparación del error cuadrático medio con inclinación positiva de pendiente

	Tobillo	Cadera
Límite Inferior	0,1129	0,1706
Q1	0,1174	0,1786
Mediana	0,1189	0,1819
Q3	0,1221	0,1886
Límite superior	0,1283	0,2015
RIC	0,0047	0,0100

Tabla 5.9: Valores en cuartiles para el error cuadrático medio con inclinación positiva

Como se observa en la diagrama 5.6 la mediana tiene una clara incidencia hacia los valores inferiores en las dos estrategias de control, permitiendo suponer que los datos se encuentran mas agrupados en los primeros cuartiles, expresado igualmente con un bigote inferior mas pequeño en los dos gráficos. De igual manera se puede observar que las dos cajas son de tamaño reducido lo que indica que los datos están agrupados muy cerca entre si, sin embargo, existe un dato atípico en la estrategia de tobillo ubicado en 0,1102 pero no tiene gran relevancia ya que supone un porcentaje bajo de los datos. Adicionalmente, se puede visualizar como la mediana para la estrategia de tobillo es mucho menor a la de cadera, lo que significa que en la primer técnica

la diferencia entre los datos medidos por el sensor y la referencia deseada es mas pequeña suponiendo una mejor corrección del error.

### Análisis para una inclinación negativa

De igual manera al análisis realizado para una inclinación positiva se realiza la obtención del diagrama de cajas y bigotes para una pendiente negativa como se muestra en la figura 5.7 y su respectiva tabla 5.10.

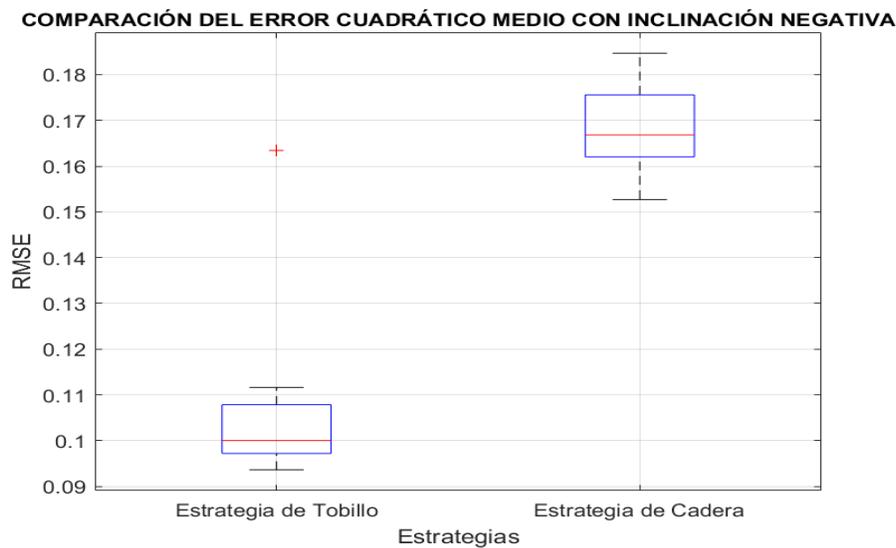


Figura 5.7: Comparación del error cuadrático medio con inclinación negativa de pendiente

	Tobillo	Cadera
Límite Inferior	0,0936	0,1527
Q1	0,0972	0,1620
Mediana	0,1000	0,1668
Q3	0,1078	0,1756
Límite superior	0,1116	0,1847
RIC	0,0106	0,0136

Tabla 5.10: Valores en cuartiles para el error cuadrático medio con inclinación negativa

La mediana observada en el diagrama 5.6 tiene una clara incidencia hacia los valores inferiores en las dos estrategias de control, dando a entender que los datos se encuentran mas agrupados en los primeros cuartiles; además, se puede visualizar una magnitud menor para la estrategia de tobillo en comparación a la de cadera, similar a lo presentado para una inclinación positiva. Del

## 5.2. ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE DATOS PARA CADA INDICADOR DE COMPARACIÓN<sup>75</sup>

mismo modo, se puede observar un bigote inferior mas pequeño al igual que cajas de tamaño reducido en los dos gráficos indicando que los datos están agrupados muy cerca entre si; sin embargo, existe un dato atípico en el límite superior de la estrategia de tobillo con valor de 0,1635, pero este no tiene gran relevancia ya que supone un porcentaje bajo de los datos.

### 5.2.4. Comparación del consumo de energía

#### Análisis para una inclinación positiva

Siguiendo el método utilizado anteriormente es posible obtener los datos de la tabla 5.11 a partir del gráfico mostrado en la figura 5.8, en este caso es posible encontrar que para la estrategia de cadera existen dos valores atípicos representados con una cruz roja, uno por encima del límite superior con un valor de 6,0412 y otro por debajo del límite inferior igual a 4,9670, sin embargo, estos datos no son muy significativos pues no son mayoría ya que representan únicamente el 13,33 % de la totalidad de los datos.

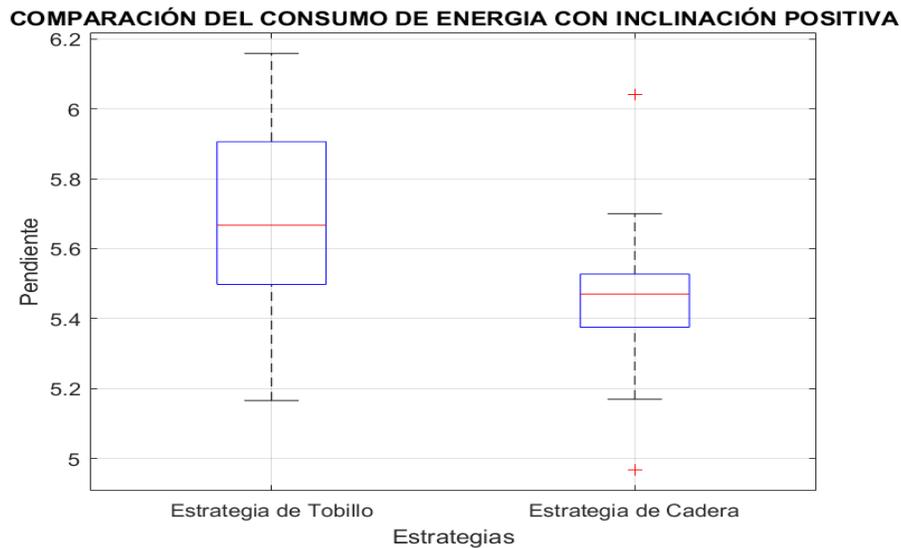


Figura 5.8: Comparación del consumo de energía con inclinación positiva de pendiente

Realizando la inspección visual se aprecia que en la estrategia de cadera se nota una leve tendencia de la mediana hacia el cuartil superior, asimismo tanto en la estrategia de tobillo como en la de cadera los bigotes superiores e inferiores son similares entre sí por lo que se puede interpretar una distribución uniforme de los datos en cada estrategia; además, respecto a la mediana de las pendientes para la estrategia de cadera se tiene que es menor frente a la estrategia de tobillo, lo

cual da a entender que la estrategia de cadera consume una menor cantidad de energía, representando un hallazgo muy importante gracias a que el consumo energético siempre implica una preocupación en la implementación de estrategias de control, dado que un menor consumo de energía supone un mayor tiempo de operación del robot bípedo, también es posible notar como aproximadamente el 50% de los datos en la estrategia de tobillo (entre el límite inferior y la mediana) se encuentran dentro del total del rango en la estrategia de cadera dando a entender que alrededor de la mitad de los casos de la estrategia de tobillo se comportan de forma similar a la estrategia de cadera.

	Tobillo	Cadera
Límite Inferior	5,1656	5,1697
Q1	5,4977	5,3754
Mediana	5,6674	5,4704
Q3	5,9060	5,5275
Límite superior	6,1587	5,7000
RIC	0,4083	0,1521

Tabla 5.11: Valores en cuartiles para la energía consumida por el robot con inclinación positiva

### Análisis para una inclinación negativa

De igual manera, para una pendiente negativa los datos obtenidos de la figura 5.9 se registran en la tabla 5.12.

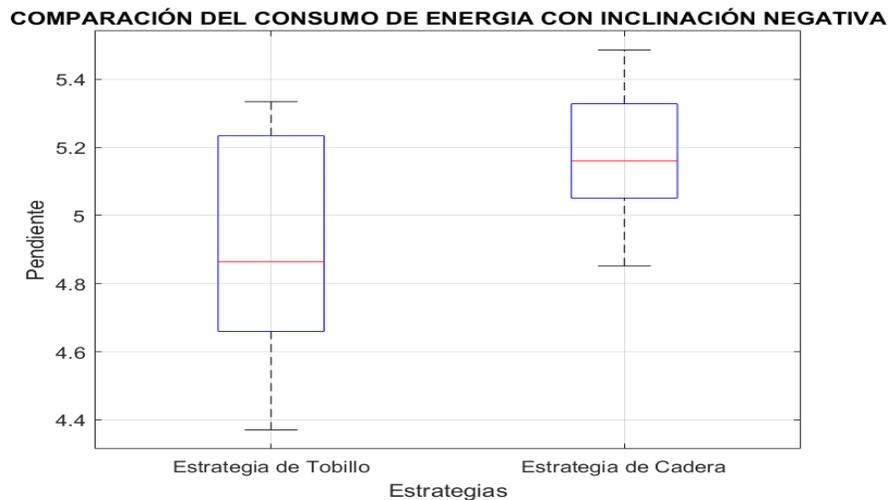


Figura 5.9: Comparación del consumo de energía con inclinación negativa de pendiente.

## 5.2. ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE DATOS PARA CADA INDICADOR DE COMPARACIÓN<sup>77</sup>

	Tobillo	Cadera
Límite Inferior	4,3705	4,8522
Q1	4,6596	5,0516
Mediana	4,8647	5,1605
Q3	5,2345	5,3284
Límite superior	5,3345	5,4862
RIC	0,5749	0,2768

Tabla 5.12: Valores en cuartiles para la energía consumida por el robot con inclinación negativa

En estas circunstancias es posible notar como la caja en la estrategia de tobillo es mucho mas alargada que en la de cadera, implicando que para la primer técnica los datos que se encuentran entre el primer y tercer cuartil están bastante dispersos entre sí, además de tener tendencia hacia el primer cuartil como se observa por la ubicación de la mediana; de igual manera, es posible percibir que los datos que se encuentran entre el límite inferior y el cuartil  $Q_3$  en la estrategia de cadera están dentro del rango comprendido entre la mediana y el límite superior de la técnica de tobillo, es decir, que en el 75 % de las veces la estrategia de cadera se comporta de forma similar con respecto al 50 % superior de la tecnica restante; no obstante, el 50 % inferior de los datos para la estrategia de tobillo demuestra valores mucho mas bajos que los presentados en la de cadera, lo que junto al valor de mediana observado evidencian que al someter la primer técnica a una inclinación negativa la pendiente es menor, demostrando un mayor consumo de energía por parte de la estrategia de cadera, contrario a lo ocurrido en el caso de pendiente positiva.

### 5.2.5. Comparación del esfuerzo de control

#### Análisis para una inclinación positiva

Para comparar el comportamiento del esfuerzo de control cuando se tiene una inclinación positiva se utiliza la información que ofrece el gráfico mostrado en la figura 5.10, al igual que los datos de la tabla 5.13

Mediante inspección visual se observa como para la estrategia de tobillo el bigote superior es mucho mas corto que el bigote inferior, implicando que en el ultimo cuartil los datos se encuentran muy juntos entre si ((3,0789, 3, 1027]); sin embargo, para la estrategia de cadera los bigotes son similares con un comportamiento uniformemente distribuido de los datos. Por otro lado, es posible observar que la mediana de las pendientes es mayor en el caso de la estrategia de cadera frente a la de tobillo; igualmente, al considerar el esfuerzo de control como la posición enviada a las articulaciones es posible decir que ocurre un cambio de posición mas rápido en esta técnica. Adicionalmente, se puede observar como los valores entre el límite inferior y la mediana en la

estrategia de cadera están aproximadamente dentro del rango del primer cuartil y el límite superior del gráfico de tobillo, dando a entender que en el 50% de las pruebas de cadera los datos se comportan de forma similar al 75% de los resultados obtenidos mediante la estrategia de tobillo, de forma semejante a lo obtenido con la comparación del error acumulado con inclinación de pendiente positiva.

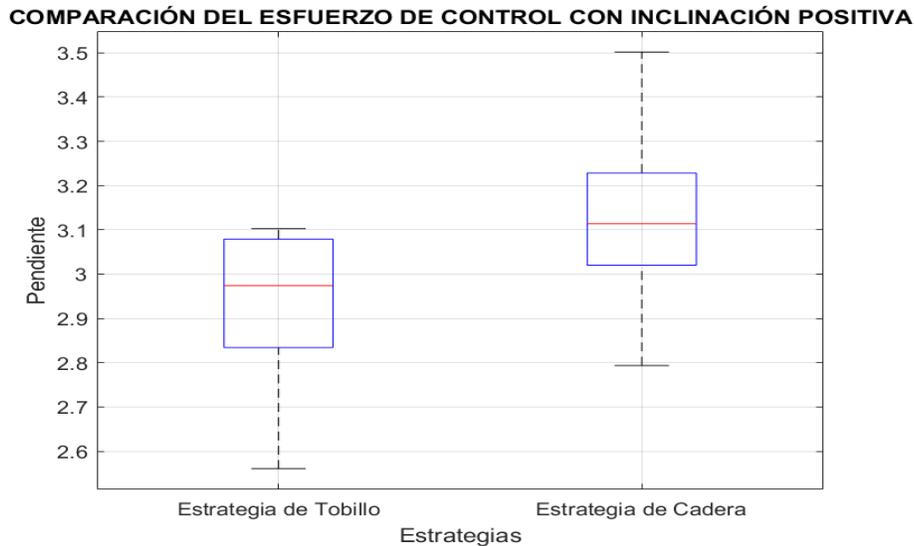


Figura 5.10: Comparación del esfuerzo de control con inclinación positiva de pendiente

	Tobillo	Cadera
Límite Inferior	2,5605	2,7934
Q1	2,8341	3,02
Mediana	2,9742	3,1139
Q3	3,0789	3,2284
Límite superior	3,1027	3,5017
RIC	0,2448	0,2084

Tabla 5.13: Valores en cuartiles para el esfuerzo de control con inclinación positiva

### Análisis para una inclinación negativa

Retomando el procedimiento desarrollado para las anteriores comparaciones, se consignan los datos suministrados por la figura 5.11 en la tabla 5.14.

## 5.2. ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN DE DATOS PARA CADA INDICADOR DE COMPARACIÓN<sup>79</sup>

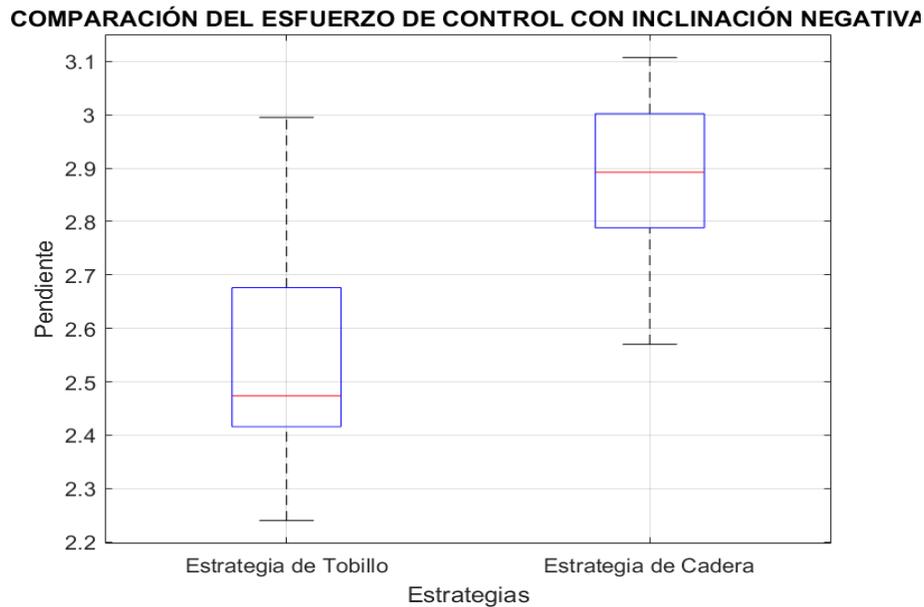


Figura 5.11: Comparación del esfuerzo de control con inclinación negativa de pendiente

	Tobillo	Cadera
Límite Inferior	2,2400	2,5702
Q1	2,4158	2,7883
Mediana	2,4737	2,8920
Q3	2,6761	3,0018
Límite superior	2,9948	3,1072
RIC	0,2603	0,2135

Tabla 5.14: Valores en cuartiles para el esfuerzo de control con inclinación negativa

Observando la tabla 5.14 se puede notar como para la estrategia de tobillo la mediana tiene una clara tendencia hacia los valores inferiores mientras que los datos superiores a la misma se encuentran bastante dispersos; por otro lado la estrategia de cadera posee datos más uniformemente distribuidos, sin embargo el bigote superior es un tanto mas corto que el bigote inferior mostrando que el ultimo 25 % de los datos están más cercanos entre sí. De igual manera cabe notar que la mediana de las pendientes en el esfuerzo de control es menor en la estrategia de tobillo en comparación a la de cadera, de forma similar a la prueba realizada con inclinación de pendiente positiva, permitiendo inferir que en la estrategia de cadera el cambio de posición se lleva a cabo mas rápidamente.

### 5.3. Prueba Estadística De Análisis De Varianza ANOVA

En este apartado se aplica la prueba estadística de análisis de varianza ANOVA, propuesta en 1930 por R.A. Fisher [59][60] con el propósito de estudiar observaciones que dependen de varios factores, siendo una herramienta fundamental en el análisis de modelos de regresión lineal y diseño de experimentos.

En este caso se desea estudiar el efecto que tiene el tipo de estrategia de control utilizada, sobre los diferentes índices de desempeño o de comparación obtenidos en los experimentos de equilibrio del capítulo anterior. Al tratarse de un análisis de varianza este tratamiento se aplica sobre variables cuantitativas que en el caso de este proyecto son representadas por los índices de comparación, permitiendo determinar si los datos de estos grupos poseen una media común o no, es decir, ANOVA permite averiguar si las dos diferentes técnicas de control variable independiente tienen diferentes efectos sobre los índices de comparación. El lector debe comprender que en este proyecto no se utilizan pruebas estadísticas como la T-Student [61] que trabaja por pares de grupos, debido a que esta no permite analizar los datos con observaciones múltiples, además de que esta disminuye el tamaño muestral al usar pares de grupos. A continuación, se muestra de manera organizada el análisis de varianza.

<b>INCLINACIÓN POSITIVA DE LA PLATAFORMA DE PRUEBAS</b>		
<b>Variables cualitativas o grupos</b>	Técnica de tobillo	Técnica de cadera
<b>Variables cuantitativas de comparación (índices)</b>	Consumo de energía	
	Valor RMS del error de seguimiento	
	Máximo ángulo de recuperación de equilibrio	

Tabla 5.15: Grupos e índices empleados para la aplicación de la prueba ANOVA con inclinación positiva

<b>INCLINACIÓN NEGATIVA DE LA PLATAFORMA DE PRUEBAS</b>		
<b>Variables cualitativas o grupos</b>	Técnica de tobillo	Técnica de cadera
<b>Variables cuantitativas de comparación (índices)</b>	Consumo de energía	
	Valor RMS del error de seguimiento	
	Máximo ángulo de recuperación de equilibrio	

Tabla 5.16: Grupos e índices empleados para la aplicación de la prueba ANOVA con inclinación negativa

Antes de aplicar la prueba ANOVA se tiene en cuenta las siguientes suposiciones:

1. Existe distribución normal en cada uno de los grupos de datos.
2. Existe homogeneidad de varianzas en los grupos de datos.
3. Los grupos son totalmente independientes.

A continuación, se procede a plantear de forma general la hipótesis nula  $H_0$ :

*Ho: Las medias de los dos grupos son iguales*

Además, se debe tener en cuenta que existen hipótesis nulas específicas que se aplican sobre cada indicador de comparación, tomando su esencia de la hipótesis nula general.

A continuación, la hipótesis nula se contrasta contra la hipótesis alternativa de forma general  $H_a$ , obteniendo igualmente hipótesis alternativas específicas asociadas a cada índice de comparación:

*Ha: La media de los dos grupos comparados son distintas*

Para este proyecto la prueba estadística ANOVA es aplicada mediante el comando `anova1()` en *Matlab*, con un nivel de significancia del 5%. El comando en cuestión es:

$$[p, tbl] = \text{anova1}(\text{abs}([\text{tobillo.NEnergia}; \text{cadera.NEnergia}]), \text{groups});$$

La sentencia anterior se debe aplicar en seis ocasiones, pues la comparación se hace en términos de tres índices y dos tipos de inclinación de la superficie de soporte, positiva y negativa. La prueba `anova1` retorna la tabla ANOVA de resultados de la forma como se muestra en la la figura 5.12, la cual es posible interpretar mediante la tabla 5.17 .

Source	SS	df	MS	F	p-value
Group (Between)	SSR	$k - 1$	$MSR = SSR / (k - 1)$	$MSR / MSE$	$P(F_{k-1, N-k}) > F$
Error (Within)	SSE	$N - k$	$MSE = SSE / (N - k)$		
Total	SST	$N - 1$			

Figura 5.12: Tabla ANOVA.  
Fuente tomada de *Matlab MathWorks*

Columna	Definición
Fuente	La fuente de la variabilidad.
SS	La suma de cuadrados debidos a cada fuente.
df	Los grados de libertad asociados a cada fuente. Supongamos que $N$ es el número total de observaciones y $k$ es el número de grupos. Entonces, $N - k$ son los grados de libertad dentro de los grupos (Error), $k - 1$ son los grados de libertad entre grupos (Columnas), y $N - 1$ son los grados totales de libertad. $N - 1 = (N - k) + (k - 1)$
MS	Los cuadrados medios para cada fuente, que es la relación $.SS/df$
F	F-estadística, que es la relación de los cuadrados medios.
$Prob > F$	El p-valor, que es la probabilidad de que el estadístico $F$ pueda tomar un valor mayor que el valor estadístico de prueba calculado. deriva esta probabilidad de la distribución cdf de $F_{anova1}$

Tabla 5.17: Interpretación Tabla Anova.  
Fuente tomada de Matlab MathWorks

El estadístico de la prueba p-valor entregado en la tabla ANOVA, permite decidir acerca del rechazo o aceptación de la hipótesis nula  $H_0$  en cualquiera de los casos de comparación. Los resultados obtenidos para cada uno de los tipos de pendiente contrastado con los indicadores de comparación son los siguientes:

### Inclinación positiva

Descripción	Técnicas de control de equilibrio	
	Tobillo	Cadera
Resultados	Tipo de inclinación: Positiva Variable de análisis: Consumo de energía eléctrica	
Prueba estadística	$(P)0,0228 < (F)0,05$	
Hipótesis nula $H_0$	Las medias de los grupos, de tobillo y cadera respecto a consumo de energía cuando la inclinación es positiva, son iguales	
Resultado	Las diferencias entre las medias de los datos contrastados son significativas	

Tabla 5.18: Resultado de la aplicación de la prueba ANOVA para las muestras de consumo de energía con inclinación positiva

Descripción	Técnicas de control de equilibrio	
	Tobillo	Cadera
Resultados	Tipo de inclinación: Positiva Variable de análisis: ECM del error de seguimiento	
Prueba estadística	$(P)2,37E-21 < (F)0,05$	
Hipótesis nula $H_0$	Las medias de los grupos, de tobillo y cadera respecto al ECM del error de seguimiento con inclinación positiva, son iguales	
Resultado	Las diferencias entre las medias de los datos contrastados son significativas	

Tabla 5.19: Resultado de la aplicación de la prueba ANOVA para las muestras de ECM del error con inclinación positiva

Descripción	Técnicas de control de equilibrio	
	Tobillo	Cadera
Resultados	Tipo de inclinación: Positiva Variable de análisis: Máximo ángulo de recuperación de equilibrio	
Prueba estadística	$(P)0,0015 < (F)0,05$	
Hipótesis nula $H_0$	Las medias de los grupos, de tobillo y cadera respecto máximo ángulo de recuperación de equilibrio cuando la inclinación es positiva, son iguales	
Resultado	Las diferencias entre las medias de los datos contrastados son significativas	

Tabla 5.20: Resultado de la aplicación de la prueba ANOVA para las muestras de máximo ángulo de recuperación con inclinación positiva

### Inclinación negativa

Descripción	Técnicas de control de equilibrio	
	Tobillo	Cadera
Resultados	Tipo de inclinación: negativa Variable de análisis: Consumo de energía eléctrica	
Prueba estadística	$(P)0,01 < (F)0,05$	
Hipótesis nula $H_0$	Las medias de los grupos, de tobillo y cadera respecto a consumo de energía cuando la inclinación es negativa, son iguales	
Resultado	Las diferencias entre las medias de los datos contrastados son significativas	

Tabla 5.21: Resultado de la aplicación de la prueba ANOVA para las muestras de consumo de energía con inclinación negativa

Descripción	Técnicas de control de equilibrio	
	Tobillo	Cadera
Resultados	Tipo de inclinación: negativa Variable de análisis: ECM del error de seguimiento	
Prueba estadística	$(P)3,98E - 13 < (F)0,05$	
Hipótesis nula Ho	Las medias de los grupos, de tobillo y cadera respecto al ECM del error de seguimiento con inclinación negativa, son iguales	
Resultado	Las diferencias entre las medias de los datos contrastados son significativas	

Tabla 5.22: Resultado de la aplicación de la prueba ANOVA para las muestras de ECM del error con inclinación negativa

Descripción	Técnicas de control de equilibrio	
	Tobillo	Cadera
Resultados	Tipo de inclinación: negativa Variable de análisis: Máximo ángulo de recuperación de equilibrio	
Prueba estadística	$(P)0,0054 < (F)0,05$	
Hipótesis nula Ho	Las medias de los grupos, de tobillo y cadera respecto máximo ángulo de recuperación de equilibrio cuando la inclinación es negativa, son iguales	
Resultado	Las diferencias entre las medias de los datos contrastados son significativas	

Tabla 5.23: Resultado de la aplicación de la prueba ANOVA para las muestras de máximo ángulo de recuperación con inclinación negativa

De las tablas anteriores se puede inferir que los datos contratados para cada uno de los indicadores de comparación con respecto a la técnica y el tipo de pendiente deja a la vista un rechazo contundente de la hipótesis nula, mostrando evidencia suficiente para indicar que las diferencias entre los grupos se deben al tipo de técnica de control usada para cada uno de los experimentos.

## Capítulo 6

# Conclusiones

La metodología planteada se creó con la intención de comparar los índices de desempeño de cada una de las estrategias de control y de esta manera determinar bajo que condiciones una se comporta mejor con respecto a la otra, por lo que mediante la inspección visual de las tablas y el uso de los diagramas de cajas y bigotes es posible determinar lo siguiente.

- En tanto al consumo de energía es muy particular lo obtenido, ya que con una inclinación positiva la estrategia de cadera posee un menor consumo de energía, mientras que con inclinación negativa la estrategia de tobillo es quien posee un menor consumo energético, por lo que en caso de ser necesario se podría alternar entre una estrategia y otra al momento de subir o bajar una pendiente.
- El máximo ángulo de recuperación de equilibrio alcanzado por cada estrategia es uno de los índices de comparación mas importantes según la literatura, donde claramente es posible evidenciar que en la estrategia de tobillo se alcanza valores mayores tanto en pendiente positiva como negativa; esto puede deberse a la dificultad de representar el control postural del cuerpo humano mediante la estrategia de cadera, lo que implica un mayor grado de dificultad en su funcionamiento; además en esta estrategia la altura del centro de gravedad oscila por su propia dinámica.
- Al momento de crear los modelos matemáticos para cada una de las estrategias no se tuvieron en cuenta pérdidas de energía por ninguna fuente (calor, mecánica, fricción, etc.), por lo que estos no representan fielmente la dinámica del robot real, generando que las constantes brindadas por la herramienta de sintonización de *Matlab* sean para un modelo similar al del robot real pero no exactamente iguales; por consiguiente, es necesaria la sintonización manual de cada uno de los controladores, ratificando nuevamente las dificultades de la dinámica simplificada en comparación a la dinámica completa, en lo que a robots bípedos respecta.

- El análisis de la mediana en los gráficos de error acumulado evidencia que este crece mas lentamente en la estrategia de tobillo, lo que igualmente se puede observar en los diagramas del *RMSE*, permitiendo inferir que esta técnica corrige más rápido y de mejor manera la variación de ZMP generada por el cambio de inclinación, siendo posible confirmar esta observación en el comportamiento de los diagramas de cajas y bigotes para el esfuerzo de control, ya que estos son muy similares a los del error en cada tipo de pendiente.
- El uso de la librería *DynamixelSerial* limita la manipulación de una gran cantidad de actuadores, ya que la activación de un nuevo motor consume mucho tiempo de ejecución afectando el tiempo total de muestreo y directamente la creación de controladores. Los sistemas bípedos son demasiado inestables y un alto tiempo de muestreo hace que no pueda reaccionar ante perturbaciones instantáneas, por tanto no se recomienda el uso de esta librería para sistemas con mayor cantidad de motores, ya que el tiempo de muestreo será demasiado alto y el sistema no alcanza a corregir el disturbio a tiempo ocasionando la pérdida del equilibrio.
- Dado que para la obtención del modelo de las plantas únicamente se tuvo en cuenta parámetros físicos del robot como la altura del centro de masa en la estrategia de tobillo o la distancia de los eslabones en la estrategia de cadera, existe la posibilidad de escalar el método implementado a otro tipo de bípedos que posean una distribución similar de articulaciones.

## Capítulo 7

# Observaciones y trabajos futuros

### 7.1. Observaciones

- Al realizar las pruebas de control se observó que el sistema es muy inestable ante cambios bruscos de pendiente, lo que generó que al momento de diseñar la estructura inclinable se deba considerar que esta posea el menor juego mecánico posible, buscando garantizar una inclinación suave y controlada que evite en lo máximo los disturbios externos sobre las pruebas.
- A pesar de no ser constantes de sintonización para el controlador PID, tanto el par de los motores como su velocidad de movimiento fueron factores importantes a considerar al momento de armonizar el comportamiento del controlador, observando que al modificar estos aspectos el funcionamiento del robot se veía afectado, aumentando o disminuyendo su capacidad de mantener el equilibrio; dicho comportamiento puede deberse a que al aplicar un par o velocidad mayor la inercia lleve la proyección del centro de masa fuera del PS, generando que al sistema no le sea posible recuperarse y se tenga una pérdida del equilibrio.
- Al momento de realizar la experimentación para encontrar el máximo ángulo de inclinación se evidenció que la fricción existente entre los pies del robot y la superficie de apoyo incide en gran medida en el valor de pendiente admitido, gracias a que en inclinaciones pronunciadas el robot caía de la base mucho antes de perder el equilibrio por un mal funcionamiento del controlador; por esta razón, fue indispensable el uso de un papel de lija sobre la superficie de contacto con los pies del robot a fin de aumentar la fuerza de fricción y evitar que la estructura de madera limite demasiado el ángulo al que pueda ser inclinada la base de soporte.

## 7.2. Trabajos futuros

- Se plantea la posibilidad de realizar una actualización de *Hardware* para la placa de control haciendo uso de un microprocesador mas potente que permita aumentar la velocidad de procesamiento del sistema, permitiendo la ejecución de controladores tanto para el plano frontal como sagital y la implementación del módulo de medición inercial MPU-6050 para la medición del ángulo de inclinación del robot.
- El estudio de estrategias de control basadas en ZMP da pie a la posibilidad de implementar algoritmos de control para la ejecución de marcha bípeda.
- El objetivo del proyecto fue realizar una comparación entre estrategias de control por lo que no existió necesidad de desarrollar modelos matemáticos exactos que representen la dinámica del sistema, generando limitantes al momento de la simulación e implementación del controlador; sin embargo, existe la posibilidad de realizar un estudio mas exhaustivo del comportamiento del robot, permitiendo aumentar la precisión de la simulación y el diseño de nuevos sistemas de control.

# Bibliografía

- [1] 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, 2016.
- [2] S. Kajita, K. Yokoi, M. Saigo, and K. Tanie, “Balancing a humanoid robot using backdrive concerned torque control and direct angular momentum feedback,” in *Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 01CH37164)*, vol. 4. IEEE, 2001, pp. 3376–3382.
- [3] D. A. Winter, A. E. Patla, and J. S. Frank, “Assessment of balance control in humans,” *Med prog technol*, vol. 16, no. 1-2, pp. 31–51, 1990.
- [4] B. Jalgha and D. C. Asmar, “A simple momentum controller for humanoid push recovery,” in *FIRA RoboWorld Congress*. Springer, 2009, pp. 95–102.
- [5] C. Runge, C. Shupert, F. Horak, and F. Zajac, “Ankle and hip postural strategies defined by joint torques,” *Gait & posture*, vol. 10, no. 2, pp. 161–170, 1999.
- [6] D. N. Nenchev and A. Nishio, “Ankle and hip strategies for balance recovery of a biped subjected to an impact,” *Robotica*, vol. 26, no. 5, pp. 643–653, 2008.
- [7] C. G. Atkeson and B. Stephens, “Multiple balance strategies from one optimization criterion,” in *2007 7th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. IEEE, 2007, pp. 57–64.
- [8] R. Martínez, E. Rolando *et al.*, “Conservación del equilibrio en un robot bípedo en posición de erguido ante perturbaciones externas,” Ph.D. dissertation, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá, 2018.
- [9] J. García López, J. A. Rodríguez Marroyo *et al.*, “Equilibrio y estabilidad del cuerpo humano,” 2015.
- [10] A. Lázaro, “El equilibrio humano: un fenómeno complejo,” *Das menschliche gleichgewicht: ein komplexes phänomen. motorik*, vol. 2, pp. 80–86, 2000.
- [11] B. A. Gowitzke and M. Milner, *El cuerpo y sus movimientos. Bases científicas*. Editorial Paidotribo, 1999, vol. 44.

- [12] M. Izquierdo and M. I. Redín, *Biomecnica y Bases Neuromusculares de la Actividad Física y el Deporte/Biomechanics and Neuromuscular Bases of Physical Activity and Sport*. Ed. Médica Panamericana, 2008.
- [13] R. Tedrake, S. Kuindersma, R. Deits, and K. Miura, "A closed-form solution for real-time zmp gait generation and feedback stabilization," in *2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*. IEEE, 2015, pp. 936–940.
- [14] M. Vukobratović and B. Borovac, "Zero-moment point-thirty five years of its life," *International journal of humanoid robotics*, vol. 1, no. 01, pp. 157–173, 2004.
- [15] K. Erbatur, A. Okazaki, K. Obiya, T. Takahashi, and A. Kawamura, "A study on the zero moment point measurement for biped walking robots," in *7th International Workshop on Advanced Motion Control. Proceedings (Cat. No. 02TH8623)*. IEEE, 2002, pp. 431–436.
- [16] V. Graefe and R. Bischoff, "From ancient machines to intelligent robots-A technical evolution-," in *Electronic Measurement & Instruments, 2009. ICEMI'09. 9th International Conference on*. IEEE, 2009, pp. 3–418.
- [17] M. Akhtaruzzaman and A. A. Shafie, "Evolution of humanoid robot and contribution of various countries in advancing the research and development of the platform," in *Control Automation and Systems (ICCAS), 2010 International Conference on*. IEEE, 2010, pp. 1021–1028.
- [18] C. Chevallereau, G. Bessonnet, G. Abba, and Y. Aoustin, *Bipedal robots: modeling, design and walking synthesis*. John Wiley & Sons, 2013.
- [19] I. Kato, "Wabot-2: Autonomous robot with dexterous finger-arm," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Raleigh*, vol. 5, 1987.
- [20] Y. Ogura, H. Aikawa, K. Shimomura, A. Morishima, H.-o. Lim, and A. Takanishi, "Development of a new humanoid robot wabian-2," in *Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on*. IEEE, 2006, pp. 76–81.
- [21] K. Kaneko, F. Kanehiro, S. Kajita, H. Hirukawa, T. Kawasaki, M. Hirata, K. Akachi, and T. Isozumi, "Humanoid robot hrp-2," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004*, vol. 2, April 2004, pp. 1083–1090 Vol.2.
- [22] K. Kaneko, K. Harada, F. Kanehiro, G. Miyamori, and K. Akachi, "Humanoid robot hrp-3," in *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE, 2008, pp. 2471–2478.
- [23] K. Kaneko, F. Kanehiro, M. Morisawa, K. Akachi, G. Miyamori, A. Hayashi, and N. Kanehira, "Humanoid robot hrp-4-humanoid robotics platform with lightweight and slim body," in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE, 2011, pp. 4400–4407.

- [24] M. Hirose and K. Ogawa, "Honda humanoid robots development," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 365, no. 1850, pp. 11–19, 2007.
- [25] I. M. Motoc, K. Sirlantzis, S. Spurgeon, and P. Lee, "Zero moment point/inverted pendulum-based walking algorithm for the nao robot," in *Emerging Security Technologies (EST), 2014 Fifth International Conference on*. IEEE, 2014, pp. 63–66.
- [26] M. Fujita, Y. Kuroki, T. Ishida, and T. T. Doi, "Autonomous behavior control architecture of entertainment humanoid robot sdr-4x," in *Intelligent Robots and Systems, 2003.(IROS 2003). Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on*, vol. 1. IEEE, 2003, pp. 960–967.
- [27] S. Shigemi, "Asimo and humanoid robot research at honda," *Humanoid Robotics: A Reference*, pp. 1–36, 2018.
- [28] J. Engelsberger, A. Werner, C. Ott, B. Henze, M. A. Roa, G. Garofalo, R. Burger, A. Beyer, O. Eiberger, K. Schmid *et al.*, "Overview of the torque-controlled humanoid robot toro," in *2014 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. IEEE, 2014, pp. 916–923.
- [29] T. Koolen, S. Bertrand, G. Thomas, T. De Boer, T. Wu, J. Smith, J. Engelsberger, and J. Pratt, "Design of a momentum-based control framework and application to the humanoid robot atlas," *International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 13, no. 01, p. 1650007, 2016.
- [30] R. J. Griffin, G. Wiedebach, S. Bertrand, A. Leonessa, and J. Pratt, "Walking stabilization using step timing and location adjustment on the humanoid robot, atlas," in *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, 2017, pp. 667–673.
- [31] I. Ha, Y. Tamura, and H. Asama, "Development of open platform humanoid robot darwin-op," *Advanced Robotics*, vol. 27, no. 3, pp. 223–232, 2013.
- [32] A. M. Al-Busaidi, "Development of an educational environment for online control of a biped robot using matlab and arduino," in *2012 9th France-Japan & 7th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS)/13th Int'l Workshop on Research and Education in Mechatronics (REM)*. IEEE, 2012, pp. 337–344.
- [33] I. Ha, Y. Tamura, and H. Asama, "Gait pattern generation and stabilization for humanoid robot based on coupled oscillators," in *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2011, pp. 3207–3212.
- [34] M. Vukobratovic, A. A. Frank, and D. Juricic, "On the stability of biped locomotion," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, no. 1, pp. 25–36, 1970.
- [35] S. Kajita and K. Tani, "Experimental study of biped dynamic walking in the linear inverted pendulum mode," in *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3. IEEE, 1995, pp. 2885–2891.

- [36] 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*,” in *Intelligent Robots and Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE/RSJ International Conference on*, vol. 1. IEEE, 2001, pp. 239–246.
- [37] 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,” in *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 03CH37422)*, vol. 2. IEEE, 2003, pp. 1620–1626.
- [38] Y. Hasegawa, J. Jang, and Y. Sankai, “Cooperative walk control of paraplegia patient and assistive system,” in *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2009, pp. 4481–4486.
- [39] S. Kajita, O. Matsumoto, and M. Saigo, “*Real-time 3D walking pattern generation for a biped robot with telescopic legs*,” in *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*, vol. 3. IEEE, 2001, pp. 2299–2306.
- [40] L. Xiang, Z. Liqin, and X. Lei, “Principle and method of speed control for biped robots,” in *2013 13th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*. IEEE, 2013, pp. 8–13.
- [41] P. M. Wensing and D. E. Orin, “*High-speed humanoid running through control with a 3D-SLIP model*,” in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE, 2013, pp. 5134–5140.
- [42] A. S. Pollock, B. R. Durward, P. J. Rowe, and J. P. Paul, “What is balance?” *Clinical rehabilitation*, vol. 14, no. 4, pp. 402–406, 2000.
- [43] 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, no. 5, pp. 488–507, 1997.
- [44] 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*, 2019.
- [45] B. Stephens, “Humanoid push recovery,” in *2007 7th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. IEEE, 2007, pp. 589–595.
- [46] S. Kiemel, “Balance maintenance of a humanoid robot using the hip-ankle strategy,” 2012.
- [47] Z. Aftab, T. Robert, and P.-B. Wieber, “Ankle, hip and stepping strategies for humanoid balance recovery with a single model predictive control scheme,” in *2012 12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2012)*. IEEE, 2012, pp. 159–164.
- [48] J. A. Castano, C. Zhou, Z. Li, and N. Tsagarakis, “Robust model predictive control for humanoids standing balancing,” in *2016 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM)*. IEEE, 2016, pp. 147–152.

- [49] A. Ortiz, S. Orozco, and I. Zannatha, "Adrc controller for weightlifter humanoid robot," in *2019 International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP)*. IEEE, 2019, pp. 41–46.
- [50] B. Ugurlu, C. Doppmann, M. Hamaya, P. Forni, T. Teramae, T. Noda, and J. Morimoto, "Variable ankle stiffness improves balance control: Experiments on a bipedal exoskeleton," *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, vol. 21, no. 1, pp. 79–87, 2015.
- [51] J. Hill and F. Fahimi, "Active disturbance rejection for walking bipedal robots using the acceleration of the upper limbs," *Robotica*, vol. 33, no. 2, pp. 264–281, 2015.
- [52] T. Kobayashi, K. Sekiyama, T. Aoyama, Y. Hasegawa, and T. Fukuda, "Optimal use of arm-swing for bipedal walking control," in *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2015, pp. 5698–5703.
- [53] —, "Selection of two arm-swing strategies for bipedal walking to enhance both stability and efficiency," *Advanced Robotics*, vol. 30, no. 6, pp. 386–401, 2016.
- [54] M. Hosokawa, D. N. Nenchev, and T. Hamano, "The dcm generalized inverse: efficient body-wrench distribution in multi-contact balance control," *Advanced Robotics*, vol. 32, no. 14, pp. 778–792, 2018.
- [55] B. Siciliano and O. Khatib, *Springer handbook of robotics*. springer, 2008.
- [56] O. A. V. Albán, *Diseño y control de robots industriales: teoría y práctica*. Elaleph. com, 2010.
- [57] N. Duclos, C. Duclos, and S. Measure, "Control postural: fisiología, conceptos principales e implicaciones para la readaptación," *EMC - Kinesiterapia - Medicina Física*, vol. 38, no. 2, pp. 1–9, 2017. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1293296517836628>
- [58] L. M. Nashner and G. McCollum, "The organization of human postural movements: a formal basis and experimental synthesis," *Behavioral and brain sciences*, vol. 8, no. 1, pp. 135–150, 1985.
- [59] R. A. Fisher, "Inverse probability," in *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 26, no. 4. Cambridge University Press, 1930, pp. 528–535.
- [60] D. Preece, "Ra fisher and experimental design: a review," *Biometrics*, pp. 925–935, 1990.
- [61] R. A. Sánchez Turcios, "t-student: Usos y abusos," *Revista mexicana de cardiología*, vol. 26, no. 1, pp. 59–61, 2015.