

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA



**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ARQUITECTURA  
CUADRÚPEDA TIPO CANINA UTILIZANDO SISTEMA  
ROBÓTICO MODULAR MECABOT**

Autores:

VERONICA ALEJANDRA GUTIERREZ CASTILLO  
DAVID ALEJANDRO SALAS CARDENAS

Director:

ING.RICARDO ANDRÉS CASTILLO ESTEPA, PhD

Bogotá, 2021

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA



TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TITULO DE INGENIERO EN  
MECATRONICA

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE ARQUITECTURA  
CUADRÚPEDA TIPO CANINA UTILIZANDO SISTEMA  
ROBÓTICO MODULAR MECABOT**

Autores:

VERONICA ALEJANDRA GUTIERREZ CASTILLO  
DAVID ALEJANDRO SALAS CÁRDENAS

Director:

ING.RICARDO ANDRÉS CASTILLO ESTEPA, PhD

Bogotá, 2021

Bogotá D.C. (2021)

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente de jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

# Agradecimientos

A mi familia por su apoyo incondicional durante toda la carrera y motivarme cada día a ser mejor.

A mis amigos por su apoyo, comprensión y compañía.

A David Salas por su apoyo, compañía y consejos a lo largo de la carrera.

A Ricardo Castillo por la paciencia, acompañamiento y guía durante el desarrollo de la tesis.

A la Universidad Militar Nueva Granada, al Programa de Ingeniería Mecatrónica, a los docentes y personal de laboratorio por la disposición para mi formación académica.

**Verónica Alejandra Gutierrez Castillo**

A mis padres por su apoyo incondicional y por permitirme estudiar esta carrera.

A mis compañeros por su apoyo, comprensión y compañía en el transcurso de mi formación.

A Verónica Gutierrez por su apoyo, compañía y consejos a lo largo de la carrera.

A Ricardo Castillo por la paciencia, acompañamiento y guía durante el desarrollo de este trabajo.

A la Universidad Militar Nueva Granada, al Programa de Ingeniería Mecatrónica, a los docentes y al personal de laboratorio por la disposición para el proceso de mi formación académica.

**David Alejandro Salas Cárdenas**

# Tabla de contenidos

<b>Agradecimientos</b>	<b>1</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>5</b>
<b>Lista de Tablas</b>	<b>8</b>
<b>Resumen</b>	<b>9</b>
<b>Abstract</b>	<b>10</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>11</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	12
1.1.1. Configuraciones Cuadrúpedas Modulares . . . . .	14
1.1.2. Mecabot . . . . .	14
1.2. Planteamiento del Problema . . . . .	17
1.3. Objetivo General . . . . .	18
1.4. Objetivos Específicos . . . . .	18
1.5. Delimitación . . . . .	19
1.6. Justificación . . . . .	20
1.7. Metodología . . . . .	22
<b>2. Marco Referencial</b>	<b>24</b>
2.1. Referentes Teóricos . . . . .	24
2.1.1. Robótica . . . . .	24
2.1.2. Robótica Móvil . . . . .	25
2.1.3. Robots Caminantes . . . . .	26
2.1.4. Robots Cuadrúpedos . . . . .	28
2.1.5. Robótica Modular . . . . .	34
2.1.6. Canino: Principios de Locomoción . . . . .	37
<b>3. Propuesta y desarrollo de la arquitectura tipo canina</b>	<b>43</b>
3.1. Especificaciones Mecabot 5.0 . . . . .	43
3.2. Tipos de acoples entre módulos Mecabot 5.0 . . . . .	47

3.2.1.	Acople Cara-Pivote . . . . .	48
3.2.2.	Acople Pivote-Pivote . . . . .	49
3.2.3.	Acople Cara-Cara . . . . .	51
3.2.4.	Acople a Caras Laterales . . . . .	53
3.3.	Propuesta de arquitecturas tipo canina utilizando sistema MECABOT 5.0 . . .	54
3.4.	Modelado CAD de arquitectura integrada . . . . .	57
3.5.	Cinemática de la Columna . . . . .	58
3.6.	Cinemática de las Piernas . . . . .	60
3.7.	Propuesta de Perfiles en Locomoción: Desplazamiento hacia delante-atrás . . .	62
<b>4.</b>	<b>Simulación de la arquitectura utilizando Webots ®</b>	<b>65</b>
4.1.	WEBOTS ® . . . . .	65
4.2.	Importación y ensamble de arquitectura integrada en software WEBOTS . . . .	68
4.3.	Programación y desarrollo de la simulación en Webots . . . . .	70
4.4.	Programación y desarrollo GUI en Matlab . . . . .	75
<b>5.</b>	<b>Pruebas Y Resultados De La Arquitectura Utilizando Software De Simulación We-</b>	<b>80</b>
	<b>bots ®</b>	
5.1.	Diseño Del Ambiente De Prueba Para Simulación De Movimientos . . . . .	80
5.2.	Prueba 1: Desplazamiento hacia delante . . . . .	86
5.2.1.	Descripción . . . . .	86
5.2.2.	Funcionamiento . . . . .	86
5.2.3.	Análisis De Indicadores De Rendimiento . . . . .	87
5.3.	Prueba 2: Desplazamiento hacia atrás . . . . .	93
5.3.1.	Descripción . . . . .	93
5.3.2.	Funcionamiento . . . . .	93
5.3.3.	Análisis De Indicadores De Rendimiento . . . . .	94
5.4.	Prueba 3: Giro a la derecha . . . . .	97
5.4.1.	Descripción . . . . .	97
5.4.2.	Funcionamiento . . . . .	98
5.4.3.	Análisis De Indicadores De Rendimiento . . . . .	99
5.5.	Prueba 4: Giro a la izquierda . . . . .	105
5.5.1.	Descripción . . . . .	105
5.5.2.	Funcionamiento . . . . .	105
5.5.3.	Análisis De Indicadores De Rendimiento . . . . .	107
5.6.	Prueba 5: Rotación sobre su propio eje . . . . .	113
5.6.1.	Descripción . . . . .	113
5.6.2.	Funcionamiento . . . . .	114
5.6.3.	Análisis De Indicadores De Rendimiento . . . . .	115
5.7.	Prueba 6: Movimientos estáticos adicionales . . . . .	121
5.7.1.	Sentarse . . . . .	122
5.7.2.	Acostarse . . . . .	124

5.8.	Prueba 7: Variación de tamaño de obstáculos . . . . .	125
5.8.1.	Descripción . . . . .	125
5.8.2.	Funcionamiento . . . . .	127
5.8.3.	Análisis De Indicadores De Rendimiento . . . . .	129
5.9.	Prueba 5: Variación de cantidad de obstáculos . . . . .	131
5.9.1.	Descripción . . . . .	131
5.9.2.	Funcionamiento . . . . .	132
5.9.3.	Análisis De Indicadores De Rendimiento . . . . .	133
<b>6.</b>	<b>Conclusiones Y Recomendaciones A Trabajos Futuros</b>	<b>138</b>

# Lista de Figuras

1.1.	Módulo Mecabot 1.0 y 2.0, <i>Tomado de [21].</i>	15
1.2.	Módulo Mecabot 3.0 y 4.0 <i>Tomado de [23].</i>	16
1.3.	Módulo Mecabot 4.0 y 5.0 <i>Tomado de [21].</i>	16
1.4.	Metodología <i>Elaboración propia</i>	23
2.1.	Mecanismo de Chebyshev <i>Tomado de [29].</i>	28
2.2.	Caballo Mecánico - Hutchinson- General electric Walking Truck <i>Tomado de [46].</i>	29
2.3.	Phoney Pony - Big Muskie <i>Tomado de [46].</i>	30
2.4.	TITAN III - IV- VII <i>Tomado de [46].</i>	30
2.5.	TITAN XII- TITAN XIII- COLLIE-I <i>Tomado de [46].</i>	31
2.6.	Robot BigDog de Boston Dynamics <i>Tomado de [51].</i>	32
2.7.	Módulos y configuraciones robot M-TRAN <i>Tomado de [20].</i>	36
2.8.	Módulo SuperBot y sus diferentes configuraciones <i>Tomado de [20].</i>	37
2.9.	Angulaciones miembro anterior y posterior <i>Tomado de [58].</i>	39
2.10.	Movimiento correcto miembro anterior y posterior <i>Tomado de [58].</i>	39
2.11.	Paso-Marcha-Caminar <i>Tomado de [58].</i>	40
2.12.	Pasajeo <i>Tomado de [58].</i>	41
2.13.	Trote <i>Tomado de [58].</i>	41
2.14.	Galope Corto <i>Tomado de [58].</i>	42
3.1.	Dimensiones Mecabot 5.0	47
3.2.	Acople Cara-Pivote Mecabot 5.0	48
3.3.	Movimientos permitidos acople Cara-Pivote Mecabot 5.0	49
3.4.	Acople Pivote-Pivote Mecabot 5.0	50
3.5.	Movimientos permitidos acople Pivote-Pivote Mecabot 5.0	51
3.6.	Acople Cara-Cara Mecabot 5.0	52
3.7.	Movimientos acople Cara-Cara Mecabot 5.0	52
3.8.	Acople Caras Laterales Mecabot 5.0	53
3.9.	Arquitectura integrada tipo canino.	57
3.10.	Dimensiones arquitectura integrada tipo canino.	58
3.11.	Diagrama DOF y sistema de coordenadas columna.	59
3.12.	Diagrama DOF y sistema de coordenadas pierna.	60
3.13.	Secuencia caminar.	64

4.1.	Entorno de desarrollo Webots. . . . .	66
4.2.	Diagrama ensamblaje arquitectura. . . . .	68
4.3.	Ensamblaje completo en Webots. . . . .	69
4.4.	Diagrama de flujo general. . . . .	71
4.5.	Diagrama de flujo algoritmo movimiento de pierna. . . . .	72
4.6.	Algoritmo de locomoción. . . . .	73
4.7.	Algoritmo de rotación sobre su eje. . . . .	75
4.8.	Interfaz gráfica Matlab - Tab Manual. . . . .	76
4.9.	Interfaz gráfica Matlab - Tab Obstáculos. . . . .	77
4.10.	Interfaz gráfica Matlab - Tab W-Space. . . . .	77
4.11.	Diagrama de flujo algoritmo celdas exactas. . . . .	78
5.1.	Primer escenario de prueba. . . . .	81
5.2.	Trayectoria por celdas exactas escenario 1. . . . .	82
5.3.	Segundo escenario de prueba. . . . .	83
5.4.	Trayectoria por celdas exactas escenario 2. . . . .	83
5.5.	Articulaciones empleadas. . . . .	84
5.6.	Funcionalidad movimientos básicos. . . . .	85
5.7.	Ilustración movimiento hacia adelante. . . . .	86
5.8.	Funcionalidad de velocidad. . . . .	87
5.9.	Distancia X en el tiempo velocidad de caminado. . . . .	88
5.10.	Distancia X en el tiempo velocidad de trote. . . . .	89
5.11.	Ángulos de cadera y rodilla derecha. . . . .	90
5.12.	Ángulos de cadera y rodilla izquierda. . . . .	91
5.13.	Ángulos rodilla y cadera de conjunto. . . . .	92
5.14.	Ilustración movimiento hacia atrás. . . . .	93
5.15.	Distancia X a través del tiempo. . . . .	94
5.16.	Ángulos cadera y rodilla derecha. . . . .	95
5.17.	Ángulos cadera y rodilla izquierda. . . . .	96
5.18.	Ángulos cadera y rodilla en conjunto. . . . .	97
5.19.	Ilustración movimiento giro hacia la derecha. . . . .	98
5.20.	Distancia X a través del tiempo. . . . .	99
5.21.	Distancia Z a través del tiempo. . . . .	100
5.22.	Distancia Z con respecto a Distancia X. . . . .	101
5.23.	Ángulo de la columna. . . . .	102
5.24.	Ángulos cadera y rodilla derecha. . . . .	103
5.25.	Ángulos cadera y rodilla izquierda. . . . .	104
5.26.	Ángulos cadera y rodilla conjunto. . . . .	105
5.27.	Ilustración movimiento giro hacia la izquierda. . . . .	106
5.28.	Distancia X a través del tiempo. . . . .	107
5.29.	Distancia Z a través del tiempo. . . . .	108
5.30.	Distancia Z con respecto a Distancia X. . . . .	109

5.31. Ángulo de la columna. . . . .	110
5.32. Ángulos cadera y rodilla derecha. . . . .	111
5.33. Ángulos cadera y rodilla izquierda. . . . .	112
5.34. Ángulos cadera y rodilla conjunto. . . . .	113
5.35. Ilustración movimiento giro sobre su propio eje. . . . .	114
5.36. Funcionalidad movimiento sobre su propio eje. . . . .	115
5.37. Ángulos superior y rodilla izquierda. . . . .	116
5.38. Ángulos superior y rodilla derecha. . . . .	117
5.39. Ángulos superior y rodilla en conjunto. . . . .	118
5.40. Ángulos superior y rodilla izquierda. . . . .	119
5.41. Ángulos superior y rodilla derecha. . . . .	120
5.42. Ángulos superior y rodilla en conjunto. . . . .	121
5.43. Funcionalidades de sentarse y acostarse. . . . .	122
5.44. Ángulos articulaciones de rodilla patas traseras. . . . .	122
5.45. Robot en estado sentado. . . . .	123
5.46. Ángulos articulaciones de rodilla en todas las patas. . . . .	124
5.47. Robot en estado acostado. . . . .	125
5.48. Obstáculo 1: Piedras. . . . .	126
5.49. Obstáculo 2: Pallet. . . . .	126
5.50. Obstáculo 3: Rampa. . . . .	127
5.51. Tiempo vs Altura Obstáculo. . . . .	130
5.52. Variación cantidad de obstáculos escenario 1. . . . .	131
5.53. Variación cantidad de obstáculos escenario 2. . . . .	132
5.54. Distancia vs Tiempo entorno 1. . . . .	134
5.55. Distancia en z vs Distancia en x de Trayectoria entorno 1. . . . .	135
5.56. Distancia vs Tiempo entorno 2. . . . .	136
5.57. Distancia en z vs Distancia en x de Trayectoria entorno 2. . . . .	137

# Lista de Tablas

2.1. Características Robots Cuadrúpedos.Tomado de [50]. . . . .	33
3.1. Componentes Mecabot 5.0 . . . . .	44
3.2. Arquitecturas propuestas tipo canino. . . . .	54
3.3. Comparación Arquitecturas Propuestas . . . . .	56
3.4. Parámetros Denavit Hartenberg Columna . . . . .	58
3.5. Parámetros Denavit Hartenberg Pierna . . . . .	61
5.1. Nombres de articulaciones empleadas. . . . .	85
5.2. Variación Obstáculo 1 . . . . .	128
5.3. Variación Obstáculo 2 . . . . .	128
5.4. Variación Obstáculo 3 . . . . .	129
5.5. Variación cantidad de obstáculos escenario 1. . . . .	133
5.6. Variación cantidad de obstáculos escenario 2. . . . .	133

# Resumen

El grupo de investigación DAVINCI de la Universidad Militar Nueva Granada desarrollo el sistema robótico modular Mecabot con el que se han logrado implementar las arquitecturas de oruga, serpiente, rueda, bípedo, hexápodo y la primer configuración cuadrúpeda correspondiente a una salamandra. El presente trabajo aborda el planteamiento y desarrollo de una arquitectura cuadrúpeda tipo canina con los módulos Mecabot 5.0 capaz de realizar movimientos básicos de locomoción en entornos no estructurados.

Se enfoca en analizar la locomoción de un canino implementando los movimientos de desplazamiento adelante/atrás, giro a la derecha/izquierda y giro sobre su propio eje en el software de Webots controlándose con una interfaz gráfica de usuario desarrollada en Matlab. Adicionalmente, se realizar pruebas con diferentes obstáculos para evaluar su rendimiento en diferentes entornos debido a que el objetivo del robot es ser usado en aplicaciones de exploración y rescate.

El desempeño del robot es medido a partir de indicadores de rendimiento, para los movimientos de locomoción (avanzar, retroceder, girar a la izquierda/derecha) se evalúa la distancia, el ángulo de las articulaciones y el tiempo. Por otro lado, se determina la influencia de la forma, tamaño y cantidad de obstáculos en un recorrido realizado por el canino.

# Abstract

The DAVINCI research group of the Nueva Granada Military University developed the Mecabot modular robotic system with which the architectures of caterpillar, snake, wheel, bipedal, hexapod and the first quadruped configuration corresponding to a salamander have been implemented. The present work addresses the approach and development of a canine-type quadruped architecture with Mecabot 5.0 modules able of performing basic locomotion movements in unstructured environments.

It focuses on analyzing the locomotion of a canine by implementing the movements of forward / backward movement, turn to the right / left and turn on its own axis in the Webots software, controlling it with a graphical user interface developed in Matlab. Additionally, tests with different obstacles were carried out to evaluate its performance in different environments because the objective of the robot is to be used in exploration and rescue applications.

The performance of the robot is measured from performance indicators, for locomotion movements (advance, go back, turn left / right) distance, joint angle and time are evaluated. On the other hand, the influence of the shape, size and quantity of obstacles in a track made by the canine is determined.

# Capítulo 1

## Introducción

En la sociedad a lo largo de los años se presentan constantes cambios gracias a los avances científicos y tecnológicos que se llevan a cabo para solucionar problemáticas o mejorar la calidad de vida de las personas. Dentro de los avances tecnológicos, se encuentra la robótica la cual es una ciencia que se encarga del diseño y construcción de maquinas programables para realizar diferentes tareas repetitivas o de alto riesgo para el ser humano [1].

La robótica es aplicada en diversas áreas como lo es medicina, construcción, transporte, hogar como lo son los robots aspiradora, industria, entre otros. Estos robots están pueden clasificarse en diferentes categorías dependiendo su aplicación entre las cuales se encuentran los robots manipuladores, móviles, andróides, híbridos, entre otros los cuales comúnmente son estructuras robustas y rígidas limitándose a aplicaciones específicas [2, 3].

Con base en lo anterior, la robótica presenta grandes retos entre los cuales se encuentra el desarrollo de robots bioinspirados donde se busca diseñar y programar estructuras que funcionen como los seres vivos. Otro desafío es realizar robots modulares ya que son menos costos, mas fáciles de integrar y se adaptan a diferentes escenarios según la tarea que deban ejecutar[4].

La presente tesis se enfoca en la robótica modular bioinspirada haciendo uso de los módulos Mecabot 5.0. Este documento está dividido en seis capítulos distribuidos de la siguiente manera: el primero incluye la introducción, planteamiento, objetivos y delimitación del proyecto. El segundo capítulo contiene el marco referencial en el cual se abordan temas teóricos de robótica modular, robots cuadrúpedos y los caninos. En la tercera sección se presenta detalladamente la propuesta y el desarrollo de la arquitectura tipo canina presentando las propuestas de perfiles de locomoción. En el capítulo cuatro y cinco se integra la arquitectura propuesta en entornos no estructurados en Webots y las pruebas para evaluar el rendimiento de esta. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones a trabajos futuros.

## **1.1. Antecedentes**

La robótica modular surge en 1993 gracias a la tesis desarrollada por Mark Yim Stanford en la cual diseña el robot modular Polypod como solución al problema de locomoción en el cual los robots no podían desplazarse en terrenos inestables. Los resultados obtenidos permitieron el origen de la robótica modular reconfigurable debido a su fiabilidad, versatilidad y los módulos implementados eran sencillos de realizar y de un bajo costo [5].

A partir del diseño original de Polypod se realizaron varias versiones, las cuales buscaban tener mejores resultados donde finalmente se obtuvieron G1v5, G2 y G3 donde se lograron diversas configuraciones, entre estas se encuentra una rueda, gusano, cuadrúpedo, humanoide, araña, entre otras. Para lograr cada una de las configuraciones se emplearon un modelo de programación autómatas de fases basado en que los movimientos son periódicos de tal manera que las señales que controlan cada módulo son las mismas pero con desfases [6, 7, 8, 9].

Luego del Polypod se creó el robot modular CKBot en la Universidad de Pensilvania el cual tenía como objetivo realizar varios tipos de configuraciones para lograr correctamente la locomoción deseada, robustez y auto-reparación en la cual el robot es capaz de formar una configuración después de recibir un impacto en el cual sus módulos se dispersan. Posteriormente surgen los robots modulares M-TRAN con la finalidad de mejorar los módulos desarrollados en los anteriores modelos; estos logran unirse mediante imanes permanentes y generan una alta viabilidad en la locomoción de las configuraciones anteriormente mencionada. Para este módulo se realizaron 3 generaciones, en la cual en la última se logró mayor velocidad de conexión con unos módulos más especializados [10, 11, 12, 13].

En el 2005 se crea el robot modular SuperBot en la Universidad de California sur diseñado para aplicaciones espaciales permitiendo desplazarse estos terrenos recolectando información. Este desarrollo fue financiado por la Nasa y el Darpa, donde se logró obtener configuraciones de rueda, araña y serpiente con sus respectivas locomociones. Estos módulos están inspirados en el modelo M-TRAN con la diferencia que se agregó un grado de libertad el cual permite que haya rotación y giro en los extremos del módulo [14, 15].

Posteriormente se crean robots modulares con locomoción bioinspirada como lo es Yamor con el cual se implementaron las configuraciones de gusano y cuadrúpedo obteniendo resultados satisfactorios. Otro de estos fue el módulo RoomBot propuesto en el instituto EPFL empleando estos módulos para formar muebles [16, 17, 18].

Teniendo en cuenta lo anterior, se establece que el objetivo de la robótica modular reconfigurable es realizar sistemas compuestos de modelos los cuales pueden acoplarse de múltiples

formas para lograr tener habilidades que no son posibles para un robot normal. Actualmente, existen varios sistemas de robot modulares los cuales se construyen con impresión 3D y son de código abierto lo cual permite que pueda trabajarse en ellos, un ejemplo de estos es el PMR y cube revolutions [19].

### **1.1.1. Configuraciones Cuadrúpedas Modulares**

Existe un tipo de robots modulares denominados robots de tipo cadena, las cuales están formados por diferentes cadenas de módulos. Dentro de este amplio grupo de robots se encuentra la estructura de un robot cuadrúpedo, la cual partiendo de este punto de vista está constituida por cinco cadenas: una central que actúa como columna vertebral y cuatro más para las extremidades (patas). Los robots de este grupo son los mejores para la locomoción, dado que permite reconstruir la morfología de diferentes tipos de animales. Estas cadenas de módulos pueden actuar como patas, brazos, columna vertebral, etc.

Los robots de tipo cadena se pueden dividir dependiendo de su topología. De este modo, se pueden tener topologías de 1D, como gusanos y serpientes, topologías 2D, como cuadrúpedos, estructuras poligonales, pentágonos, entre otros. O también topologías 3D como erizos [20].

### **1.1.2. Mecabot**

El grupo de investigación DAVINCI de la Universidad Militar Nueva Granada realiza en el año 2013 el módulo robótico Mecabot 1.0 el cual posee un acople mecánico y permite el movimiento rotacional en sus extremos y costados. Además de esto, posee cinco servomotores los cuales son controlados por un PIC24HJ12GP201 de Microchip, cuenta con sensores y

proximidad y baterías de litio. Sin embargo, estos poseen un tamaño grande donde los motores implementados no tenían el suficiente torque para moverlos impidiendo realizar alguna configuración [19, 21].



Figura 1.1: Módulo Mecabot 1.0 y 2.0, *Tomado de [21]*.

A partir de los problemas generados, se crea una versión Mecabot 2.0 en la cual se reduce el tamaño y peso del módulo en su mitad, se modifica el acople mecánico por uno de imanes permanentes y el controlador se reemplaza por un Arduino Nano. En la Figura 1.1 se presentan los Módulos Mecabot 1.0 (Rojo) y 2.0 (Negro).

A pesar de estos cambios el peso del módulo era alto por lo tanto no logró implementarse una configuración con éxito. En el 2016 se crea la versión 3.0 de este módulo, en el cual se disminuye su tamaño y se incorporan servomotores de 1.8 Kg y 1.3 Kg aumentando la fuerza que éste podía ejercer y se logró implementar la configuración tipo serpiente y oruga [21, 22, 23].

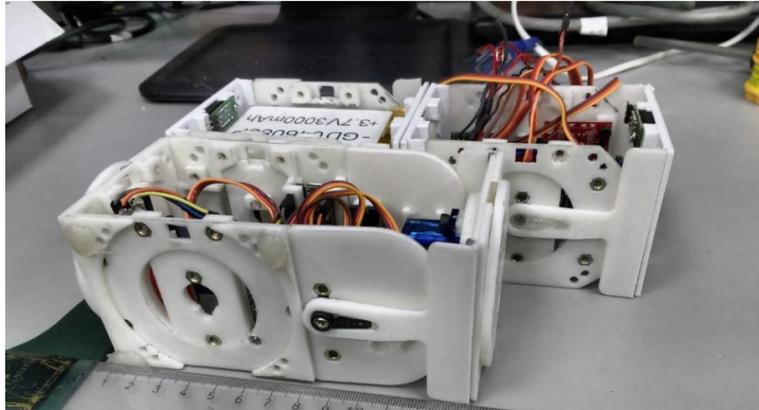


Figura 1.2: Módulo Mecabot 3.0 y 4.0 Tomado de [23].

Finalmente se realizan las versiones 4.0 y 5.0 en las cuales se reduce el peso del módulo, se eliminan los movimientos rotacionales permitiendo mejorar el torque de este al implementar servomotores de 3.9 Kg. Con el módulo 4.0 se lograron implementar las configuraciones de hexápodo y rueda las cuales sirvieron como base para implementar la configuración cuadrúpeda tipo salamandra y bípeda en el Mecabot 5.0 las cuales poseen locomoción bioinspirada [21, 22]. En la Figura 1.3 se presentan los módulos del Mecabot 4.0 (atrás) y Mecabot 5.0 (frente).

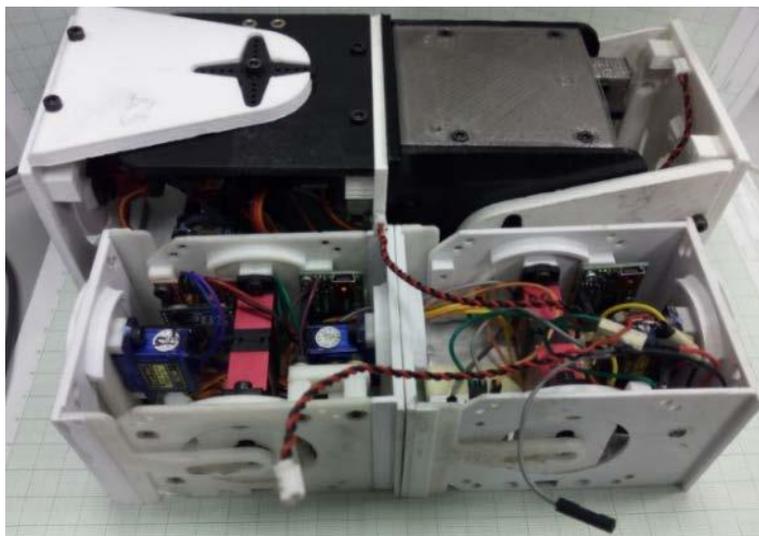


Figura 1.3: Módulo Mecabot 4.0 y 5.0 Tomado de [21].

## 1.2. Planteamiento del Problema

En las últimas décadas se ha evidenciado un creciente interés por los robots caminantes, desde un punto de vista de investigación básica y también desde sus potenciales aplicaciones. Una de las características más destacadas de los robots equipados con patas es su capacidad de desplazamiento sobre una amplia variedad de terrenos no estructurados. Está entre otras particularidades los hace mecanismos muy atractivos e interesantes para su aplicación práctica como robots de servicios en los que se requiere de un tipo de locomoción distinta, sobre terrenos naturales o en superficies irregulares que contienen diversos tipos de obstáculos y distintas pendientes. Estos robots caminantes pueden ser implementados a partir de robótica modular lo cual los hace mucho más versátiles y con mayor adaptabilidad a diferentes tipos de entorno [24]. Adicionalmente este tipo de robots caminantes con arquitectura cuadrúpeda tienen amplias aplicaciones en la búsqueda y rescate de personas en situaciones de desastres o en un ámbito militar, debido a su capacidad para superar obstáculos de diferentes tamaños y formas en diferentes tipos de terreno [25, 26, 27, 28, 29].

El grupo de investigación DAVINCI de la Universidad Militar Nueva Granada ha aportado investigación en el campo de la robótica modular para la implementación de diferentes tipos de robots caminantes. Esto ha sido posible gracias a el diseño y la fabricación del robot MECABOT, del cual a lo largo del tiempo se han ido implementando varias actualizaciones con diferentes estructuras de robots móviles. Sin embargo, a pesar de las estructuras ya implementadas quedan muchas más opciones y oportunidades para descubrir, las cuales pueden ser totalmente nuevas o pueden ser estructuras conocidas que contengan algún tipo de mejora.

Las primeras versiones del MECABOT fueron pensadas para configuraciones en las que el robot se desplaza por medio de arrastre. Sin embargo, una vez implementados estos modelos

se empezaron a probar estructuras de robots caminantes como el hexápodo o cuadrúpeda, los cuales al ser mecanismos con patas permiten un mejoramiento en la locomoción de los mismos en terrenos irregulares o con obstáculos [21, 22, 23].

Es importante tener en cuenta la capacidad del robot de adaptación a diferentes entornos para las aplicaciones en las que puede ser utilizado. Por lo cual, un mecanismo cuadrúpedo de tipo canino es una opción ideal para el desplazamiento sobre estructuras irregulares, lo que le permite desempeñarse en situaciones de búsqueda y rescate en las que pueda tener que enfrentarse a terrenos con diferentes tipos de superficies. En contraste con lo anterior, la pregunta que se pretende responder con el desarrollo de este trabajo es: ¿De qué forma una arquitectura cuadrúpeda tipo canino empleando módulos robóticos MECABOT puede desplazarse en terrenos irregulares?

### **1.3. Objetivo General**

Diseñar arquitectura cuadrúpeda tipo canino utilizando el sistema robótico modular MECABOT y simular sus movimientos básicos de locomoción (avanzar, retroceder, girar a la izquierda/derecha) con la finalidad de evaluar su desempeño en terrenos no estructurados utilizando un ambiente virtual para simulación de robots.

### **1.4. Objetivos Específicos**

- Utilizar software de modelado CAD 3D para diseñar la arquitectura cuadrúpeda tipo canina con base en los módulos MECABOT 5.0 de tal manera que se pueda obtener robot bioinspirado en un canino.

- Desarrollar secuencias de movimientos básicos de locomoción (avanzar, retroceder, girar a la izquierda/derecha) y simularlos dentro del entorno no estructurado utilizando software Webots con el fin de evaluar rendimiento de arquitectura cuadrúpeda de tipo canina al realizar pruebas de funcionamiento (locomoción).
- Implementar un ambiente virtual no estructurado para la simulación de los movimientos básicos de locomoción de la arquitectura integrada con el propósito de evaluar el desempeño del robot en entornos con diferentes condiciones y con obstáculos de diferentes tipos, con lo cual se pueda determinar en cuáles de estos el robot es apto para su desplazamiento.

## **1.5. Delimitación**

La propuesta busca diseñar una arquitectura cuadrúpeda tipo canina y simular su locomoción (avanzar, retroceder, girar a la izquierda/derecha) empleando módulos MECABOT 5.0 desarrollados por el grupo de investigación DAVINCI de la Universidad Militar Nueva Granada para realizar arquitectura integrada en el software de desarrollo virtual WEBOTS. Posteriormente, se realizan pruebas, evaluación de resultados obtenidos y rendimiento de la arquitectura propuesta. Es importante indicar que se emplearán los módulos MECABOT 5.0 para realizar la arquitectura 3D, sin embargo, es posible que se realicen ajustes (en el diseño CAD) en los módulos actuales o se implementen otras piezas para lograr adecuadamente la arquitectura cuadrúpeda tipo canina.

## 1.6. Justificación

El término de robótica modular hace referencia a una familia de sistemas robóticos que están compuestos por pequeñas unidades interconectadas llamadas módulos, las cuales se unen a través de interfaces de acoplamiento. Los módulos son estructuras simples que cuentan con sistemas propios de actuación y sensores. Sin embargo, a pesar de que son estructuras independientes, los módulos contienen sistemas de acoplamiento que permiten conexiones para la formación de un sistema robótico con mayores capacidades. Esta característica hace que los robots modulares sean llamados sistemas auto-configurables, independientemente si la estructura es dirigida de forma externa o es realizada de forma autónoma por los módulos[30].

La modularidad brinda al mecanismo robótico ventajas funcionales y económicas respecto a los robots convencionales, pues un robot con estas capacidades es capaz de adaptarse a nuevas situaciones y cambios en el entorno a través de la configuración de sus módulos, por ejemplo desplazarse en distintos tipos de superficie. Asimismo, también admite modificaciones de forma rápida y sencilla con aumento o disminución del número de módulos del sistema y permite el acople de otros sistemas especiales que faciliten la realización de tareas específicas tales como sensores, ganchos, baterías entre otros. Adicionalmente, otra característica que sugiere una ventaja es la producción en masa de módulos sencillos que al compararlos con robots especializados dan como resultado un proceso de fabricación más económico [31, 32].

El grupo de investigación DAVINCI de la Universidad Militar Nueva Granada ha diseñado e implementado una variedad de prototipos con el nombre de MECABOT. Cada uno de estos diseños e investigaciones han aportado datos que permiten el constante mejoramiento de este prototipo. No obstante dado al gran número de posibilidades que involucra la robótica modular es necesario explorar nuevas posibles arquitecturas y configuraciones que permitan mejorar

y enriquecer este proyecto. Las primeras versiones del MECABOT fueron configuraciones de arrastre. Posteriormente se han venido implementado configuraciones con patas, puesto que permiten un mejor desempeño en la aplicación principal de este prototipo que es la búsqueda y rescate.

Un robot modular caminante tiene la capacidad de desplazarse fácilmente en terrenos irregulares. Adicionalmente, este tipo de robot puede tener más éxito que un robot convencional de configuración fija, puesto que en caso de alguna eventualidad que pueda causar la destrucción completa o parcial del robot este simplemente puede ser reemplazado por otros módulos, mientras que un robot fijo se destruiría completamente. Esto se justifica debido a la aplicación para la cual está pensado, pues en situaciones de búsqueda y rescate es propenso a destrucción o daños. Al realizar el diseño es importante tener en cuenta factores como la estabilidad, los costos y el consumo. Entre implementaciones anteriores del MECABOT para robots caminantes, se ha implementando una configuraciones de tipo hexápodo, bípedo y cuadrúpedo tipo salamandra. La arquitectura de tipo hexápodo al tener un mayor número de puntos de apoyo (patas) puede representar un mayor consumo. La configuración de tipo bípedo, la cual fue implementada con un caminador, contiene un equilibrio estático, mientras que una arquitectura de tipo cuadrado contiene un equilibrio dinámico y mayor posibilidad de movimiento. Finalmente, la arquitectura implementada cuadrúpedo tipo salamandra tiene dificultad de sobrepasar terrenos estructurados o con posibles objetos que contengan inclinaciones. Un robot con configuración cuadrúpeda de tipo canina tiene una mayor posibilidad de desplazamiento frente a obstáculos y posibles terrenos irregulares con pendiente. Con base a lo descrito anteriormente vale la pena la realización de una nueva versión de un robot modular con patas que supera limitaciones que se tenían en prototipos anteriores.

## **1.7. Metodología**

Para el desarrollo de la tesis se implementa la metodología presentada en el diagrama de la Figura 1.4 el cual esta conformado por 4 etapas. Inicialmente se presenta la etapa de diseño en la cual se realiza una revisión de la literatura relacionada con los temas fundamentales del proyecto y el estudio de los módulos Mecabot 5.0 desarrollados por la Universidad Militar para realizar posteriormente el diseño de la arquitectura cuadrúpeda tipo canina en Solidworks. En segunda instancia se realiza la implementación de la arquitectura en el ambiente virtual Webots® en el cual se realiza una familiarización con el software y se exporta el diseño de Solidworks. En la tercer etapa, se desarrolla teóricamente la estructura, se programan los movimientos básicos de locomoción (avanzar, retroceder, girar a la izquierda/derecha) y se implementa la interfaz de usuario. Finalmente se realizar pruebas de los movimientos básicos de locomoción, se evalúa el rendimiento y se obtienen recomendaciones para futuros trabajos.

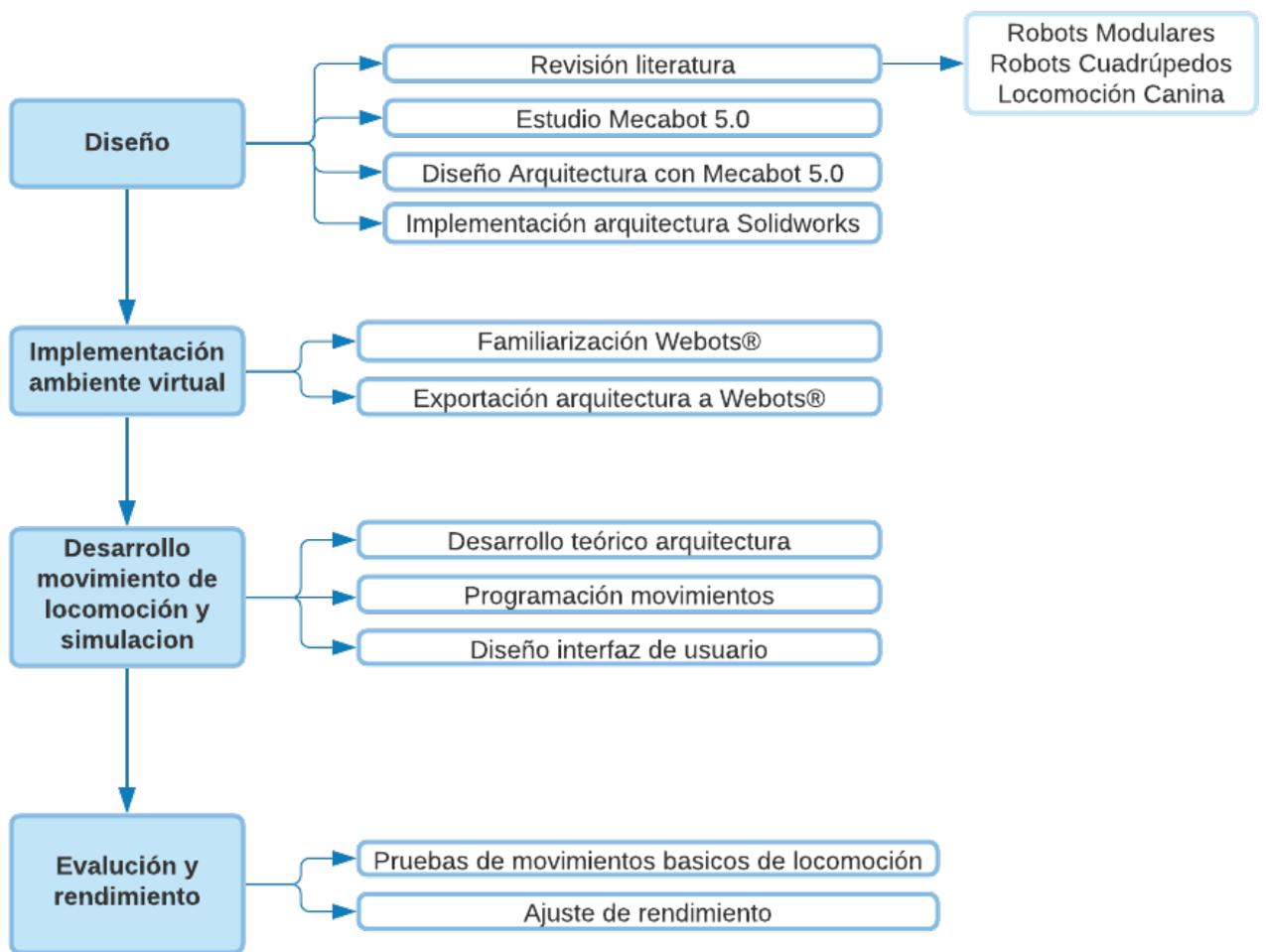


Figura 1.4: Metodología *Elaboración propia*

# Capítulo 2

## Marco Referencial

Este capítulo presenta un referente teórico en el cual se describen los conceptos de robótica, robótica móvil, robots cuadrúpedos, robótica modular y los principios de locomoción de un canino. Posteriormente, se presentan los antecedentes en el cual se incluyen los estudios realizados anteriormente relacionados con el tema y se realiza una revisión detallada de los módulos Mecabot.

### 2.1. Referentes Teóricos

#### 2.1.1. Robótica

Con los avances técnicos y científicos, surge la robótica como una herramienta tecnológica que combina los conceptos de ingeniería para funcionar de manera autónoma facilitando el trabajo del ser humano [33, 34].

La robótica actual inicia en el siglo XVIII, con la maquina textil programable mediante tarjetas perforadas inventada por Joseph Jacquard. Con esta, en la revolución industrial se in-

centivo el desarrollo de la robótica dando surgimiento a máquinas de forma humana entre las cuales se encuentran la muñeca mecánica cuya función es realizar dibujos, el torno mecánico motorizado de Babbitt y el mecanismo programable para pintar con spray de Pollard y Rose-lund. Estas creaciones tenían varias limitaciones y no se adaptan al concepto actual de un robot el cual tiene apariencia y actúa como un humano [35].

En 1920 se usa por primera vez la palabra robot en la obra "Los Robots Universales de Rossum" (R.U.R) escrita por Karel Capek en la cual un hombre fabrica un robot. Este término proviene de la palabra checa 'Robota' la cual significa "trabajador forzado". Por otro lado, en 1939 surgen las "Tres Leyes de la Robótica." atribuido a Isaac Asimov las cuales se usan actualmente al fabricar un robot y estas son: 1. Un robot no puede hacer daño a un ser humano., 2. Un robot debe cumplir las ordenes dadas por el hombre y 3. El robot debe proteger su propia existencia [36].

### **2.1.2. Robótica Móvil**

Con las nuevas tecnologías de planificación y razonamiento automático entre en transcurso de los de 1966 a 1972 se desarrolló el primer robot móvil llamado Shakey, que era una plataforma móvil independiente la cual era controlada por visión por medio de una cámara dotada de un detector táctil. Desde ese momento la investigación y el diseño de robots móviles creció de una manera exponencial. Los robots móviles brindan la posibilidad de navegar en diferentes terrenos y tienen varias aplicaciones tales como: la explotación minera, la exploración planetaria, misiones de búsqueda y rescate de personas, limpieza de desechos peligrosos, automatización de procesos, vigilancia, reconocimiento de terreno y también son utilizados como plataformas móviles que pueden ser incorporadas para un brazo manipulador [37]. Los robots móviles se pueden clasificar por el tipo de locomoción que utilizan. Sin embargo, de manera general, los

tres principales medios de movimiento son: por ruedas, por patas y oruga. Cabe resaltar que a pesar de que la locomoción con patas y orugas son medios que han sido estudiados e investigados, los más comunes y los que contienen mayor desarrollo son los Robots Móviles con Ruedas (RMR).

### **2.1.3. Robots Caminantes**

Los primeros trabajos fueron desarrollados en 1970 por Kato y Vukobratovic los cuales introducen diseños experimentales de robots con patas. A partir de esto, en 1973 presentan el primer robot antropomórfico "WABOT 1.<sup>en</sup> la Universidad de Waseda, Japón el cual posee un esquema de control simple capaz de realizar pasos lentos en equilibrio estático. Paralelamente, el instituto Mihailo Puppín presentaron los primeros exoesqueletos en el cual se busca extender un criterio de estabilidad dinámica de los robots con patas [25].

En la siguiente década, los avances provienen de Estados Unidos donde se diseñó una secuencia de robots saltadores activos, con una, dos o cuatro patas, con resultados impresionantes, entre ellos un famoso salto realizado por una máquina saltadora de dos patas. Simultáneamente, R. McGhee y K. Waldron, después de la construcción de algunos prototipos, lograron el diseño del hexápodo más grande del mundo capaz de caminar sobre un terreno natural irregular, que fue conducido por un humano [26].

El desarrollo e implementación de la locomoción para robots caminantes se ha dado gracias al estudio de sistemas biológicos, cuyo sistema de locomoción está basado principalmente en conjuntos de juntas o articulaciones que se denominan patas. Los robots caminantes aprovechan este tipo de locomoción dependiendo de la cantidad de puntos de apoyo que contengan (monopodos, bípedos, cuadrúpedos, hexápodos etc) para convertirse en máquinas ideales para

espacios peligrosos o de difícil acceso. Las principales características que tienen las máquinas caminantes son las siguientes:

- Control de las fuerzas en los puntos de apoyo.
- Gran omnidireccionalidad.
- Capacidad de adaptarse a distintos terrenos.
- Apoyos discretos en el terreno.

La mayoría de estos robots caminantes están destinados para un uso de exploración a terrenos que no son accesibles para el ser humano. Entre las aplicaciones principales de estas máquinas se encuentra la detección de minas personales, trabajos de forestación, limpieza de fachadas, transporte de equipos y herramientas de construcción. Por su parte, por todas las características mencionadas, las máquinas caminantes se convierten en mecanismos que son ideales para el desplazamiento por superficies horizontales, pero también para superficies verticales o con cierto grado de inclinación, los cuales para este último caso son denominados robots escaladores [38].

Las ventajas de la locomoción con patas dependen de las posturas, el número de piernas y la funcionalidad de la pierna. Aunque los robots con ruedas y orugas pueden trabajar en terrenos planos, pero la mayoría de ellos no podrían trabajar en terrenos desordenados, entornos complejos y peligrosos. El robot de patas tiene más potencial para movilizarse por casi todas las superficies de la tierra en diferentes terrenos, al igual que el humano y un animal[27]. Los animales utilizaban sus patas para moverse rápido con fiabilidad en diferentes terrenos con excelente locomoción y agilidad. La mayoría de las veces, se preparan con alta velocidad y eficiencia dependiendo de las condiciones ambientales [28, 29].

### 2.1.4. Robots Cuadrúpedos

Los robots cuadrúpedos son la mejor alternativa entre todos los robots con patas relacionados con la movilidad y la estabilidad de la locomoción. Debido a que las cuatro patas del robot son fácilmente controladas, diseñadas y soportadas en comparación con los robots de dos o seis patas. La locomoción biológicamente inspirada en la marcha tiene la capacidad de soportar una gran carga útil y mantener en equilibrio el robot cuadrúpedo. Para lograr la velocidad en tiempo real y el movimiento natural como una vaca, perro, guepardo, se requiere un sistema de control desarrollado y el modelado dinámico de la marcha de robots cuadrúpedos [39, 40, 41].

Los primeros sistemas cuadrúpedos se desarrollaron en 1870 el cual es un mecanismo de cuatro barras que convierte el movimiento rotacional en movimiento de traslación con velocidad constante. Este se presenta en la Figura 2.1 desarrollado por Chebyshev y es capaz de caminar dinámicamente en terrenos planos [42].

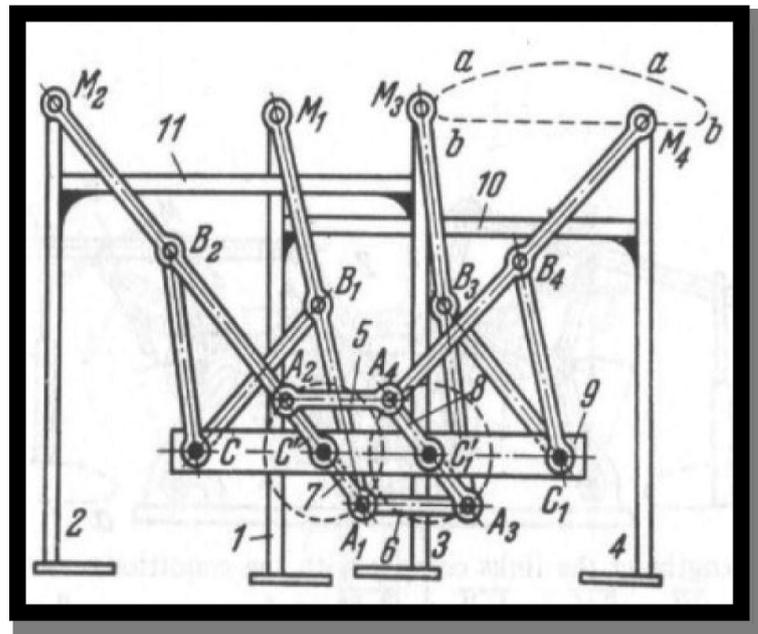


Figura 2.1: Mecanismo de Chebyshev Tomado de [29].

Para 1893 se desarrolla el caballo mecánico mostrado en la figura 2.2(a), este tiene un sistema manivela para transmitir la potencia a la máquina mediante la ayuda de pedales del ciclista [43]. A partir de esto, se construyen cuadrúpedos con patas controladas independientemente como se presenta en la Figura 2.2(b) el cual fue creado por Hutchinson en Gran Bretaña en 1940; este es un modelo de cuatro patas, de unos 60 cm de altura, cuyas ocho articulaciones estaban controladas por cables flexibles que a su vez eran controlados por los dos pies y las manos de un operador [44]. Luego de esto, General Electric en 1960 inventa el cuadrúpedo "Walking Truck" de la Figura 2.2(c) donde su energía era controlada por un motor de gas [45].

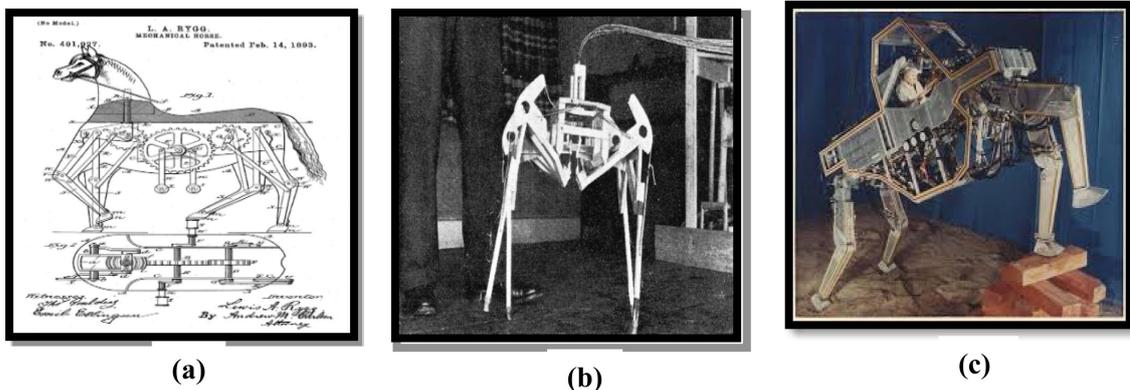
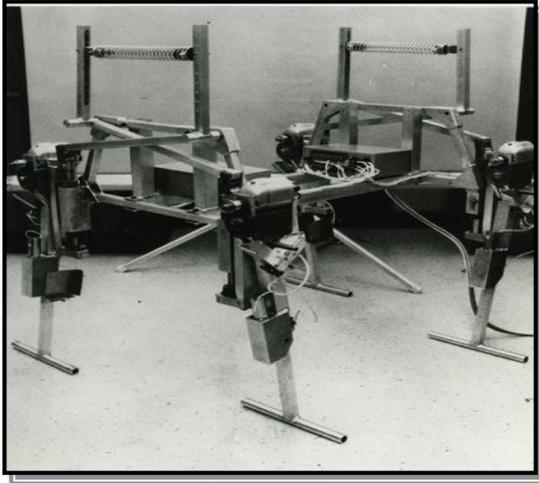


Figura 2.2: Caballo Mecánico - Hutchinson- General electric Walking Truck Tomado de [46].

En Estados Unidos se construye el primer robot cuadrúpedo autónomo en la década de 1960 presentado en la Figura 2.3(a) donde cada una de sus patas tenía dos articulaciones rotativas con accionamiento eléctrico capaces de generar patrones de marcha como trote, caminata y gateo. En esta misma década, en el año 1969 Bucyrus-Brie creó "The Big Muskie" de la Figura 2.3(b) la cual es una locomotora de 13500 ton de cuatro patas accionada hidráulicamente con una altura de 160 pies y una longitud de 310 pies y su velocidad máxima de marcha era de 0,1 mph [42].



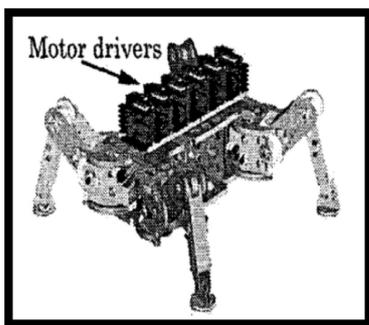
(a)



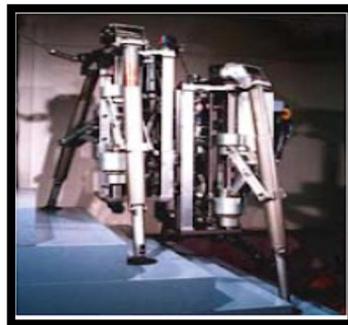
(b)

Figura 2.3: Phoney Pony - Big Muskie Tomado de [46].

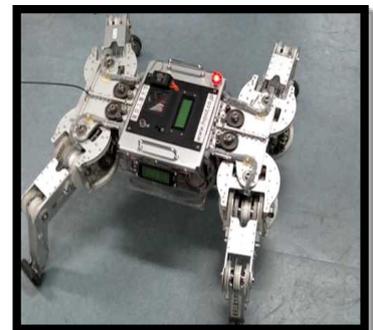
En la década de 1990 se logra el control de movimiento de la estabilidad dinámica un robot cuadrúpedo. En la Figura 2.4(a) se presenta el robot TITAN-III el cual se incorpora un mecanismo de pantógrafo en sus patas. Luego de esto, se desarrollo el TITAN-IV como se indica en la Figura 2.4(b) el cual puede convertir el gateo y la caminata en trote aumentando gradualmente la velocidad. Se crearon otros modelos con el propósito de mejorar su peso, mecanismo y marcha hasta lograr el robot cuadrúpedo andante de la Figura 2.4(c) el cual es empleado principalmente para ayudar en trabajos de construcción con pendientes pronunciadas [46].



(a)



(b)



(c)

Figura 2.4: TITAN III - IV- VII Tomado de [46].

El robot cuadrúpedo TITAN tuvo gran éxito por lo cuales se desarrollaron diversas versiones los cuales sirven para tareas de desminado y trabajo en pendientes pronunciadas. En la Figura 2.5(a) se presenta el TITAN XII el cual es un robot cuadrúpedo que puede pasar por encima de un obstáculo a una velocidad 1,5 m / s con precisión manejado por computador y microcontrolador. El TITAN XIII se muestra en la Figura 2.5(b) el cual es capaz de caminar en diferentes terrenos, con obstáculos a una velocidad de 1.38 m/s siendo energizado con una batería lo cual permite que este funcione en lugares de difícil acceso [47].

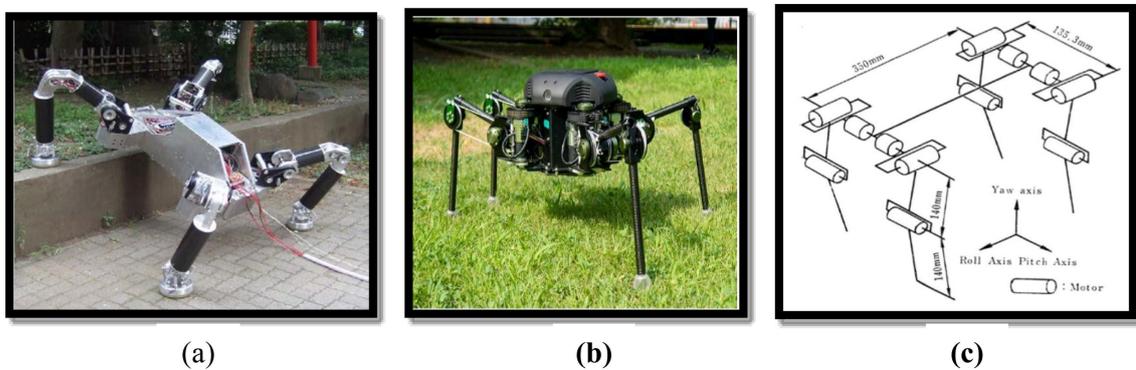


Figura 2.5: TITAN XII- TITAN XIII- COLLIE-I Tomado de [46].

A partir de esto, se desarrolla el robot dinámico Collie-I por Miura como se muestra en la Figura 2.5(c) el cual posee 12 GDL lo cual permite que la caminata se efectuó correctamente. Sin embargo, su peso es de alrededor de 7,5 kg lo cual dificultaba que el robot mantuviera su estabilidad en una zancada [48].

Uno de los robots cuadrúpedos más conocidos de la década de 2000 es el BigDog. Este es un robot cuadrúpedo que camina y corre sobre terrenos irregulares y en superficies que tienen inclinaciones no mayores a 35°. Ha sido desarrollado por la empresa Boston Dynamics y financiado por la Agencia de Investigación de Proyectos Avanzados para la defensa (DARPA). Sus patas contienen tres grados de libertad junto con una configuración de mamífero que implementan sistemas de amortiguamiento para absorber los golpes y recicla la energía generada en un paso para aprovecharla en el siguiente. La velocidad que alcanza este robot al correr es de

1.56 m/s y es capaz de soportar cargas de hasta 54 kg. En la figura 2.6 se observa una ilustración de este robot [49].



Figura 2.6: Robot BigDog de Boston Dynamics *Tomado de [51]*.

Has sido los múltiples modelos de robot cuadrúpedos que se han desarrollado a lo largo de los años. Por esto, en la Tabla 2.1 se presentan los modelos más destacados con sus características principales las cuales son : **D** Dimensiones (L:Largo, W: Ancho, H: Alto, l:Largo de la pata), **G** modo de andar, **V** velocidad, **W** peso , **PL** carga útil, **DOF** grados de libertad, **Fr** numero de Froude, **f** , **A** tipo de actuador (Hy: Hidráulico, E: Eléctrico y F:Zancada por segundo).

Tabla 2.1: Características Robots Cuadrúpedos.Tomado de [50].

Name of the Robot	$D$ (m)	$G$	$V$ (m/s)	$W$ (kg)	$PL$ (kg)	$DOF$	$Fr$	$f$	$A$
GE Walking Truck	$4 \times 3 \times 3.3$ (L $\times$ W $\times$ H)	–	1.39	1300	220	3/leg	–	0.35	Hy
PHONY PONY	–	Crawl, Walk, Trot, Creep	–	50	–	2/leg	–	–	E
BIG MUSKIE	$94 \times 48$ (L $\times$ H)	–	0.04	$13.5 \times 105$	–	4/leg	–	–	Hy
KUMO-I	1.5 (l)	Walk	–	14	–	1/leg	–	–	E
PV-II	0.9 (L),1(H)	Walk	0.02	10	2	3/leg	$4.5 \times 10^{-5}$	–	E
TITAN-XIII	$0.21 \times 0.55 \times 0.34$ (L $\times$ W $\times$ H)	Sprawling	0.9	5.65	5	3/leg	–	4.2	E
COLLIE-II	$0.35 \times 0.38$ (L $\times$ H)	Trot, Pace	0.25	0.15	–	6/leg	–	0.7	E
SCOUT -I	0.2(L)	Walk, Run	–	1.2	–	1/leg			E
SCOUT-II	$0.55 \times 0.48 \times 0.27$ (L $\times$ W $\times$ H),0.32(l)	Bound	1.3	23.7	–	2/leg	0.53	2.3	E
WRAP-I	–	Trot, Crawl	0.2	60	–	3/leg	–	–	E
BISAM	0.7(H)	Stable walk	–	23	–	4/leg	–	–	E
JROB-I	–	Trot- walking	–	31.5	28	3/leg	–	–	E
JROB-II	–	Trot- walking	–	29.1	–	3/leg	–	–	E
SILO4	$0.31 \times 0.31 \times 0.3$ (L $\times$ W $\times$ H),0.24(l)	Periodic and non-periodic gait	0.55	30	15	3/leg	0.0003	1.77	E
TEKKEN-II	0.3 (L), 0.25 (l)	Trot	0.7	4.3	–	4/leg	0.37	2.3	E
TEKKEN-III	–	Trot, Walk	0.7	10	–	4/leg	–	–	E
TEKKEN-IV	0.3 (L), 0.264 (l)	Trot, Walk	0.5	9.7	–	4/leg	0.099	1.67	E
KOLT	$1.75 \times 0.6 \times 0.8$ (L $\times$ W $\times$ H),0.7(l)	Trot	1.1	75	–	3/leg	0.18	0.63	E
MRWALL-SPECT	–	Crawl	0.008	–	–	3/leg	–	–	E
Air hopper	$1.29 \times 1.2 \times 0.6$ (L $\times$ W $\times$ H)	–	–	34.6	–	4/leg	–	–	P
AiDAN-III	0.3(l)	Trot, Walk	0.33	12.3	3	3/leg	0.04	–	E
qRT-I	$1 \times 0.5 \times 1$ (L $\times$ W $\times$ H)	Trot	1.3	60	40	3/leg	–	1.3	Hy
qRT-II	$1 \times 0.5 \times 1$ (L $\times$ W H)	Trot	1.3	60	40	3/leg	–	1.3	Hy
KAMAMBARE	$0.25 \times 0.26 \sim 0.74 \times 19$ (L $\times$ W $\times$ H)	Chameleon Mode	–	1.3	–	4/leg	–	–	E
PATRUSH	$0.36 \times 0.24 \times 0.33$ (L $\times$ W $\times$ H)	Trot	0.6	5.2	–	3/leg	–	1.67	E
KOTETSU	$0.34 \times 0.19 \sim 0.25 \times 0.35$ (L $\times$ W $\times$ H)	Walk	0.2	5.2	–	3/leg	–	0.58	E
VU Quadruped	$0.46 \times 0.64 \times 0.38$ (L $\times$ W $\times$ H)	Walk- Trot	0.23	6.9	9.1	3/leg	–	0.5	P
ROBO CAT-I	$0.34 \times 0.3 \times 0.23$ (L $\times$ W $\times$ H)	Trot running	–	6.8	–	2/leg	–	–	E
PAW	$0.49 \times 0.24 \sim 0.36 \times 0.16$ (L $\times$ W $\times$ H) l = 0.21	Bound	1.2	15.7	–	1/leg	0.7	2.4	E
RUSH	$0.3 \times 0.2 \times 0.2$ , (L $\times$ W $\times$ H)l = 0.2	Bound	0.9	4.3	–	1/leg	0.41	3	E
CHEETAH- CUB	L = 0.205, l = 0.158	Trot	1.42	1.1	–	2/leg	1.3	6.92	E
QUADRUPED	$1.05 \times 0.35 \times 0.95$ (L $\times$ W $\times$ H) l = 0.66	Trot	2.2	38	–	3/leg	0.88	2.09	E
AIBO RES-210A	L = 0.289, l = 0.129	Walk	0.294	1.4	–	3/leg	0.07	1.01	E
NUDT QUADRUPED	$1.2 \times 0.5 \times 0.6$ (L $\times$ W $\times$ H)	Trot	0.83	60	–	4/leg	–	0.7	Hy
JINPOONG	$1.1 \times 0.4 \times 1.2$ (L $\times$ W $\times$ H)	Walk	–	120	60	4/leg	–	–	Hy
MBBOT	–	Trot	2	100	–	4/leg	–	–	Hy
BABY ELEPHAN	$1.2 \times 0.6 \times 1$ (L $\times$ W $\times$ H)	Trot	0.5	130	100	3/leg	–	0.41	Hy

BIONIC QUADRUPED	1.2 × 0.38 × 1 (L × W × H)	Trot	0.83	120	–	4/leg	–	0.7	Hy
SCALF-I	1 × 0.4 × 0.68 (L × W × H)	Trot	1.8	123	80	3/leg	–	1.8	Hy
HyQ	1 × 0.5 × 0.98 (L × W × H), 0.68(l)	Trot	2	80	–	3/leg	0.6	2	Hy/E
Star1ETH	0.6(L), 0.49(l)	Bound	1	23	25	3/leg	0.21	1.6	E
ANY mal	–	Free gait	1	30	10	3/leg	–	–	E
MIT cheetah I	–	Trot-running	6.1	33	–	2/leg	–	–	E
Quadro	0.9(L)	–	0.2	35	3	–	–	0.23	E
HUBODOG	0.8 (L), 0.6 (l)	Trot	0.55	42	24	3/leg	0.05	0.69	E
Big Dog 1	1 × 0.3 × 0.8 (L × W × H)	Trot Run	1.8	90	50	4/leg	–	1.8	Hy
Big Dog 2	1.1 × 0.3 × 1 (L × W × H)	Bound	3.5	109	154	4/leg	–	3.18	Hy
LS3	1.7(H)	Trot	–	590	181	3/leg	–	–	Hy
LittleDog	0.3 (L)	–	0.25	2.85	–	3/leg	–	0.84	E
Cheetah	1.7(H)	Gallop Run	12.5	–	–	3/leg	–	–	–
Wild cat	1.17(H)	Trot, bound Gallop,	8.8	154	–	3/leg	–	–	Hy
SPOT	1.1 × 0.5 × 0.84 (L × W × H)	–	1.6	30	14	3/leg	–	–	–

### 2.1.5. Robótica Modular

La robótica modular o los robots modulares son conjuntos de robots o módulos acoplados, los cuales pueden configurarse para adaptar diferentes morfologías, por ende una amplia cantidad de movimientos. Los módulos de estos robots comúnmente contienen un actuador que les permite desplazarse de manera independiente. En algunos casos estos robots requieren de estrategias CPG (Central pattern generators), tablas de movimiento o generadores sinusoidales que le permiten estimar las posiciones adecuadas para los actuadores para poder lograr un desplazamiento y a su vez controlar sus movimientos. Para la locomoción de este tipo de robots se busca la capacidad de trasladarse de un lugar a otro en diferentes escenarios dependiendo de su morfología. Por su parte, el estudio para mejorar este aspecto consta de la implementación de métodos para coordinar el movimiento de los módulos, partiendo de considerar la configuración del robot y su entorno, todo esto se logra a través de sensores, simuladores, redes neuronales, etc. Es importante mencionar que al aumentar los módulos del robot, también se aumenta la

complejidad de movimiento y la movilidad resulta mucho más limitada por el diseño de la estructura mecánica. Las principales ventajas de estos robots son su capacidad de desplazamiento por espacios angostos, gran estabilidad estática y dinámica, capacidad de tracción, adaptabilidad a gran variedad de terrenos, versatilidad, entre otras más. La unión de todas estas características convierten a estos robots en mecanismos perfectos para la realización de tareas como operaciones de búsqueda y rescate o exploración en general, inspección en diferentes entornos y muchas otras aplicaciones que son posibles debido a su locomoción [31].

La construcción de estos robots se realiza haciendo uso de módulos que permiten crear diferentes tipos de cadenas cinemáticas y/o cambiar la morfología de la estructura [32, 50]. El diseño del robot depende de las características del módulo entre las cuales se destacan principalmente las siguientes:

- **Caras:** Definen la formula del modulo y poseen mecanismos que permiten la unión con otros módulos [51, 50].
- **Grados de libertad:** Indican la cantidad de ejes de rotación que posee el modulo las cuales pueden ser lineales, rotacionales o la combinación de los dos dependiendo del actuador implementado [52, 50].
- **Escalabilidad:** Es la capacidad de adaptación que posee el módulo al unirse con otros módulos [12, 50].
- **Comunicación:** Es el protocolo usado en un módulo para compartir información con otros módulos o dispositivos [53, 50].

Uno de los robots modulares más avanzados que existen hasta el día de hoy es el M-TRAN (Modular transformer), el cual fue desarrollado en el Instituto Nacional de Ciencias y Tecnologías Industriales avanzadas de Japón (AIST). La versión actual de este robot ha sido el resultado

de más de 10 años de investigaciones. Se trata de un robot modular híbrido, que puede tener diferentes configuraciones, lo que le permite formar topologías de cadenas o retículos. Se han desarrollado tres generaciones de módulos en total, el M-TRAN I,II y III [20]. En la figura 2.7, se puede observar los módulos de este robot junto con las diferentes configuraciones que puede realizar.

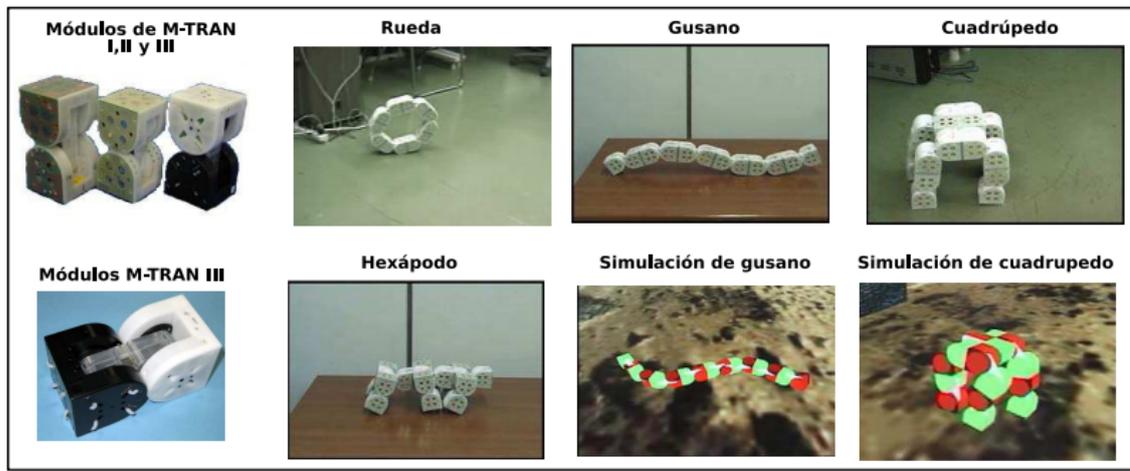


Figura 2.7: Módulos y configuraciones robot M-TRAN Tomado de [20].

Otro de los robots más conocidos en este campo de la robótica es el SuperBot. Este es un robot modular creado en el laboratorio de robótica polimórfica del ISI (Information Science Institute) en la Universidad de California sur. El modelo diseñado es de los más modernos y está inspirado en todos los desarrollos de robots modulares complejos como el M-TRAN. Es un proyecto financiado por la NASA y el DARPA. Inicialmente se desarrolló para uso en aplicaciones espaciales. Este está en constante estudio para emplearse como una plataforma móvil que pueda desplazarse por la superficie de otro planeta y recolectar información [20]. En la Figura 2.8, se observan los módulos de este robot y las diferentes configuraciones que puede realizar.

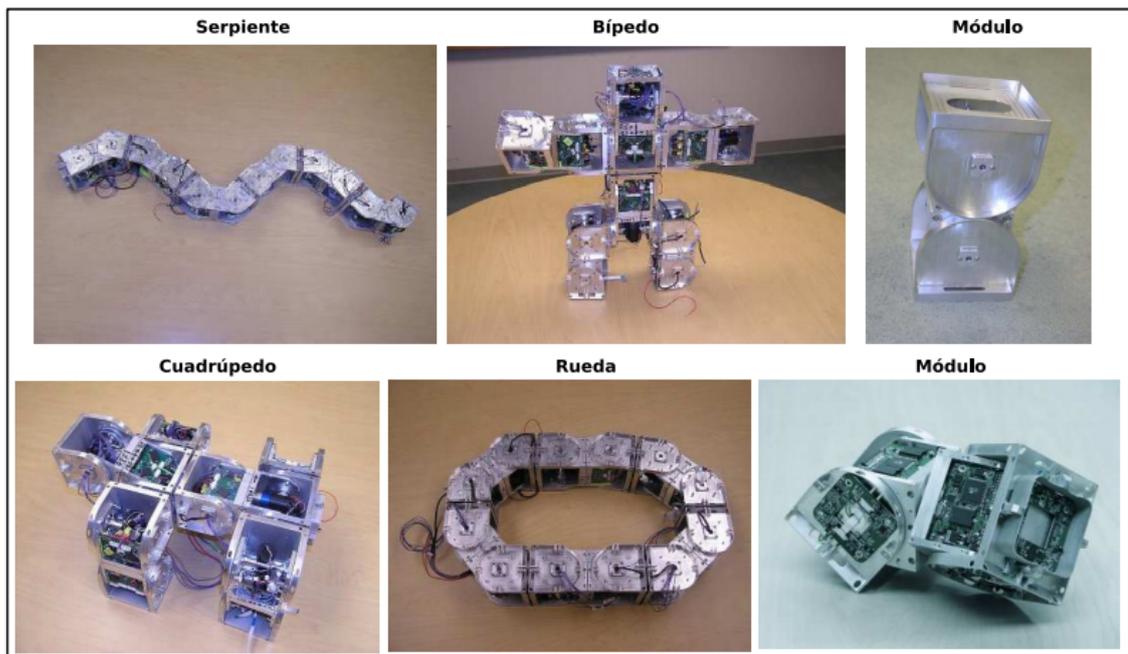


Figura 2.8: Módulo SuperBot y sus diferentes configuraciones *Tomado de [20]*.

### 2.1.6. Canino: Principios de Locomoción

Un canino es una especie perteneciente a la familia Cánidos del orden de los carnívoros. Esto incluye zorros, lobos, chacales y perros domésticos. Los caninos son reconocidos por sus piernas largas y delgadas. Además de esto, su musculatura axial le permite moverse con mayor velocidad y agilidad [54].

Los caninos emplean estrategias para desplazarse con la finalidad de optimizar energía. Para lograr el desplazamiento, emplean dos tipos de pasos: los simétricos como caminar, trotar y correr donde cada una de sus patas son controladas simultáneamente en un espacio de tiempo y los asimétricos como saltos y galope donde la caída de cada miembro se ejecuta en un instante de tiempo diferente.

La locomoción de un perro esta generada por un periodo el cual representa un paso de cada pata independiente del tipo de desplazamiento que se requiere. Este paso esta conformado por una fase de balanceo y otra de apoyo en la cual se requiere la fuerza necesaria para generar el movimiento del perro. Estos animales ejercen una fuerza para lograr moverse en el ambiente por lo tanto es importante lograr un equilibrio entre las articulaciones de los músculos que controlan el movimiento. Con base en esto, se emplea la cinemática y cinética para lograr la locomoción adecuada ya que la cinética estudia la fuerzas que actúan en los cuerpos rígidos, mientras que la cinemática investiga sobre el movimiento producido por esas fuerzas [55].

### **Movimiento**

Esta es la habilidad que tiene el canino de desplazarse haciendo uso de sus miembros anteriores y posteriores. Para que este sea correcto, debe desarrollarse con el menor esfuerzo y la máxima eficiencia. Adicionalmente, debe reflejar el equilibrio y la armonía de su estructura y hacer que se vea agradable a la vista [56].

En la estructura de cada canino no existen diferencias significativas en el número de huesos, músculos y articulaciones. Sin embargo, dependiendo de la raza puede variar el tipo de movimiento y sus particularidades. Para el estudio del movimiento de un perro, son importantes las angulaciones que son los ángulos que se forman cuando se articulan los huesos. Esto se evidencia en la Figura 2.9 en la cual se presentan las angulaciones más importantes para el miembro anterior y posterior las cuales pueden variar dependiendo la raza ya que no todas poseen los mismos ángulos y/o largo de huesos [57].

#### ■ **Miembro anterior:**

Angulación hombro (escápulo-húmero) alrededor  $90^\circ$

Angulación codo (húmero-radio-cubital) alrededor  $135^\circ$

■ **Miembro anterior:**

Angulación coxofemoral alrededor  $100^\circ$

Angulación rodilla (fémur-tibia-rotula) alrededor  $100^\circ$

Articulación del garrón alrededor  $120^\circ$

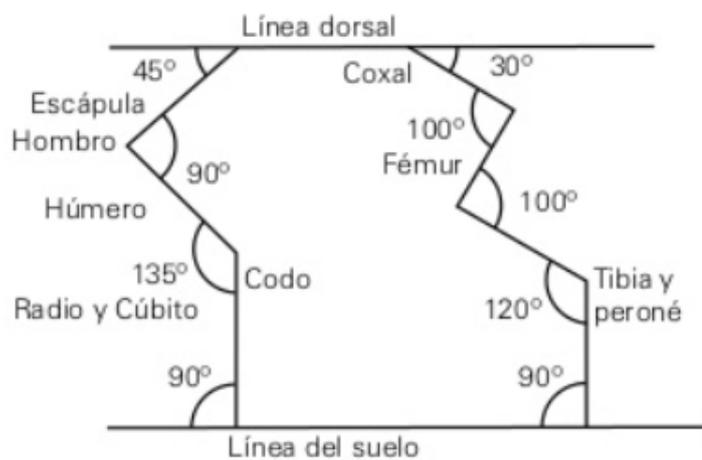


Figura 2.9: Angulaciones miembro anterior y posterior Tomado de [58].

A pesar de tener las angulaciones definidas, no es posible identificar si el movimiento se está realizando correctamente por el ser humano. Por lo tanto, a partir de la estructura se toman zonas de referencia que permiten realizar la evaluación del movimiento como se presenta en la Figura 2.10 aplicando el mínimo esfuerzo y la máxima efectividad [56, 57].

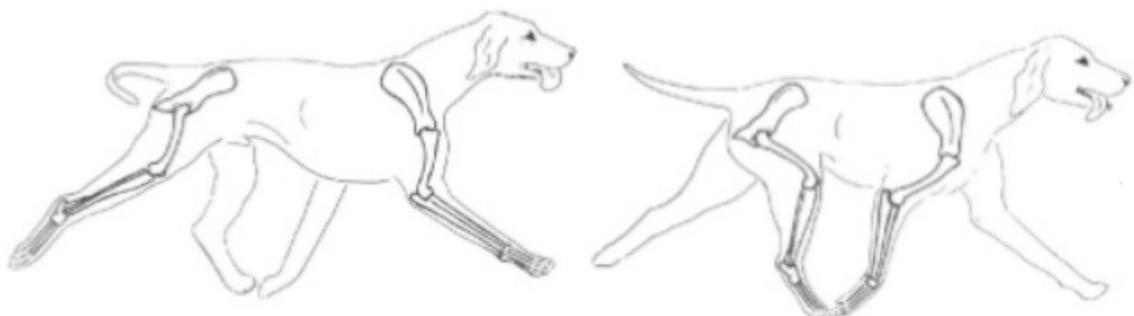


Figura 2.10: Movimiento correcto miembro anterior y posterior Tomado de [58].

## Tipos de movimiento

Todo movimiento de un canino para desplazarse esta conformado por un **paso** que es la distancia entre dos huellas consecutivas del mismo miembro y un **ritmo** que es establecido por la secuencia y/o orden en el que se apoyan los miembros en el suelo los cuales pueden ser como se mencionan a continuación [57].

- **2 Tiempos:** Se apoyan de manera alternada y al tiempo dos miembros (una mano y pata juntas).
- **3 Tiempos:** Se mueve solo un miembro, luego 2 miembros y finalmente otro solo.
- **4 Tiempos:** Cada uno de los miembros se mueve individualmente de tal manera que siempre haya uno en el aire y tres en el suelo.

A continuación se presentan los tipos movimientos adoptados por los caninos.

### 1. Paso-Marcha-Caminar

Posee un ritmo de 4 tiempos en el cual solo se encuentra un miembro en movimiento y los otros tres soportan el peso de perro. Así mismo, este permite mantener el equilibrio y la estabilidad del perro [57]. En la figura 2.11 se presenta el movimiento del perro y el orden en el cual se realiza el movimiento de sus patas.

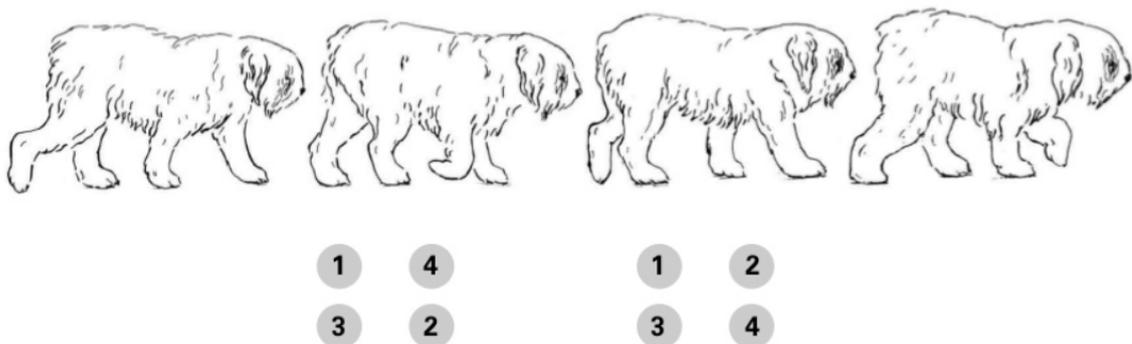


Figura 2.11: Paso-Marcha-Caminar Tomado de [58].

## 2. Pasuqueo

En la figura 2.12 se presenta el movimiento del perro y el orden en el cual se realiza el movimiento de sus patas evidenciando que posee un ritmo de 2 tiempos en el cual dos miembros del mismo lado se mueven. Este movimiento particular en caninos de razas grandes, cachorros y perros viejos.

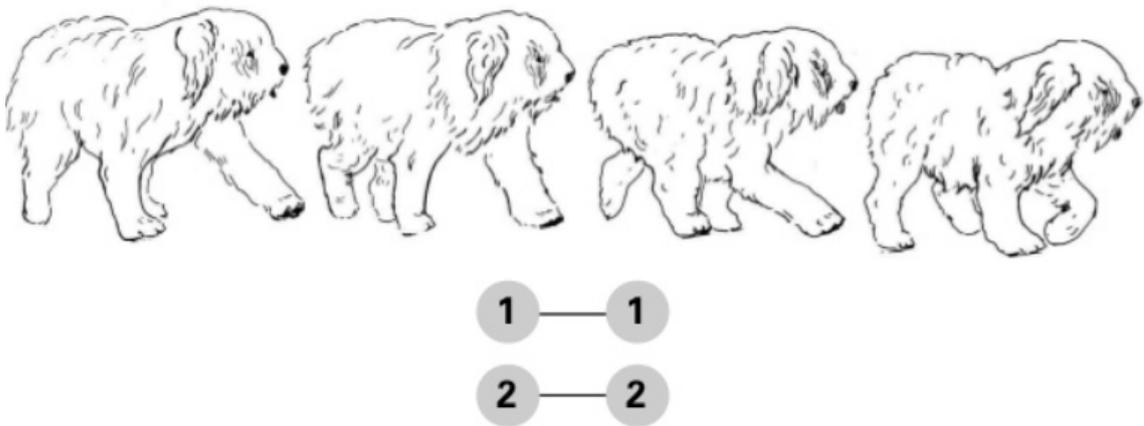


Figura 2.12: Pasuqueo Tomado de [58].

## 3. Trote

Posee un ritmo de dos tiempos con movimiento de sus miembros en diagonal como se muestra en la Figura 2.13 [57, 56].

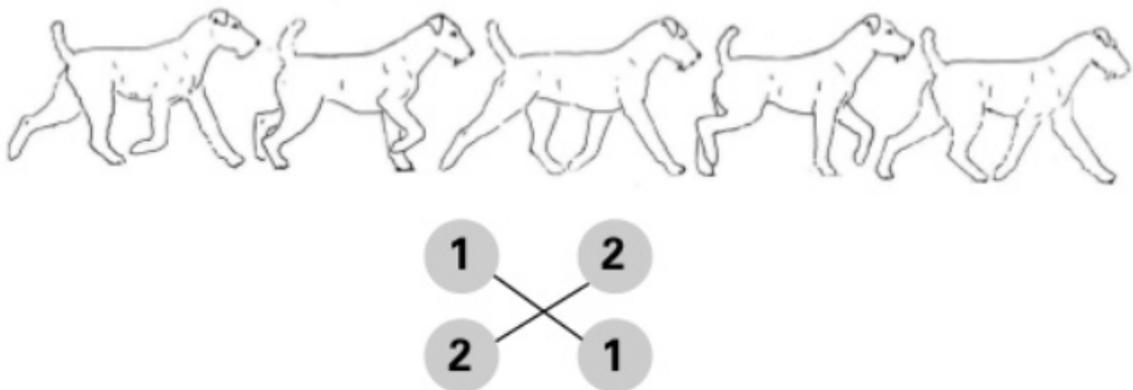


Figura 2.13: Trote Tomado de [58].

#### 4. Galope Corto

Este movimiento es de 3 tiempos en el cual se mueven dos miembros separadamente y dos en diagonal como se presenta en la Figura 2.14 [57, 56].

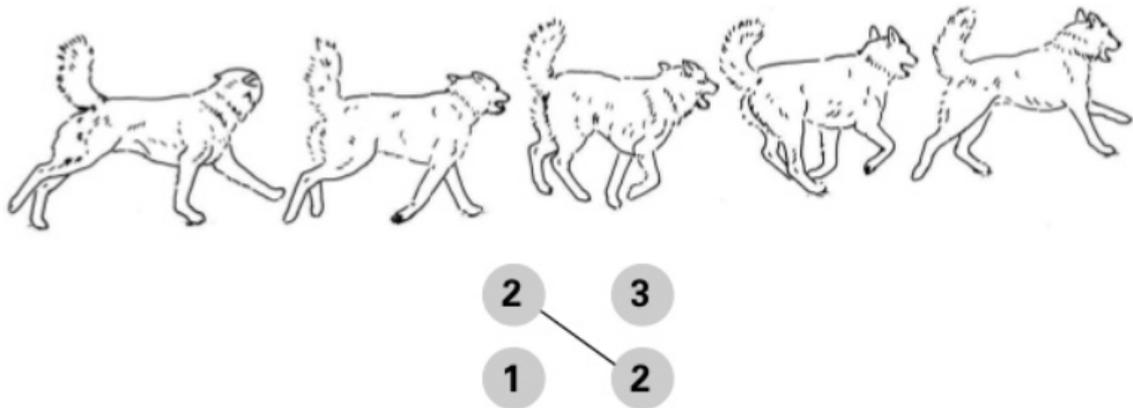


Figura 2.14: Galope Corto Tomado de [58].

## **Capítulo 3**

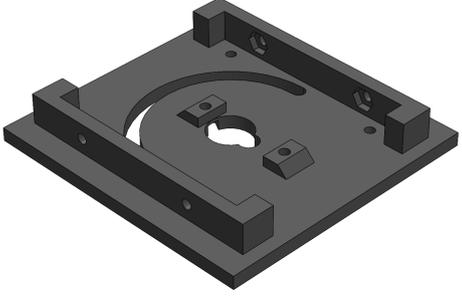
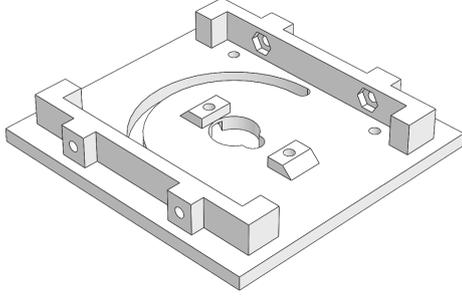
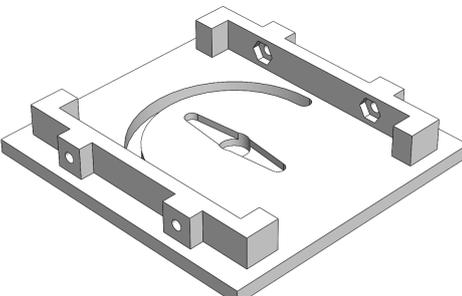
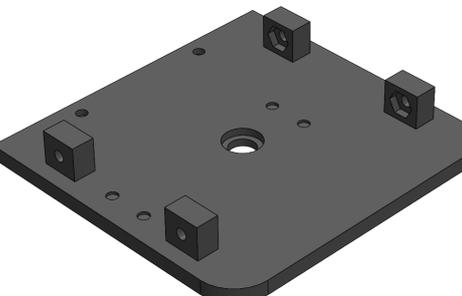
# **Propuesta y desarrollo de la arquitectura tipo canina**

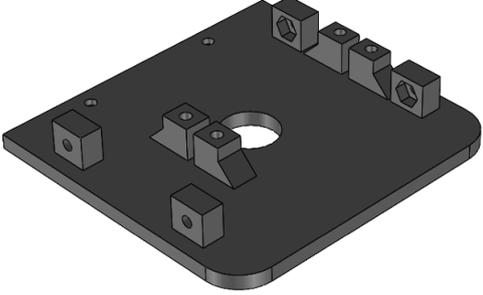
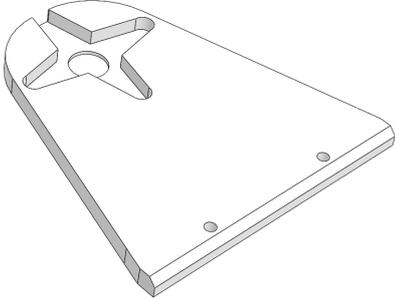
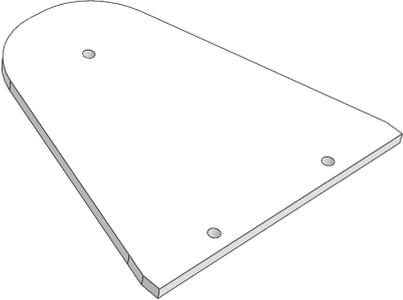
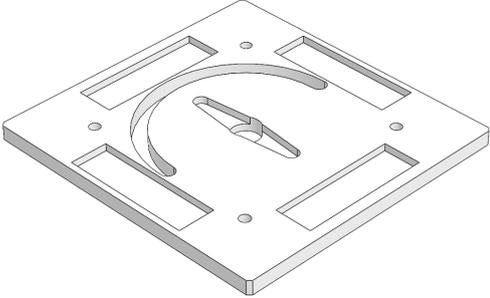
En el capítulo se presenta una descripción detallada de los módulos Mecabot 5.0 incluyendo los tipos de acoples. Posteriormente, se proponen diferentes arquitecturas cuadrúpedas para definir una tipo canina.

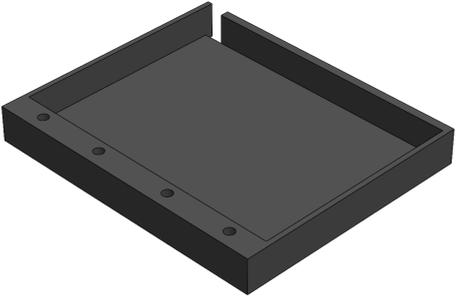
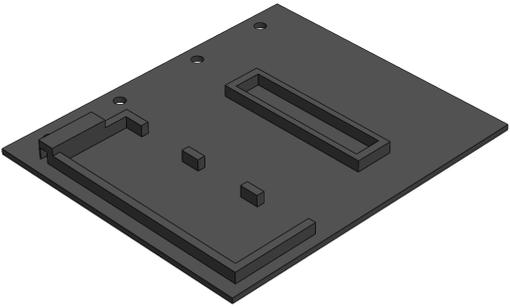
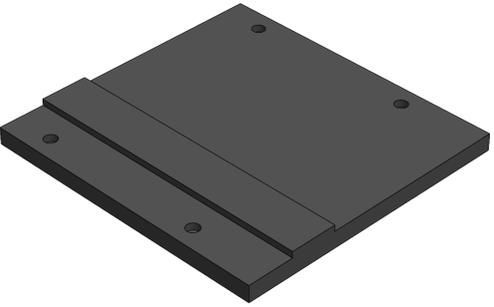
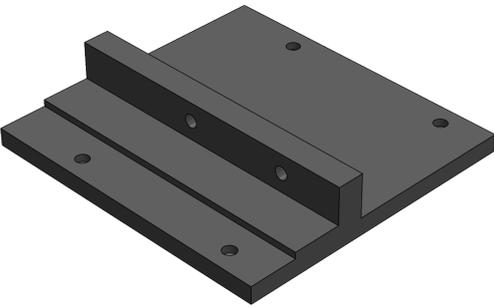
### **3.1. Especificaciones Mecabot 5.0**

El Mecabot 5.0 es un robot modular en su quinta versión desarrollado en la Universidad Militar Nueva Granada por el grupo de investigación DAVINCI. Este está construido de dos semi-módulos estructurados cada uno de un cuerpo y un pivote los cuales son diseñados en el software Solidworks y prototipado con impresión 3D. En la Tabla 3.1 se indican los componentes diseñados y las cantidades requeridas para conformar el módulo Mecabot 5.0.

Tabla 3.1: Componentes Mecabot 5.0

Componente	Cantidad
	<p>Cara Servomotor 1810MG – Cuerpo del Mecabot</p> <p>2 piezas</p>
	<p>Cara Servomotor 1810MG – Pivote del Mecabot</p> <p>1 pieza</p>
	<p>Centro Servo 18010MG - Pivote del Mecabot</p> <p>1 pieza</p>
	<p>Cara Rodamiento – Cuerpo del Mecabot</p> <p>2 piezas</p>

	<p>Cara Servomotor 1501MG – Cuerpo del Mecabot</p>	<p>2 piezas</p>
	<p>Pivote Servomotor 1501MG – Pivote Mecabot</p>	<p>2 piezas</p>
	<p>Pivote Rodamiento- Pivote Mecabot</p>	<p>2 piezas</p>
	<p>Pieza rueda- Mecabot</p>	<p>1 pieza</p>

	<p>Caja Baterías - Mecabot</p>	<p>1 pieza</p>
	<p>Tapa Caja baterías - Mecabot</p>	<p>1 pieza</p>
<p>Componentes Adicionales</p>		
	<p>Tapa Inferior- Cuerpo Es usado principalmente para realizar acoples de caras laterales, con cara inferior.</p>	<p>Depende del uso necesario.</p>
	<p>Tapa Superior- Cuerpo Es usado para realizar acoples de caras laterales con la cara superior.</p>	<p>Depende de la aplicación del módulo.</p>

A partir de los componentes se realiza el ensamble del módulo , obteniendo el modelo de la Figura 3.1 con las dimensiones generales en milímetros del módulo y los semi-módulos que lo conforman.

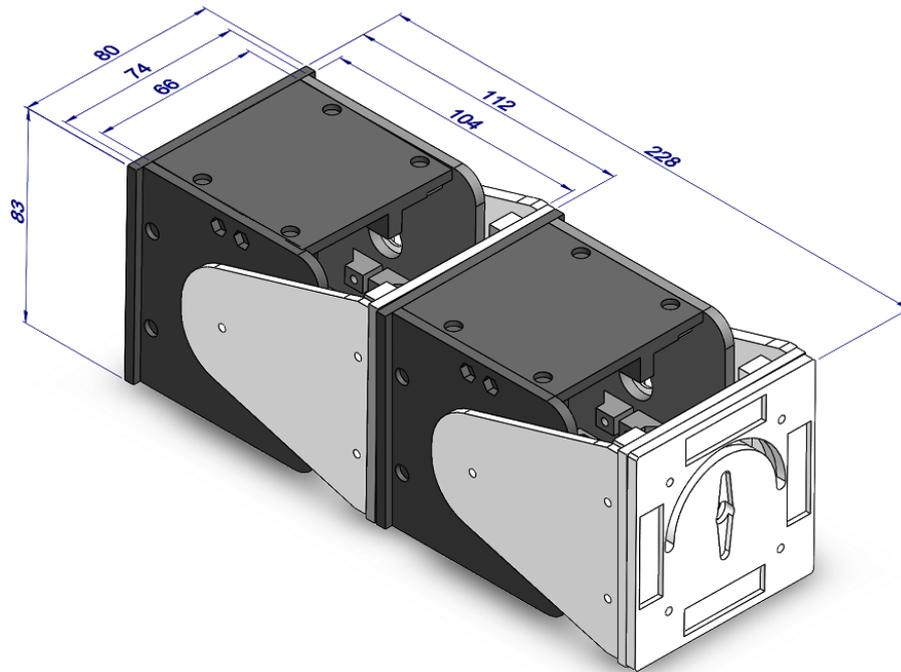


Figura 3.1: Dimensiones Mecabot 5.0

### 3.2. Tipos de acoples entre módulos Mecabot 5.0

La composición del módulo Mecabot 5.0 posee diferentes tipos de acoples entre sus semi-módulos que permiten abordar diferentes necesidades dependiendo del mecanismo o la configuración a desarrollar. Estos pueden realizarse por medio de las ruedas que contienen imanes para la unión y/o desacoplando una cara por completo y atornillarla en el lugar adecuado para lograr el acople necesario.

### 3.2.1. Acople Cara-Pivote

Esta configuración es la más implementada en el desarrollo de arquitecturas con Mecabot y consiste en acoplar la cara de un semi-módulo con el pivote del otro como se evidencia en la Figura 3.2.

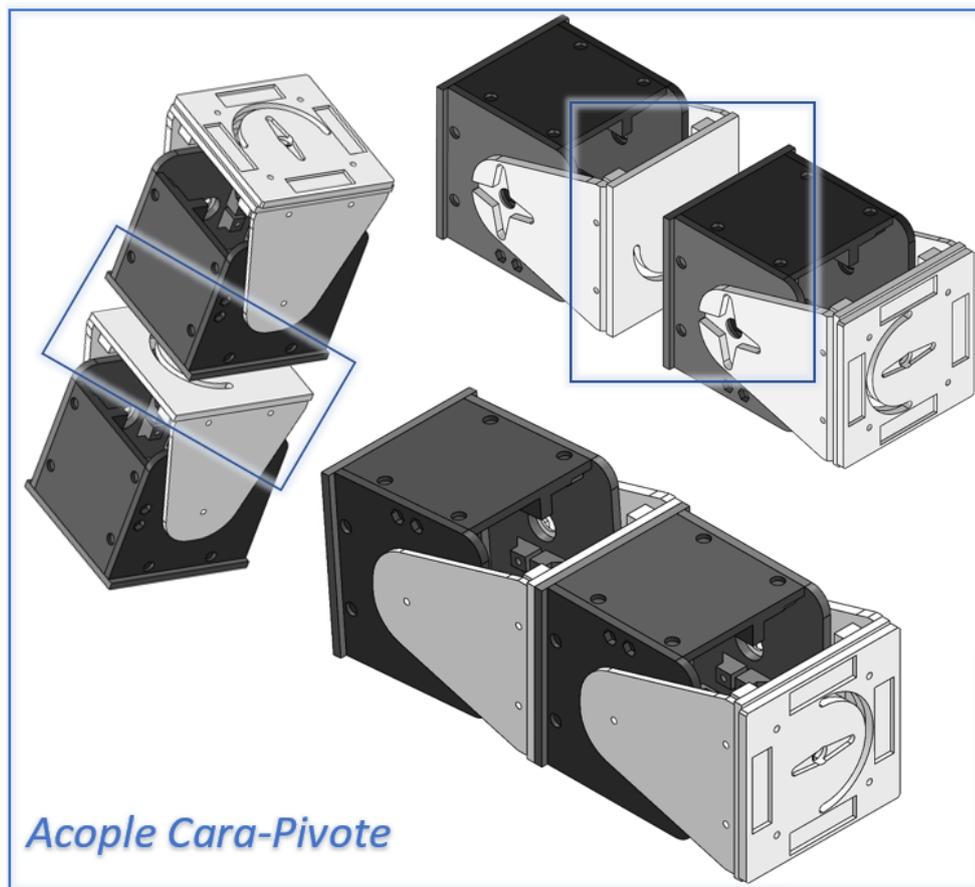


Figura 3.2: Acople Cara-Pivote Mecabot 5.0

En la Figura 3.3 se presentan los giros que puede realizar el semi-módulo en su pivote o con presencia de ruedas para adoptar diferentes configuraciones. Además de esto, si se requiere acoplar otro módulo cara-pivote, se deben usar los imanes de las ruedas exteriores los cuales están acoplados con o sin inversión.

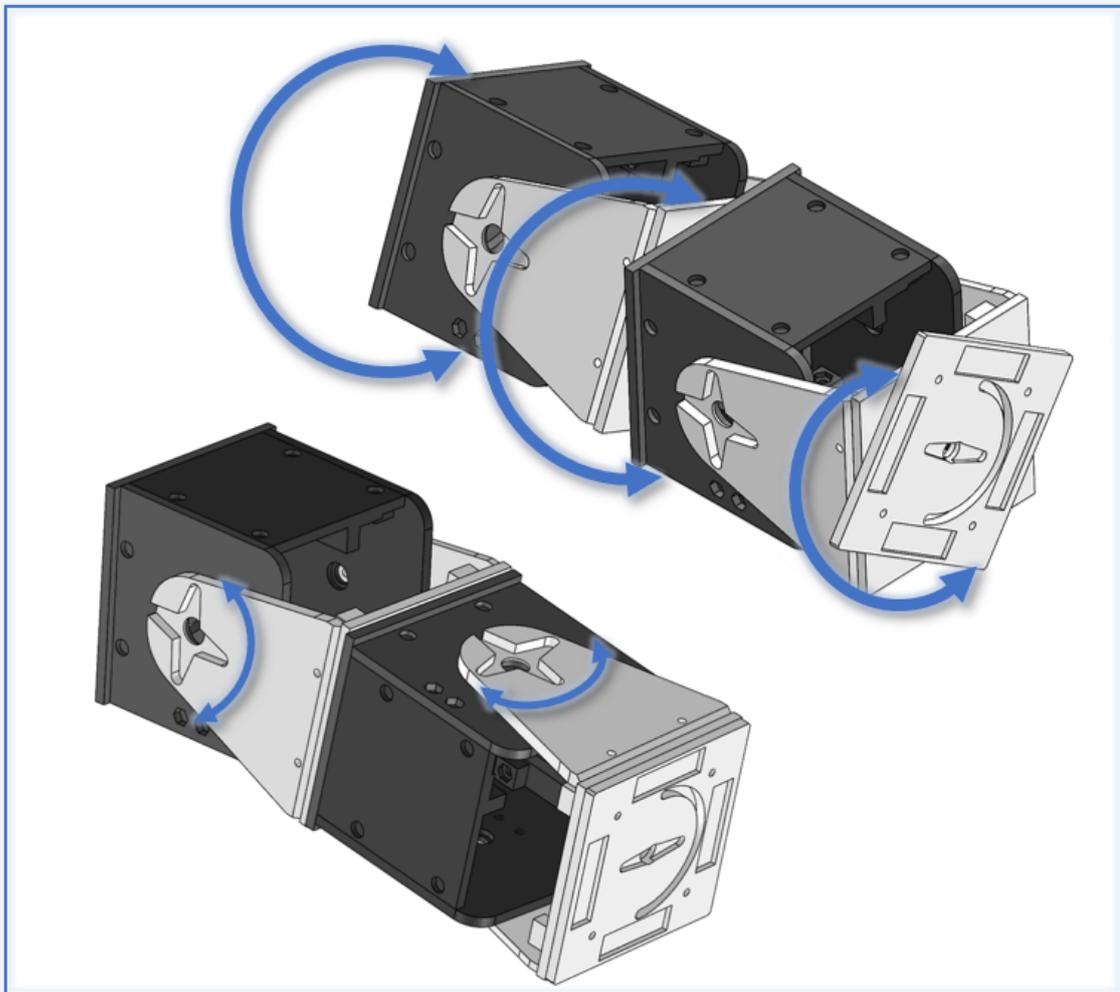


Figura 3.3: Movimientos permitidos acople Cara-Pivote Mecabot 5.0  
*Movimientos permitidos en las ruedas con imanes (superior), configuración Cara-Pivote invertida (inferior).*

### 3.2.2. Acople Pivote-Pivote

Este consiste en unir el componente cara servomotor 1810MG de dos semi módulos como se presenta en la Figura 3.4.

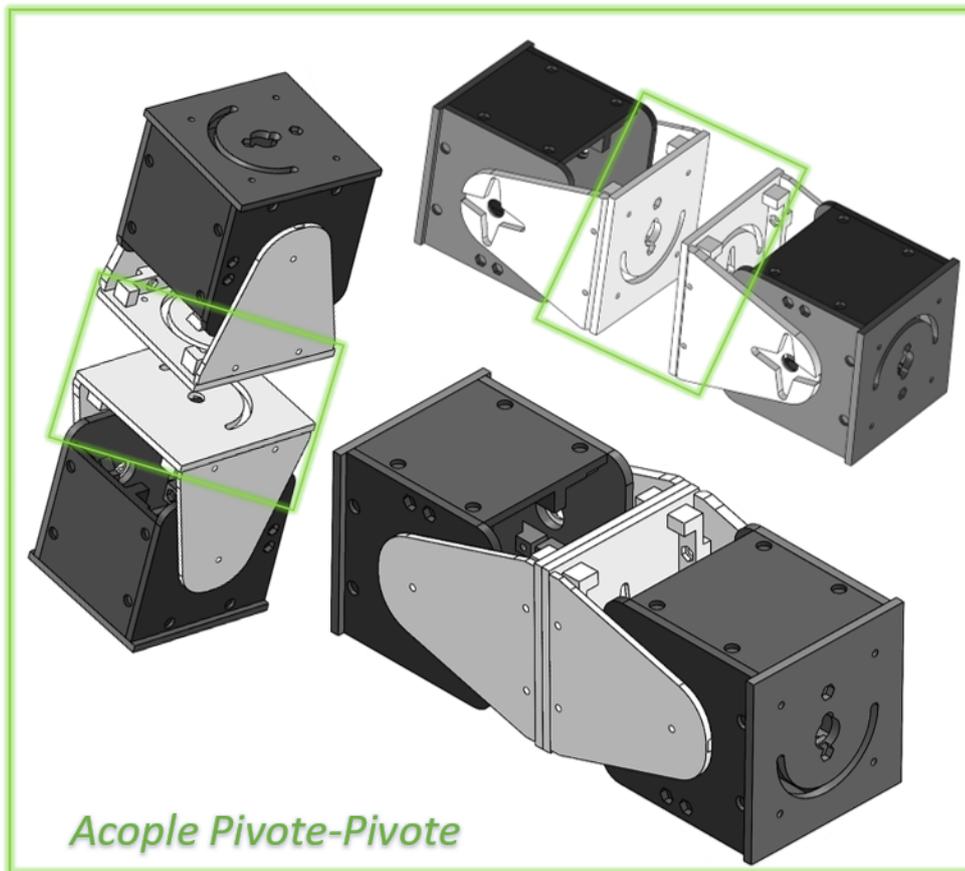


Figura 3.4: Acople Pivote-Pivote Mecabot 5.0

En la Figura 3.5 se presentan los movimientos permitidos para este acople. Además de esto, se presenta la configuración cuando se implementa una rueda con imán para unir las dos caras debido a que permite la rotación entre los dos semi módulos. Finalmente se encuentran los movimientos en los pivotes en la configuración invertida para los cuales se requiere programar dos motores para alcanzar la posición requerida.

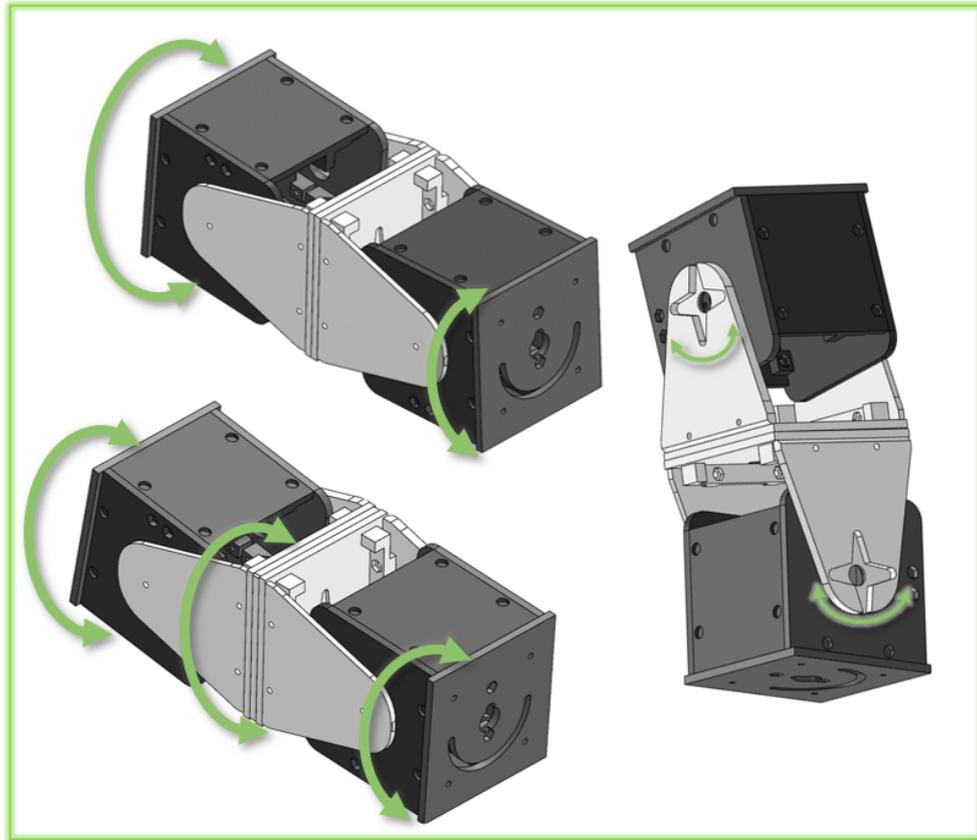


Figura 3.5: Movimientos permitidos acople Pivote-Pivote Mecabot 5.0  
*Movimientos permitidos acoplados por la cara de los pivotes(izquierda-superior),  
 movimientos permitidos en las ruedas con imanes (izquierda-inferior), configuración  
 Pivote-Pivote invertida (derecha).*

### 3.2.3. Acople Cara-Cara

Para realizar esta configuración se modifica la disposición de algunas piezas cambiando la pieza centro servo 1810MG del pivote por la pieza cara del servomotor 1810MG del pivote y se integra una pieza rueda para realizar el acople mediante los imanes que contiene como se presenta en la Figura 3.6.

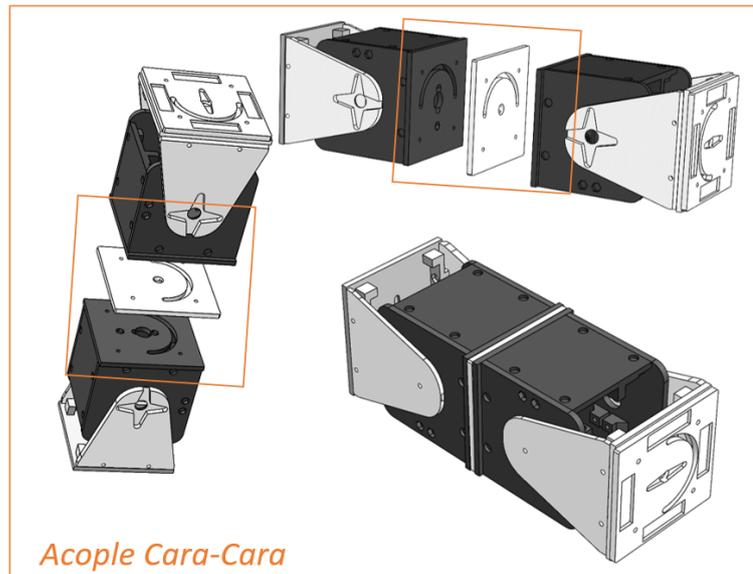


Figura 3.6: Acople Cara-Cara Mecabot 5.0

En la Figura 3.7 se presentan las rotaciones que pueden realizarse con dicha configuración al integrarse ruedas con imanes y en los pivotes de los semi módulos.

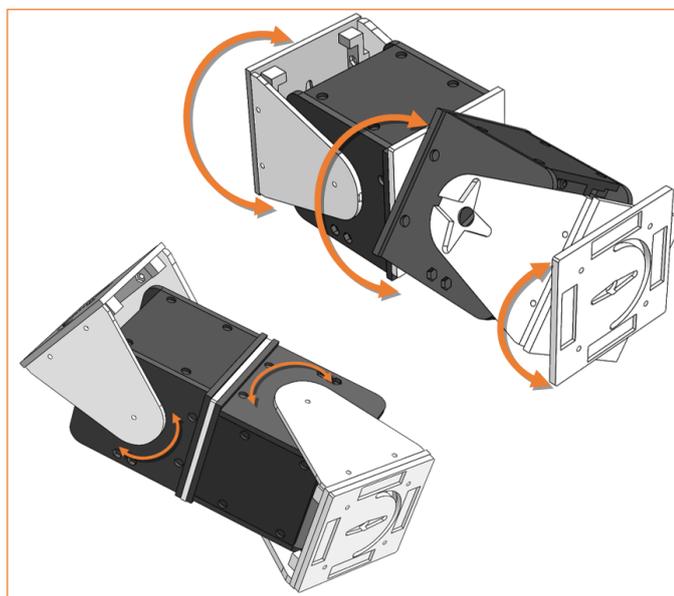


Figura 3.7: Movimientos acople Cara-Cara Mecabot 5.0  
*Movimientos permitidos en las ruedas con imanes (superior), movimiento de pivotes cara-cara invertida (inferior).*

### 3.2.4. Acople a Caras Laterales

Para realizar la configuración, se añaden como piezas adicionales la tapa superior e inferior del cuerpo de los semi módulos y de esta manera unir los semi módulos dejando la unión fija. Es implementado para unir semi módulos perpendicularmente y se realiza únicamente a las caras laterales de otro semi módulo para evitar interferencia con los pivotes. En la Figura ?? se presenta el acople de las caras laterales con el pivote y cuerpo donde este ultimo presenta una mayor limitación mecánica.

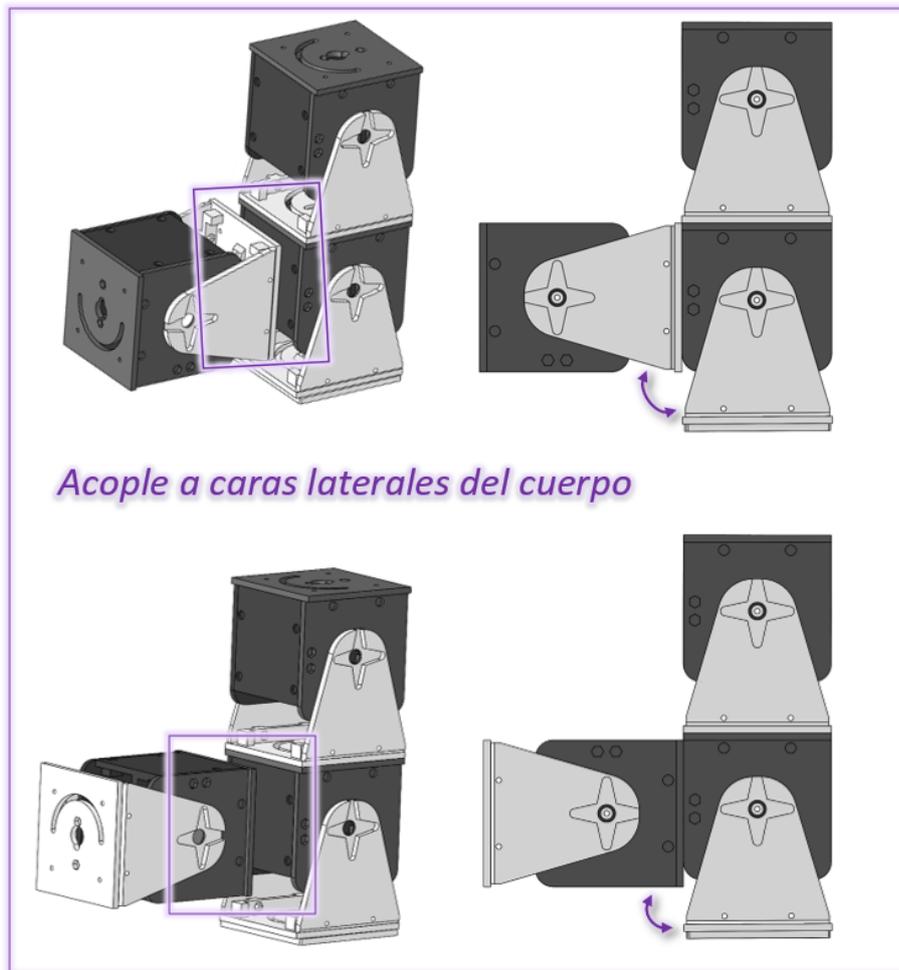


Figura 3.8: Acople Caras Laterales Mecabot 5.0  
*Acople con pivote(superior) y con cuerpo(inferior).*

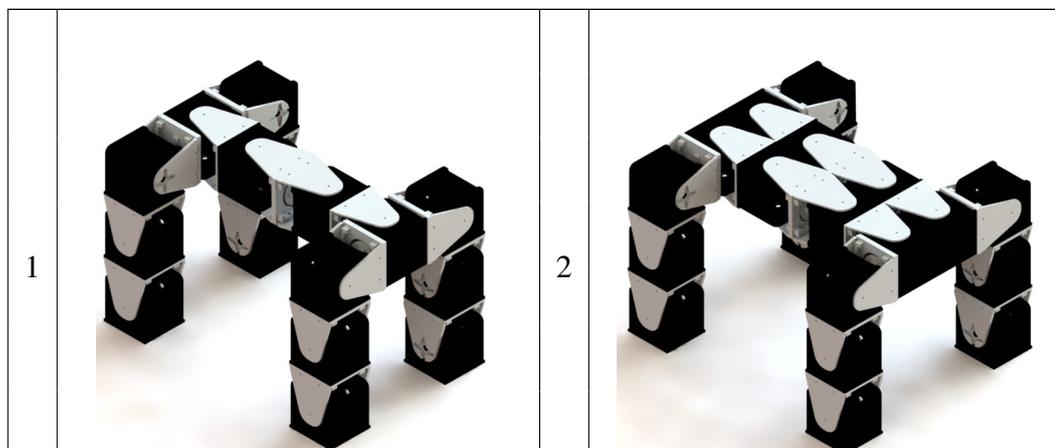
### 3.3. Propuesta de arquitecturas tipo canina utilizando sistema MECABOT 5.0

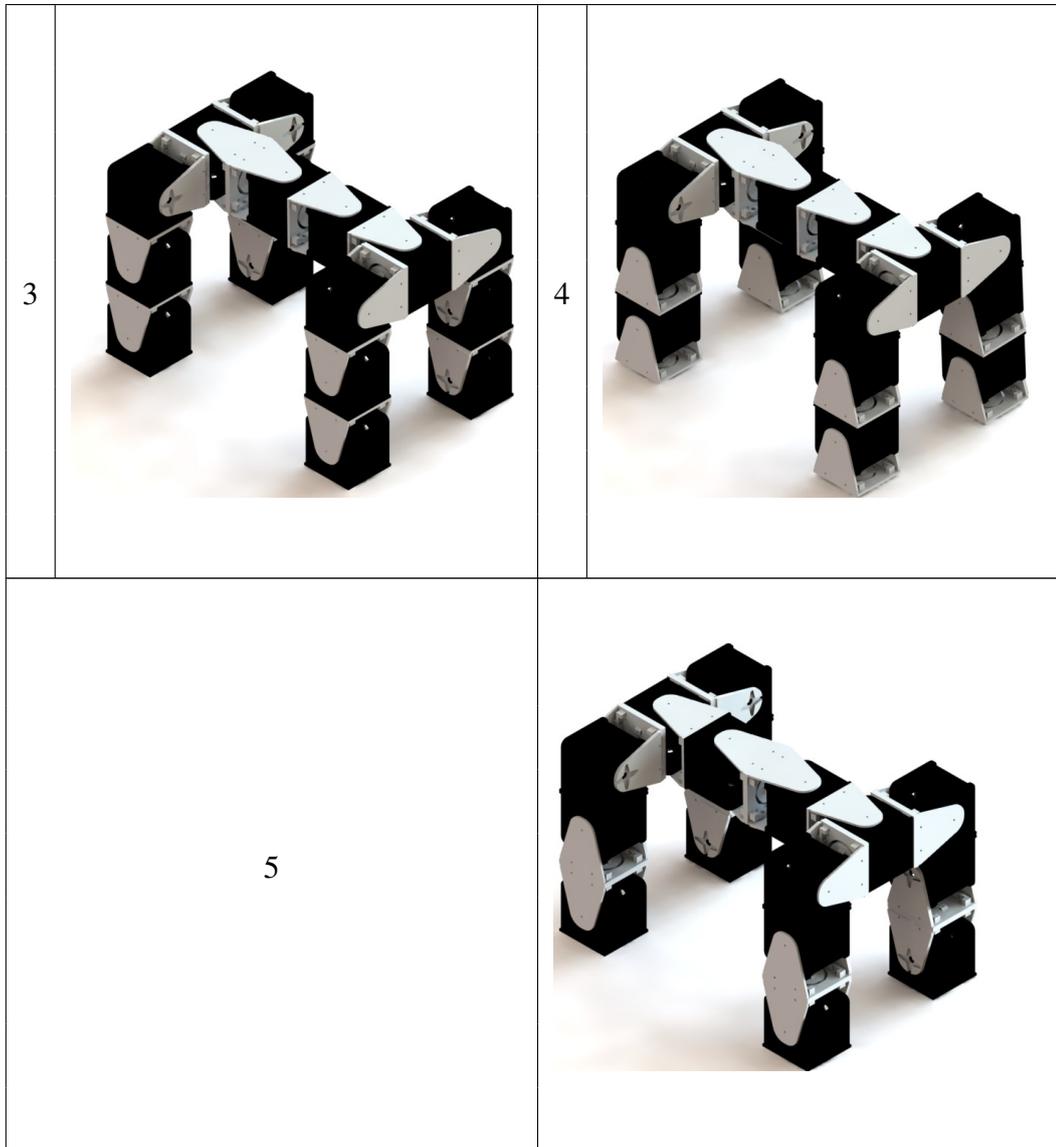
En la literatura se encuentran diferentes configuraciones cuadrúpedos de robots modulares que pueden implementarse con los módulos Mecabot como es el caso de la arquitectura tipo salamandra. Sin embargo, esta presenta limitaciones para desplazarse en terrenos irregulares con obstáculos por lo cual se busca una arquitectura bioinspirada en un canino que permita operaciones de búsqueda y rescate en terrenos irregulares con obstáculos.

En el diseño de la arquitectura, se busca imitar la locomoción de un canino, en el cual se realiza una aproximación de la disposición y grados de libertad de sus piernas y columna teniendo en cuenta el costo computacional y peso que genera adicionar grados de libertad en la arquitectura.

En Tabla 3.2 se encuentran cinco arquitecturas propuestas, entre ellas se vario la cantidad y disposición de los módulos y se realizo un análisis de las articulaciones para integrar la locomoción de sus movimientos básicos.

Tabla 3.2: Arquitecturas propuestas tipo canino.





A partir de las arquitecturas propuestas de la Tabla 3.2, en las cuales se tuvo en cuenta la anatomía de un canino para su elaboración. Además de esto, en la Tabla 3.3 se presentan los parámetros de comparación para determinar cual arquitectura es la apropiada para representar un canino.

Tabla 3.3: Comparación Arquitecturas Propuestas

Características Arquitecturas Propuestas					
Arquitectura	1	2	3	4	5
Peso (gr)	5388.52	6697.78	5388.52	5388.52	5388.52
DOF Columna	4	8	4	4	4
DOF Pierna	3	3	3	3	2
Adaptabilidad *	5	3	5	4	4
Estabilidad *	5	2	4	5	4
Similitud Canino*	5	4	4	4	3
Cantidad Módulos	8	10	8	8	8

\* Calificación de 1 a 5 . (1) Muy bajo (2)Bajo (3) Medio (4)Alto (5) Muy alto

- **Peso:** Es el peso total de toda la arquitectura teniendo en cuenta que los módulos se realizan en ABS con impresión 3D y se incluye el peso de componentes electrónicos correspondiente a servomotores y módulos de comunicación.
- **DOF Columna:** Son los grados de libertad que contiene la columna del canino.
- **DOF Pierna:** Son los grados de libertad que contiene cada pierna del canino.
- **Adaptabilidad:** Es la capacidad que tiene la arquitectura de desplazarse en diferentes tipos de terreno.
- **Estabilidad:** Es la competencia que posee la arquitectura para poder realizar los movimientos básicos de locomoción y atravesar obstáculos sin perder el equilibrio.
- **Similitud canino:** Es el parecido que tiene la arquitectura con un canino.
- **Cantidad módulos:** Número de módulos Mecabot 5.0 requeridos.

### 3.4. Modelado CAD de arquitectura integrada

Con base en los parámetros de la tabla 3.3 se define el modelo 1 como la arquitectura integrada la cual se presenta en la Figura 3.9 debido a que presenta un menor peso comparado con la arquitectura 2, los grados de libertad de la pierna corresponden a los de un canino, tiene mayor adaptabilidad, estabilidad y similitud. En la Figura 3.10 se presentan las dimensiones generales de la estructura donde el módulo color azul corresponde a la parte delantera del robot canino.



Figura 3.9: Arquitectura integrada tipo canino.

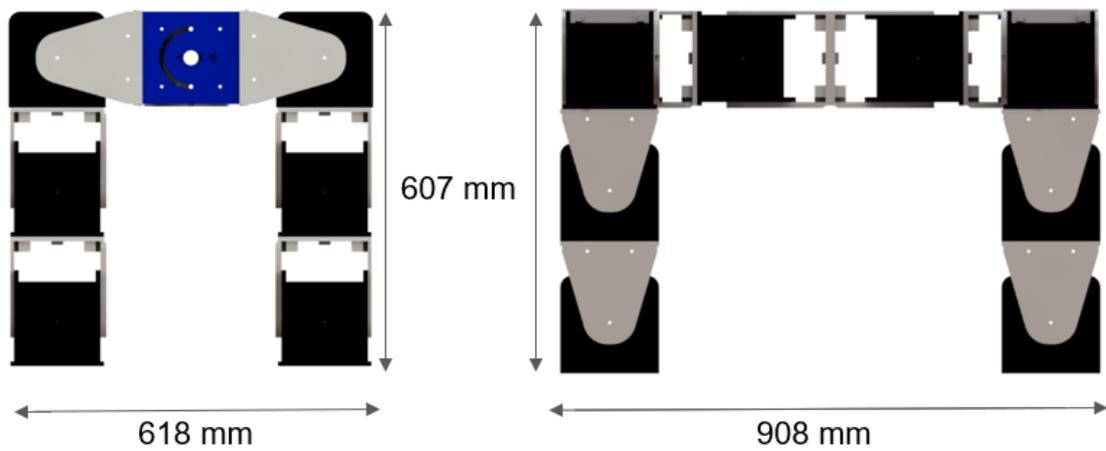


Figura 3.10: Dimensiones arquitectura integrada tipo canino..

### 3.5. Cinemática de la Columna

Se realiza un análisis de los movimientos del robot por medio de la cinemática de su espalda y sus piernas. En la Figura 3.11 se presentan los grados de libertad de la columna donde los sistemas coordenados cero y tres hacen referencia a la parte delantera y trasera del cuadrúpedo tipo canino.

Para determinar la cinemática directa de la columna, se proponen los parámetros de Denavit Hartenberg como se presenta en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Parámetros Denavit Hartenberg Columna

Articulación	$\theta$	$d$	$a$	$\alpha$
1	$\theta_1$	0	$a_1$	0
2	$\theta_2$	0	$a_2$	0
3	$\theta_3$	0	$a_3$	0

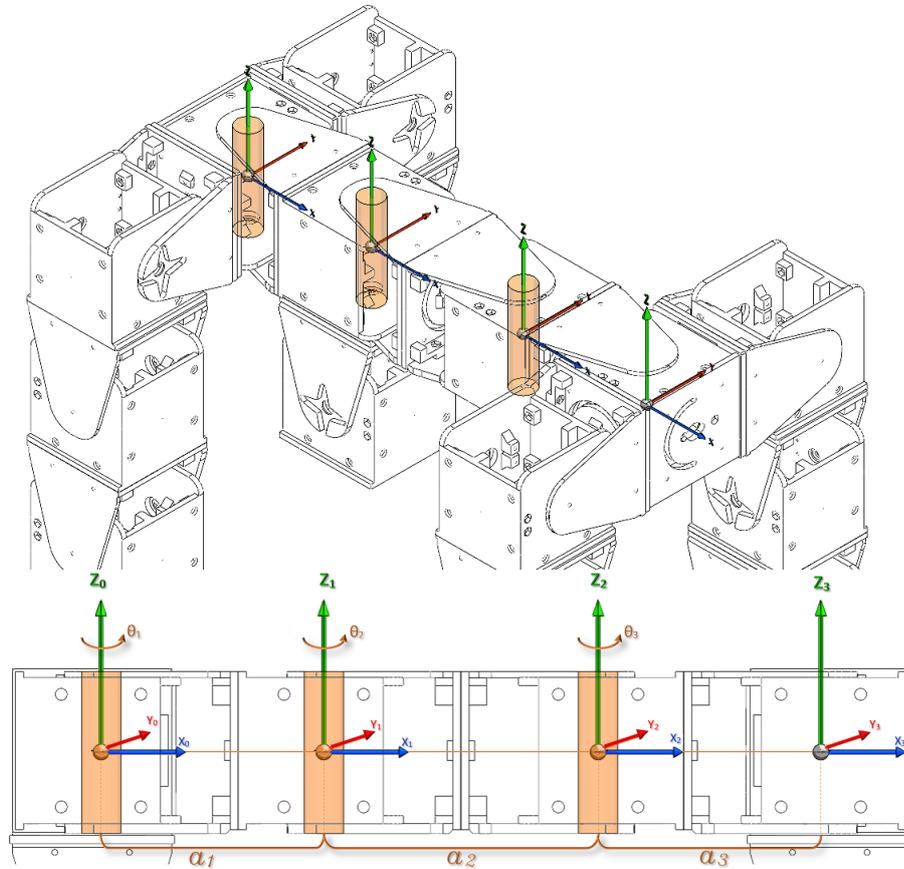


Figura 3.11: Diagrama DOF y sistema de coordenadas columna.  
 Vista isométrica (superior), vista frontal (inferior)

A partir de la tabla se obtiene la matriz de transformación dada por la ecuación 3.1.

$$A_0^3 = A_0^1 A_1^2 A_2^3 \quad (3.1)$$

Donde:

$$A_0^1 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 & 0 & a_1 C\theta_1 \\ S\theta_1 & C\theta_1 & 0 & a_1 S\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_1^2 = \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & a_2 C\theta_2 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & a_2 S\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_2^3 = \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & a_3 C\theta_3 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & a_3 S\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Reemplazando cada una de las matrices, se obtiene la matriz  $A_0^3$  de la ecuación 3.2.

$$A_0^3 = \begin{bmatrix} \sigma_2 & -\sigma_1 & 0 & a_2C(\theta_1 + \theta_2) + a_2C\theta_1 + a_3\sigma_2 \\ \sigma_1 & \sigma_2 & 0 & a_2S(\theta_1 + \theta_2) + a_2S\theta_1 + a_3\sigma_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} \sigma_1 = S(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ \sigma_2 = C(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \end{matrix} \quad (3.2)$$

### 3.6. Cinemática de las Piernas

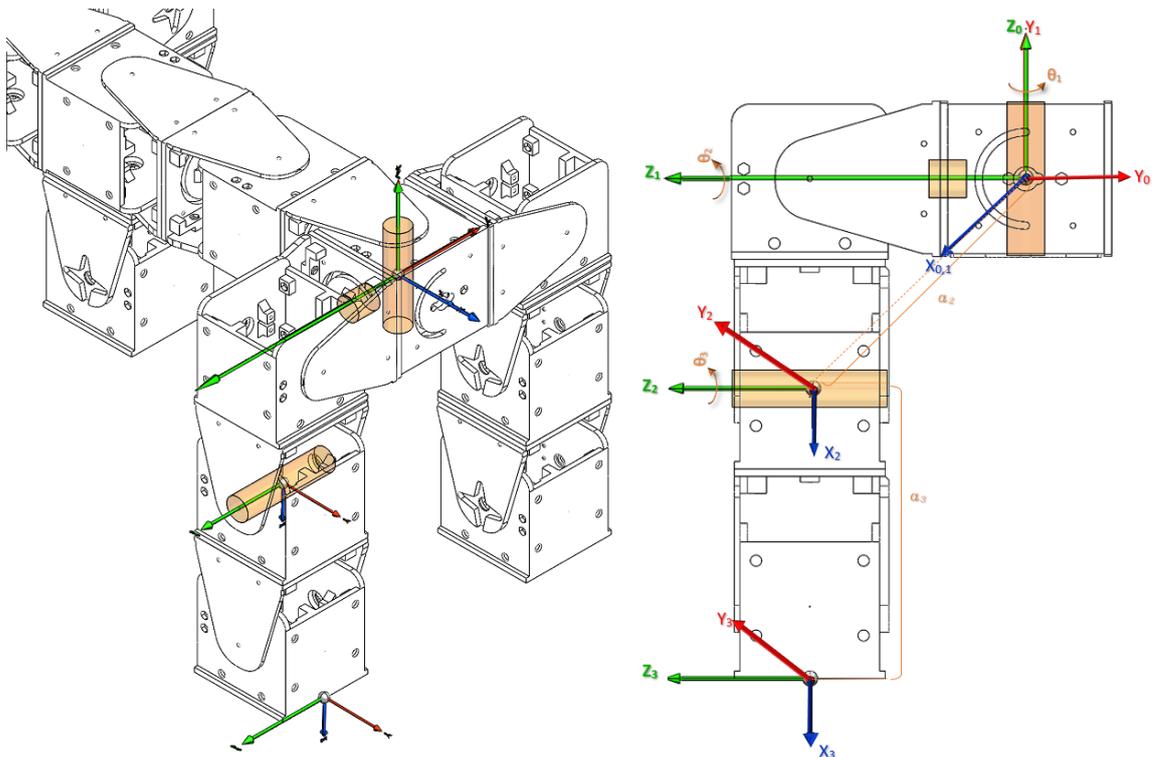


Figura 3.12: Diagrama DOF y sistema de coordenadas pierna.  
Vista isométrica (superior), vista lateral (inferior)

En la Figura 3.12 se presentan los grados de libertad relacionados con las piernas, en el cual se omite el relacionado con el ultimo pivote debido a que no se requiere para su loco-

moción. Adicionalmente, se evidencia que la parte delantera de la columna añade un grado de libertad. Sin embargo, la parte trasera presenta los mismos DOF al ser simétrico.

A partir del sistema de coordenadas, se determinan los parámetros de Denavit Hartenberg como se encuentra en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Parámetros Denavit Hartenberg Pierna

Articulación	$\theta$	$d$	$a$	$\alpha$
1	$\theta_1$	0	0	$\pi/2$
2	$\theta_2$	0	$a_2$	0
3	$\theta_3$	0	$a_3$	0

A partir de la tabla se obtiene la matriz de transformación dada por la ecuación 3.3.

$$A_0^3 = A_0^1 A_1^2 A_2^3 \quad (3.3)$$

Donde:

$$A_0^1 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & 0 & S\theta_1 & 0 \\ S\theta_1 & 0 & -C\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_1^2 = \begin{bmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & a_2 C\theta_2 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & a_2 S\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_2^3 = \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & a_3 C\theta_3 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & a_3 S\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Reemplazando cada una de las matrices, se obtiene la matriz  $A_0^3$  de la ecuación 3.4.

$$A_0^3 = \begin{bmatrix} C(\theta_2 + \theta_3)C\theta_1 & -S(\theta_2 + \theta_3)C\theta_1 & S\theta_1 & C\theta_1\sigma_1 \\ C(\theta_2 + \theta_3)S\theta_1 & -S(\theta_2 + \theta_3)S\theta_1 & -C\theta_1 & S\theta_1\sigma_1 \\ S(\theta_2 + \theta_3) & C(\theta_2 + \theta_3) & 0 & a_3 S(\theta_2 + \theta_3) + a_2 S\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\sigma_1 = a_3 C(\theta_2 + \theta_3) + a_2 C\theta_2 \quad (3.4)$$

En este punto es importante resaltar que la cinemática del robot sirvió para poder tener claridad donde se podían ubicar los ejes de rotación de cada articulación dentro del software de simulación Webots. La cinemática de la columna sirvió para poder ubicar el eje de rotación de la columna el cual permite el giro a derecha e izquierda del robot y la cinemática de las piernas permitió definir la posición de los ejes de rotación de cada una de las articulaciones de las extremidades del robot canino. Esto hizo posible que se pudiera obtener el movimiento esperado de las piernas para llegar a desarrollar un algoritmo de locomoción que permitiera avanzar, retroceder, girar y realizar los movimientos adicionales de sentarse y acostarse.

Por otro lado, los parámetros Denavit Hartenberg permiten analizar el movimiento del robot al asignar un sistema de coordenadas a cada una de las articulaciones y las matrices de transformación tanto de columna como de pierna sirven para implementar en futuros trabajos algoritmos de control del movimiento del robot cuadrúpedo tipo canino.

### **3.7. Propuesta de Perfiles en Locomoción: Desplazamiento hacia delante-atrás**

Con el fin de conseguir que la locomoción del robot fuese lo parecida a la locomoción de un canino, el algoritmo de movimiento diseñado se basó en una secuencia de un canino real. En la figura 3.13 se pueden observar los diferentes tipos de locomoción de un perro real. Para el caso particular de este proyecto se utilizó el tipo que se puede observar en la gráfica del apartado *b*,

el cual hace referencia a el trote de un perro.

Se escogió este movimiento puesto que fue el que mejor se pudo adaptar a la estructura del robot modular. Además fue el movimiento con el que se consiguió replicar de una mejor forma la locomoción de un canino.

Adicionalmente, en la figura 3.13 se observa a la derecha la estructura de la pierna del robot desarrollado. En este se observan dos articulaciones fundamentales que fueron utilizadas para realizar la secuencia de caminado. La primera es la de la cadera la cual se encuentra en la parte superior y tiene su eje de rotación representado como  $Z_1$  y la segunda es la articulación de la rodilla que tiene su eje de rotación representado como  $Z_2$ . Estas dos articulaciones fueron las únicas utilizadas para realizar el movimiento de cada una de las patas.

Asimismo, como se observa en las gráficas la secuencia utilizada (***b***) se realiza en movimientos consecutivos haciendo uso de las patas del robot de manera diagonal. Esto se sabe ya que ***FL*** y ***FR*** hacen referencia a las patas frontal izquierda y frontal derecha respectivamente y ***HL*** y ***HR*** hacen referencia a las patas trasera izquierda y trasera derecha respectivamente. También, en esta secuencia se puede evidenciar que existe un periodo de tiempo en el que todas las patas se encuentran en movimiento, esta característica también fue tomada en cuenta para el desarrollo del algoritmo de locomoción.

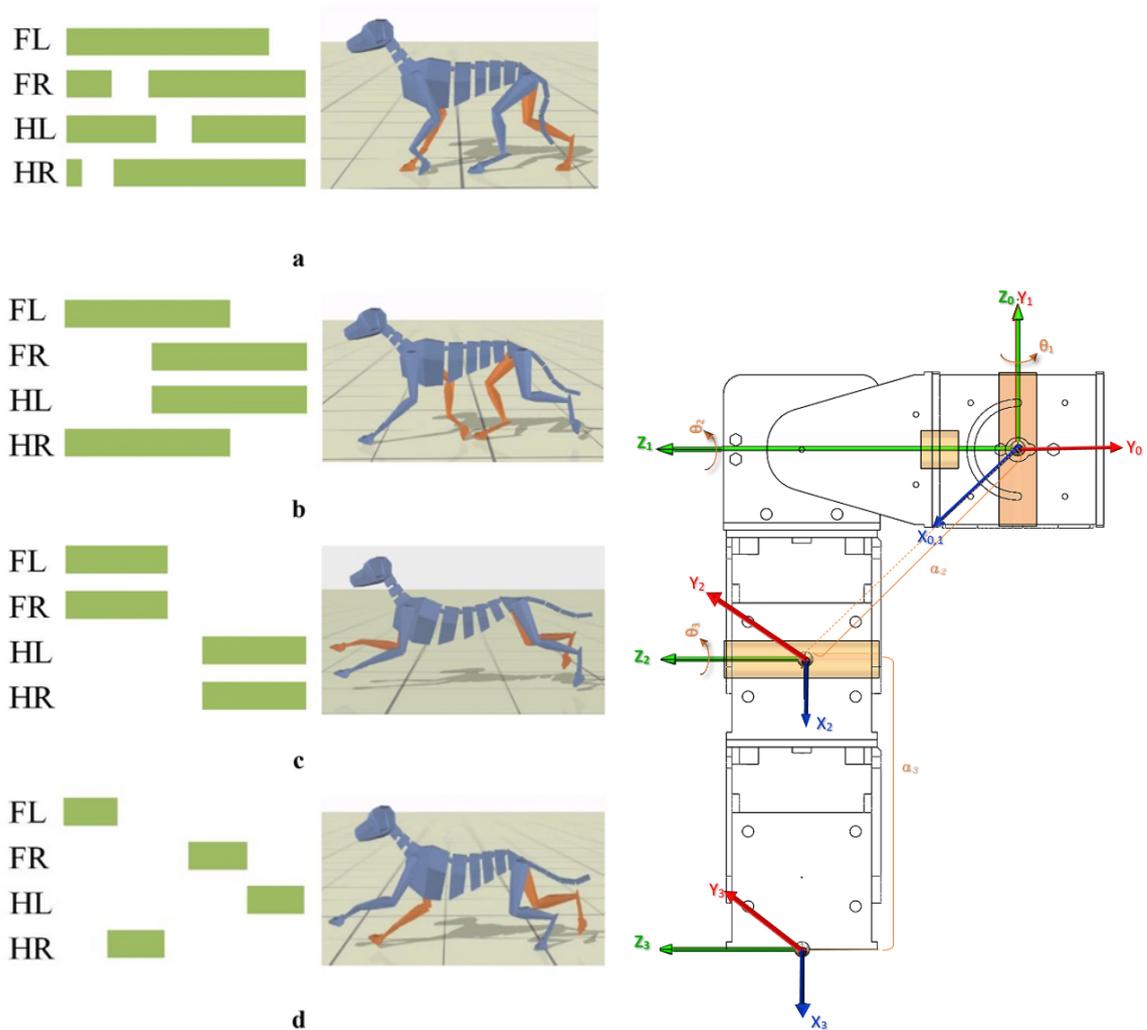


Figura 3.13: Secuencia caminar.  
Tomado de [58]

# Capítulo 4

## Simulación de la arquitectura utilizando Webots ®

### 4.1. WEBOTS ®

Webots es una aplicación de escritorio multiplataforma y de código abierto diseñada para realizar simulaciones de robots. Esta aplicación proporciona un entorno desarrollo muy completo el cual permite modelar, programar y simular arquitecturas robóticas. Esta aplicación es usada de manera profesional en la industria, en la educación y la investigación.

Este proyecto fue iniciado en 1996 por EPFL, pero actualmente es mantenido por la empresa Cyberbotics Ltd, la cual mantiene este software como producto principal desde 1998 [referencia webots1].

Webots es una aplicación bastante versátil, ya que maneja varios lenguajes con los cuales se pueden realizar la programación de sus componentes. Estos lenguajes son: C, C++, Java, Python y Matlab. El principio de funcionamiento de webots esta basado en una estructura nodal en la cual se trabaja de manera análoga a la programación orientada a objetos. Cada nodo en Webots

maneja el concepto denominado como "herencia", mediante el cual cada uno tiene una relación padre-hijo con los componentes que deriven de él, lo cual se realiza además de manera jerárquica.

Al momento de crear un proyecto nuevo en Webots se crea un mundo básico el cual contiene unos nodos por defecto que permiten definir el entorno y el ambiente. En la figura 4.1 se observa el entorno de desarrollo de la aplicación.

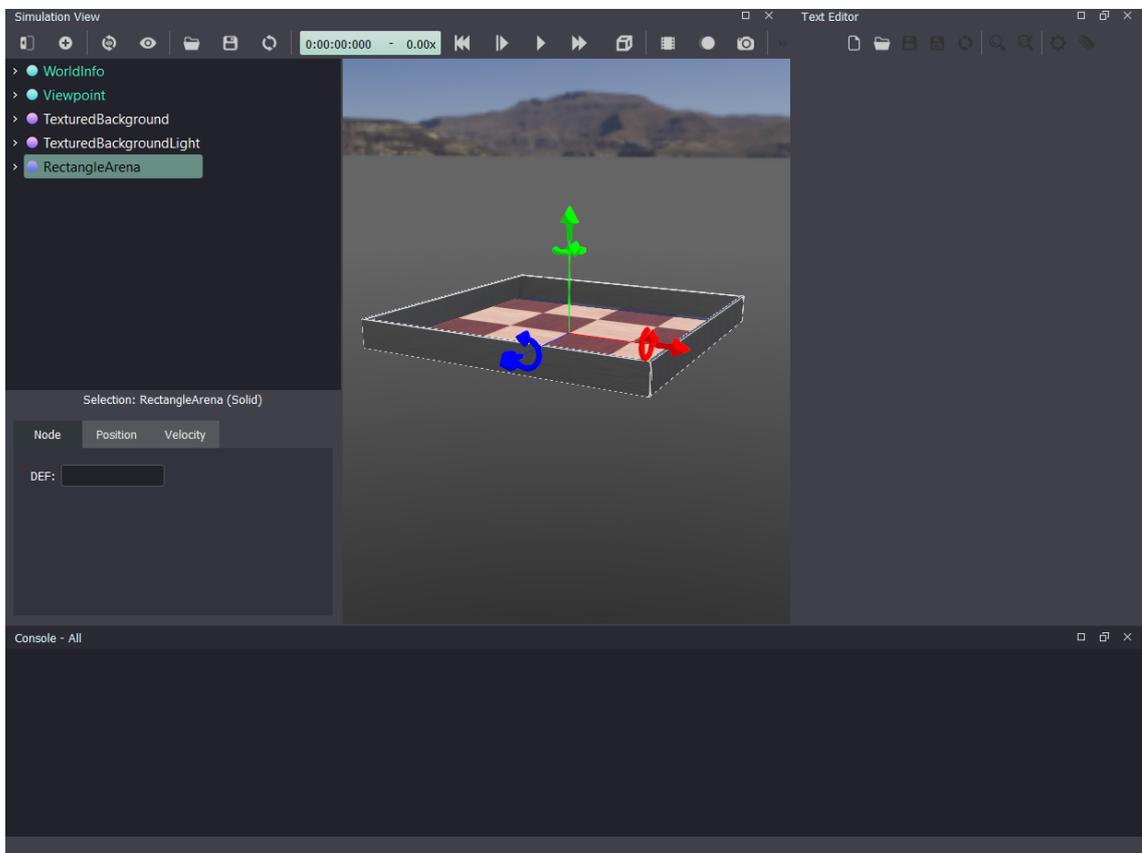


Figura 4.1: Entorno de desarrollo Webots.

Como se puede observar en esta figura, el entorno de desarrollo se divide en tres áreas principales. La primera la cual contiene una lista con todo el árbol de nodos de la escena. Esta a su vez contiene en la parte inferior un apartado que permite la edición de cada elemento que

sea seleccionado. La segunda área es la correspondiente al editor de texto, en esta se realiza la escritura del código en el lenguaje que se este manejando. Finalmente una consola en la tercer área, mediante la cual la aplicación envía información acerca de posibles fallos y/o advertencias.

Por otro lado, además de los nodos básicos que permiten la manipulación del entorno, para realizar la aplicación se usan otros nodos los cuales permiten otro tipo de funcionalidades dentro del entorno de desarrollo. A continuación se realiza una breve descripción de los principales nodos y conceptos utilizados para el desarrollo de la simulación con su respectivo definición [referencia glosario webots].

- **Robot:** es un nodo el cual define un sistema robótico. Dentro de sus descendentes se pueden encontrar actuadores o sensores.
- **Solid** es un nodo sólido el cual define un objeto físico, incluidos robots, sensores, actuadores etc.
- **Device:** un dispositivo es un actuador o un sensor.
- **Controller:** es un programa que controla el comportamiento de un robot y es ejecutado en su propio proceso. Este componente es el que puede ser escrito en los diferentes lenguajes de programación que maneja Webots.
- **Controller time step:** hace referencia al incremento del tiempo ejecutado en cada iteración del bucle de control presente en el controlador.
- **Basic time step:** hace referencia al tiempo utilizado por Webots para avanzar el tiempo virtual que permite la simulación física.
- **Actuator:** representa un actuador robótico real. Estos reciben comandos por medio del *Controller*.

- **Sensor:** representa un sensor robótico real. Estos pueden otorgar diferentes datos de medición.
- **HingeJoint:** permite otorgar una articulación a una pieza. Este contiene un *Device* el cual puede ser *Actuator* o *Sensor*.

## 4.2. Importación y ensamble de arquitectura integrada en software WEBOTS

Para llevar a cabo el ensamblaje de la arquitectura se siguió la estructura de nodos que maneja la aplicación. Para esto se hizo uso de varios tipos de nodos como: *Robot Solid*, *HingeJoint* entre otros más, los cuales fueron explicados previamente en el capítulo 3.6.

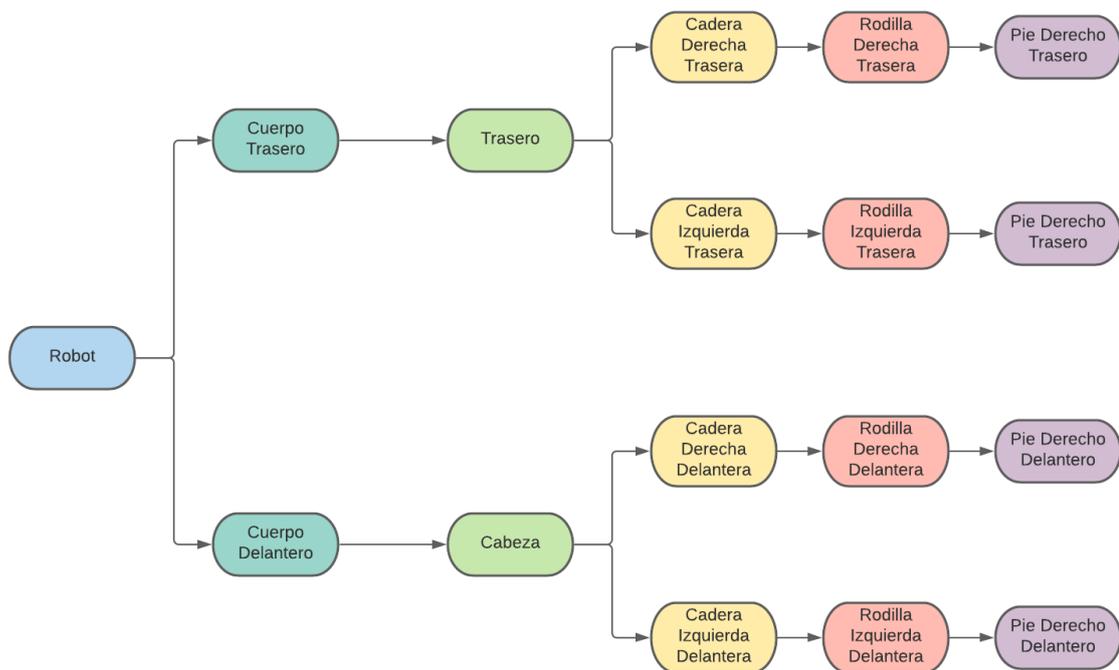


Figura 4.2: Diagrama ensamble arquitectura.

Sin embargo, para ilustrar de una mejor manera como se llevo a cabo este ensamble y con que jerarquía, se realizó el diagrama que se observa en la figura 4.2. La jerarquía de la implementación del ensamble en Webots esta demarcada en el diagrama de izquierda a derecha a partir de colores. Cada color representa a un nodo, por lo cual el primer nodo o antecesor es *Robot* los demás son nodos sucesores a este.

Una vez se realiza el ensamblaje de la estructura completa, en el software de Webots se obtiene lo que se puede observar en la figura 4.3

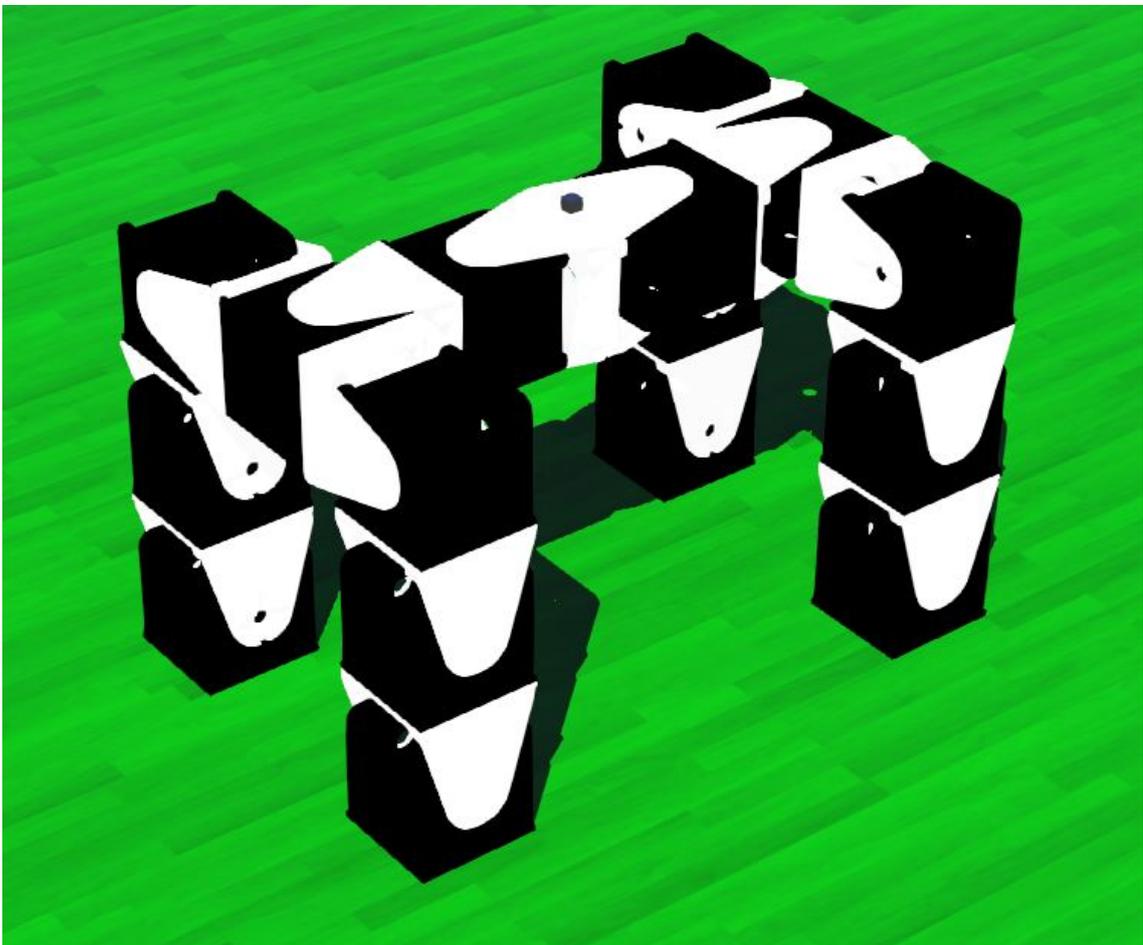


Figura 4.3: Ensamblaje completo en Webots.

### 4.3. Programación y desarrollo de la simulación en Webots

Para el desarrollo de la simulación de este proyecto se programó todo el sistema en Webots por medio del lenguaje Python. Con este versátil lenguaje y su fácil implementación de la programación orientada a objetos se programaron las funcionalidades de todos los motores que componen el sistema en su totalidad.

#### Algoritmo general

Dentro del entorno de simulación de Webots existen archivos de código denominados **controladores**. Estos permiten programar completamente el comportamiento de un Robot. Para este caso el código de manera general está definido por medio del diagrama de flujo de la figura 4.4. Este hace referencia al controlador del robot cuadrúpedo tipo canino.

Como se puede observar en el diagrama de la Figura 4.4, el código sigue un orden estructurado. Primero se hace la importación de todas las librerías necesarias para la programación del robot y para la comunicación serial. Posteriormente, se declaran todas las variables globales y finalmente debido a que este código está basado en programación funcional antes de programar el bucle infinito se definen todas las funciones necesarias para los diferentes tipos de movimientos y/o funcionamientos del robot. Las funciones más importantes serán explicadas más adelante.

Dentro del bucle infinito se programaron diferentes condiciones que validan la información que se está recibiendo por medio de la comunicación serial. Dependiendo de la información recibida se activan unas banderas que son útiles para otras condiciones que determinan si una función se debe estar ejecutando o no de manera constante.

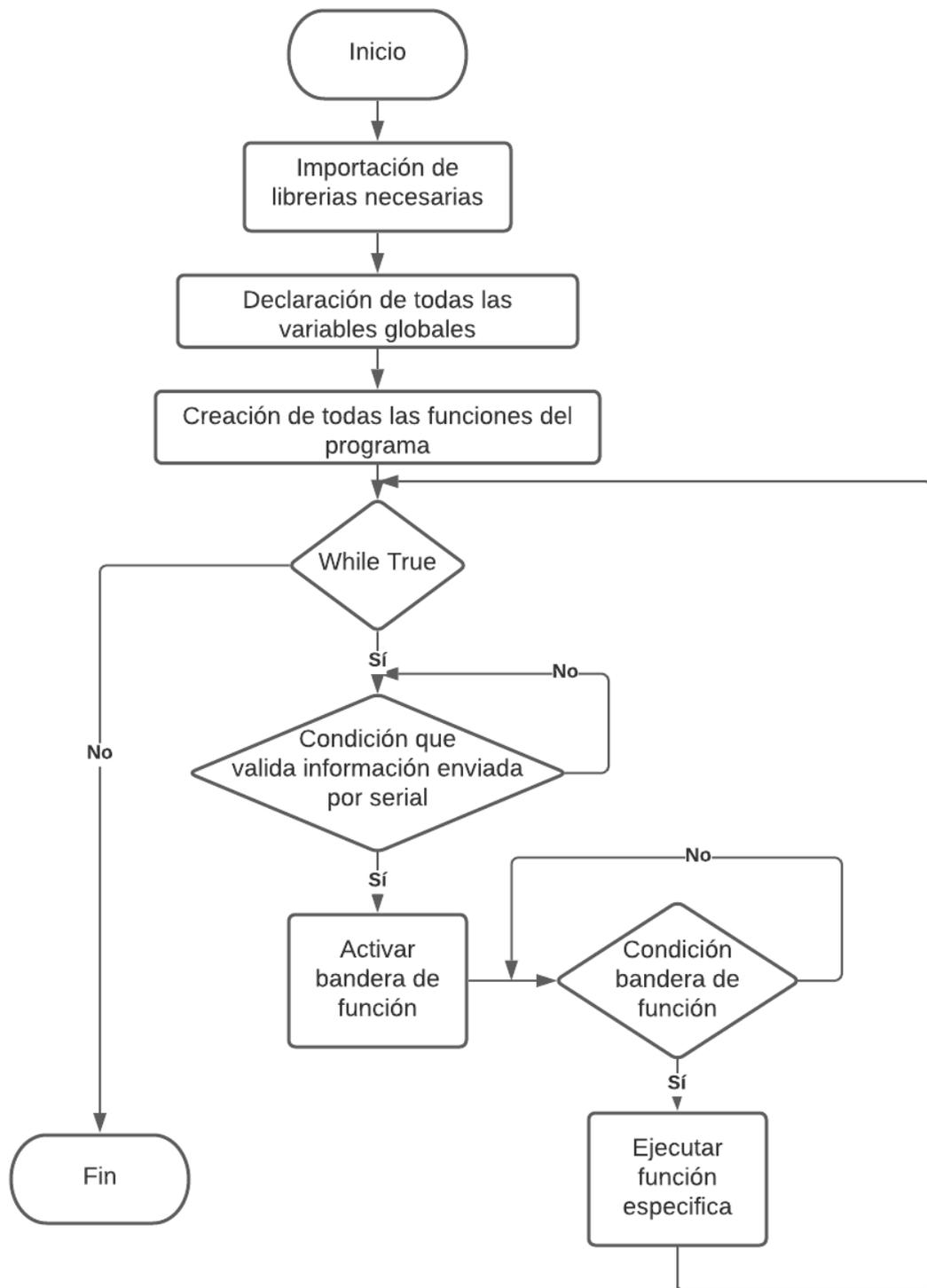


Figura 4.4: Diagrama de flujo general.

## Algoritmo movimiento de pierna

Uno de los algoritmos mas importantes para el funcionamiento del robot cuadrúpedo es el correspondiente al movimiento de las patas. Este es necesario para realizar el algoritmo de locomoción.

En la figura 4.5 se observa el diagrama de flujo correspondiente a este algoritmo.

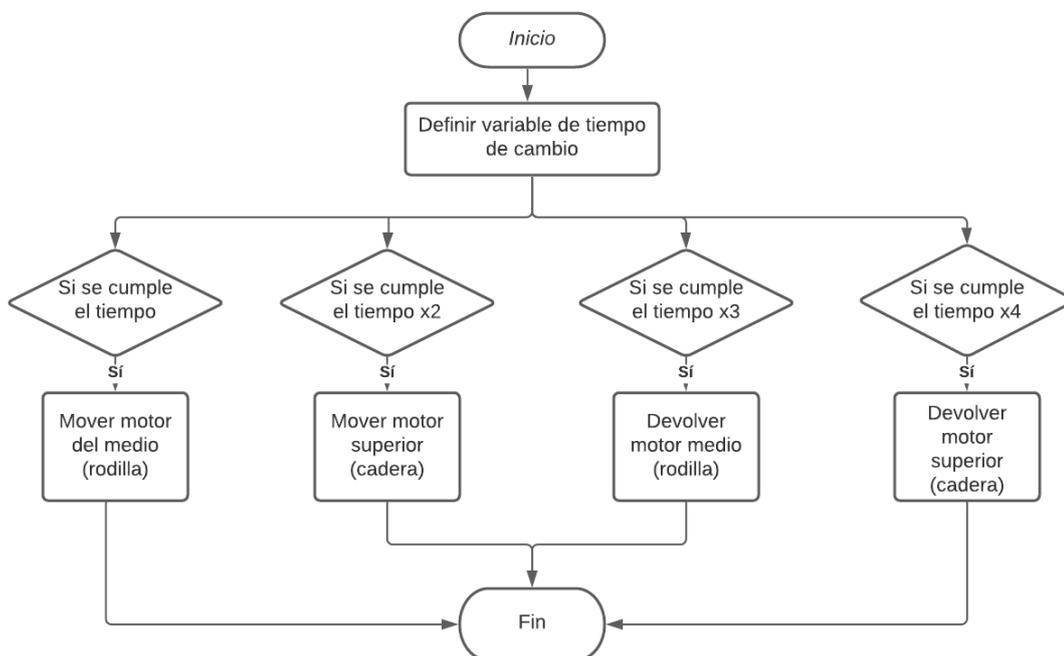


Figura 4.5: Diagrama de flujo algoritmo movimiento de pierna.

Como se puede observar en el diagrama se trata de un algoritmo sencillo, el cual esta hecho a partir de tiempos preestablecidos. Para este caso se define una variable que determina cada cuando se moverá un motor diferente. Una vez se tiene definida esta variable se generan una serie de condiciones que validan si se cumple el tiempo especificado. Si este se cumple se ejecuta el movimiento de un motor. Los movimientos van en secuencia debido al orden de los tiempos y esta secuencia es la que hace posible el movimiento de la pata del robot.

Es importante resaltar que dentro de este algoritmo se especifica la dirección del movimien-

to, dado que para caminar hacia adelante los ángulos con los que se mueven los motores son diferentes a los enviados en el movimiento hacia atrás.

### Algoritmo de locomoción

Por su parte, como se mencionó anteriormente el algoritmo de locomoción depende del algoritmo de movimiento de las patas explicado anteriormente. El diagrama de flujo para este algoritmo se puede visualizar en la figura 4.6.

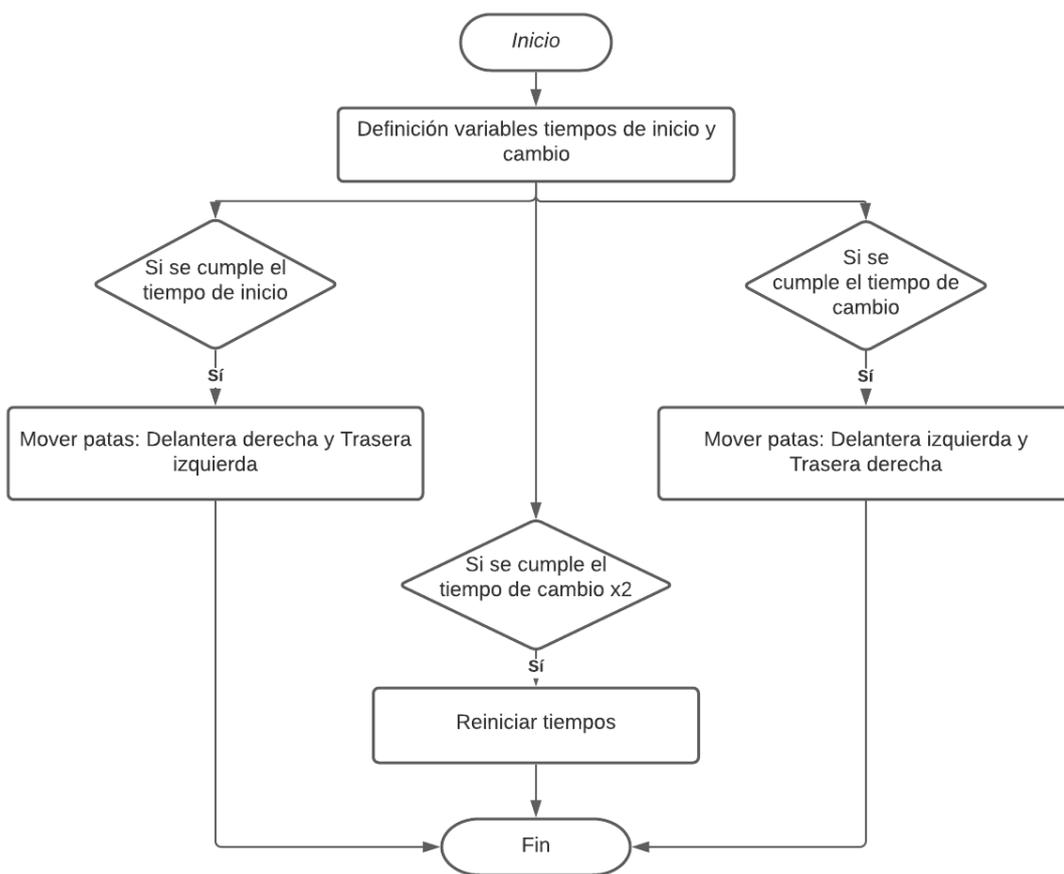


Figura 4.6: Algoritmo de locomoción.

Como se puede observar en el diagrama, primero se definen dos variables las cuales corresponden al tiempo de inicio y al tiempo de cambio. Estos tiempos son diferentes. Esto se debe a

que el tiempo de inicio es diferente al tiempo de cambio por simultaneidad de los movimientos. El movimiento de las patas se esta haciendo en diagonal. Como se evidencia en el diagrama, cuando se cumple la condición del tiempo de inicio se mueven las patas delantera derecha y trasera izquierda. Asimismo, cuando se cumple la condición del tiempo de cambio se mueven las patas contrarias: delantera izquierda y trasera derecha. Finalmente, cuando se cumple la condición de dos tiempos de cambio se reinician los tiempos para que la secuencia vuelva a iniciar su curso.

### **Algoritmo de rotación sobre su eje**

Antes de explicar el algoritmo para la rotación sobre su propio eje, es necesario resaltar como funciona la rotación básica. Para este tipo de movimiento, es decir para que el robot pueda girar tanto a izquierda como a derecha se hizo uso del algoritmo de locomoción.

Cuando el usuario quiere mover el robot hacia otra dirección simplemente se mueve el motor de la cadera en la dirección deseada y se ejecuta el mismo algoritmo de locomoción. Esto permite que el robot gire en estas dos direcciones.

Como se observa en el diagrama de la Figura 4.7, para llevar a cabo esta funcionalidad primero se debe realizar una rotación de 90 grados exactos para que las patas queden orientadas hacia los laterales del robot. Posteriormente se inicializa una variable que contiene el tiempo de partida.

El algoritmo de rotación sobre su propio eje es más complejo. El diagrama de flujo que lo describe se evidencia en la figura 4.7. Con este tiempo de partida se generan todas las condicio-

nes. Este algoritmo consta de ocho etapas en total. Cada una de estas etapas se encarga de mover un motor con la finalidad de hacer el movimiento adecuado para que el robot con la posición de sus extremidades pueda girar sobre su eje.

Similar a lo visto en algoritmos anteriores, también se tiene una condición que reinicia la variable de tiempo en cuestión para que la secuencia vuelva a comenzar.

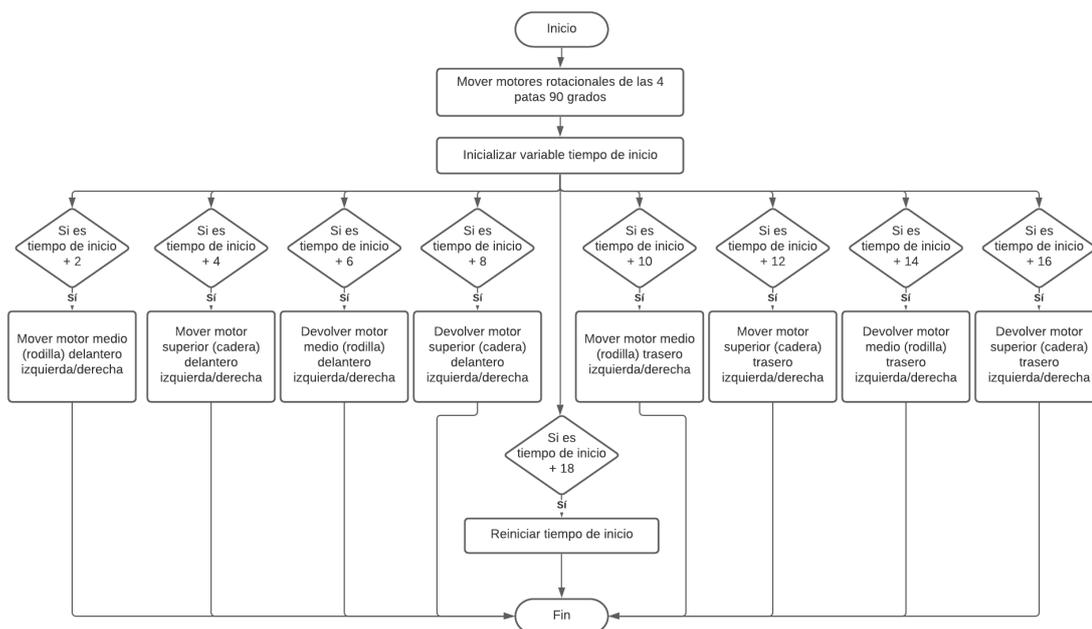


Figura 4.7: Algoritmo de rotación sobre su eje.

#### 4.4. Programación y desarrollo GUI en Matlab

Dentro del entorno de simulación de Matlab se creo una interfaz gráfica que permitía ejecutar diferentes tipos de funcionalidades sobre el Robot en Webots.

Esta interfaz se puede observar en la figura 4.8, en la cual para este caso está posicionada en la pestaña "Manual" que permite todas las opciones generales del movimiento y funcionamiento

del robot. Lo que se hizo dentro del código para hacer posible cada una de las funcionalidades expresadas en esta área, es en envió de información por puerto serial que posteriormente será recibida en Webots.



Figura 4.8: Interfaz gráfica Matlab - Tab Manual.

Adicional a esto, hay tres pestañas mas que son utilizadas para el algoritmo de celdas exactas para evasión de obstáculos.

El contenido de la otra pestaña se observa en la figura 4.9, en esta se puede ingresar toda la información asociada a los obstáculos con los cuales se realizarán las pruebas.

Asimismo, para la graficación del **W-SPACE** y el **C-SPACE** se hace uso de las otras dos pestañas. A manera de ejemplo, en la figura 4.10 se observa el contenido de una de estas pestañas. Es importante resaltar que la otra contiene los mismos componentes, la diferencia es que estas contienen gráficas diferentes.

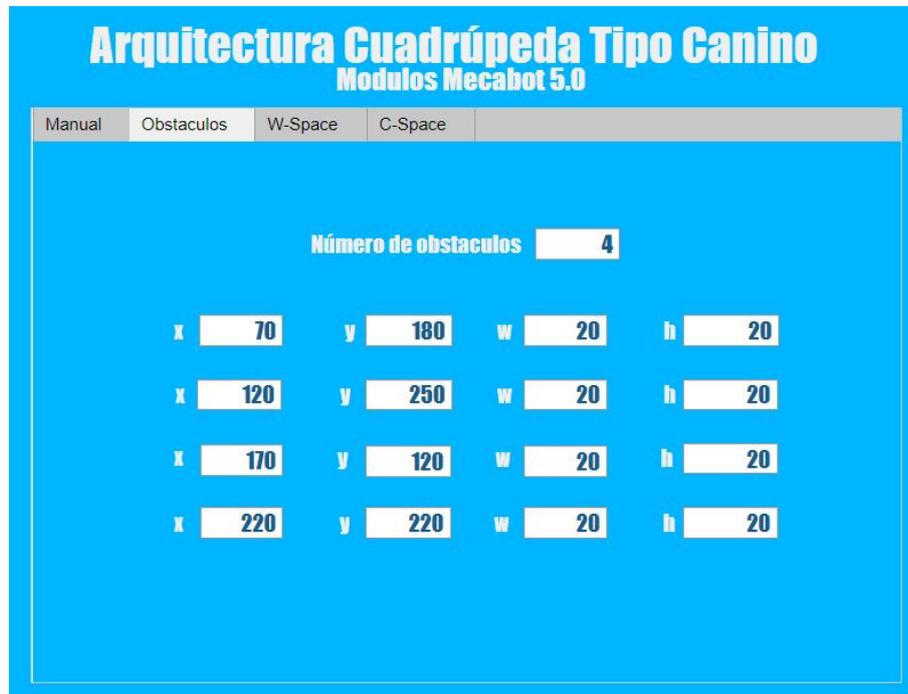


Figura 4.9: Interfaz gráfica Matlab - Tab Obstáculos.

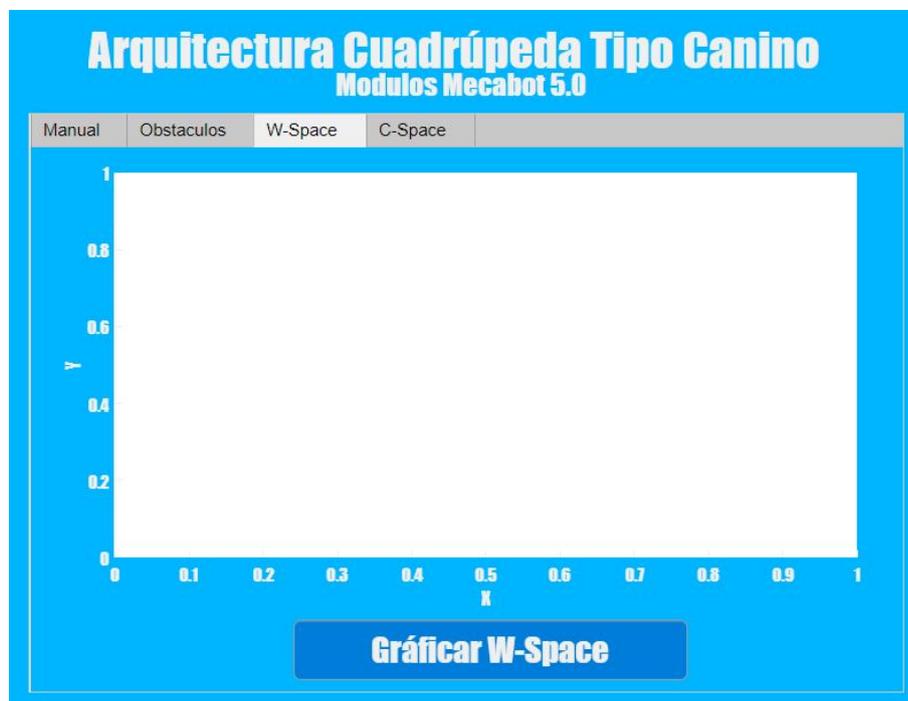


Figura 4.10: Interfaz gráfica Matlab - Tab W-Space.

Otro punto importante a tener en cuenta es el algoritmo que se llevó a cabo para implementar el método de evasión de obstáculos por celdas exactas. El diagrama de flujo correspondiente a este se puede observar en la figura 4.11

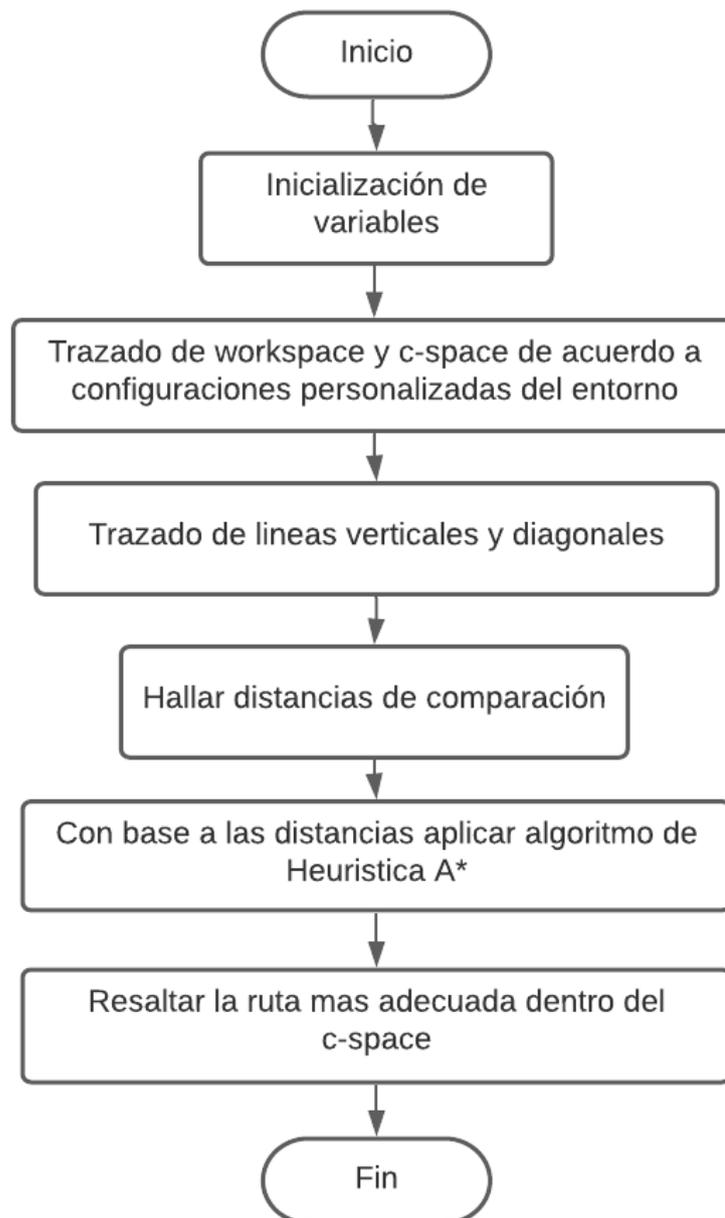


Figura 4.11: Diagrama de flujo algoritmo celdas exactas.

Como se puede observar en el diagrama, primero se realiza una inicialización de todas las variables que se van a utilizar. Posteriormente se realiza el trazado del W-SPACE y el C-SPACE de acuerdo a las configuraciones establecidas en la pestaña anterior (Obstáculos). Considerando que ya se ha graficado en C-SPACE con todas sus líneas verticales y diagonales se continúa el proceso con la búsqueda de las distancias para realizar la comparación. Esta comparación se lleva a cabo a través de diferentes tipos de condicionales que tienen como función determinar la ruta con la distancia más corta.

## **Capítulo 5**

# **Pruebas Y Resultados De La Arquitectura Utilizando Software De Simulación**

## **Webots ®**

En este capítulo se mostrarán los ambientes que se diseñaron para la realización de las pruebas. Asimismo se describirán y se expondrán los resultados de cada una de las pruebas ejecutadas para evaluar el funcionamiento del robot canino.

### **5.1. Diseño Del Ambiente De Prueba Para Simulación De Movimientos**

Para realizar las pruebas del desplazamiento y la locomoción del robot se implementaron dos escenarios, cada uno ambientado de forma diferente. Estos contenían varios tipos de obstáculos en los cuales el robot debía ejecutar una secuencia determinada esquivando y/o sobrepasando los objetos presentes en el entorno. Estos obstáculos fueron escogidos teniendo en cuenta la

aplicación para la cual fue creado el robot, dado que para la búsqueda y rescate el robot se puede enfrentar a objetos con superficie irregular.

Asimismo, de manera general en ambos ambientes los obstáculos grandes que no se pueden superar son cajas grandes dependiendo la ambientación, señales de tránsito y barriles. Por otro lado, para los obstáculos que si se pueden superar se escogieron piedras y pequeñas estibas, las cuales en un entorno real podrían representar estructuras irregulares en situaciones de desastre como escombros o piedras.

En la figura 5.1 se observa el primer escenario, el cual tiene una ambientación estilo a un parque. En este escenario se incluyeron obstáculos que el robot no podía pasar como señales d

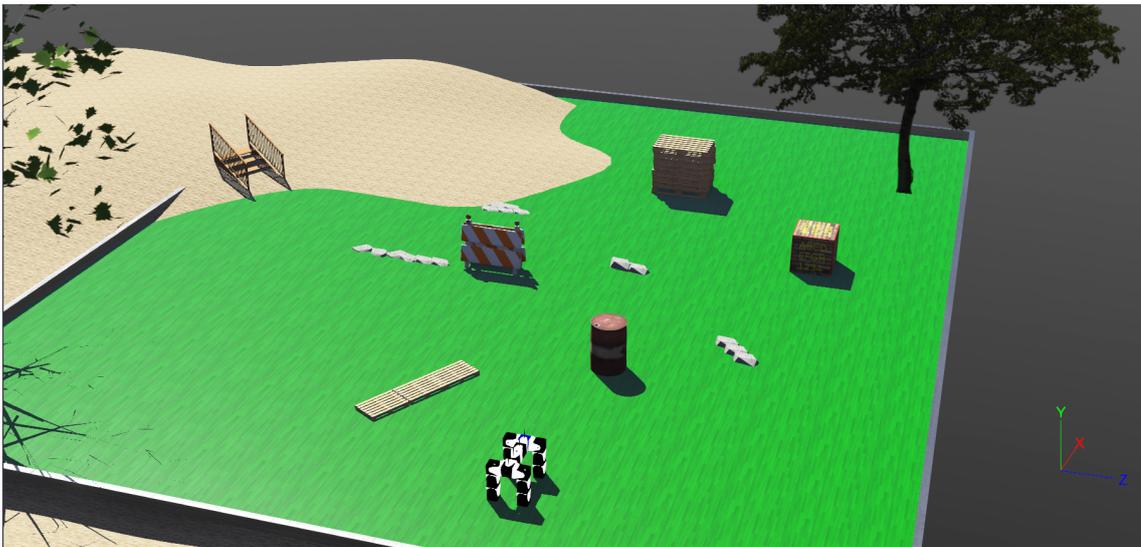


Figura 5.1: Primer escenario de prueba.

Es importante resaltar, que con el algoritmo de celdas exactas se extrajo una trayectoria que permitía evadir los obstáculos mas grandes presentes en el escenario. Esta trayectoria se tomó de referencia para realizar todas las pruebas y se visualiza en la figura 5.2, hace referencia al espacio de trabajo.

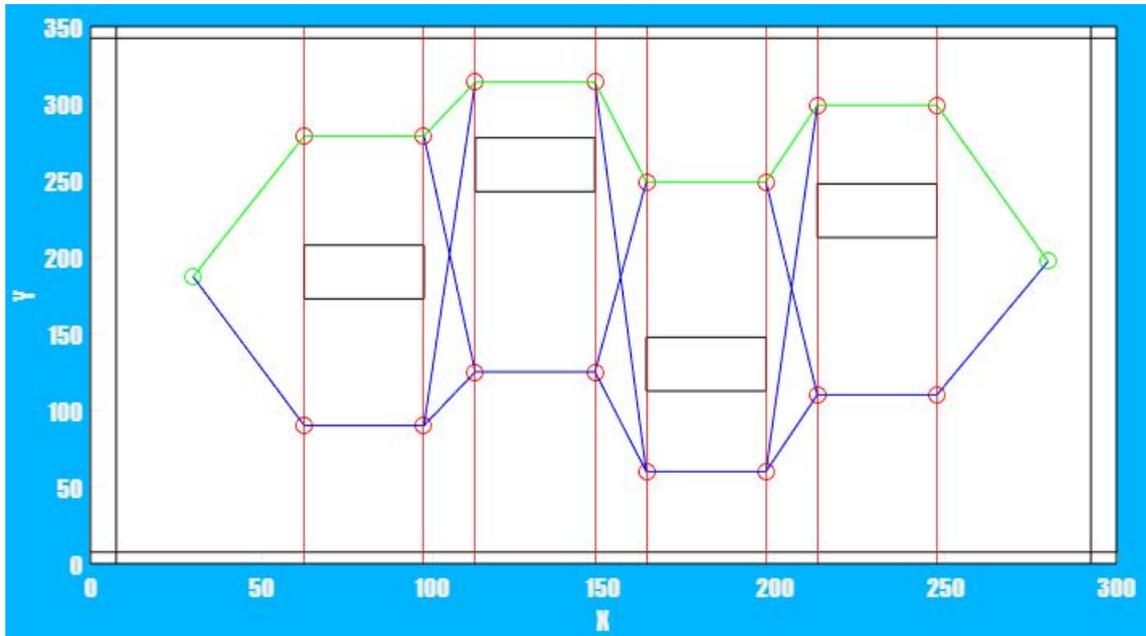


Figura 5.2: Trayectoria por celdas exactas escenario 1.

Del mismo modo, en la figura 5.3 se observa el segundo escenario, el cual tiene una ambientación de construcción. En esta se puede observar que fueron utilizados los mismos obstáculos que se pueden sobre pasar. Esto se hizo de esta forma debido a que como se mencionó anteriormente estos simulan un entorno real en el que el robot puede verse enfrentado a situaciones de desastre.

Al igual que el caso anterior, para el segundo escenario debido a que es completamente diferente y tiene mas obstáculos que el anterior, se hizo uso del algoritmo de celdas exactas para obtener la trayectoria mas adecuada que le permitiera al robot evadir estos objetos. Esta trayectoria, de la misma manera sirvió como referencia para el desplazamiento del robot en las pruebas y se visualiza en la figura 5.4, hace referencia al espacio de trabajo.

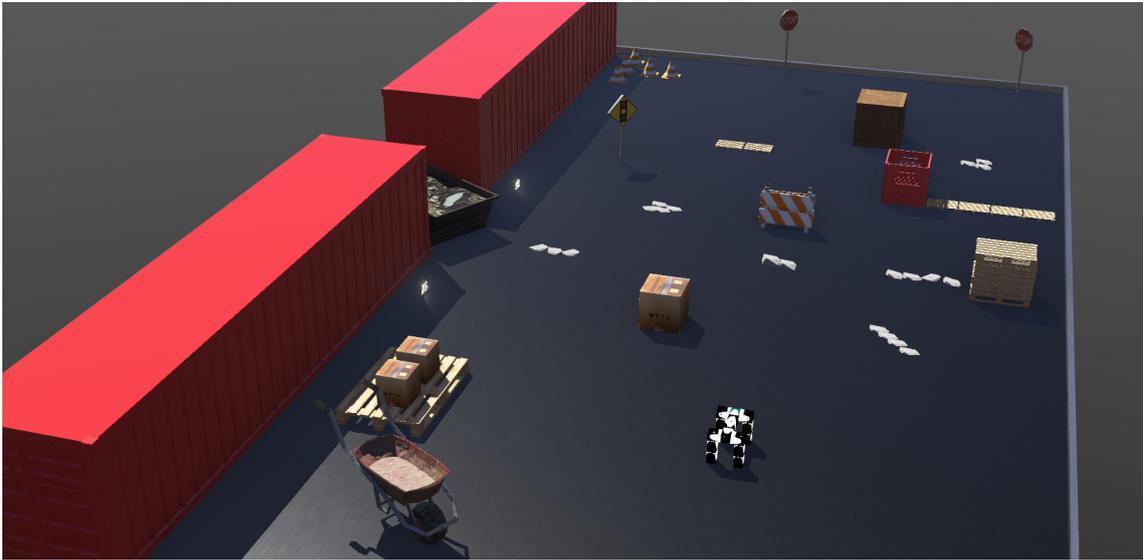


Figura 5.3: Segundo escenario de prueba.

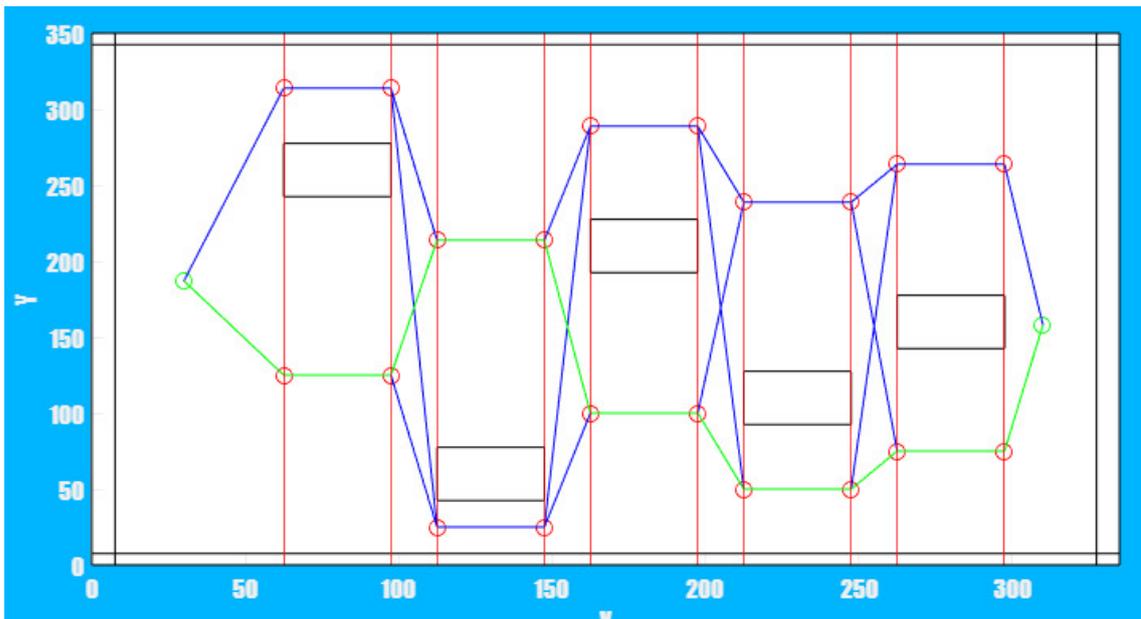


Figura 5.4: Trayectoria por celdas exactas escenario 2.

Para la descripción y explicación de todas las pruebas se habla expresamente de cuatro articulaciones utilizadas en el robot para efectuar todos los movimientos. Por lo tanto, en la figura 5.5 se muestran las articulaciones que fueron empleadas para los movimientos básicos

del robot.

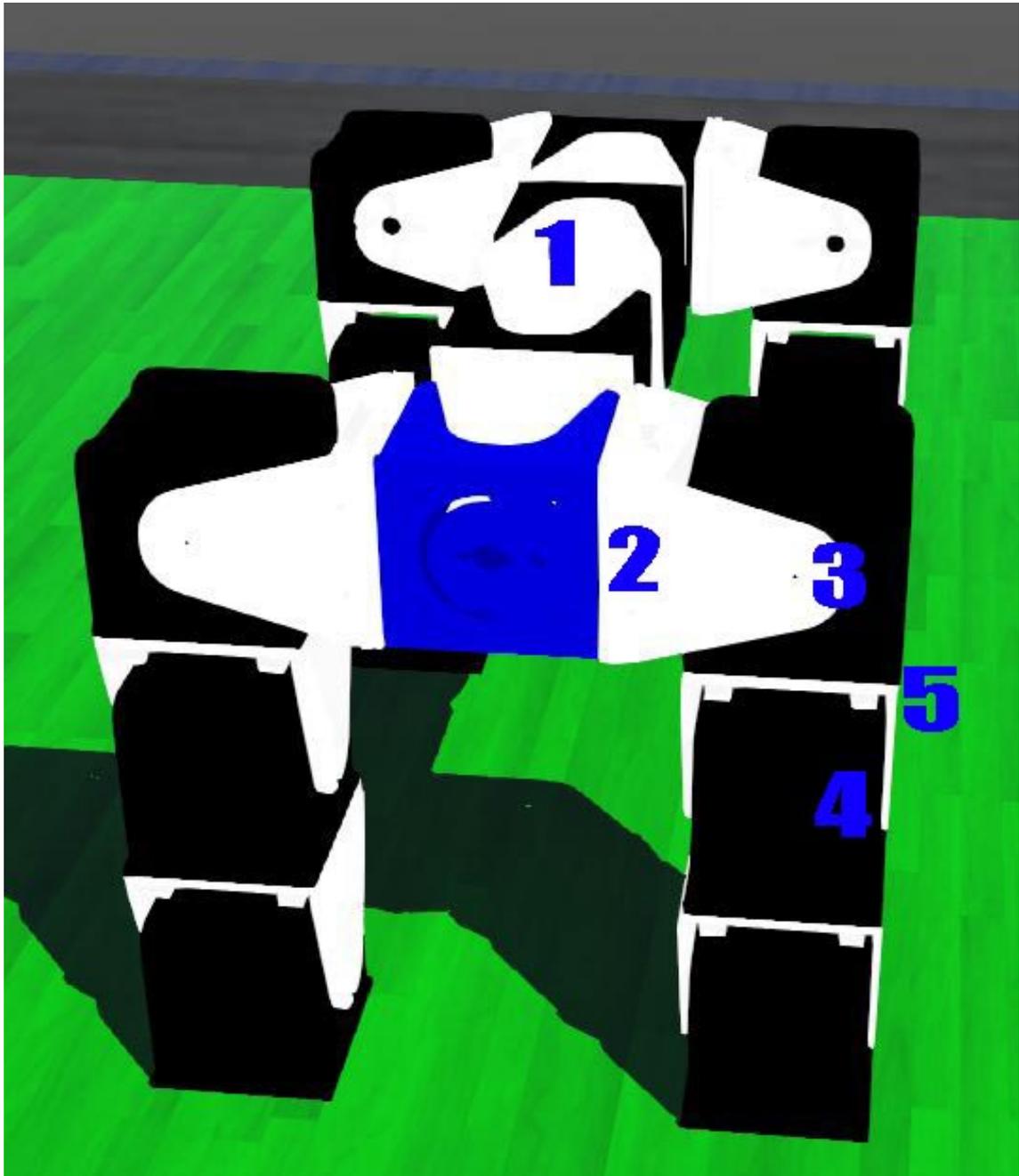


Figura 5.5: Articulaciones empleadas.

Teniendo en cuenta la imagen anterior, en la tabla 5.1 se puede evidenciar el nombre que se utilizó para cada una de las articulaciones señaladas a lo largo del capítulo.

Tabla 5.1: Nombres de articulaciones empleadas.

Referencia Numérica	Nombre Articulación
1	Columna
2	Cadera
3	Superior
4	Rodilla
5	Articulación Adicional Rotar Eje

Asimismo, para los movimientos básicos del robot cabe resaltar que todos estos fueron llevados a cabo ejecutados por medio de la interfaz gráfica con las funcionalidades que se aprecian en la figura 5.6.

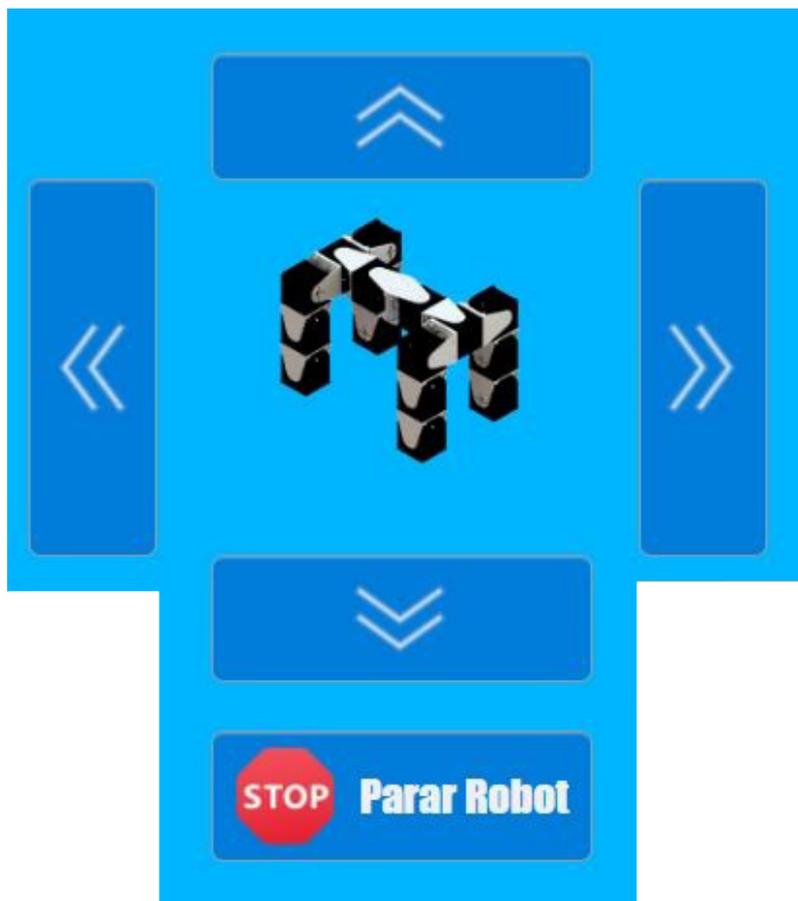


Figura 5.6: Funcionalidad movimientos básicos.

Como se puede observar, en estos botones se encuentran los controles básicos para el movimiento de el robot y también para detenerlo. Las otras funcionalidades adicionales desarrolladas también en la interfaz gráfica serán mostradas en el transcurso de las pruebas realizadas que las involucren.

## 5.2. Prueba 1: Desplazamiento hacia adelante

### 5.2.1. Descripción

La prueba de desplazamiento hacía adelante es una de las pruebas mas básicas que se ejecuta para evaluar el correcto funcionamiento del robot. Este tipo de movimiento es uno de los más importantes debido a que se utiliza en otros movimientos básicos de diferentes maneras.

### 5.2.2. Funcionamiento

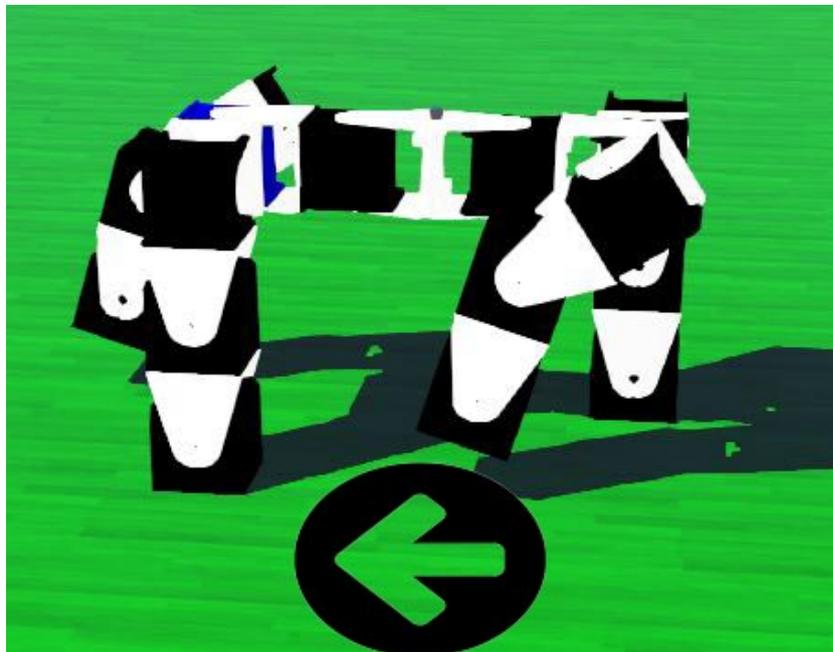


Figura 5.7: Ilustración movimiento hacía adelante.

El funcionamiento del desplazamiento hacía adelante se da a partir del algoritmo de locomoción explicado en secciones anteriores. Gracias a este y siguiendo la secuencia de pasos el robot logra realizar un desplazamiento hacia adelante garantizando un movimiento lo mas parecido a un canino.

Una mejor ilustración del funcionamiento del robot al moverse hacia adelante se visualiza en la figura 5.7. Es importante resaltar, que el robot tiene uno de los semi módulos de color azul. Esto se realizó con la finalidad de poder diferenciar cual es la parte frontal del mismo.

### 5.2.3. Análisis De Indicadores De Rendimiento

Para realizar estas pruebas se desplazo el robot por un tramo corto, para así poder evaluar y analizar las gráficas entregadas de la distancia recorrida a través del tiempo y lo que se midió en los sensores de algunos motores principales.

Primero, para este caso particular, es importante resaltar que en esta sección se realizó adicionalmente la prueba de velocidad que pertenece a la funcionalidad que se visualiza en la figura 5.8.



Figura 5.8: Funcionalidad de velocidad.

Como se puede observar, existen dos velocidades denominadas **Trotar** y **Caminar**, las cuales corresponden a  $1 \frac{rad}{s}$  y  $1,5 \frac{rad}{s}$  de velocidad en los motores respectivamente.

En la figura 5.9 se observa la distancia en X recorrida por el robot en esta prueba. Se toma como referencia la dimensión X ya que es el eje por el cual el robot se esta moviendo en línea recta. En esta prueba se utilizó la velocidad de **caminar**, se observa que tiene un desplazamiento suave a través del tiempo.

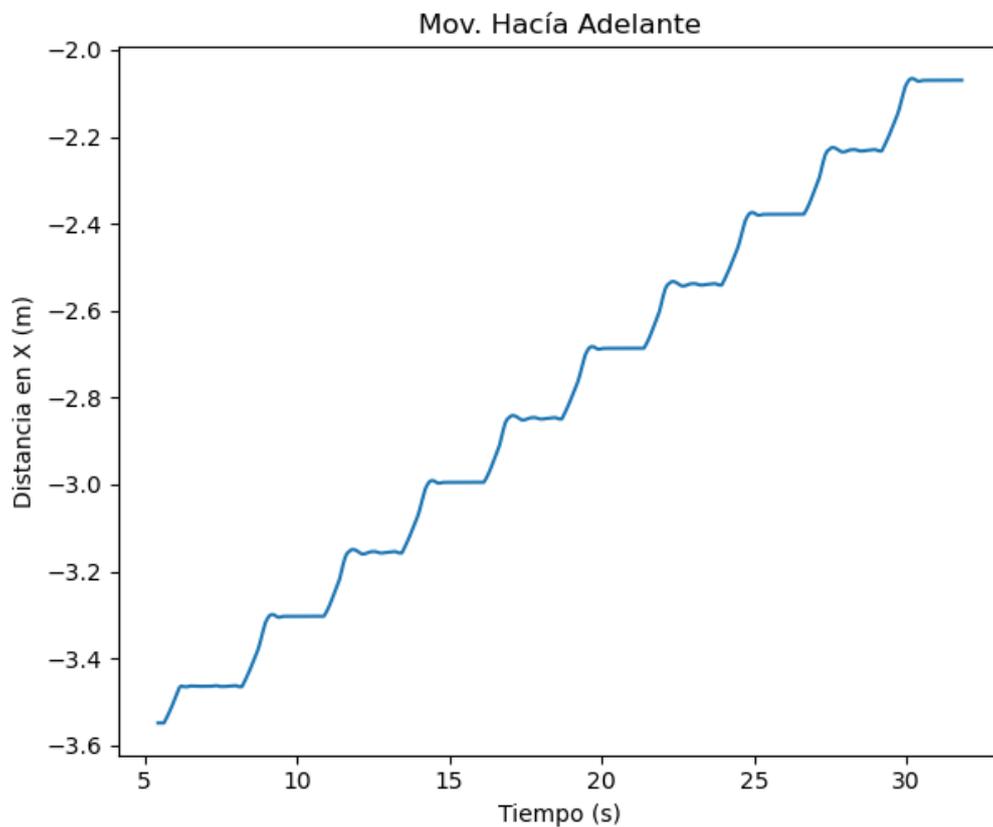


Figura 5.9: Distancia X en el tiempo velocidad de caminado.

Por otro lado, para evaluar la funcionalidad de velocidad y ver el comportamiento con la velocidad de trotar, en la figura 5.10 se observa la distancia en X recorrida a través del tiempo

con dicha velocidad. Como se puede observar el movimiento a diferencia del anterior es mas progresivo y súbito. Se puede ver que para este caso el robot esta alcanzando puntos mas rápido, sin embargo la diferencia entre distancia/tiempo no es notoria.

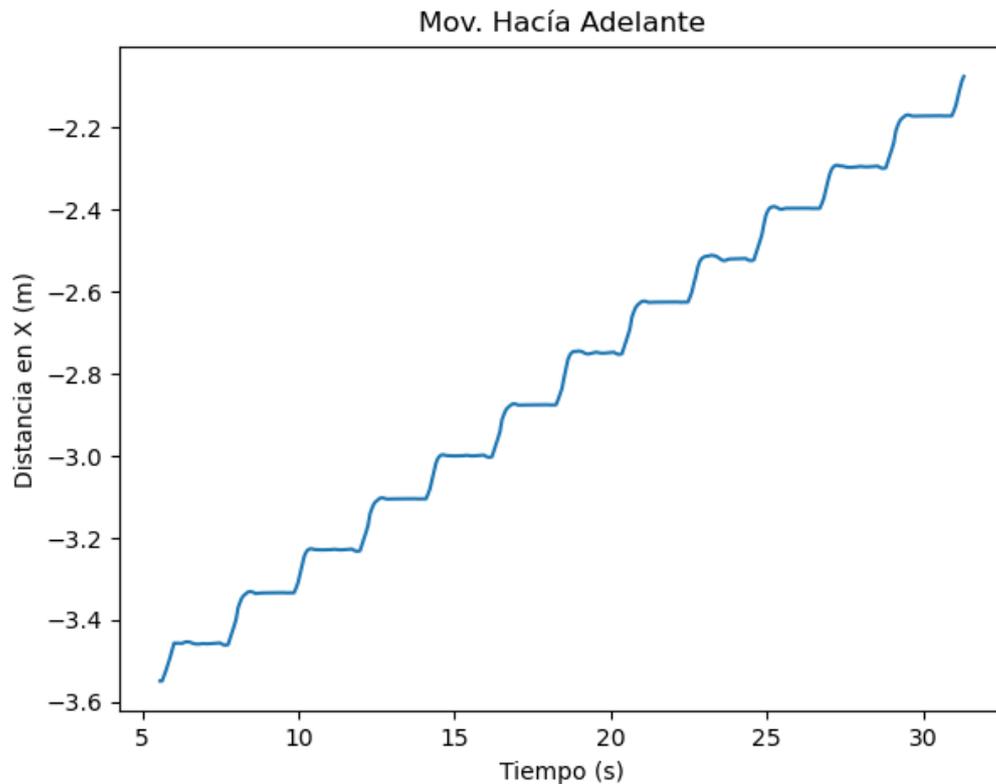


Figura 5.10: Distancia X en el tiempo velocidad de trote.

Debido a que la diferencia entre las velocidades propuestas no es tan relevante, tal como se analizó anteriormente, se opta por realizar todas las pruebas con la velocidad de caminado únicamente.

Teniendo claro lo anterior, en la figura 5.11 se puede observar el ángulo medido de los motores de la cadera y la rodilla durante el movimiento de prueba.

Como se puede observar, estos ángulos tienen comportamiento inverso, ya que el ángulo de la cadera es positivo mientras el de la rodilla es negativo para este caso.

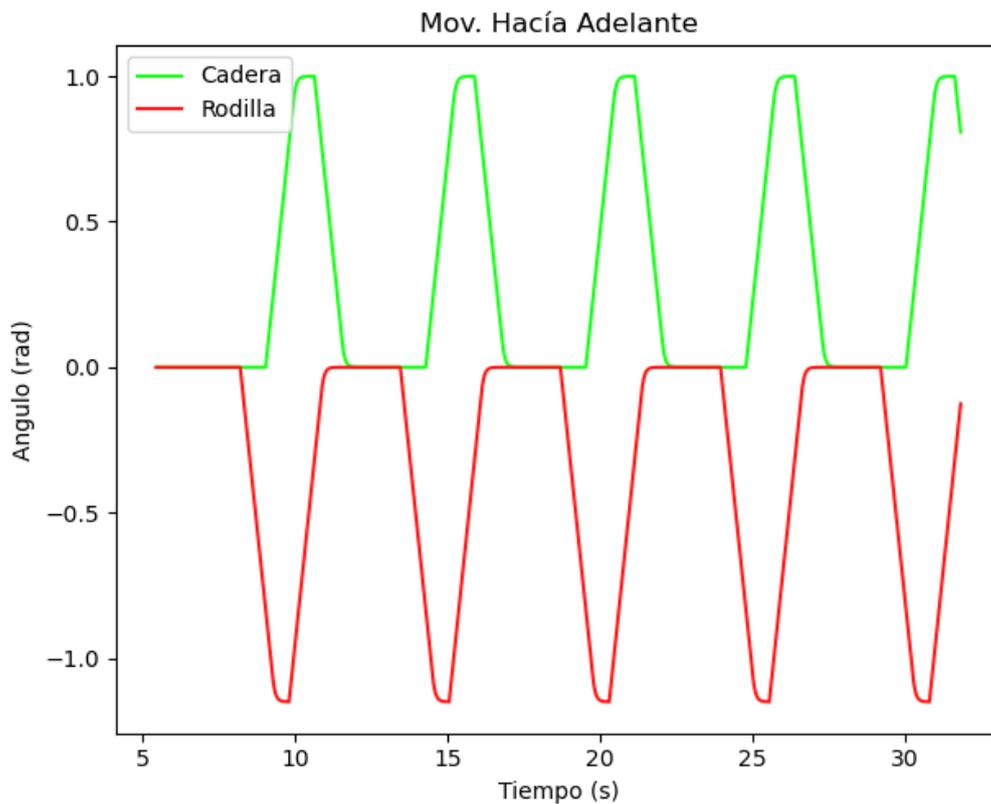


Figura 5.11: Ángulos de cadera y rodilla derecha.

Los ángulos analizados anteriormente corresponden al movimiento de una de las patas de la derecha. A continuación se mostrarán los ángulos de las mismas articulaciones pero para una de las patas de la izquierda.

En la figura 5.12 se puede observar el ángulo para la cadera y la rodilla izquierda. Este caso es muy similar al anterior, los ángulos tienen el mismo comportamiento, lo único que cambia es el periodo en el que se grafican.

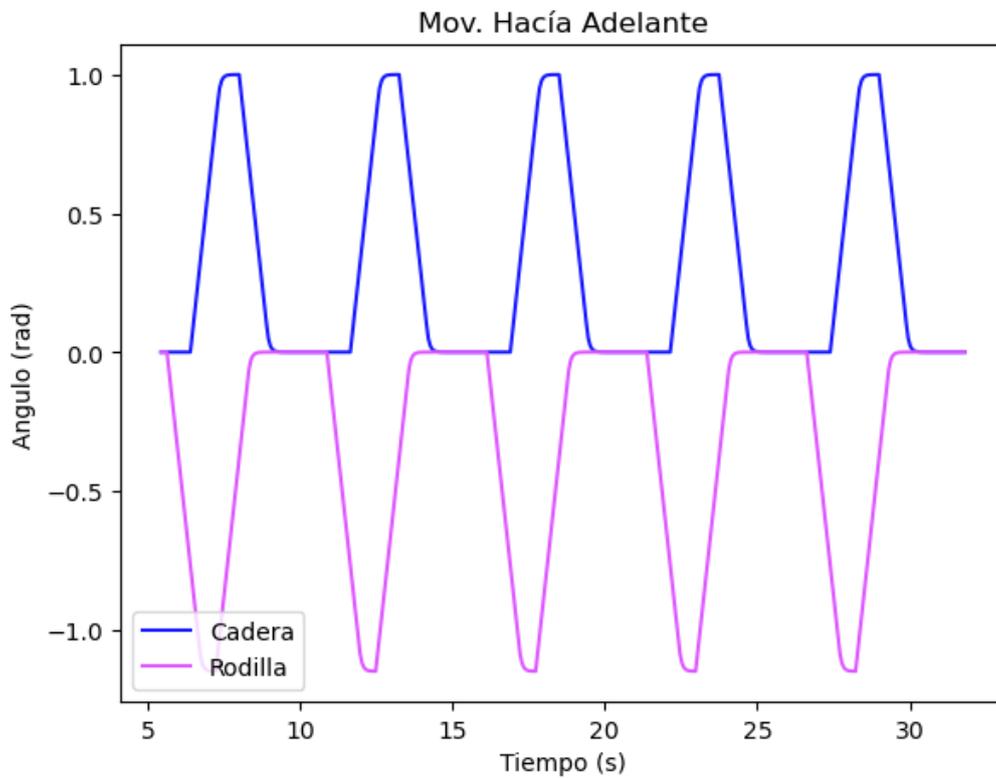


Figura 5.12: Ángulos de cadera y rodilla izquierda.

Para ver la diferencia entre ambas patas, se tiene la figura 5.13. En esta se observa tanto los ángulos de cadera y rodilla derecha como los de la izquierda. Se puede observar que debido a el algoritmo de locomoción explicado en el que se baso la secuencia se esta logrando un comportamiento invertido para simular el movimiento de un canino.

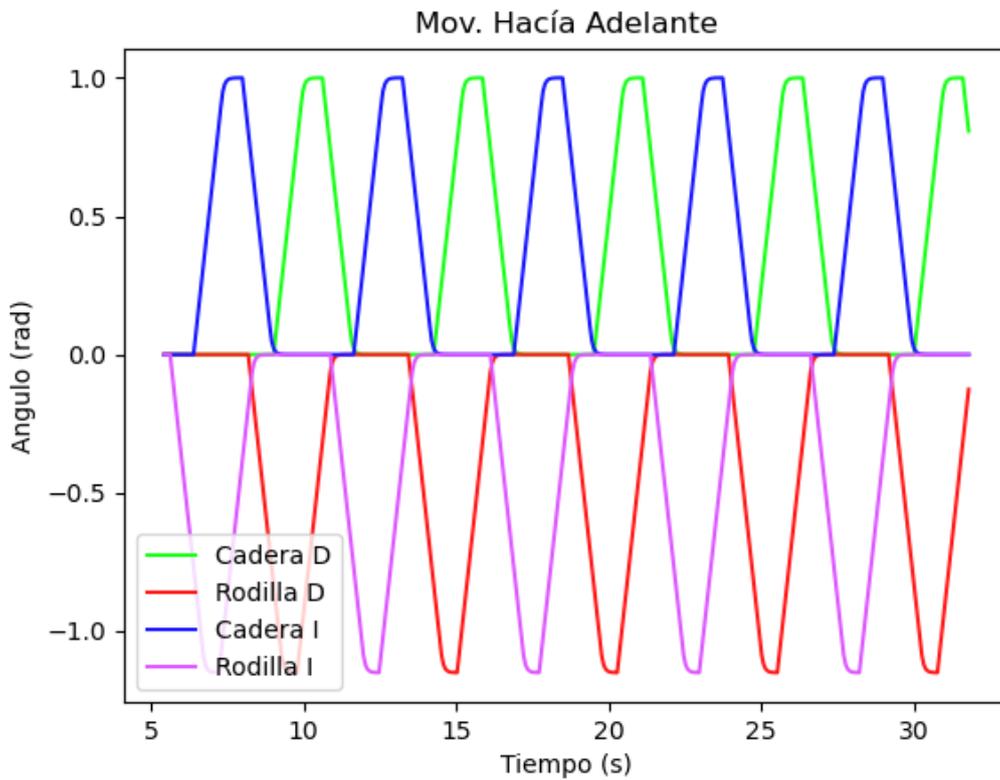


Figura 5.13: Ángulos rodilla y cadera de conjunto.

En esta figura se puede observar que se cumple la secuencia, puesto que mientras se está moviendo la pata derecha y su diagonal no se mueve la izquierda y su diagonal, pero si existe un tramo de tiempo intermedio en el que ambas se encuentran en movimiento.

En este punto es importante resaltar que los resultados se están analizando con únicamente dos patas. Sin embargo, se realiza así con el fin de simplificar, ya que el algoritmo funciona moviendo dos patas al tiempo con el mismo comportamiento pero de manera invertida. Esto aplica para todas las pruebas posteriores.

## 5.3. Prueba 2: Desplazamiento hacia atrás

### 5.3.1. Descripción

El desplazamiento hacia atrás es muy similar al desplazamiento hacia adelante, se utiliza en situaciones en las que el robot tenga que retroceder y retomar su rumbo. Es un desplazamiento bastante útil al momento de evadir obstáculos.

### 5.3.2. Funcionamiento

El funcionamiento de este movimiento esta basado completamente en el de el movimiento hacia adelante. Se utiliza el mismo algoritmo de locomoción solo que invertido, en cuanto a secuencia y ángulos de movimiento.

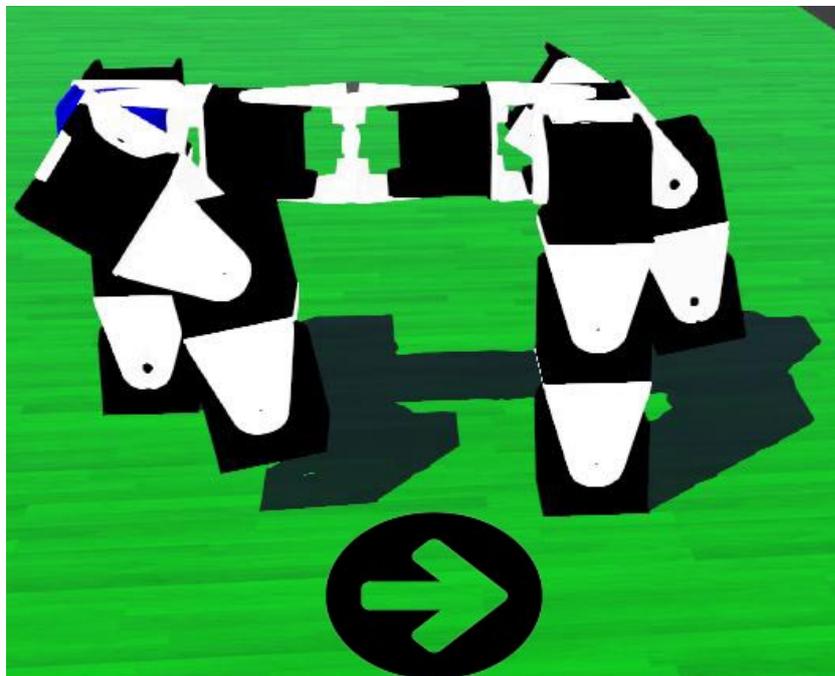


Figura 5.14: Ilustración movimiento hacia atrás.

En la figura 5.14 se muestra una ilustración del funcionamiento del robot cuando realiza un desplazamiento hacia atrás.

### 5.3.3. Análisis De Indicadores De Rendimiento

Para evaluar el desempeño de del movimiento hacia atrás se realizó las mismas pruebas empleadas en el movimiento hacia adelante. En la figura 5.15 se puede observar la distancia en X a través del tiempo. Se midió esta distancia por la misma razón de la prueba anterior, ya que el movimiento se realizó sobre este eje.

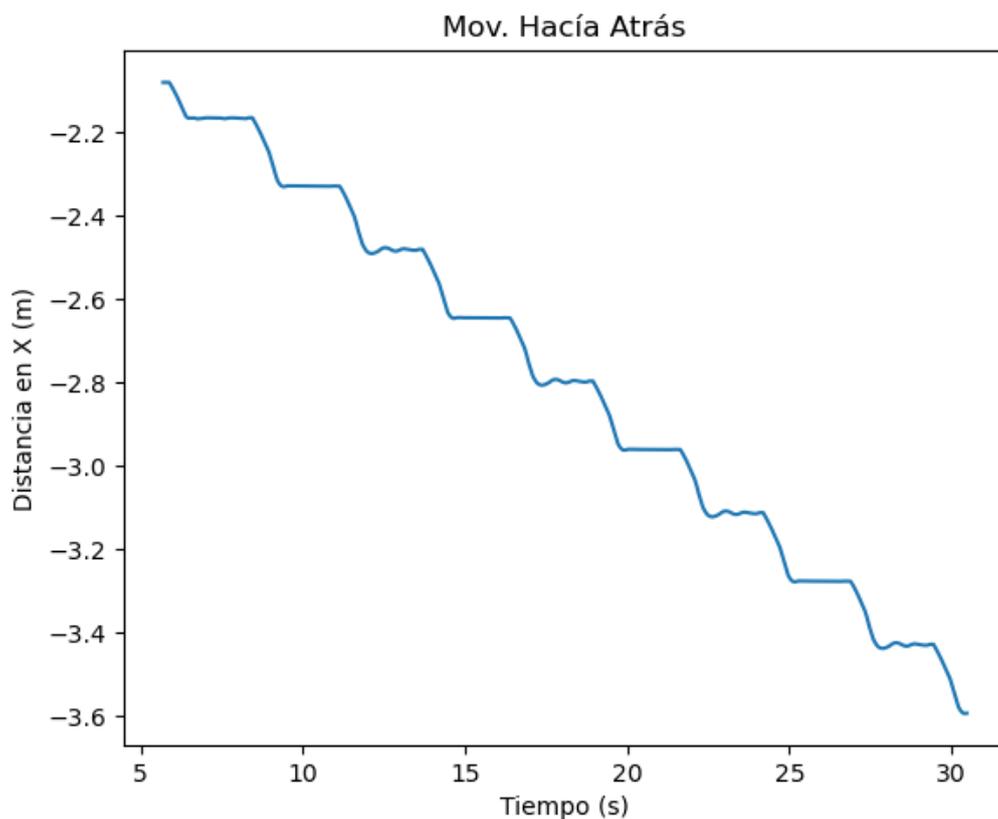


Figura 5.15: Distancia X a través del tiempo.

Como se puede observar, la diferencia con el movimiento hacia adelante es notoria, ya que

como se describió en el funcionamiento es lo mismo pero de manera invertida, por esa razón la gráfica ahora es descendiente y no ascendente como en el movimiento hacía adelante.

El comportamiento invertido también se puede observar en los ángulos de las articulaciones. Similar a la prueba anterior, se midieron los ángulos de las articulaciones en este caso para la cadera y rodilla de una pata derecha. En la figura 5.16 se puede visualizar la gráfica de estos ángulos.

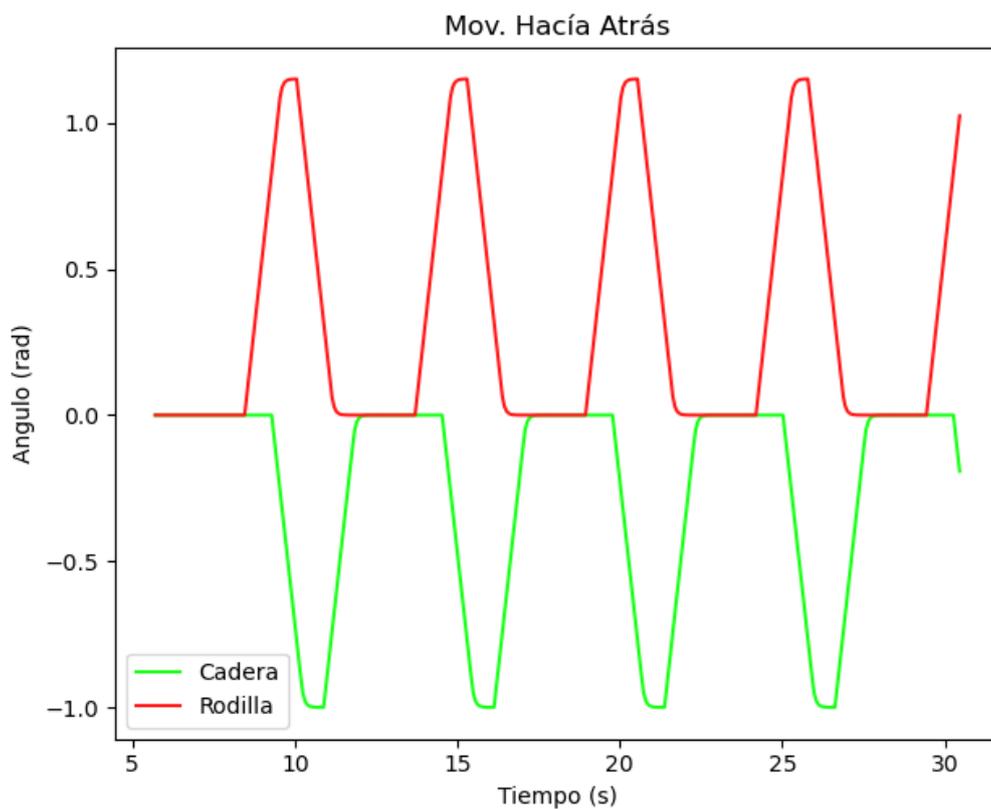


Figura 5.16: Ángulos cadera y rodilla derecha.

Como se puede observar, en este punto también se puede notar la diferencia, dado que los ángulos de cada articulación también están de manera inversa. Mientras que en el movimiento

hacia adelante los ángulos para la cadera eran positivos acá son negativos, lo mismo ocurre para los ángulos de la rodilla.

El comportamiento analizado anteriormente, se repite para los ángulos de las articulaciones de la pata izquierda. En la figura 5.17 se puede observar la inversión de los ángulos comparado con el movimiento hacia adelante.

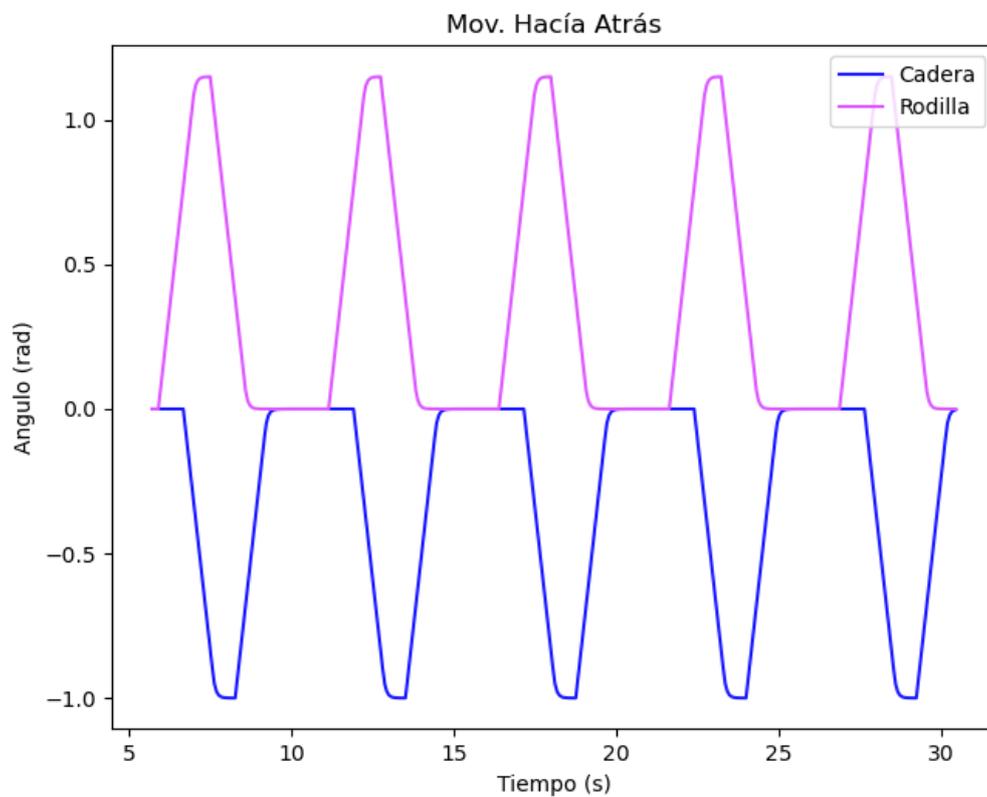


Figura 5.17: Ángulos cadera y rodilla izquierda.

Finalmente similar a la prueba anterior, en la figura 5.18 se observan todos los ángulos en conjunto. De igual forma se está cumpliendo el principio de la secuencia para el algoritmo de locomoción, con la diferencia de la inversión de los ángulos explicada anteriormente.

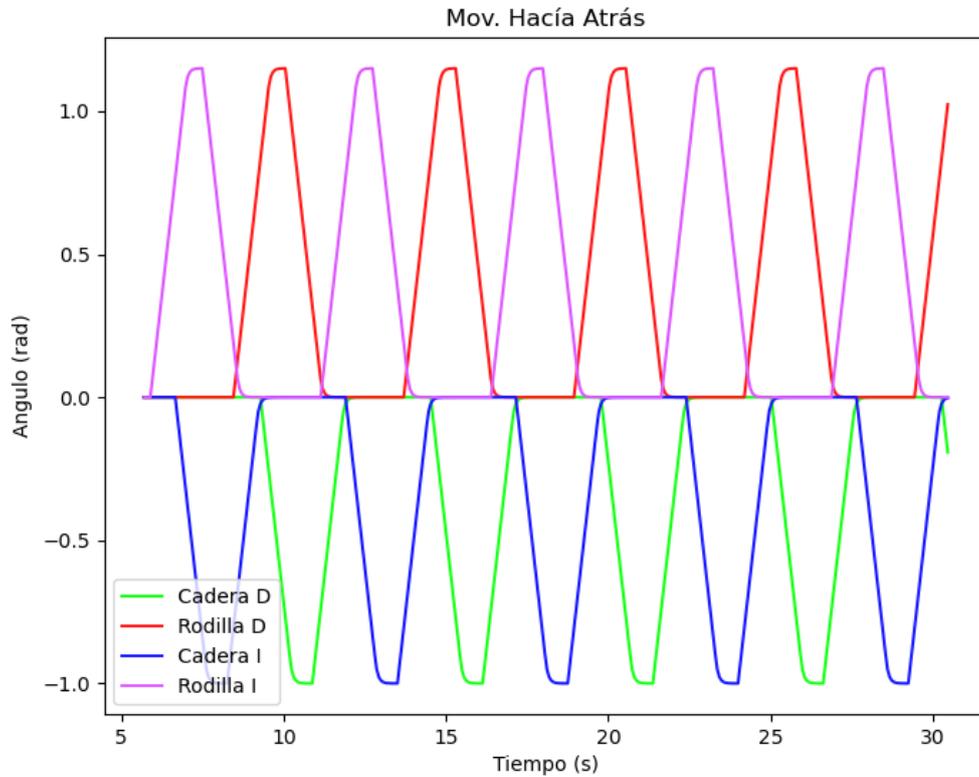


Figura 5.18: Ángulos cadera y rodilla en conjunto.

## 5.4. Prueba 3: Giro a la derecha

### 5.4.1. Descripción

El movimiento de girar a la derecha le permite al robot direccionarse hacia otro lugar. Es muy útil para evasión de obstáculos.

### 5.4.2. Funcionamiento

El funcionamiento del giro a la derecha se da con el movimiento hacia adelante. Para esto, se rota la columna del robot con un ángulo específico y se ejecuta la secuencia de caminado hacia adelante. De esta forma se consigue que el robot gire hacia la derecha.

Para un mejor entendimiento de lo dicho anteriormente, en la figura 5.19 se muestra una ilustración del funcionamiento del robot cuando realiza un giro a la derecha.

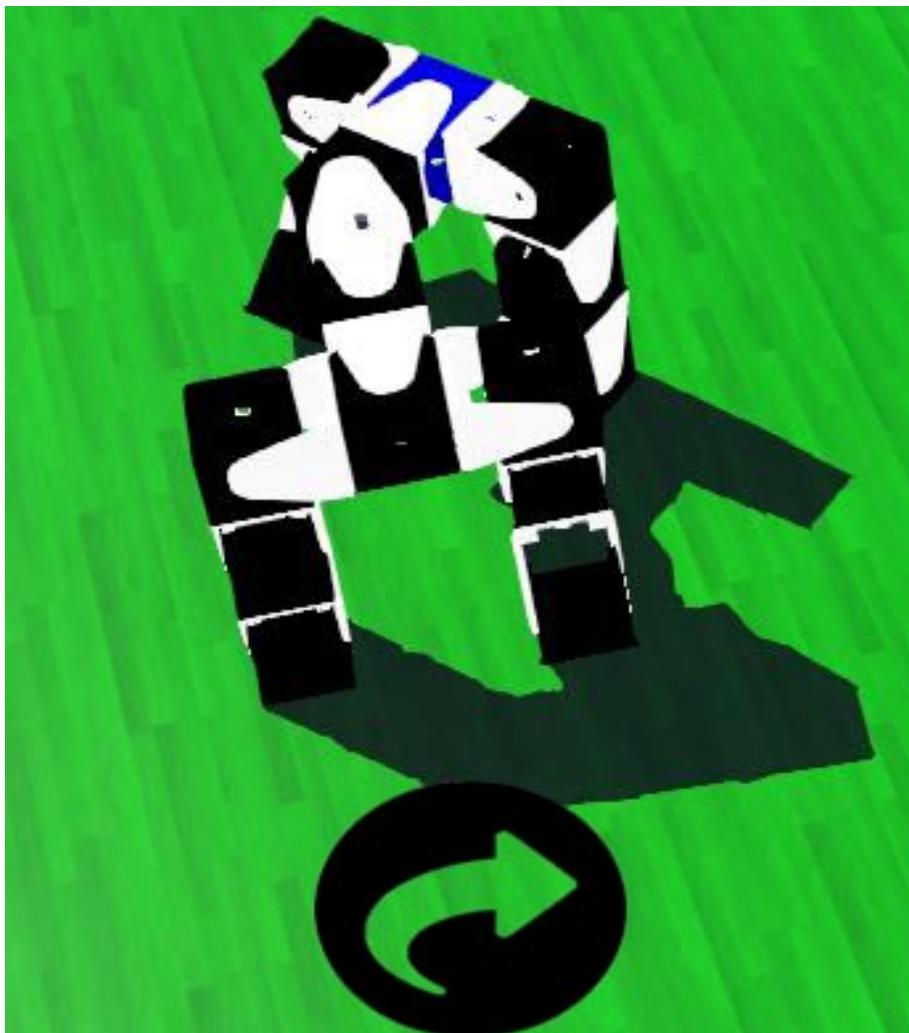


Figura 5.19: Ilustración movimiento giro hacia la derecha.

### 5.4.3. Análisis De Indicadores De Rendimiento

Para las pruebas de los giros se utilizaron más mediciones debido a que la naturaleza del movimiento involucra mas variables.

Para comenzar, en la figura 5.20 se observa la distancia en X con respecto al tiempo. Para este caso como se trata de un giro se puede observar que el robot describe en su movimiento de rotación una gráfica que se asemeja a una función sinusoidal.

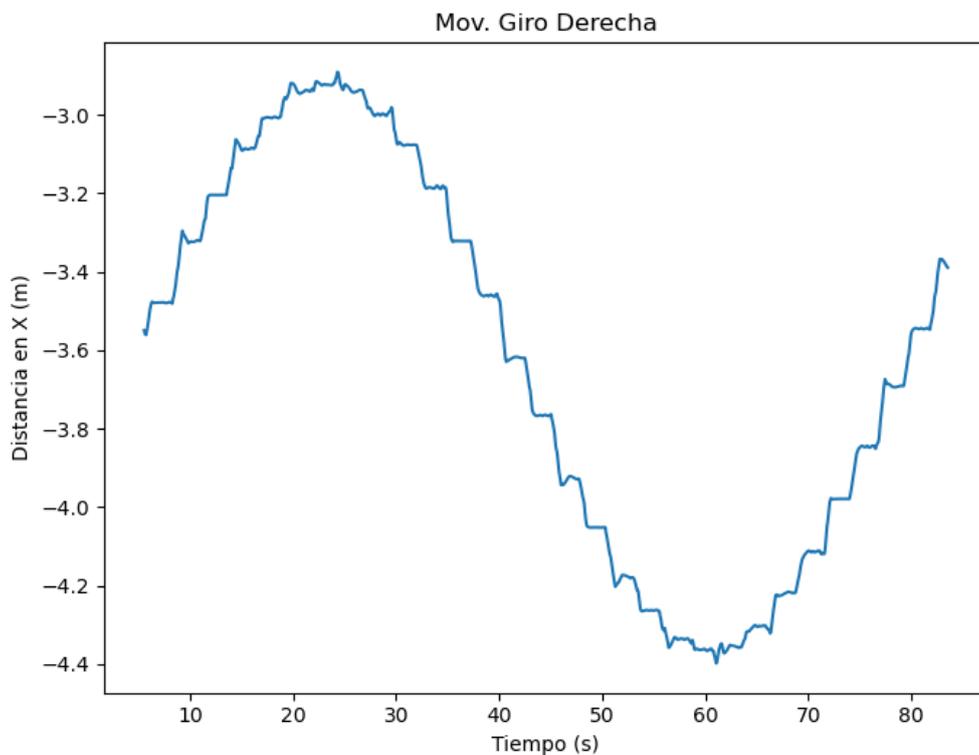


Figura 5.20: Distancia X a través del tiempo.

Por su parte, como se mencionó anteriormente el giro involucra mas variables. Una de esas variables es la distancia sobre el eje Z, puesto que el robot ya no sólo se esta moviendo en línea recta sobre un eje sino en dos para efectuar el giro.

En la figura 5.21 se observa la gráfica de la distancia en Z con respecto al tiempo. Esta gráfica

también cumple un comportamiento curvo, el cual para este caso se asemeja a una parábola con apertura negativa (hacia abajo).

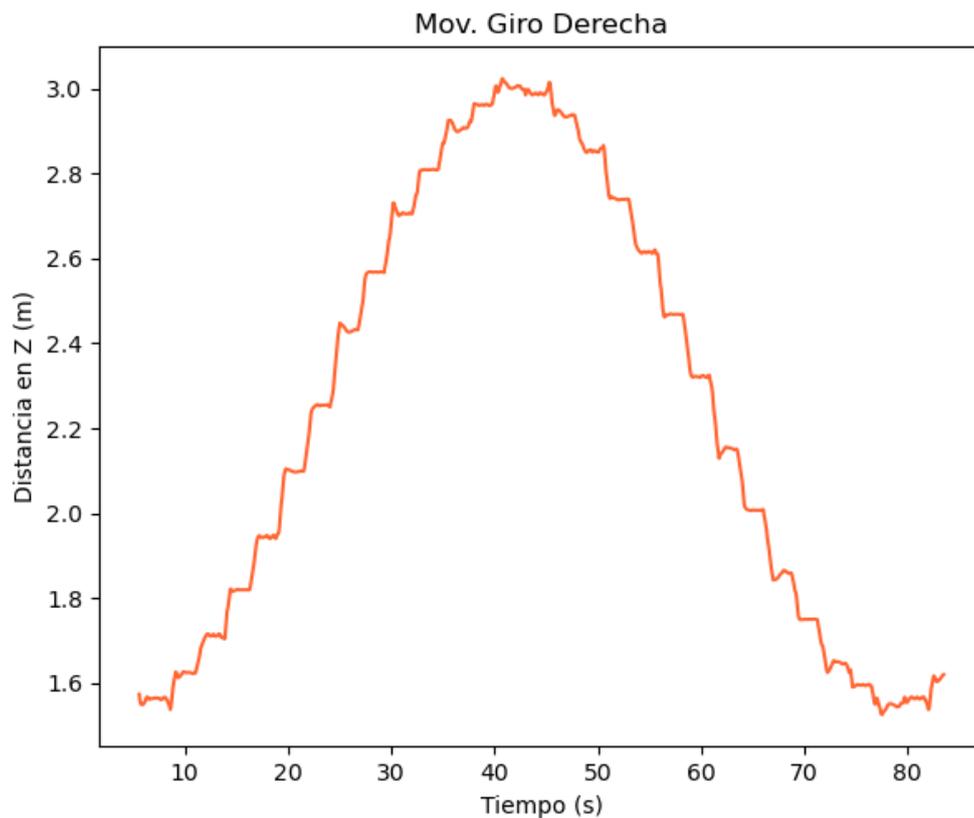


Figura 5.21: Distancia Z a través del tiempo.

Asimismo, como en este caso el robot se está moviendo por dos ejes, estos dos se pueden graficar juntos y obtener la circunferencia que está describiendo el robot con su giro. Para este caso en la prueba realizada se permitió que el robot describiera una circunferencia completa. En la figura 5.22 se observa la circunferencia descrita, debido a la graficación de estos dos ejes juntos.

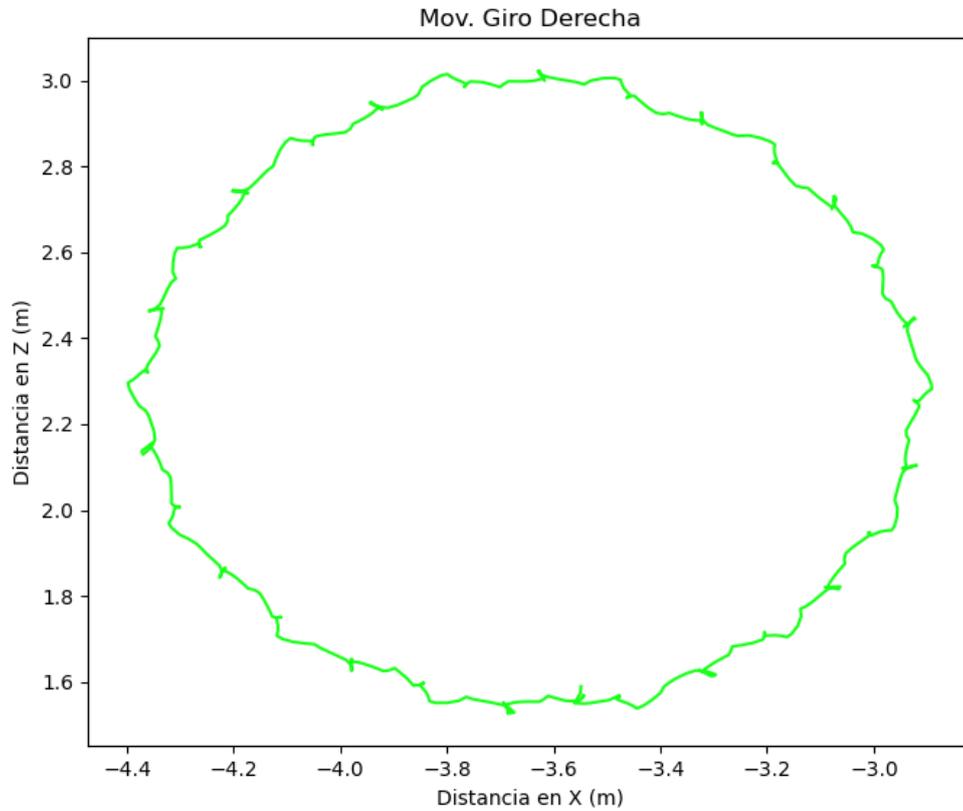


Figura 5.22: Distancia Z con respecto a Distancia X.

Teniendo en cuenta que para este movimiento se realizó un giro de la columna que es la que permite direccionar al robot, en la imagen 5.23 se puede observar la gráfica del ángulo que toma esta articulación para este caso.

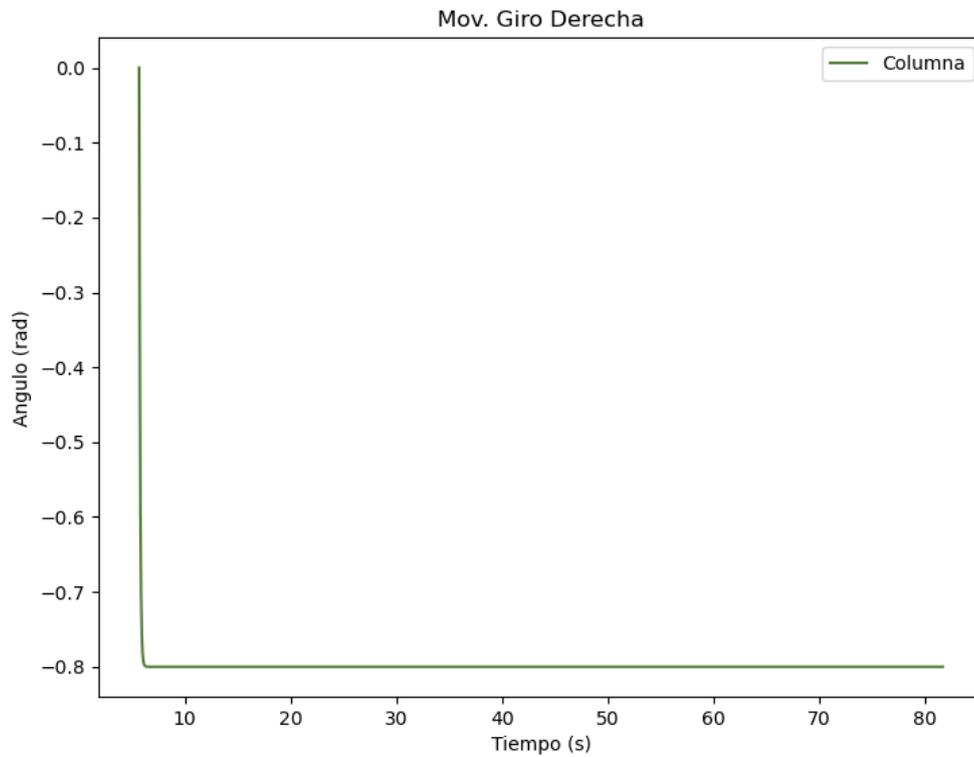


Figura 5.23: Ángulo de la columna.

Como se visualiza en la figura, el ángulo que debe tomar la columna para direccionar el robot hacia la derecha es de  $-0.8$  radianes. Este ángulo se mantiene durante todo el movimiento.

Por otro lado, este giro hace uso del algoritmo de locomoción para caminado. Por esta razón, en la figura 5.24 se observan los ángulos de la cadera y la rodilla para la pata derecha, en los cuales se obtiene el mismo comportamiento en el movimiento hacia adelante.

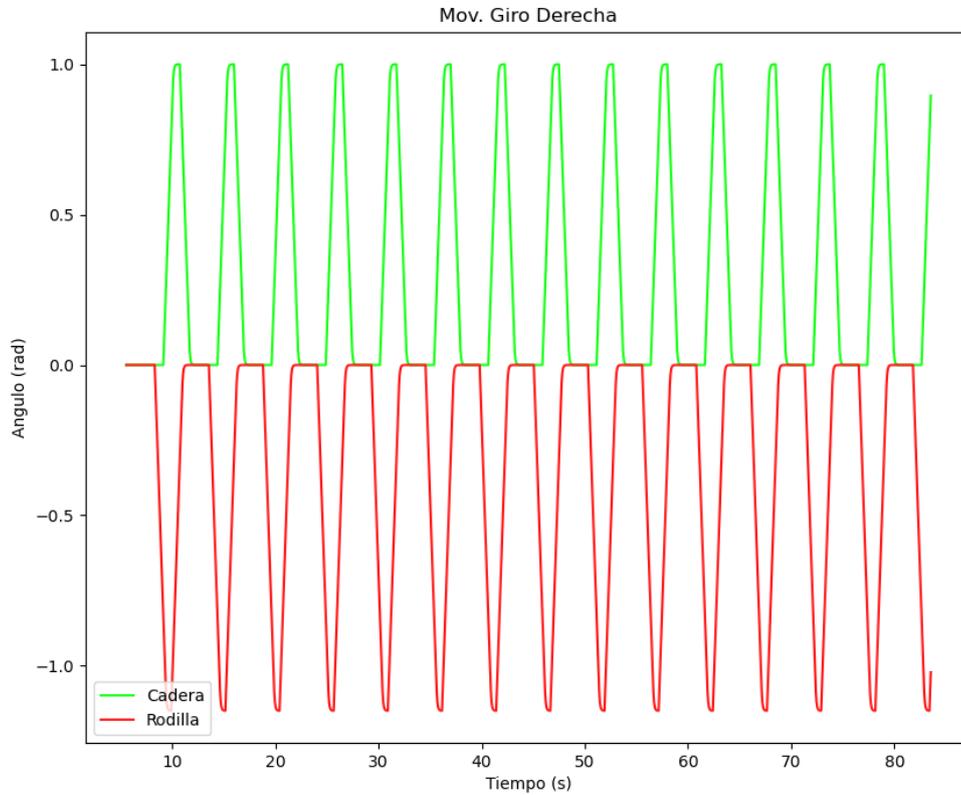


Figura 5.24: Ángulos cadera y rodilla derecha.

La única diferencia que se puede visualizar en esta gráfica es el tiempo que se empleó como prueba para que el robot efectuara una vuelta completa, lo cual conlleva a más ciclos.

De la misma manera, en la figura 5.25 se puede observar los ángulos de cadera y rodilla para la pata izquierda. Por lo dicho anteriormente, se obtiene la misma gráfica obtenida para el movimiento hacia adelante con la única diferencia del tiempo empleado y más ciclos.

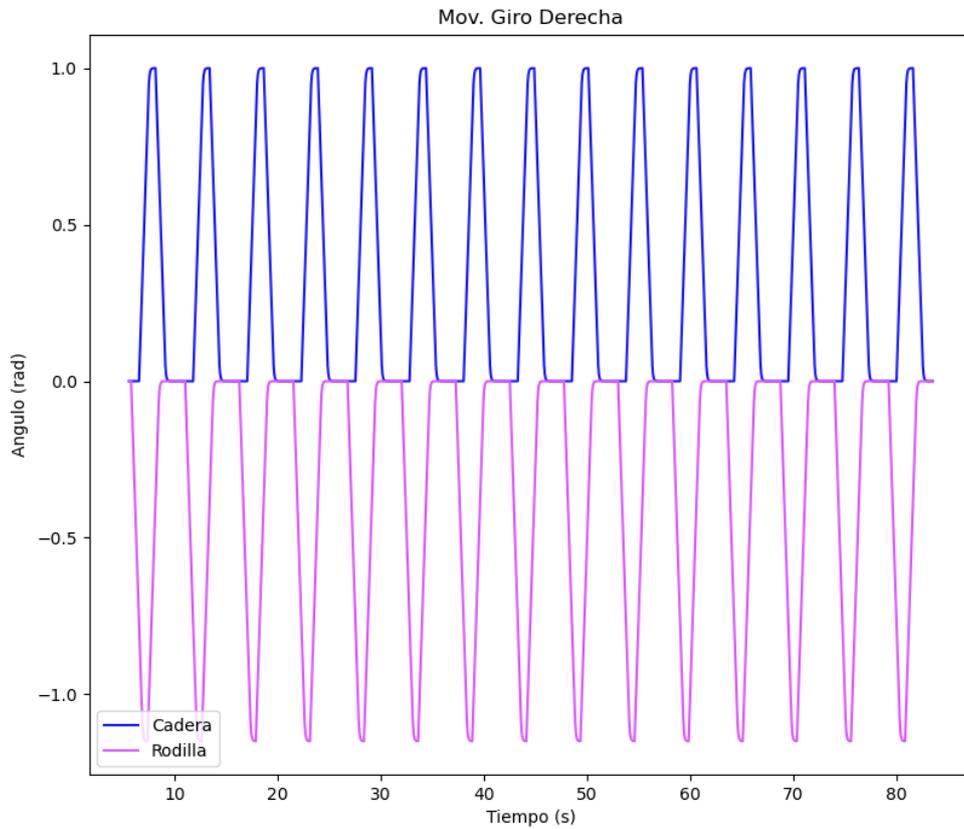


Figura 5.25: Ángulos cadera y rodilla izquierda.

Finalmente, en la figura 5.26 se observa todos los ángulos para ambas patas en conjunto. Una vez mas se comprueba que es el mismo comportamiento obtenido en el movimiento hacía adelante.

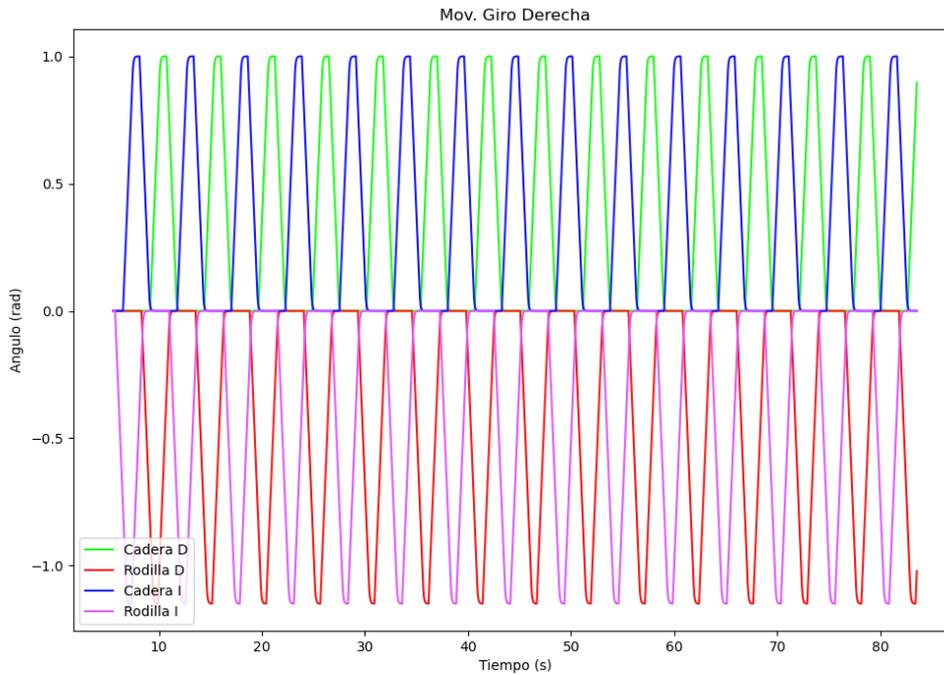


Figura 5.26: Ángulos cadera y rodilla conjunto.

## 5.5. Prueba 4: Giro a la izquierda

### 5.5.1. Descripción

El movimiento de girar a la izquierda es muy similar al del giro a la derecha. Este al igual que el anterior permite evadir obstáculos.

### 5.5.2. Funcionamiento

El funcionamiento de giro a la izquierda al igual que el caso anterior se da con el movimiento hacia adelante. En este caso la columna también se rota con un ángulo específico, que es el mismo del giro a la derecha, la única diferencia es el signo de este ángulo. Una vez se gira la

columna se ejecuta la secuencia de caminado hacia adelante, de esta forma se logra que el robot gire a la izquierda.

En la figura 5.27 se muestra una ilustración de lo dicho anteriormente para un mejor entendimiento del funcionamiento del robot cuando realiza un giro a la izquierda.

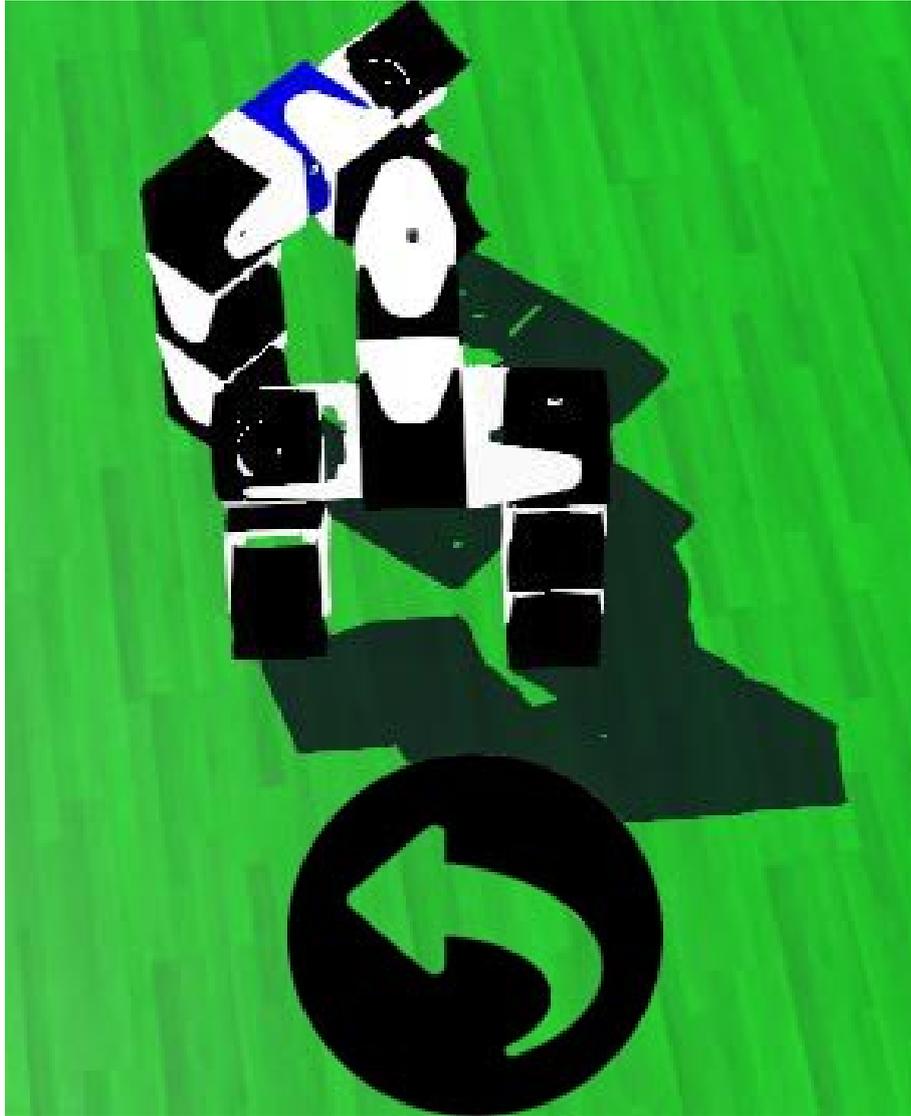


Figura 5.27: Ilustración movimiento giro hacía la izquierda.

### 5.5.3. Análisis De Indicadores De Rendimiento

El funcionamiento del giro a la izquierda es muy similar al giro de la derecha. Una comprobación de esto es la figura 5.28, dado que se obtuvo algo muy similar a lo obtenido en el giro a la derecha, en donde el robot describió un comportamiento sinusoidal. Esta similitud casi exacta ocurre ya que el movimiento sobre el eje X es casi idéntico en ambos giros por que en ambos se esta partiendo del mismo punto y se esta describiendo una vuelta completa.

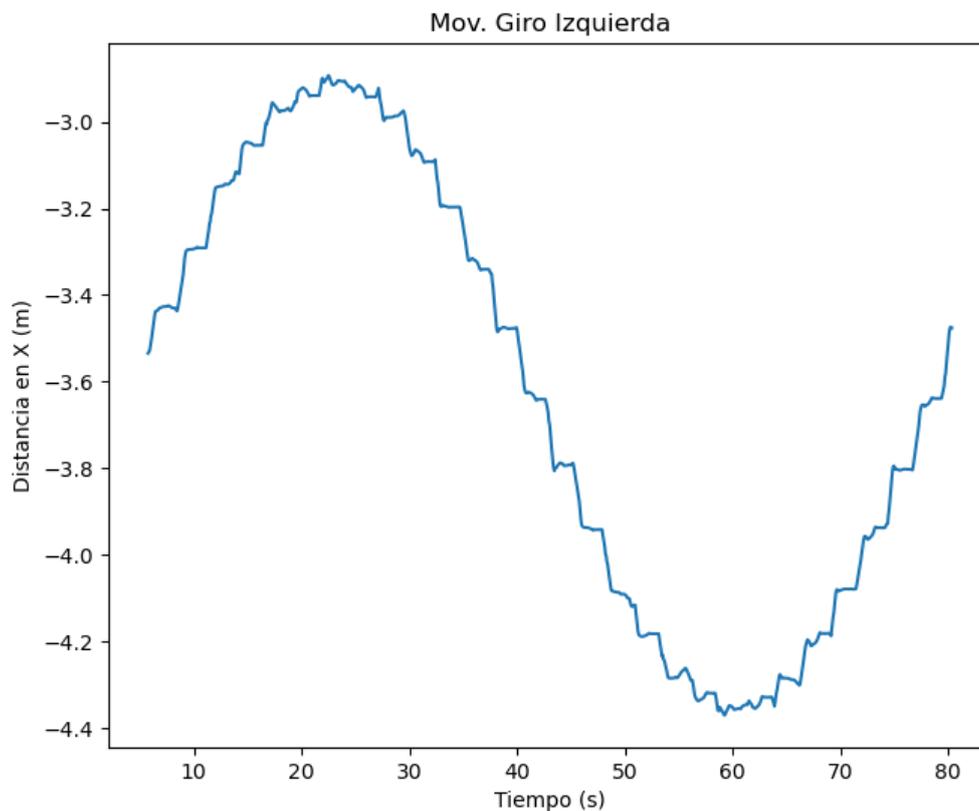


Figura 5.28: Distancia X a través del tiempo.

El cambio y la diferencia con respecto al giro anterior se comprueba en la distancia descrita en el eje Z, dado que para este caso el robot dependiendo del giro esta partiendo con una dirección diferente.

En la figura 5.29 se puede observar la distancia Z con respecto al tiempo, en la cual se puede observar el contraste con la curva obtenida en el giro a la derecha. Para este caso se obtiene una parábola también, pero esta tiene una apertura positiva (hacia arriba).

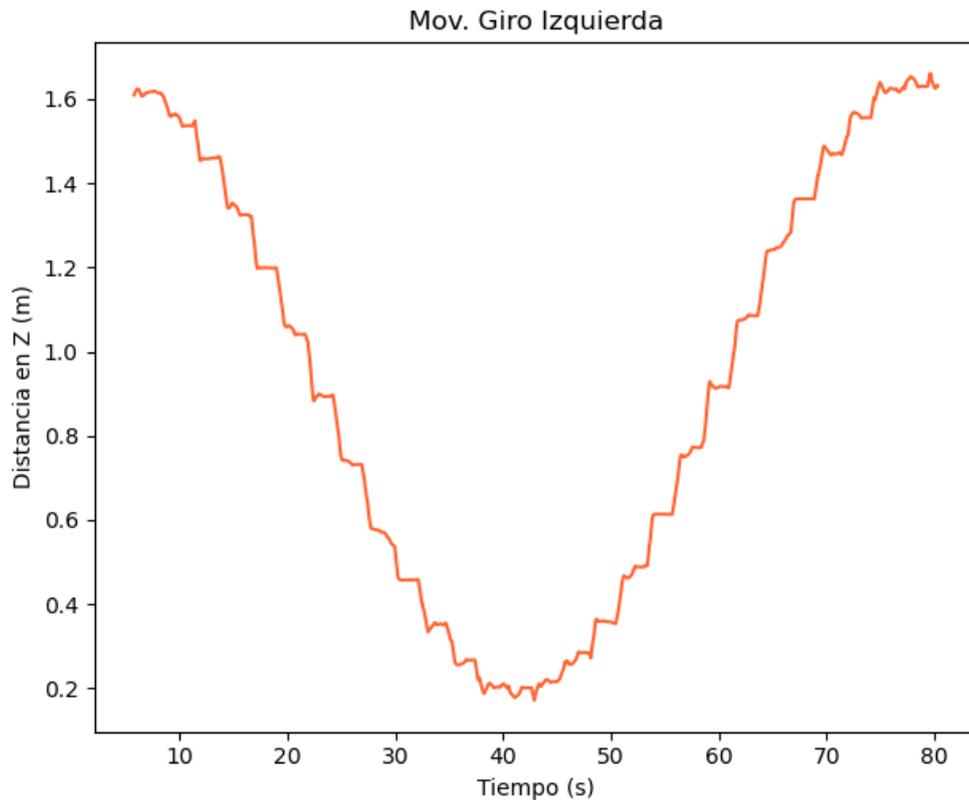


Figura 5.29: Distancia Z a través del tiempo.

Posteriormente, como era de esperarse con lo analizado anteriormente. En la figura 5.30 se puede observar la circunferencia realizada por el robot que se obtuvo para el caso de este giro. Se evidencia una circunferencia bastante similar a la obtenida en el giro a la derecha, lo cual es correcto debido a que el robot a pesar de que las pruebas de giro tengan diferencias en la dirección que toman en su punto de partida, se está describiendo la misma vuelta completa.

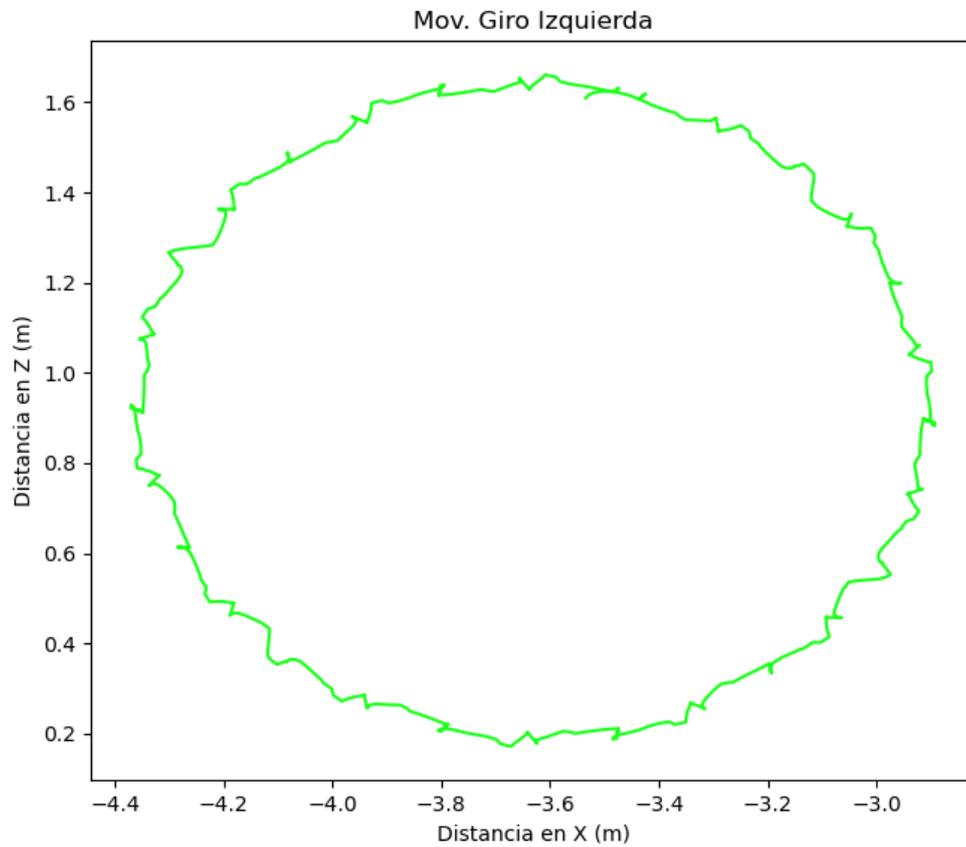


Figura 5.30: Distancia Z con respecto a Distancia X.

Para el caso del giro a la izquierda, el ángulo de la articulación de la columna es el inverso al obtenido en el giro a la derecha. En la imagen 5.31 se visualiza la gráfica del ángulo que toma esta articulación.

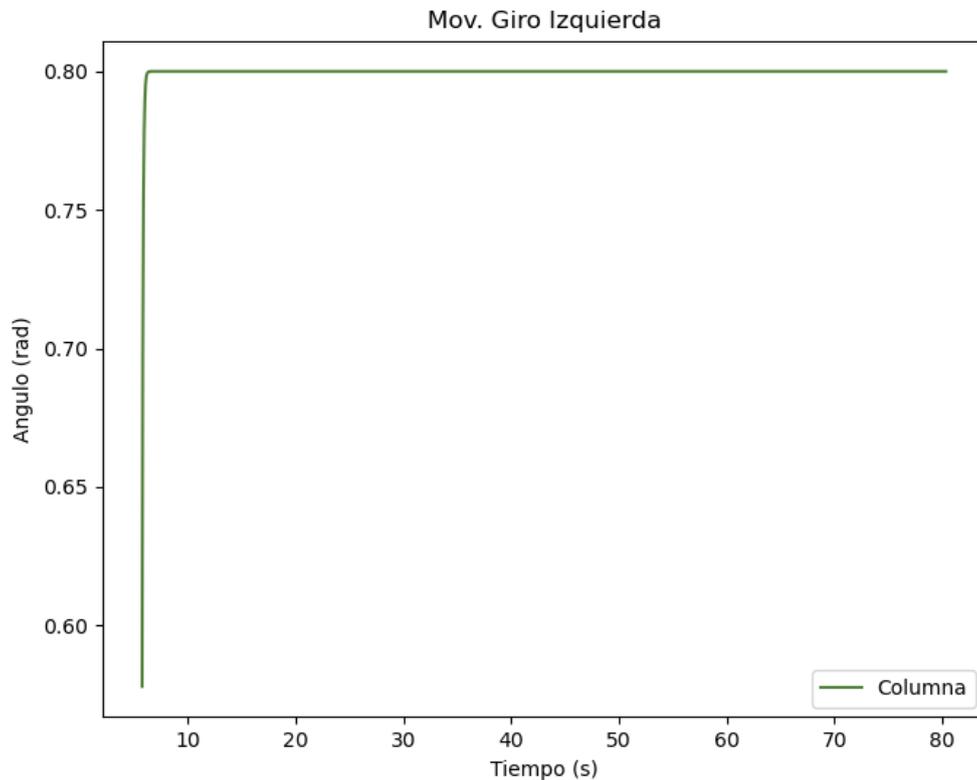


Figura 5.31: Ángulo de la columna.

Como se puede observar, el ángulo es de **0.8** radianes y al igual que lo que sucedía en el giro a la derecha este se mantiene durante todo el movimiento.

Por su parte, similar al caso del giro hacia la derecha y como se describió en el funcionamiento este giro también funciona con el algoritmo de locomoción del movimiento hacia adelante. Por lo cual con la figura 5.32 se comprueba que se están obteniendo los ángulos de las articulaciones de cadera y rodilla para la pata derecha del mismo modo que en el movimiento hacia adelante. La única diferencia es el periodo y el número de ciclos que se ejecutan.

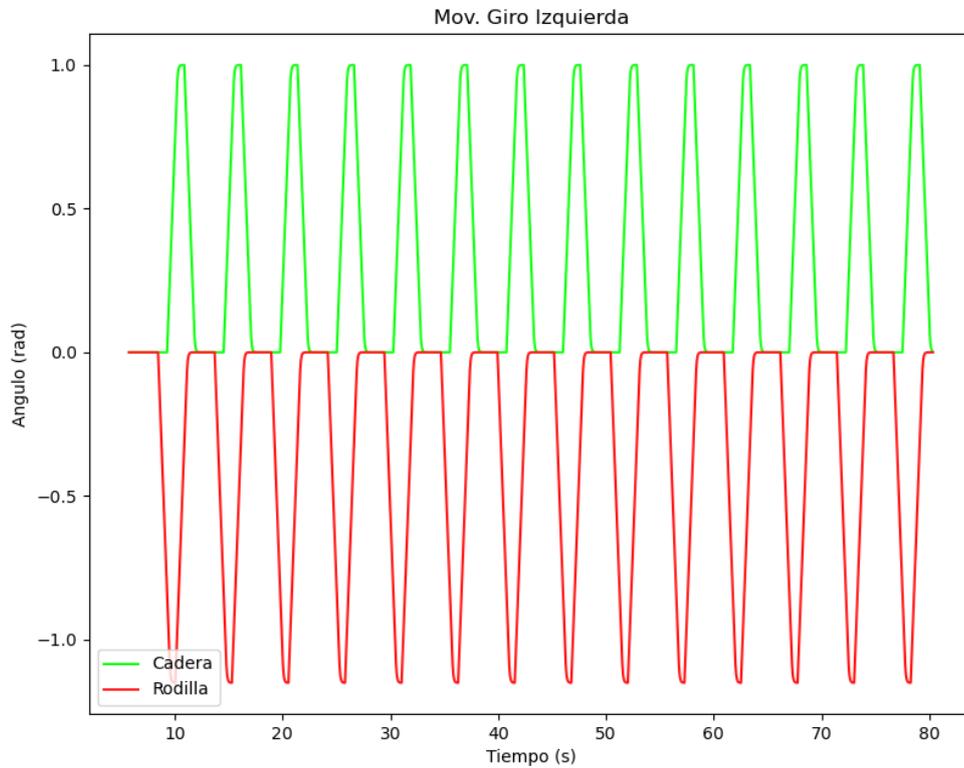


Figura 5.32: Ángulos cadera y rodilla derecha.

Del mismo modo, esto se cumple para los ángulos de cadera y rodilla de la pata izquierda, los cuales, tal como se visualiza en la figura 5.33 se obtiene lo mismo del movimiento hacia adelante con un periodo de tiempo largo mayor y más ciclos de ejecución.

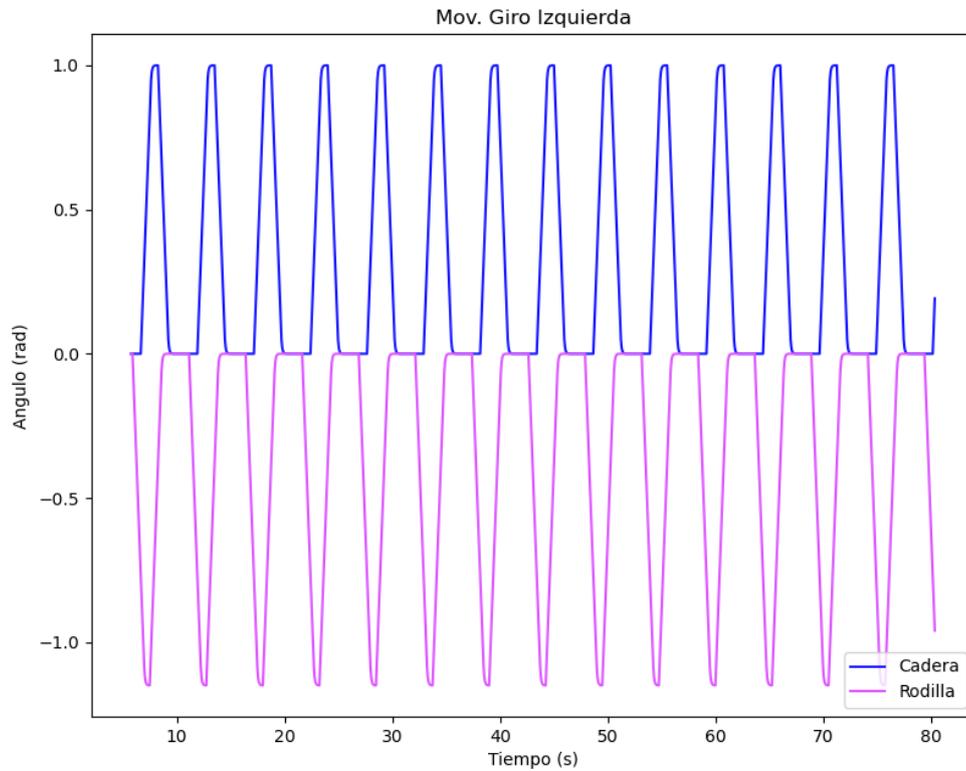


Figura 5.33: Ángulos cadera y rodilla izquierda.

Finalmente, se comprueba el funcionamiento de manera completa con la figura 5.34. En esta figura se muestra las articulaciones de la cadera y la rodilla para ambas patas en conjunto obteniéndose el mismo comportamiento del movimiento hacia adelante con mas ciclos y mas tiempo, que fue el necesario para que el robot describiera una vuelta completa.

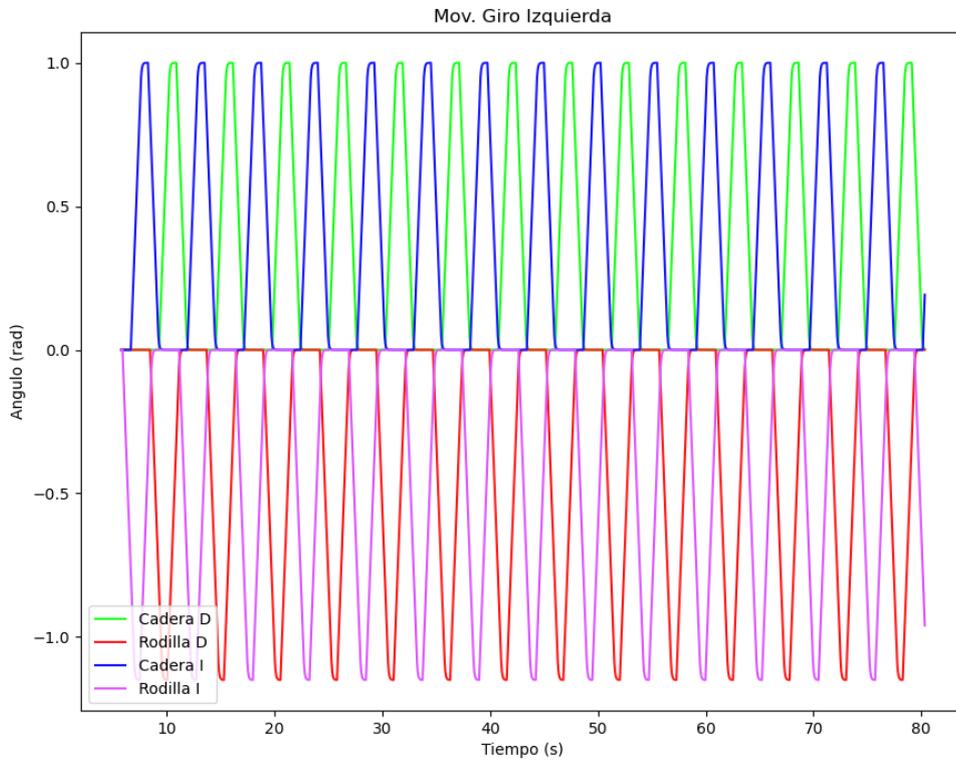


Figura 5.34: Ángulos cadera y rodilla conjunto.

## 5.6. Prueba 5: Rotación sobre su propio eje

### 5.6.1. Descripción

El movimiento de rotación sobre el propio eje del robot hace al robot mucho mas versátil en sus movimientos. Este tipo de movimiento, le permite al robot desempeñarse de una mejor manera y poder evadir obstáculos en situaciones en las que el robot este a distancias muy cortas de los objetos.

### 5.6.2. Funcionamiento

Para el funcionamiento de este tipo de movimiento fue necesario hacer uso de otra articulación la cual permite rotar los semi módulos para lograr que el movimiento de la rodilla no sea paralelo a la columna del robot sino perpendicular. Una vez logrado esto, también se utilizó otra articulación que es muy parecida a la de la rodilla pero esta un poco mas arriba.

Para entender lo dicho anteriormente, en la figura 5.35 se muestra una ilustración del funcionamiento del robot cuando esta realizando un giro sobre su propio eje.

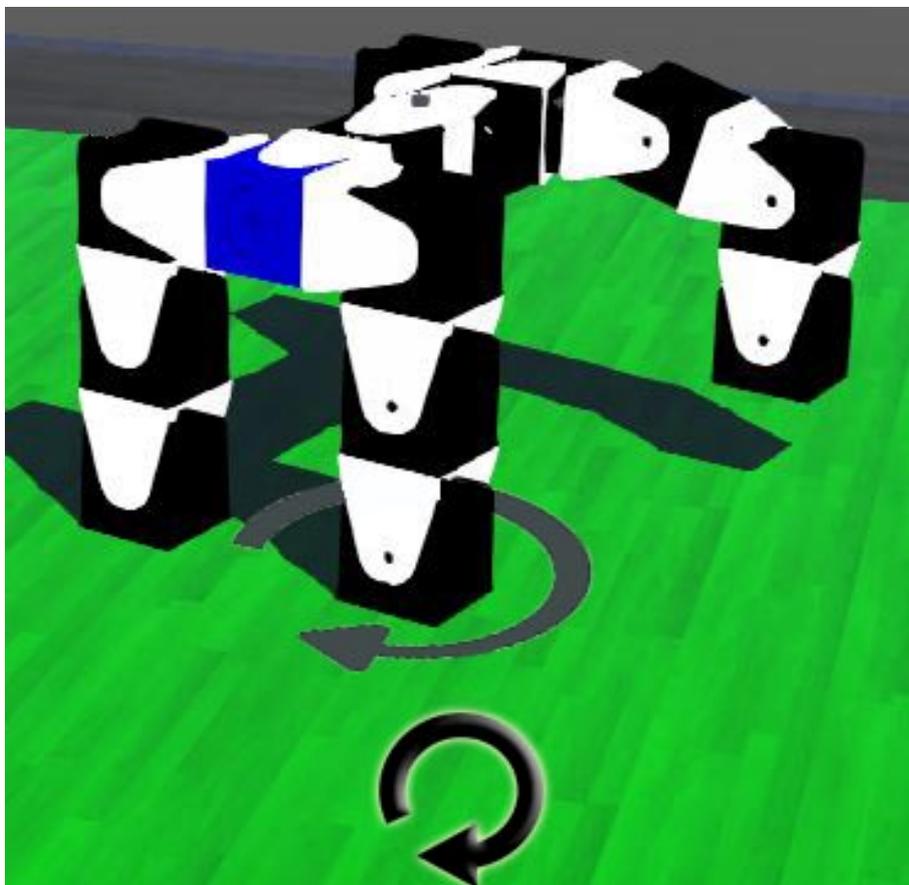


Figura 5.35: Ilustración movimiento giro sobre su propio eje.

Como se puede observar y como se mencionó anteriormente la articulación que permite este movimiento es la que realiza un giro de 90 grados a los semi-módulos que parten desde la rodilla

como se muestra en la figura con la flecha gris. Asimismo, gracias a esta orientación lateral el robot puede hacer uso del semi-módulo superior y el de la rodilla para realizar un movimiento sobre su propio eje. Este procedimiento se realiza con las patas en diagonal, por lo que si se utiliza la pata delantera derecha y la trasera izquierda el robot se moverá hacia la derecha y si se utilizan las inversas a las mencionadas anteriormente el robot se moverá hacia la izquierda.

Esta funcionalidad corresponde a la que se encuentra en la figura 5.36, la cual permite desde la interfaz gráfica realizar un movimiento sobre su propio eje en sentido horario y anti-horario.



Figura 5.36: Funcionalidad movimiento sobre su propio eje.

### **5.6.3. Análisis De Indicadores De Rendimiento**

Para el análisis de este movimiento no hace falta tener en cuenta el desplazamiento en ninguno de los ejes, ya que el robot no se está desplazando, sólo está girando sobre su propio eje. Por esta razón, a continuación se mostrarán los resultados obtenidos del comportamiento de las articulaciones involucradas para este movimiento para ambos sentidos.

## Giro Horario

Para el giro a favor de las manecillas del reloj, se obtuvieron los resultados que se expondrán a continuación. En la figura 5.37 se observan los ángulos obtenidos para las articulaciones de la rodilla y superior de la pata izquierda.

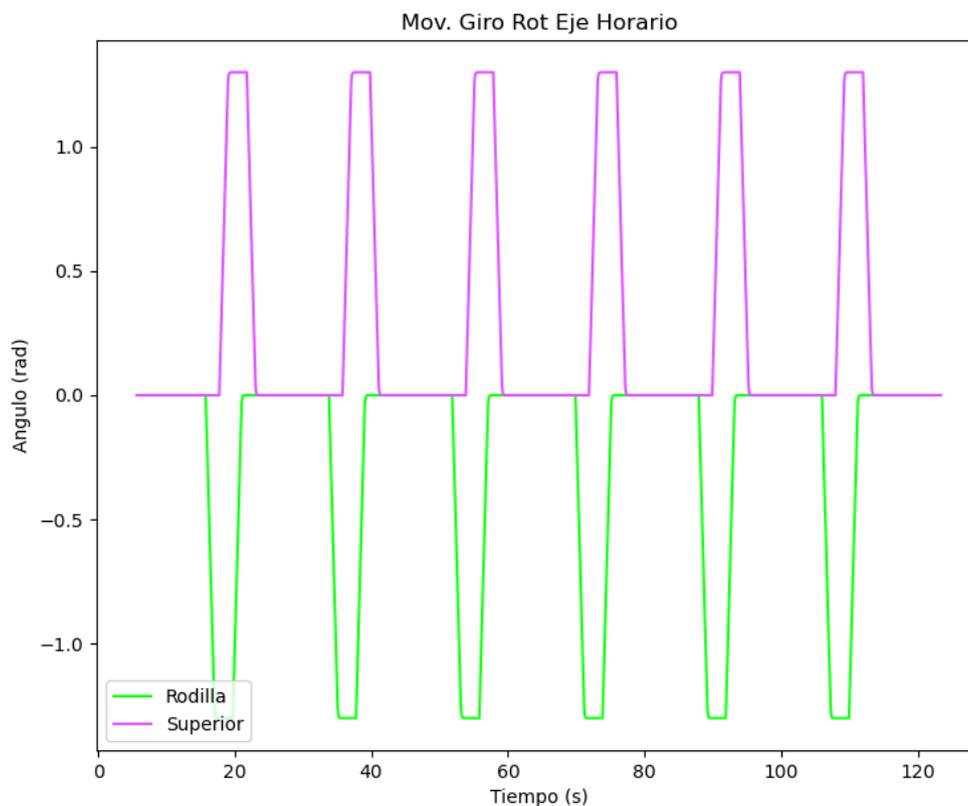


Figura 5.37: Ángulos superior y rodilla izquierda.

Como se puede observar, mientras que para la rodilla el ángulo aplicado a través del tiempo es negativo, para la articulación superior el ángulo es positivo

Posteriormente, para las articulaciones de la pata derecha, se obtuvieron los resultados que

se observan en la figura 5.38. Como se puede evidenciar este comportamiento es inverso al observado anteriormente con la pata izquierda, dado que el ángulo aplicado para la rodilla durante el movimiento es positivo y el de la articulación superior es negativo.

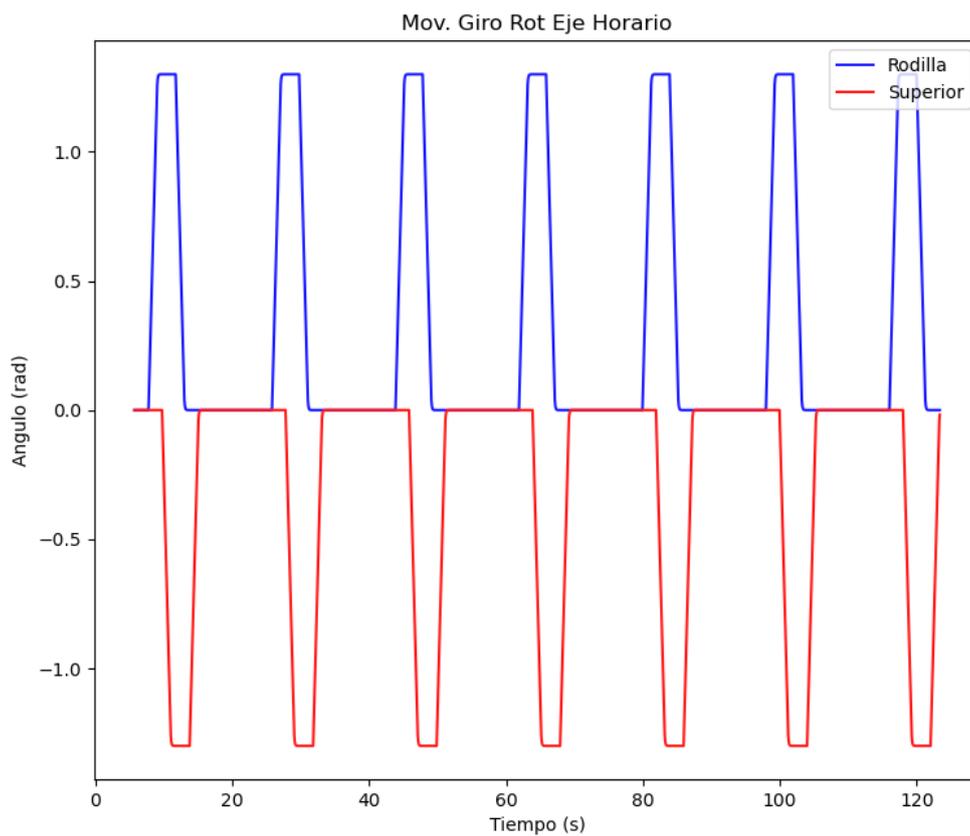


Figura 5.38: Ángulos superior y rodilla derecha.

Finalmente, para contrastar el comportamiento de ambas patas en el movimiento de rotación sobre su propio eje en sentido horario, en la figura 5.39 se observan los ángulos de estas condensados en una sola gráfica.

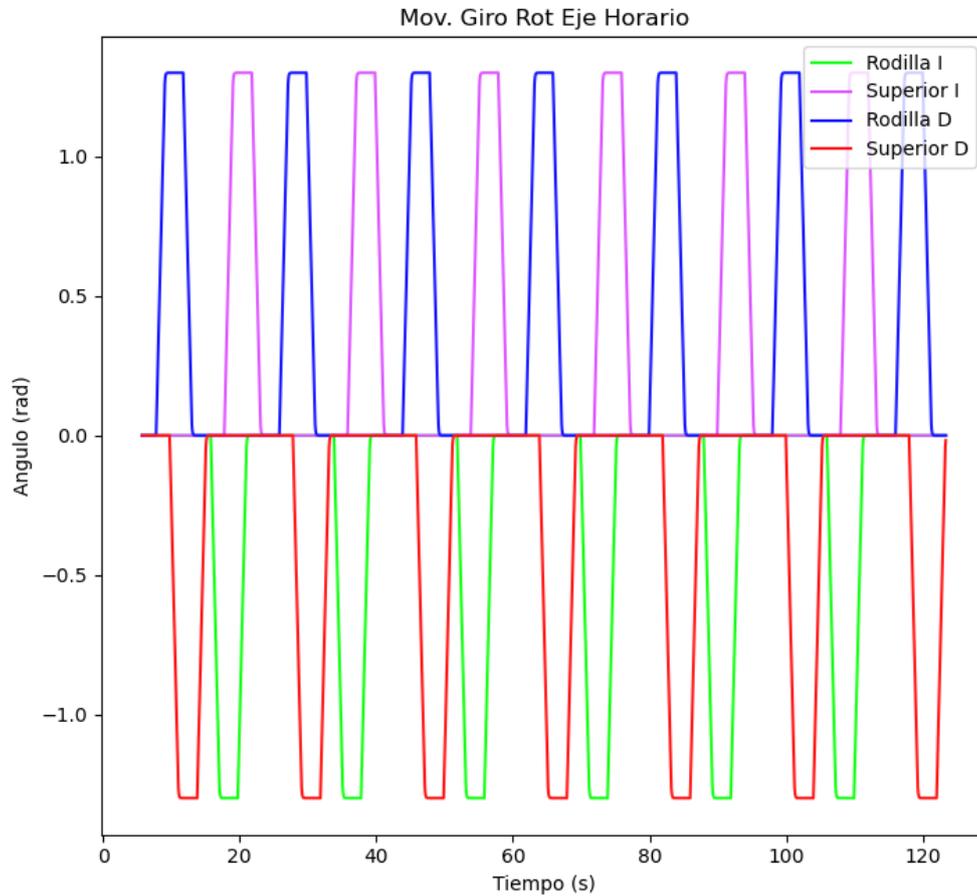


Figura 5.39: Ángulos superior y rodilla en conjunto.

### Giro Anti-Horario

Para el movimiento del giro en contra de las manecillas del reloj se obtuvieron los resultados que se expondrán a continuación. En la figura 5.40 se observan los ángulos obtenidos para las articulaciones superior y rodilla de la pata izquierda. Como se puede evidenciar en esta gráfica, el ángulo otorgado para ambas articulaciones es negativo, lo cual se diferencia con el giro en sentido horario en el que se generaban ángulos invertidos.

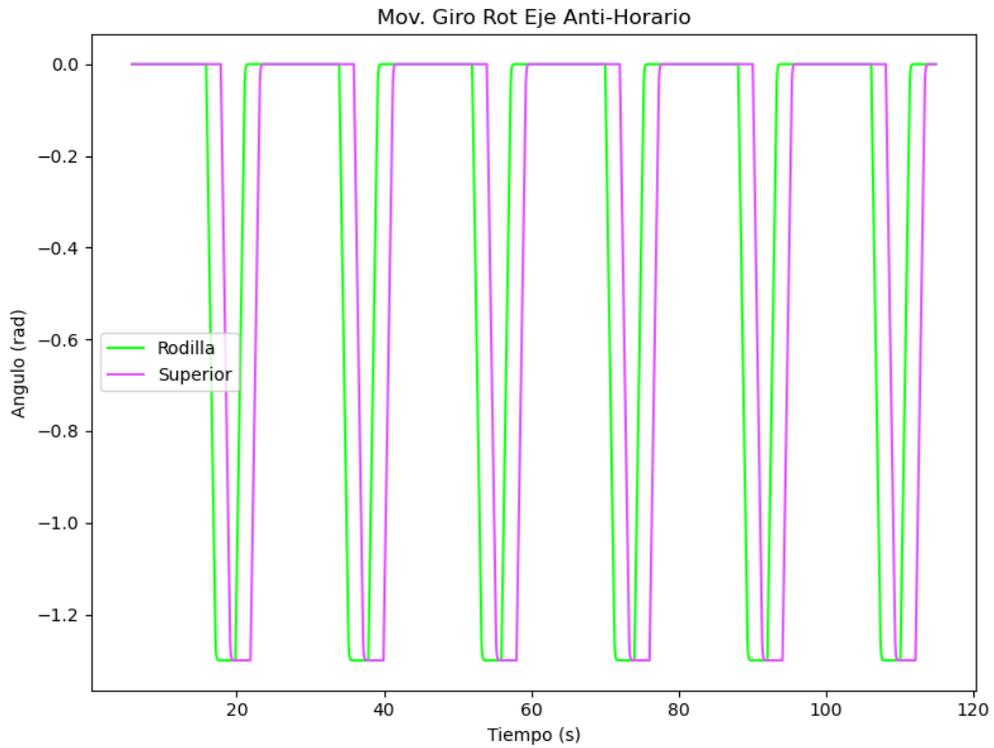


Figura 5.40: Ángulos superior y rodilla izquierda.

Posteriormente, en la figura 5.41 se pueden observar los ángulos de las articulaciones superior y rodilla de la pata derecha. Se obtuvo que el ángulo suministrado también es el mismo como en el caso anterior, con la diferencia que es un ángulo positivo.

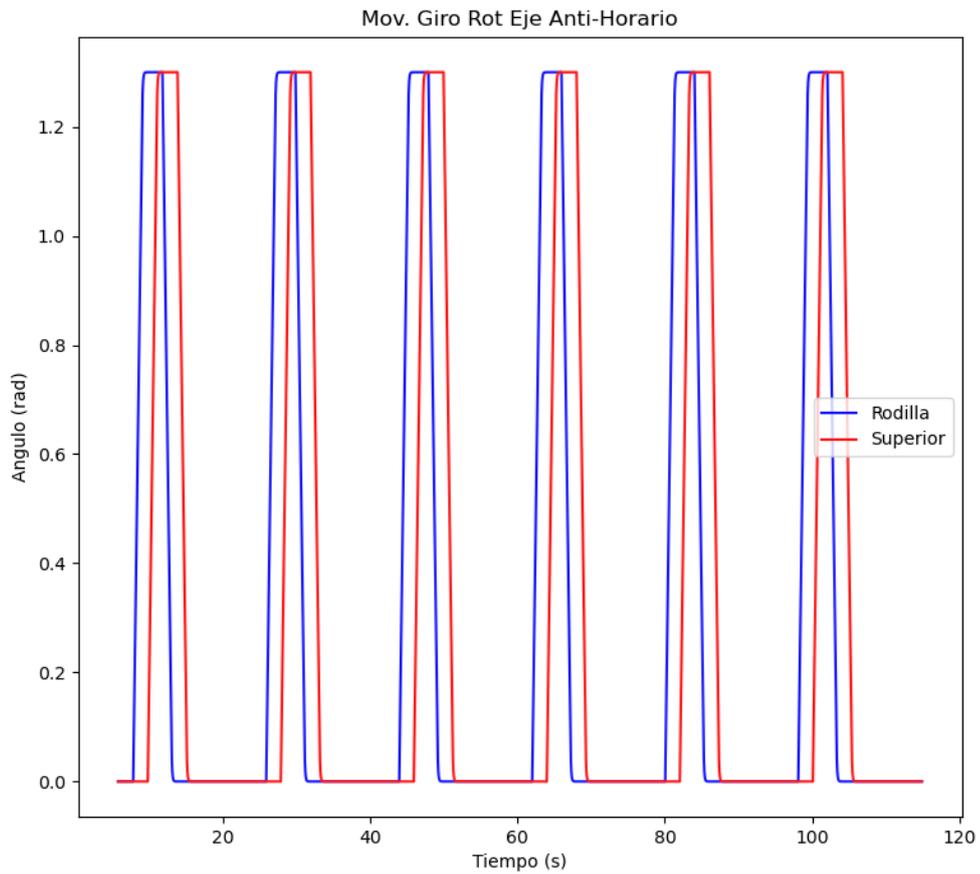


Figura 5.41: Ángulos superior y rodilla derecha.

Finalmente, en la figura 5.42 se pueden observar los ángulos obtenidos en el movimiento de rotación sobre su propio eje en sentido anti-horario para ambas patas condenados en una sola gráfica.

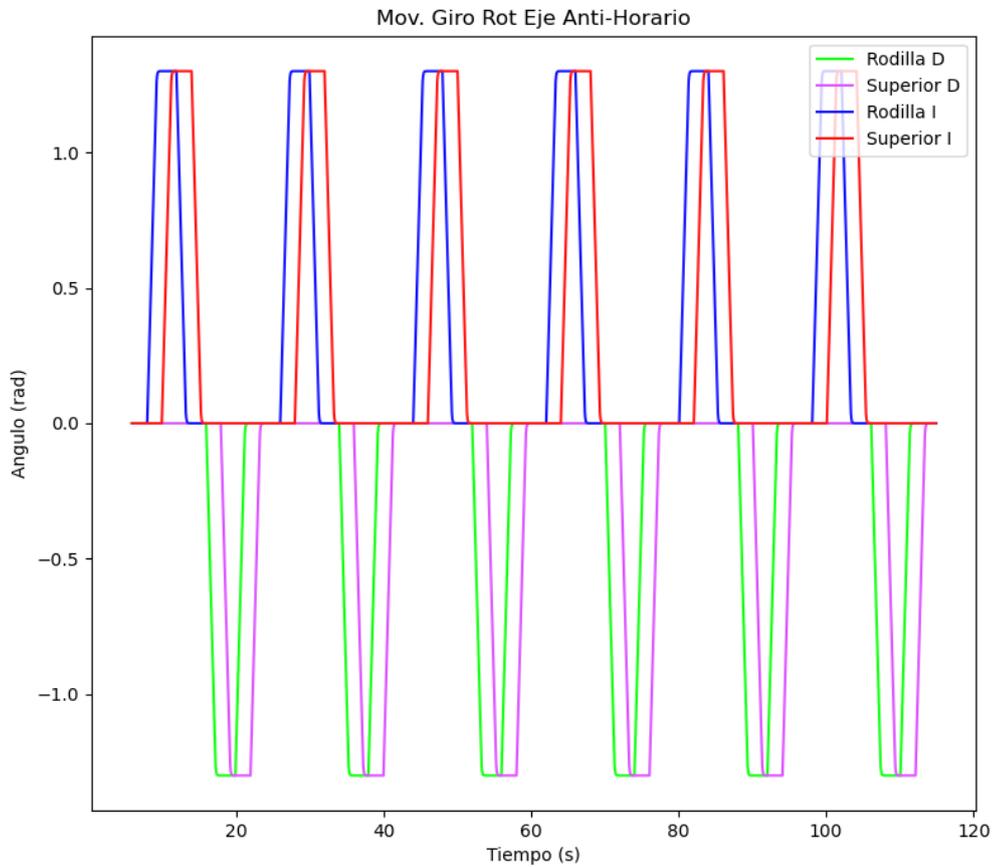


Figura 5.42: Ángulos superior y rodilla en conjunto.

## 5.7. Prueba 6: Movimientos estáticos adicionales

Esta sección corta se realiza con la finalidad de mostrar el resultado de los movimientos estáticos que se agregaron al robot para las funcionalidades de sentarse y acostarse. Estas funcionalidades se pueden encontrar en la interfaz gráfica y corresponden a los botones que se observan en la figura 5.43.



Figura 5.43: Funcionalidades de sentarse y acostarse.

### 5.7.1. Sentarse

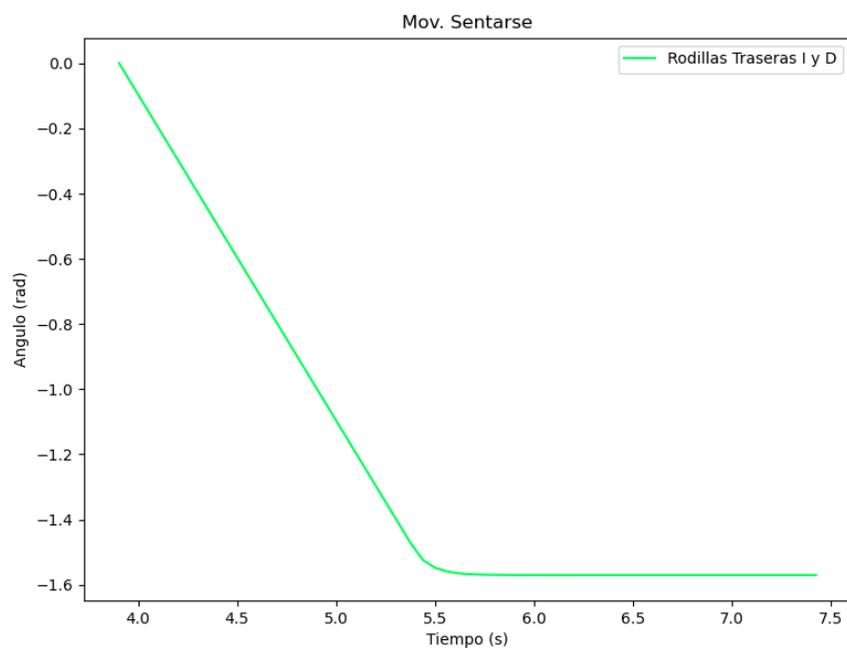


Figura 5.44: Ángulos articulaciones de rodilla patas traseras.

Para sentarse el robot ocupa las articulaciones de la rodilla de ambas patas traseras, tanto la izquierda como la derecha. En la figura 5.44 se observa el ángulo obtenido para estas articulaciones una vez se ejecuta el movimiento. Como se puede observar, simplemente es un ángulo el cual se mantiene mientras el robot este en este estado.

Finalmente en la figura 5.45 se puede observar una imagen del robot después de haberle aplicado esta funcionalidad.

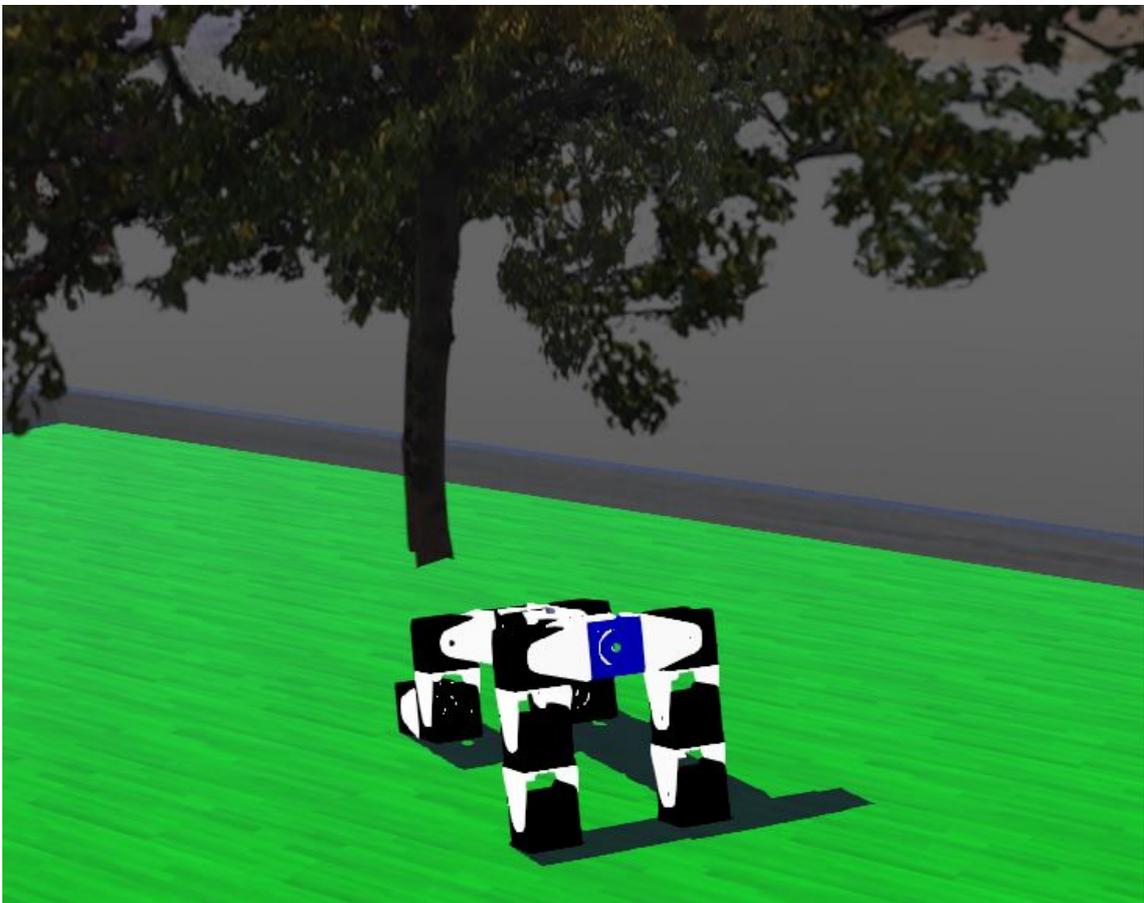


Figura 5.45: Robot en estado sentado.

### 5.7.2. Acostarse

Para acostarse el robot ocupa más articulaciones que el movimiento anterior. Para este caso, el robot hace uso de las articulaciones de la rodilla para todas las patas. Por lo tanto, en la figura 5.46 se pueden observar los ángulos obtenidos para estas articulaciones una vez se ejecuta este movimiento.

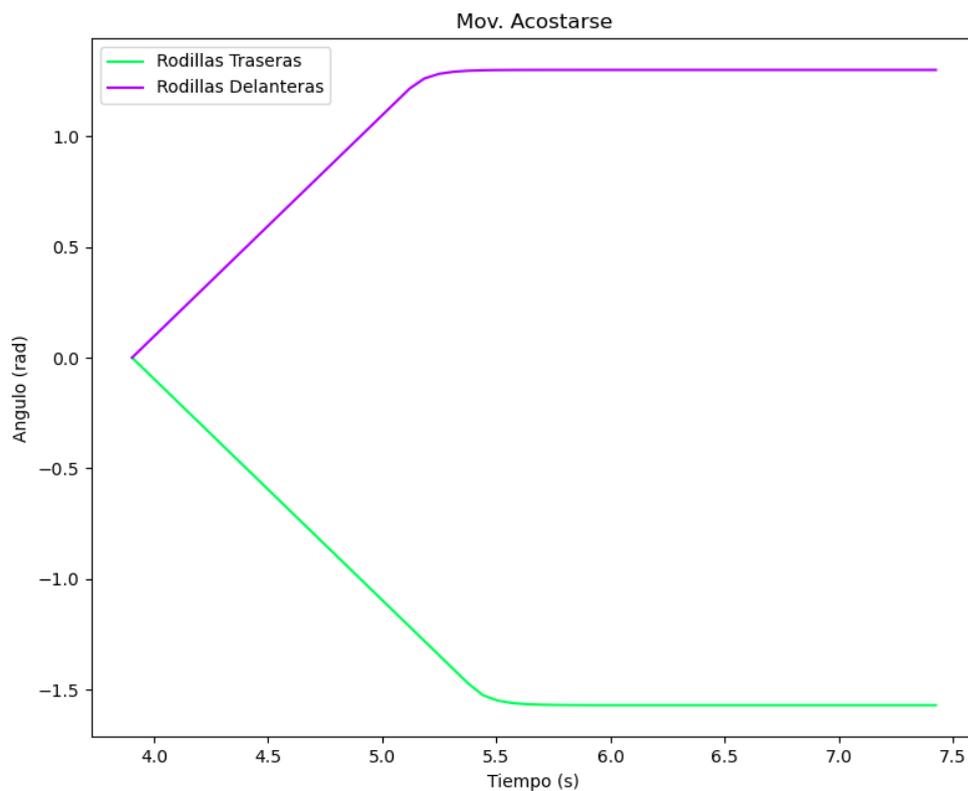


Figura 5.46: Ángulos articulaciones de rodilla en todas las patas.

Como se pudo evidenciar en la figura anterior, el ángulo para las articulaciones de la rodillas traseras es inverso al ángulo para las articulaciones de las rodillas delanteras. Este al igual que en el caso anterior se mantiene siempre que se este ejecutando este movimiento.

Finalmente, similar al caso anterior, en la figura 5.47 se puede observar una imagen del

robot después de haberle aplicado esta funcionalidad.

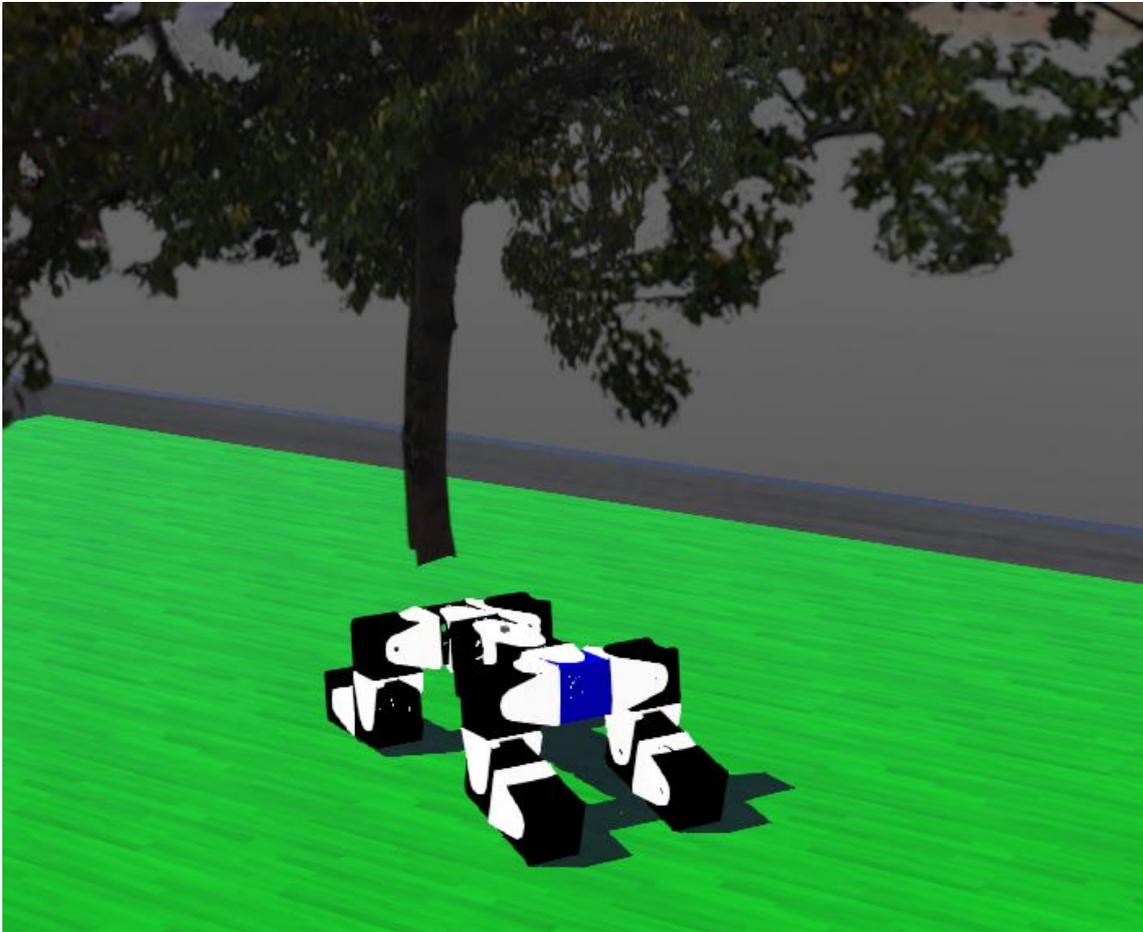


Figura 5.47: Robot en estado acostado.

## **5.8. Prueba 7: Variación de tamaño de obstáculos**

### **5.8.1. Descripción**

Teniendo en cuenta que la aplicación de búsqueda y rescate, se realizan pruebas de sus movimientos básicos de locomoción en terrenos no estructurados implementando obstáculos de diferentes formas y tamaños con la finalidad de evaluar cual es la altura máxima que puede pasar y el tiempo que se demora.

Para esta prueba se realiza el desplazamiento hacia delante del robot durante un metro integrando los obstáculos de las Figuras 5.48 y 5.49 correspondiente a un grupo piedras y un pallet.

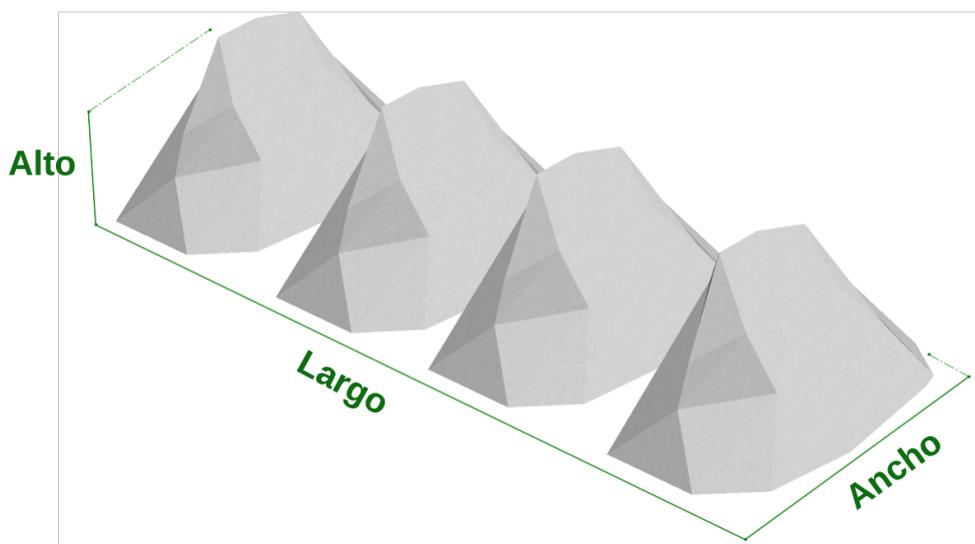


Figura 5.48: Obstáculo 1: Piedras.

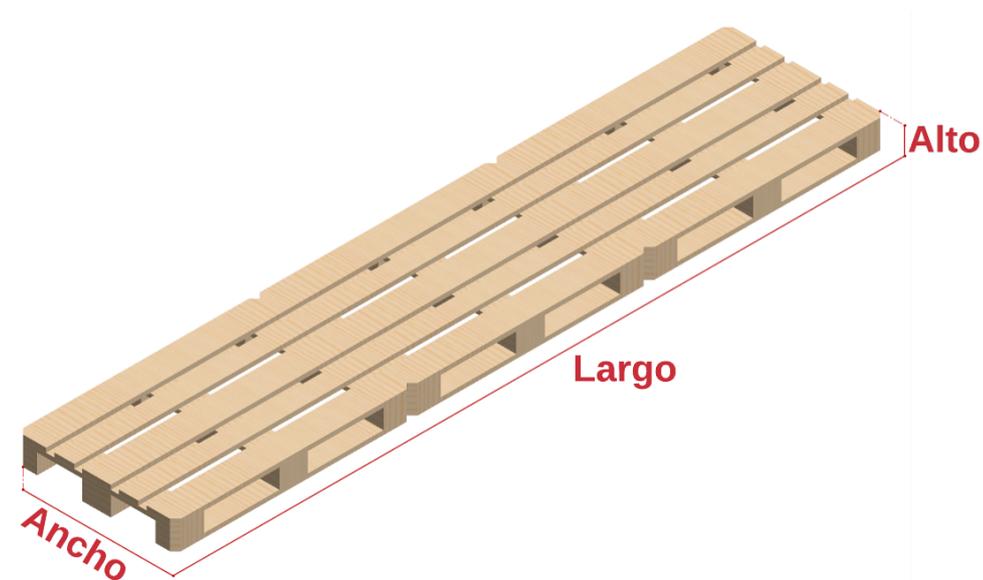


Figura 5.49: Obstáculo 2: Pallet.

Adicional a esto, se evalúa el funcionamiento del robot tipo canino con un obstáculo que presenta inclinación de  $15^\circ$  el cual se muestra en la Figura 5.50.

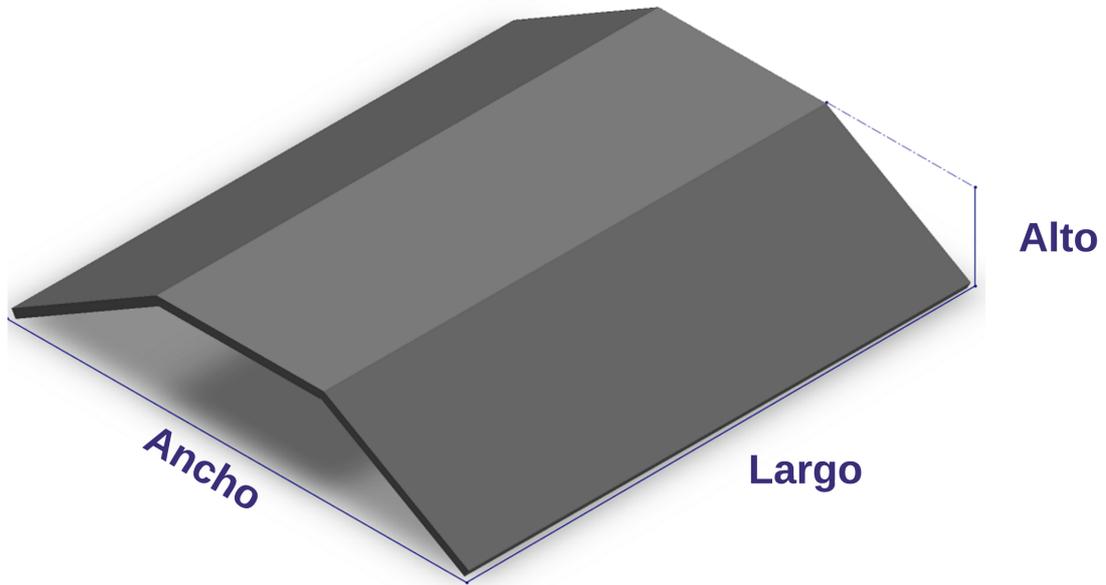


Figura 5.50: Obstáculo 3: Rampa.

### 5.8.2. Funcionamiento

Se da a partir del algoritmo de locomoción con desplazamiento hacia delante explicado en secciones anteriores. En la Tabla 5.2 se presentan las dimensiones del primer obstáculo correspondiente a la piedra y el tiempo que tarda el cuadrúpedo en recorrer una distancia de 1 metro pasando por el obstáculo.

Tabla 5.2: Variación Obstáculo 1

Largo (cm)	Ancho (cm)	Alto (cm)	Tiempo (s)
95	25	0	15.104
		1	16.64
		2	17.856
		3	19.84
		5	21.376
		6	23.25
		7	24.06
		8	25.259
		9	45.376

En la Tabla 2 se encuentran las dimensiones del segundo obstáculo correspondiente al pallet el cual posee una estructura más uniforme lo cual dificulta que el robot pueda atravesar obstáculos más altos. En este se varía la altura del obstáculo y se determina el tiempo que el robot tarda en recorrer una distancia de un metro pasando por este.

Tabla 5.3: Variación Obstáculo 2

Largo (cm)	Ancho (cm)	Alto (cm)	Tiempo (s)
102	27	0	15.104
		1	16.168
		2	16.704
		3	16.896
		4	17.523
		5	18.005
		6	18.816
		7	20.736
		8	22.4
		8.5	28.544

Como tercer obstáculo se tiene una rampa, cuyas dimensiones se presentan en la Tabla 5.4 donde el alto y el ancho varían hasta alcanzar una altura máxima de 10.2 cm y el tiempo que tarda en recorrer una distancia de un metro con el obstáculo presente.

Tabla 5.4: Variación Obstáculo 3

Largo (cm)	Ancho (cm)	Alto (cm)	Tiempo (s)
60	0	0	15.104
	44.5	1	15.574
	48	2	15.706
	49.5	3	15.827
	54.3	4	15.888
	58	5	16.016
	60.8	6	16.112
	64	7	16.576
	67.8	8	17.328
	72	9	17.424
	72.4	10.2	17.788

### 5.8.3. Análisis De Indicadores De Rendimiento

A continuación se realiza un análisis del tiempo al integrar un obstáculo en un recorrido. En la gráfica 5.51 se presenta la altura de cada uno de los obstáculos y el tiempo que tarda el robot en recorrer una distancia de un metro. De esta gráfica, se evidencia que dependiendo de la forma del obstáculo el cuadrúpedo tipo canino puede tardar menos tiempo y/o atravesar un obstáculo con mayor altura.

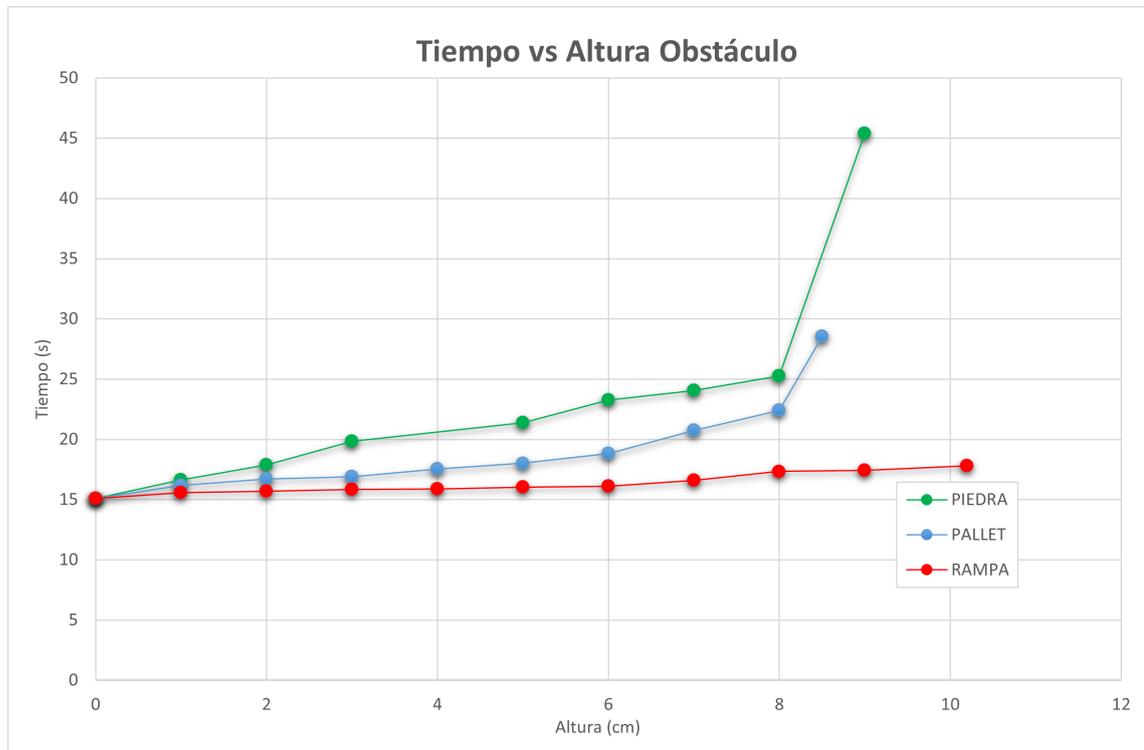


Figura 5.51: Tiempo vs Altura Obstáculo.

Como primer obstáculo se tiene las piedras la cual presenta una forma irregular por lo cual el robot tarda mayor tiempo en atravesar y la altura máxima de esta es de 9 cm en la cual el cuadrúpedo tardo un alto tiempo debido a que las deformaciones que presentan las piedras causan que el robot se deslice. Para el segundo obstáculo, el tiempo en que tarda el robot en recorrer la distancia es menor que el anterior sin embargo, la altura máxima que puede pasar es de 8.5 cm ya que a una distancia mayor el robot se cae. Finalmente se encuentra la rampa, en la cual el robot presenta menor dificultad para atravesar debido a su inclinación logrando cruzar un obstáculo de máximo 10.2 cm en un tiempo de 17.78 segundos que comparado con los demás obstáculos no tiene un alto impacto en el recorrido total.



canino puede atravesar correspondiente a estibas (rectángulos amarillos).

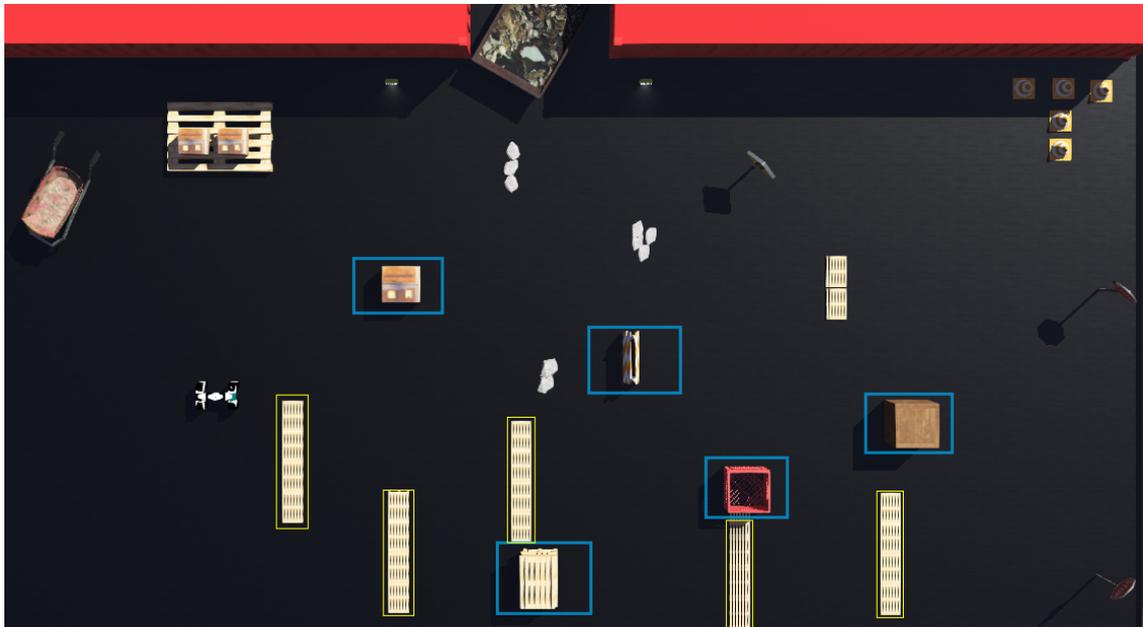


Figura 5.53: Variación cantidad de obstáculos escenario 2.

## 5.9.2. Funcionamiento

Se evalúa el algoritmo de locomoción de desplazamiento hacia adelante y giro a la derecha e izquierda realizando 5 pruebas de las trayectorias obtenidas del método celdas exactas adicionando obstáculos que el robot puede atravesar.

En la Tabla 5.5 se presentan las pruebas realizadas para el entorno 1, en el cual se dejan 4 obstáculos grandes y se determina la distancia recorrida y el tiempo que tarda en realizar la trayectoria de la Figura 5.2 al variar el número de obstáculos pequeños evidenciando al aumentar esta cantidad el tiempo en hacer el recorrido es mayor.

Tabla 5.5: Variación cantidad de obstáculos escenario 1.

Prueba	1	2	3	4	5
Obstáculos Grandes	4				
Obstáculos Pequeños (Piedras 7 cm)	0	1	3	5	8
Tiempo (s)	149.824	158.336	159.744	160.768	167.744
Distancia en x recorrida (m)	6.765	6.782	6.879	6.7963	6.667

Por otro lado, en la Tabla 5.6 se presentan las pruebas realizadas para el entorno 2, en el cual se dejan 5 obstáculos grandes determinando la distancia recorrida y el tiempo que tarda en realizar la trayectoria de la Figura 5.4 al variar la cantidad de obstáculos pequeños.

Tabla 5.6: Variación cantidad de obstáculos escenario 2.

Prueba	1	2	3	4	5
Obstáculos Grandes	5				
Obstáculos Pequeños (Pallet 5 cm)	0	1	3	5	8
Tiempo (s)	190.336	192.0	196.352	201.984	210.56
Distancia en x recorrida (m)	9.347	9.332	9.335	9.325	9.369

### 5.9.3. Análisis De Indicadores De Rendimiento

En la Figura 5.54 se presenta la distancia y el tiempo que tarda el robot en realizar la trayectoria para las 5 pruebas de la Tabla 5.5. En este se evidencia que la cantidad de obstáculos afecta en el tiempo que tarda el canino en llegar al punto final ya que sin obstáculos tarda 149.824 segundos mientras que con 8 obstáculos aumenta el tiempo a 167.744 segundos. Por otro lado, se demuestra que la cantidad de obstáculos pequeños no influye en la distancia que el robot recorre

por lo que en todas las pruebas el valor no varía significativamente.

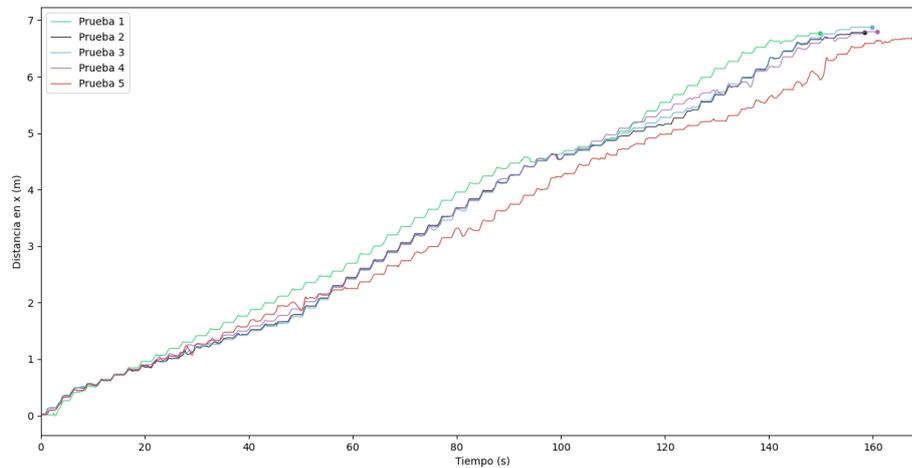


Figura 5.54: Distancia vs Tiempo entorno 1.

Además de esto, se emula la trayectoria de la Figura 5.2 de tal manera que el robot esquive los obstáculos grandes. En la Figura 5.55 se presenta el recorrido realizado por el cuadrúpedo tipo canino en cada prueba, el robot inicia realizando el mismo recorrido sin embargo, a partir del primer obstáculo presenta variaciones en su trayectoria lo cual se genera por la forma de irregular de las piedras afectando la locomoción del canino. Adicionalmente, se evidencia que a mayor cantidad de obstáculos pequeños, la distancia en Z del punto final es menor.

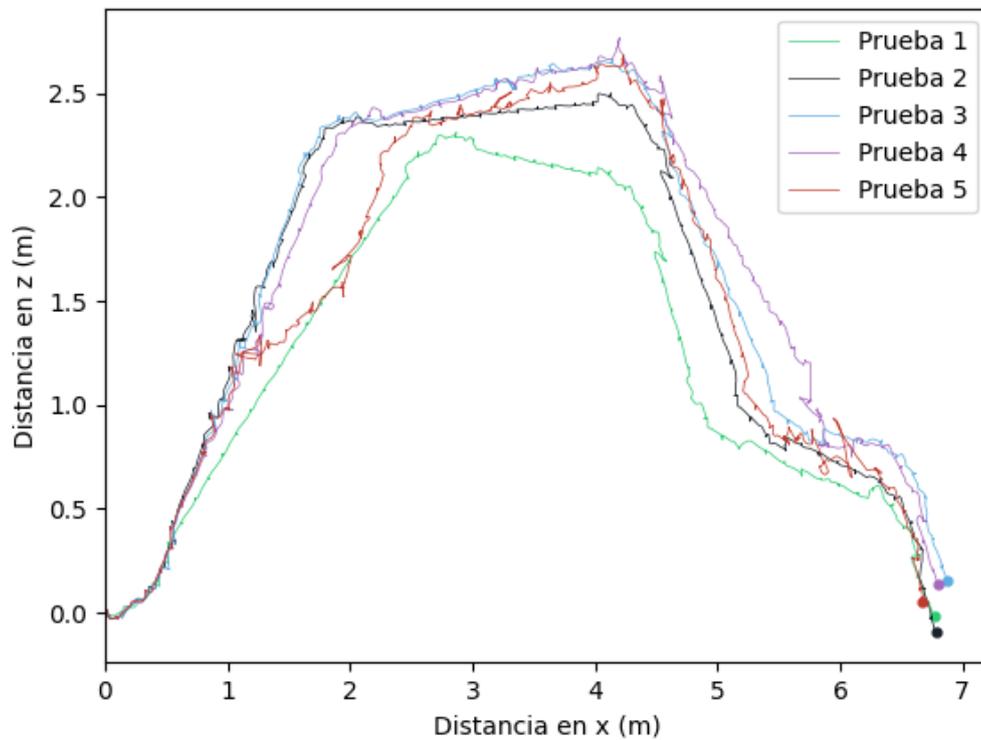


Figura 5.55: Distancia en z vs Distancia en x de Trayectoria entorno 1.

En la Figura 5.56 se presenta la distancia y el tiempo que tarda el robot en realizar la trayectoria para las 5 pruebas de la Tabla 5.6. En esta gráfica, se demuestra que el número de obstáculos pequeños afecta en el tiempo que tarda el canino en llegar al punto final ya que sin obstáculos tarda 190.336 segundos mientras que con 8 obstáculos aumenta el tiempo a 210.56 segundos. Por otro lado, se demuestra que la cantidad de obstáculos pequeños no influye en la distancia que el robot recorre por lo que en todas las pruebas el valor no varía significativamente.

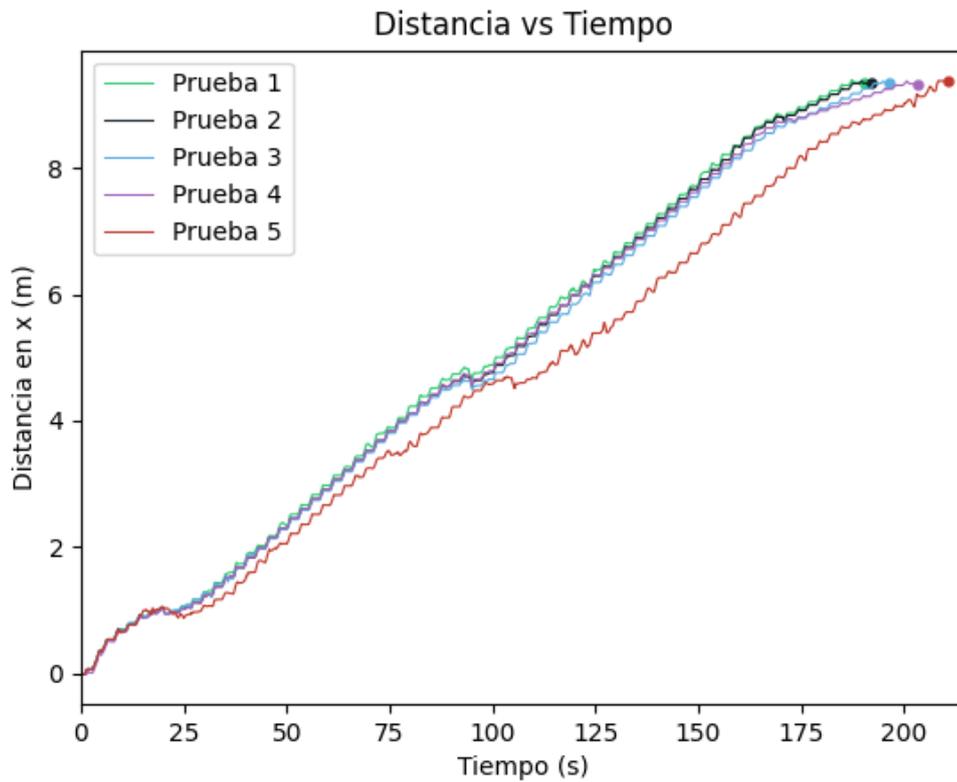


Figura 5.56: Distancia vs Tiempo entorno 2.

Por otro lado, se simula la trayectoria de la Figura 5.4 de tal manera que el robot esquive los obstáculos grandes. En la Figura 5.57 se presenta el recorrido realizado por el cuadrúpedo tipo canino en cada prueba, el robot inicia realizando el mismo recorrido sin embargo, cuando debe realizar el primer giro se presentan variaciones en su trayectoria lo cual se genera por la manera en que el robot atraviesa el obstáculo ya que toma una posición diferente a la esperada.

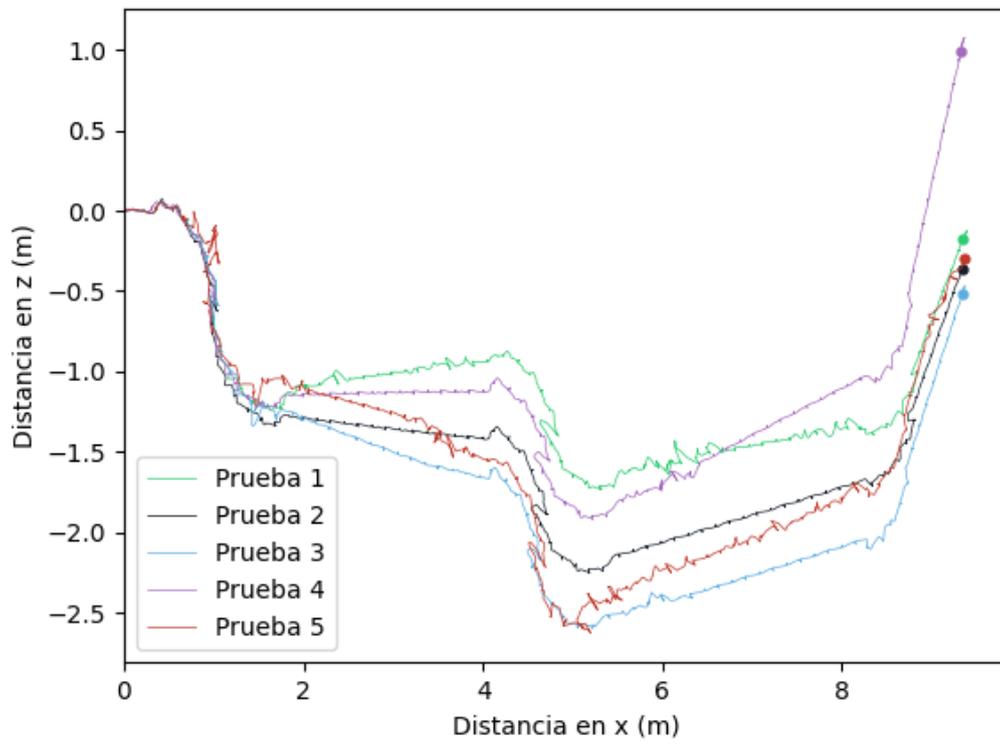


Figura 5.57: Distancia en z vs Distancia en x de Trayectoria entorno 2.

## Capítulo 6

# Conclusiones Y Recomendaciones A

## Trabajos Futuros

Con base a los módulos Mecabot 5.0, se desarrolló una estructura bioinspirada en un canino haciendo uso del software de Solidworks la cual tiene unas dimensiones de 0.908x0.618x0.607 m, escogida dentro de varias propuestas a partir de una serie de características descritas en la tabla 3.3. Para seleccionar esta arquitectura se tuvieron en cuenta factores como el peso de 5.388 kg , lo cual le otorga al robot una mayor estabilidad y fluidez, también se analizó la disposición de los módulos para obtener las articulaciones de cadera y rodilla que permitieron simular el comportamiento del robot lo más parecido a un canino.

Se evaluó correctamente el rendimiento de la arquitectura cuadrúpeda de tipo canina en los movimientos básicos de: avanzar, retroceder, girar a derecha e izquierda mediante las pruebas efectuadas en el software Webots logrando que el robot realice un paso en 4 segundos y la secuencia de caminata en 7 segundos. Adicionalmente se analizó que el ángulo que debe tomar la columna para direccionar el robot a la derecha o izquierda es de  $\mp 0.8$  radianes. Asimismo, se desarrollaron secuencias básicas de locomoción, las cuales permitieron el desplazamiento del

robot por los terrenos irregulares que simulan un entorno real para una situación de desastre. Se analizó que la estructura modular diseñada presentó dificultades para realizar el movimiento de un canino por condiciones propias de la misma. Sin embargo, se replicó la secuencia para obtener la locomoción lo mas parecido posible a la de un canino.

Se diseñaron e implementaron dos ambientes virtuales no estructurados los cuales hacen posible el desplazamiento y movimiento del robot para realizar las diferentes pruebas propuestas. Se escogieron los obstáculos presentes en los ambientes con el fin de representar un entorno real al que podría enfrentarse el robot en su aplicación de búsqueda y rescate. Con base en esto, se analizó que es importante la forma del obstáculo debido que de este depende la altura máxima que es capaz de atravesar el robot, la cual de acuerdo a las pruebas generadas es de 9 cm para las piedras cuya forma es amorfa, 8.5 cm para pallet lo cual hace referencia a un obstáculo de 90 ° y 10.2 cm para una rampa de inclinación de 15°. La obtención de estos resultados fue posible gracias a la evaluación de escenarios en los que el robot perdía el equilibrio y se caía.

**Teniendo en cuenta la investigación realizada y el desarrollo de la tesis, se sugieren los siguientes trabajos a futuro:**

Implementar la arquitectura cuadrúpeda modular de tipo canino con los módulos físicos MECABOT 5.0. Asimismo, evaluar y analizar el desempeño obtenido para compararlo con los resultados alcanzados en este trabajo. Adicionalmente examinar el funcionamiento en diferentes tipos de terrenos, realizar pruebas con obstáculos de diferentes formas y tamaños, escalones y/o superficies inclinadas.

El estudio y diseño de módulos especiales que tengan una mejor adaptación con el robot

para poder simular el movimiento de un canino de una manera exacta y fluida.

Realizar un algoritmo de control adaptativo que permita implementar con precisión la trayectoria obtenida del método de celdas exactas en Webots teniendo en cuenta las condiciones del entorno no estructurado.

# Bibliografía

- [1] V. R. B. Sotelo, J. R. G. Sánchez, and R. S. Ortigoza, “Robots móviles: Evolución y estado del arte,” *Polibits*, no. 35, pp. 12–17, 2007.
- [2] J. P. Turiel, J. C. F. Marinero, and J. R. P. González, “Aplicaciones de la robótica: Últimas tendencias y nuevas perspectivas,” *Dyna*, vol. 77, no. 3, pp. 61–68, 2002.
- [3] R. Suárez Feijóo, “¿ son los robots fácilmente aceptados en la sociedad?,” *The Economy Journal*, 2017.
- [4] Agencia Sinc, “Los diez grandes retos de la robótica,” 02 2018.
- [5] J. González, I. González, and E. Boemo, “Alternativas hardware para la locomoción de un robot ápedo,” *III Jornadas sobre Computación Reconfigurable y Aplicaciones, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid*, 2003.
- [6] M. Yim, Y. Zhang, and D. Duff, “Modular robots,” *IEEE Spectrum*, vol. 39, no. 2, pp. 30–34, 2002.
- [7] Y. Zhang, K. D. Roufas, and M. Yim, “Software architecture for modular self-reconfigurable robots,” in *Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Expanding the Societal Role of Robotics in the the Next Millennium (Cat. No. 01CH37180)*, vol. 4, pp. 2355–2360, IEEE, 2001.

- [8] Y. Zhang, M. Yim, C. Eldershaw, D. Duff, and K. Roufas, "Phase automata: a programming model of locomotion gaits for scalable chain-type modular robots," in *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)*(Cat. No. 03CH37453), vol. 3, pp. 2442–2447, IEEE, 2003.
- [9] Z. Guanghua, D. Zhicheng, and W. Wei, "Realization of a modular reconfigurable robot for rough terrain," in *2006 International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 289–294, IEEE, 2006.
- [10] M. Park, S. Chitta, A. Teichman, and M. Yim, "Automatic configuration recognition methods in modular robots," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 27, no. 3-4, pp. 403–421, 2008.
- [11] M. Yim, B. Shirmohammadi, J. Sastra, M. Park, M. Dugan, and C. J. Taylor, "Robustness and self-repair in modular robots," in *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2553–2554, IEEE, 2007.
- [12] S. Murata and H. Kurokawa, "Self-reconfigurable robots," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 14, no. 1, pp. 71–78, 2007.
- [13] A. Kamimura, H. Kurokawa, E. Yoshida, S. Murata, K. Tomita, and S. Kokaji, "Automatic locomotion design and experiments for a modular robotic system," *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, vol. 10, no. 3, pp. 314–325, 2005.
- [14] B. Salemi, M. Moll, and W.-M. Shen, "Superbot: A deployable, multi-functional, and modular self-reconfigurable robotic system," in *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3636–3641, IEEE, 2006.

- [15] G. Taylor, R. Lentz, S. Lawrence, L. Martel, W. Shen, P. Will, M. Sims, and S. Colombano, “Superbots on the lunar surface: Mini-mobile investigation system (mini-mis).,” *Planets*, vol. 105, no. E2, p. 4175, 2005.
- [16] G. S. Miller, “The search-and-rescue mission,” *Neurotechnology for Biomimetic Robots*, p. 271, 2002.
- [17] J. Dietsch, R. Moeckel, C. Jaquier, K. Drapel, E. Dittrich, A. Upegui, and A. J. Ijspeert, “Exploring adaptive locomotion with yamor, a novel autonomous modular robot with bluetooth interface,” *Industrial Robot: An International Journal*, 2006.
- [18] R. Arredondo, *Design and simulation of locomotion of self-organising modular robots for adaptive furniture*. PhD thesis, Citeseer, 2006.
- [19] R. A. C. Estepa, D. J. G. Ceballos, and G. A. V. Torres, “Reconfigurable hardware features of modular robotic system mecabot,” *Research Journal of Applied Sciences*, vol. 13, no. 10, pp. 594–602, 2018.
- [20] J. G. Gómez, “Robótica modular y locomoción: Aplicación a robots ápodos,” *Universidad Autónoma de Madrid, Thesis*, 2008.
- [21] V. Cruz Carbonell *et al.*, “Simulación e implementación de arquitectura cuadrúpeda utilizando sistema robótico modular mecabot,”
- [22] J. S. Olarte Vega *et al.*, “Simulación e implementación de locomoción tipo bípeda utilizando sistema robótico modular mecabot,”
- [23] M. Rubiano, W. Andrewy, *et al.*, “Simulación e implementación de sistema robotico en arquitectura tipo rueda utilizando robotica modular,” 2017.

- [24] S. N. Abussaid, *Diseño y control reactivo de robots caminantes sobre terreno natural*. PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid, 2008.
- [25] S. Kajita and B. Espiau, “Legged robot,” 2008.
- [26] M. H. Raibert, *Legged robots that balance*. MIT press, 1986.
- [27] H. Zhuang, H. Gao, Z. Deng, L. Ding, and Z. Liu, “A review of heavy-duty legged robots,” *Science China Technological Sciences*, vol. 57, no. 2, pp. 298–314, 2014.
- [28] D. J. Todd, *Walking machines: an introduction to legged robots*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [29] J. Tenreiro Machado and M. Silva, “An overview of legged robots,” in *International symposium on mathematical methods in engineering*, pp. 1–40, 2006.
- [30] A. A. Vergara Pulgar, “Diseño y fabricación de robots modulares blandos,” 2015.
- [31] A. P. R. Cevallos *et al.*, “Locomoción de robots modulares,” *Revista vínculos*, vol. 17, no. 1, pp. 6–6, 2020.
- [32] P. Moubarak and P. Ben-Tzvi, “Modular and reconfigurable mobile robotics,” *Robotics and autonomous systems*, vol. 60, no. 12, pp. 1648–1663, 2012.
- [33] E. Palmerini, “Robótica y derecho: sugerencias, confluencias, evoluciones en el marco de una investigación europea,” *Revista de Derecho Privado*, no. 32, pp. 53–97, 2017.
- [34] F. F. Córdova Quiroz, “La robótica, principio y evolución,” *Polibits*, vol. 28, pp. 18–20, 2002.
- [35] M. Muñiz Rodríguez *et al.*, “La era robótica, un turismo de futuro,” 2018.

- [36] C. O. F. D’Inca, “Estado actual de la robótica.,” *Revista de la Universidad de Mendoza*, 1996.
- [37] R. S. Ortigoza, R. G. Sánchez, R. B. Sotelo, M. A. M. Vilchis, V. M. H. Guzmán, and G. S. Ortigoza, “Una panorámica de los robots móviles,” *Télématique*, vol. 6, no. 3, pp. 1–14, 2007.
- [38] E. Calle, I. Ávila, and J. Zambrano, “Diseño e implementación de un robot móvil cuadrúpedo,” *Revista Tecnológica-ESPOL*, vol. 20, no. 1, 2007.
- [39] R. S. Gonçalves and J. C. M. Carvalho, “Review and latest trends in mobile robots used on power transmission lines,” *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 10, no. 12, p. 408, 2013.
- [40] D. C. Kar, “Design of statically stable walking robot: A review,” *Journal of Robotic Systems*, vol. 20, no. 11, pp. 671–686, 2003.
- [41] M. H. Raibert, “Legged robots,” *Communications of the ACM*, vol. 29, no. 6, pp. 499–514, 1986.
- [42] P. G. De Santos, E. Garcia, and J. Estremera, *Quadrupedal locomotion: an introduction to the control of four-legged robots*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [43] M. H. Raibert, *Legged robots that balance*. MIT press, 1986.
- [44] A. Hutchinson, “Machines can walk,” *The Chartered Mechanical Engineer*, vol. 11, no. 10, pp. 480–484, 1967.
- [45] R. Mosher, “Test and evaluation of a versatile walking truck,” in *Proceedings of Off-Road Mobility Research Symposium, Washington DC, 1968*, pp. 359–379, 1968.

- [46] S. Hirose, K. Yoneda, and H. Tsukagoshi, “Titan vii: Quadruped walking and manipulating robot on a steep slope,” in *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 494–500, IEEE, 1997.
- [47] H. Komatsu, M. Ogata, R. Hodoshima, G. Endo, E. Fukushima, and S. Hirose, “Development of quadruped walking robot titan xii and its basic consideration on the control of large obstacle traversing motion,” *Transactions of the JSME (in Japanese)*, vol. 80, no. 813, 2014.
- [48] H. Miura, I. Shimoyama, M. Mitsuishi, and H. Kimura, “Dynamical walk of quadruped robot (collie-1),” in *Int. Symp. Robotics Research*, pp. 317–324, Cambridge, MA: MIT Press, 1985.
- [49] S. Nabulsi Abussaid, “Diseño y control reactivo de robots caminantes sobre terreno natural,” 2009.
- [50] H. A. Hernandez Martinez, “Estimación de una serie de movimientos utilizando un algoritmo de optimización bio-inspirado para la operación de manera autónoma y on-line de una plataforma multi-robot (caso robot modular),” *Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial*, 2018.
- [51] N. Eckenstein and M. Yim, “The x-face: An improved planar passive mechanical connector for modular self-reconfigurable robots,” in *2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3073–3078, IEEE, 2012.
- [52] J. Baca, M. Ferre, and R. Aracil, “A heterogeneous modular robotic design for fast response to a diversity of tasks,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 60, no. 4, pp. 522–531, 2012.

- [53] T. D. Ngo *et al.*, “morebots: System development and integration of an educational and entertainment modular robot,” in *2017 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS)*, pp. 74–80, IEEE, 2017.
- [54] S. Amanat, H. Paracha, E. Alexandre, J. Mayer, and M. C. Granatosky, “Canine locomotion,” *Encyclopedia of Animal Cognition and Behavior Cham: Springer International Publishing*, pp. 1–6, 2020.
- [55] A. S. Aristizabal Escobar, “Análisis cinético de la locomoción en perros como metodología diagnóstica de enfermedades ortopédicas,” 2015.
- [56] R. Elliott, *Dogsteps: A New Look*. Fox Chapel Publishing Company, Incorporated, 2014.
- [57] J. Fariña, “Manual ilustrado de cinología,” *Recuperado de <http://www.dogjudging.com/wp-content/uploads/2014/08/Manual-Ilustrado-de-Cinologia-del-Consiglio-dei-Giudici-della-FCA.pdf>*, 2011.
- [58] J. He and F. Gao, “Mechanism, actuation, perception, and control of highly dynamic multilegged robots: a review,” *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 33, no. 1, pp. 1–30, 2020.