

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA EN INGENIERÍA EN MECATRÓNICA



**SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE ARQUITECTURA
CUADRÚPEDA UTILIZANDO SISTEMA ROBÓTICO
MODULAR MECABOT**

Autor:

VANESSA CRUZ CARBONELL

Director:

ING. RICARDO ANDRÉS CASTILLO ESTEPA, PhD

Bogotá, 2018

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA EN INGENIERÍA EN MECATRÓNICA



TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO EN
MECATRÓNICA

**SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE ARQUITECTURA
CUADRÚPEDA UTILIZANDO SISTEMA ROBÓTICO
MODULAR MECABOT**

Autor:

VANESSA CRUZ CARBONELL

Director:

ING. RICARDO ANDRÉS CASTILLO ESTEPA, PhD

Bogotá, 2018

Bogotá D.C. (2018)

Nota de aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma de Jurado

Firma de Jurado

Agradecimientos

A mi familia por brindarme la oportunidad de estudiar esta maravillosa carrera. A mis amigos por su apoyo y compañía durante estos años.

A Ricardo Castillo PhD por su valiosa guía, por su tiempo y su atención durante el desarrollo de esta tesis. Al ingeniero Wilhelm Andrewy por sus aportes, compartirme sus experiencias y conocimientos. A los ingenieros Germán y Guillermo por sus contribuciones.

A la Universidad Militar Nueva Granada, al Programa de Ingeniería en Mecatrónica, a los docentes y personal de laboratorio por la formación integral brindada a lo largo de la carrera.

Contenido

LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABLAS.....	12
LISTA DE ANEXOS	13
GLOSARIO.....	14
RESUMEN	16
ABSTRACT	17
1. INTRODUCCIÓN	18
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
1.2. OBJETIVO GENERAL.....	20
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1.4. DELIMITACIÓN	20
1.5. JUSTIFICACIÓN	21
1.6. METODOLOGÍA	22
2. MARCO REFERENCIAL	24
2.1. ROBÓTICA Y BREVE HISTORIA.....	24
2.2. ROBÓTICA MÓVIL.....	25
2.3. ROBOTS CAMINANTES O CON PATAS	25
2.3.1. <i>Ventajas y Desventajas</i>	25
2.4. ROBOTS CUADRÚPEDOS.....	27
2.4.1. <i>Estabilidad</i>	27
2.4.2. <i>Disposición de las Extremidades</i>	28
2.4.3. <i>Secuencia (gait)</i>	29
2.4.4. <i>Movimiento en Línea Recta</i>	30
2.4.5. <i>Movimiento de Giro</i>	30
2.5. ROBÓTICA MODULAR	31
2.5.1. <i>Módulos</i>	31
2.5.2. <i>Interfaces o mecanismos de acoplamiento</i>	32
2.6. CLASIFICACIÓN DE ROBOTS MODULARES	32

2.6.1.	<i>Configuración Móvil</i>	32
2.6.2.	<i>Locomoción de cuerpo completo</i>	33
2.6.3.	<i>Arquitectura de red, retículo, lattice o malla</i>	34
2.6.4.	<i>Arquitectura cadena, árbol o chain</i>	34
2.6.5.	<i>Arquitectura híbrida</i>	35
2.7.	CONFIGURACIONES CUADRÚPEDAS MODULARES Y BREVE HISTORIA	35
2.8.	ALGORITMOS DE LOCOMOCIÓN USADOS EN ROBOTS MODULARES	37
2.9.	CONFIGURACIÓN TETRÁPODA MODULAR	39
2.10.	MECABOT	40
2.11.	SALAMANDRA: PRINCIPIOS DE LOCOMOCIÓN	41
2.11.1.	<i>Secuencias de movimiento en una salamandra</i>	42
2.11.2.	<i>La cola de la salamandra</i>	43
2.11.3.	<i>Simplificación de los grados de libertad</i>	44
2.11.4.	<i>Columna y extremidades</i>	45
2.11.5.	<i>Revisión de los algoritmos de locomoción en robots salamandra</i>	46
2.11.6.	<i>Variación de parámetros e influencia en la locomoción del robot</i>	46
3.	DESARROLLO DE LA ARQUITECTURA TIPO SALAMANDRA UTILIZANDO WEBOTS ®	48
3.1.	CLASES DE ACOPLES ENTRE MÓDULOS DEL MECABOT 5.0.....	48
3.1.1.	<i>Acople Cara-Pivote</i>	49
3.1.2.	<i>Acople Pivote-Pivote</i>	50
3.1.3.	<i>Acople Cara-Cara</i>	51
3.1.4.	<i>Acople a caras laterales del cuerpo</i>	52
3.2.	PROPUESTA DE ARQUITECTURAS TIPO SALAMANDRA UTILIZANDO SISTEMA MECABOT 5.0	52
3.3.	ARQUITECTURA TIPO COLUMNA ACTIVA	54
3.4.	CINEMÁTICA DE LA COLUMNA	56
3.5.	CINEMÁTICA DE LAS PIERNAS	60
3.6.	INFLUENCIA DE LA COLA EN EL DISEÑO.....	64
3.7.	PROPUESTA DE PERFILES EN LOCOMOCIÓN EN LÍNEA RECTA: COLUMNA	64
3.8.	PROPUESTA DE PERFILES EN LOCOMOCIÓN EN LÍNEA RECTA: PIERNAS	65
3.9.1.	<i>Procedimiento</i>	66
3.9.	AJUSTE DE LA COORDINACIÓN EN LOCOMOCIÓN RECTA.....	69
3.10.	PROPUESTA DE PERFIL EN LOCOMOCIÓN: GIRO ABIERTO	72
3.11.	PROPUESTA DE PERFIL EN LOCOMOCIÓN: GIRO CERRADO O ROTACIÓN	76
3.12.	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	80
4.	SIMULACIÓN DE LA ARQUITECTURA UTILIZANDO SOFTWARE WEBOTS ®	81
4.1.	WEBOTS ®.....	81
4.2.	MODELAMIENTO CAD E IMPORTACIÓN DE LOS SEMI-MÓDULOS	84
4.3.	SIMULACIÓN DE LA LOCOMOCIÓN RECTA.....	87
4.3.1.	<i>Análisis variación de la amplitud en columna</i>	87
4.3.2.	<i>Análisis variación de la amplitud de las piernas</i>	90
4.3.3.	<i>Análisis variación de la frecuencia de movimiento</i>	91

4.4.	SIMULACIÓN DEL GIRO ABIERTO	92
4.4.1.	<i>Análisis variación de la amplitud de las piernas borde externo</i>	92
4.4.2.	<i>Análisis variación del offset</i>	94
4.4.3.	<i>Análisis variación de la amplitud/offset en la columna</i>	96
4.5.	SIMULACIÓN DE LA ROTACIÓN	97
4.5.1.	<i>Análisis variación de la amplitud de las piernas</i>	97
4.5.2.	<i>Análisis variación de la frecuencia</i>	98
4.6.	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	99
5.	ENSAMBLE DE LA ARQUITECTURA TIPO SALAMANDRA CON EL MECABOT 5.0	100
5.1.	MECABOT 5.0	100
5.2.	COMPONENTES ELECTRÓNICOS EN EL MECABOT 5.0	102
5.2.1.	<i>Xbee S2</i>	102
5.2.2.	<i>Teensy</i>	105
5.2.3.	<i>Motores</i>	107
5.2.4.	<i>Driver Pololu</i>	108
5.2.5.	<i>Regulador Pololu y Protection Circuit Module</i>	108
5.3.	PROCEDIMIENTO DE ENSAMBLAJE DE LOS MÓDULOS DEL MECABOT 5.0	109
5.3.1.	<i>Impresión 3D de las piezas y pegado</i>	109
5.3.2.	<i>Ensamble de los elementos electrónicos</i>	110
5.3.3.	<i>Ensamble de la estructura</i>	111
5.4.	CARACTERIZACIÓN DE LOS MOTORES	113
5.5.	CONCLUSIONES	116
6.	PRUEBAS DE LA ARQUITECTURA TIPO SALAMANDRA EN EL MECABOT 5.0	117
6.1.	INTERFAZ DE USUARIO EN MATLAB®	117
6.2.	PRUEBAS PRELIMINARES CON LA INTERFAZ DE USUARIO	118
6.2.1.	<i>Algoritmo de Control</i>	118
6.2.2.	<i>Pruebas diagnóstico de la configuración cuadrúpeda ensamblada</i>	122
6.2.3.	<i>Pruebas diagnóstico con alimentación a baterías</i>	124
6.3.	IMPLEMENTACIÓN LOCOMOCIÓN RECTA	125
6.4.	IMPLEMENTACIÓN GIRO ABIERTO.....	127
6.5.	IMPLEMENTACIÓN ROTACIÓN	129
6.6.	CONCLUSIONES	132
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES A TRABAJOS FUTUROS	133
	REFERENCIAS.....	135
	ANEXOS	141

Lista de Figuras

Figura 1.1. Metodología.....	23
Figura 2.1. Resumen de las ventajas de los robots con patas.....	26
Figura 2.2. Robot cuadrúpedo polígono de estabilidad.....	27
Figura 2.3. Disposiciones de las piernas en robots cuadrúpedos	28
Figura 2.4. Postura de mamífero	29
Figura 2.5. Postura de reptil y de arácnido	29
Figura 2.6. Interpretación de un diagrama de estado.	29
Figura 2.7. Ejemplo de creeping y standard gait.....	30
Figura 2.8. Módulos individuales de PolyBot y PolyPod.	32
Figura 2.9. Kilobots que forman la letra K.	33
Figura 2.10. Robot Modular M-TRAN.....	33
Figura 2.11. Robot Modular Odín.....	34
Figura 2.12. Robot Modular PolyBot.....	34
Figura 2.13. Robot Modular SuperBot.....	35
Figura 2.14. Polybot configuraciones cuadrúpedas	36
Figura 2.15 CKBot Configuración Cudrúpeda	37
Figura 2.16. Walbot Configuración swerve driver.....	37
Figura 2.17. Robot modular Amphibot.....	39
Figura 2.18. Cambios en la versión Mecabot 2.0.....	40
Figura 2.19. Cambios en la versión Mecabot 4.0.....	41
Figura 2.20. Algunos robots salamandra	42
Figura 2.21. Diagrama de estado secuencias de movimiento en salamandras.....	43
Figura 2.22. Esqueleto del Pleurodeles waltl.....	44
Figura 2.23. Robot AMOS-WD02 bioinspirado en lagartijas.....	45
Figura 2.24. Caminado lateral robot salamandra: parámetro de offset	47
Figura 3.1. Acople Cara-Pivote.....	49
Figura 3.2. Acople Cara-Pivote con y sin inversión	49
Figura 3.3. Acople Pivote-Pivote.....	50
Figura 3.4 Acople Pivote-Pivote con y sin inversión.....	50
Figura 3.5. Acople Cara-Cara	51
Figura 3.6 Acople Cara-Cara con y sin inversión.....	51

Figura 3.7. Acople a caras laterales del cuerpo.....	52
Figura 3.8. Posibles arquitecturas con disposición frontal en el Mecabot	53
Figura 3.9. Límites mecánicos en la propuesta A	54
Figura 3.10. Posibles configuraciones en los semi-módulos centrales de la columna en la propuesta A	55
Figura 3.11. Columna activa VS columna pasiva en la propuesta A.....	56
Figura 3.12. Diagrama de DOF y sistema coordinado columna	57
Figura 3.13. Análisis geométrico columna plano XY.....	58
Figura 3.14. Diagrama de DOF y sistema coordinado pierna.....	60
Figura 3.15. Análisis geométrico pierna plano XZ.....	61
Figura 3.16 Análisis geométrico pierna plano XY.....	62
Figura 3.17. Simulación en Webots® de la versión con cola	64
Figura 3.18. Orden de secuencia y DOFs del robot según el plano de movimiento.....	65
Figura 3.19. Medición en SolidWorks ® de los puntos del fragmento del Movie S5.	66
Figura 3.20. Fotograma del fragmento del Movie S5.....	67
Figura 3.21. Interpolación para locomoción recta	68
Figura 3.22. Trayectoria Recta. Secuencia de pasos con amplitud uno.....	70
Figura 3.23. Trayectoria Recta. Coordinación pierna-columna con amplitud uno.....	71
Figura 3.24. Diagrama de flujo Locomoción en línea recta.....	72
Figura 3.25. Movimiento del centro de gravedad, secuencia estándar de locomoción en línea recta.....	73
Figura 3.26. Giro abierto. Secuencia de pasos con amplitud uno.....	75
Figura 3.27. Diagrama de flujo Locomoción giro abierto	76
Figura 3.28. Giro cerrado. Limitaciones del Mecabot vs Salamandra Real	77
Figura 3.29. Giro cerrado. Secuencia de pasos con amplitud uno.....	78
Figura 3.30. Diagrama de flujo rotación	79
Figura 4.1. Ejemplo de un World básico en Webots ®.....	82
Figura 4.2. Esquema de nodos y propiedades en Webots ®.....	83
Figura 4.3. Simplificación del CAD para la simulación en Webots ®	84
Figura 4.4. Exportación de pieza en SolidWorks ®.....	84
Figura 4.5. Importación de pieza en Webots®	85
Figura 4.6. Grupo de nodos para la escápula	85
Figura 4.7. Grupo de nodos pierna cara-cara invertida.....	86
Figura 4.8. Grupo de nodos para eslabón de columna.....	86
Figura 4.9. Ensamble final en Webots®	86
Figura 4.10. Locomoción recta: Relación entre la amplitud de la columna y de las piernas.....	88
Figura 4.11. Locomoción recta: Relación entre amplitud columna y velocidad.....	89
Figura 4.12. Locomoción recta: Relación entre amplitud de las piernas y velocidad.....	90
Figura 4.13. Locomoción recta: Relación entre la frecuencia y velocidad	91

Figura 4.14. Locomoción giro abierto: Relación entre la amplitud de las piernas borde externo con el radio de la circunferencia descrita	93
Figura 4.15. Locomoción giro abierto: Relación entre el offset con la amplitud del par interno de piernas.....	94
Figura 4.16. Locomoción giro abierto: Relación entre el offset con la amplitud del par externo de piernas.....	95
Figura 4.17. Locomoción giro abierto: Relación entre el offset con el radio de la circunferencia descrita.....	95
Figura 4.18. Locomoción giro abierto: Relación entre el offset con el radio de la circunferencia descrita. Variación en la amplitud de la columna	96
Figura 4.19. Locomoción rotación: Relación entre amplitud de las piernas con velocidad angular.....	97
Figura 4.20. Pérdida de estabilidad. Amplitud de $\pi/3$	98
Figura 4.21. Locomoción rotación: Relación entre frecuencia con velocidad angular.....	98
Figura 5.1. Partes estructurales del Mecabot 5.0	101
Figura 5.2. Vistas de sección con los componentes electrónicos Mecabot 5.0.....	101
Figura 5.3. Especificaciones Xbee XB24-Z7WIT	102
Figura 5.4. Parámetros Xbee en modo Coordinador AT	103
Figura 5.5. Comunicación serial Xbee computador-Mecabot 5.0	104
Figura 5.6. Especificaciones de Teensy 3.2	105
Figura 5.7. Programación de la Teensy 3.2 con Arduino.....	106
Figura 5.8. Especificaciones Servomotor Power HD 1810MG	107
Figura 5.9. Especificaciones Servomotor HD 1501MG	107
Figura 5.10. Especificaciones de Driver Micro Maestro Pololu 6 canales	108
Figura 5.11. Especificaciones Regulador D24V22F5 Pololu	108
Figura 5.12. Especificaciones PCB FDC-2S-2	109
Figura 5.13. Fase de Pegado del Mecabot 5.0	110
Figura 5.14. Fase de ensamble de elementos electrónicos del Mecabot 5.0.....	111
Figura 5.15 Fase de ensamble de elementos electrónicos del Mecabot 5.0.....	111
Figura 5.16. Diferencias de tamaños entre Mecabot 4.0 y 5.0.....	112
Figura 5.17. Fase de ensamble de la estructura del Mecabot 5.0.....	112
Figura 5.18. Parte final de fase de ensamble de la estructura del Mecabot 5.0	113
Figura 5.19. Caracterización a través del Maestro Control Center®.....	114
Figura 5.20. Caracterización motor pivote 1 módulo 6	115
Figura 5.21. Caracterización motor pivote 2 módulo 6	115
Figura 6.1. Interfaz de usuario en Matlab®.....	118
Figura 6.2. Generadores sinusoidales correctamente coordinados	119
Figura 6.3 Generadores sinusoidales no coordinados.....	120
Figura 6.4 Generadores sinusoidales por suma de senos coordinados después de reconexión.....	120
Figura 6.5. Generadores sinusoidales coordinados con variación de parámetros de control.....	121

Figura 6.6. Pruebas preliminares de coordinación	121
Figura 6.7 Algunas pruebas con aditamentos en el Mecabot 5.0.....	123
Figura 6.8 Locomoción recta pruebas físicas en terrenos estructurados: Relación entre la frecuencia y velocidad.....	125
Figura 6.9. Locomoción recta pruebas físicas en terrenos no estructurados: Relación entre la frecuencia y velocidad	126
Figura 6.10 Locomoción giro pruebas físicas: Relación entre la offset y radio en diferentes vueltas.....	127
Figura 6.11. Locomoción giro pruebas físicas: Relación entre la offset y radio.....	128
Figura 6.12. Locomoción rotación derecha pruebas físicas: Relación entre la frecuencia y velocidad....	129
Figura 6.13. Locomoción rotación izquierda pruebas físicas: Relación entre la frecuencia y velocidad.	130
Figura 6.14. Comparación entre la velocidad en rotación según el ángulo del 2DOF.....	130
Figura 6.15. Locomoción rotación derecha pruebas físicas en terrenos no estructurados: Relación entre la frecuencia y velocidad.....	131

Lista de Tablas

Tabla 2.1. Principales exponentes de la robótica modular desde 1988 hasta el año 2007.....	36
Tabla 2.2 Métodos en gait locomotion.....	38
Tabla 3.1 Parámetros Denavit Hartenberg columna	57
Tabla 3.2. Parámetros Denavit Hartenberg Pierna.....	60
Tabla 3.3.Locomoción en línea recta. Parámetros de Control columna	65
Tabla 5.1. Trama de datos comunicación configuración tipo cuadrúpeda.....	103
Tabla 5.2. Trama de datos para modalidad Manual (M).....	103
Tabla 5.3 Trama de datos para modalidad Parámetros (P)	104
Tabla 5.4 Trama de datos para modalidad Tiempo (T).....	105
Tabla 5.5 Trama de datos para modalidad Locomoción (L).....	105

Lista de Anexos

Anexo A Tablas de recolección de pruebas simuladas en locomoción recta.....	141
Anexo B Tablas de recolección de pruebas simuladas en giro abierto	143
Anexo C Tablas de recolección de pruebas simuladas en giro cerrado	144
Anexo D. Pseudo código de la Teensy 3.2	144
Anexo E. Tablas de recolección de pruebas en locomoción recta	146
Anexo F. Tablas de recolección de pruebas en giro abierto	147
Anexo G. Tablas de recolección de pruebas en giro cerrado o rotación.....	148

Glosario

A

Amplitud

Distancia entre el punto más alejado de una onda sinusoidal a su punto de equilibrio ...46, 47, 64, 65, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 75, 76, 77, 78, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 104

Apertura

Amplitud, positiva o negativa, alcanzada por un motor rotacional52, 68, 72, 76, 87, 88, 90, 91, 92, 93, 94, 96, 98, 99, 114, 118

B

Bias

Diferencia de fase entre ondas sinusoidales o de una onda sinusoidal a partir del tiempo cero...47, 69, 70, 79

Bioinspirado

Basado en la naturaleza 18, 24, 25, 42, 45

C

Cinemática

Estudio del movimiento sin tener en cuenta sus causas (fuerzas, pares) 41, 48, 56, 57, 58, 61, 65

Circling gait

Secuencia que describe una trayectoria circular ...30, 76

Contralateral

Referente al costado derecho45, 64

CPG

Abreviación de Generadores de Patrones

Centrales 38, 39, 46

Cuadrúpedo

Referente a cuatro patas siendo todas ellas

empleadas en la locomoción18, 22, 27, 34, 36

D

Diagrama de estado

Representación gráfica de un gait ..29, 43, 69, 70, 75, 78

Disposición frontal

Relativo a la disposición de las piernas en los cuadrúpedos, a los costados en dirección contraria al avance28, 29, 52, 53, 54

DOF

Abreviación de grados de libertad.44, 52, 56, 57, 60, 66, 67

F

Factor de apoyo

Relación entre el tiempo en fase de apoyo y el periodo de la secuencia 42, 76

Fase de apoyo

Sinónimo de Fase de estancia 27

Fase de estancia

Evento en un gait en donde el pie se encuentra en el suelo.....27, 31, 43, 45, 70

Fase de levantamiento

Sinónimo de Fase de transición 45

Fase de transición

Evento en un gait en donde el pie no se encuentra en el suelo45, 73, 74, 75

G

Gait

Coordinación del cuerpo en conjunto con el movimiento descrito por cada pie 29

Generadores de patrones centrales
 Controlador bioinspirado en la interacción de
 neuronas motoras.....46
 Generadores sinusoidales
 Central Pattern Generators simplificados. 39, 46, 64, 67,
 78, 104
 Grados de libertad
 Movimiento rotacional o traslacional en el plano
 tridimensional permitido por una articulación 44, 52,
 56, 60, 66, 77

I

Ipsilateral
 Referente al costado izquierdo 42, 45, 64

M

MECABOT
 Robot modular creado por Davinci (UMNG)..... 18, 19
 Módulo
 Estructuras simples generalmente provistas de
 sistemas independientes (microcontrolador,
 actuadores, etc.) 18

O

Offset
 Desplazamiento, positivo o negativo, del punto
 de equilibrio de una onda sinusoidal ... 47, 72, 73, 76,
 92, 93, 94, 95, 96, 99, 104

P

Postura de reptil
 Postura adoptada en disposiciones frontales con
 las rodillas sobresaliendo a los costados..... 29, 52, 53

Protracción
 Movimiento hacia al frente en el plano
 transversal 45, 53, 90

R

Retracción
 Movimiento hacia atrás en el plano transversal .. 45, 53,
 71, 90

S

Secuencia
 Ver gait 29
 Secuencia estándar
 Ver Standard gait 45, 67, 69, 73
 Semi módulo
 En el Mecabot, se refiere a un pivote unido a un
 cuerpo. Dos semi módulos conforman un
 módulo 49, 51, 52, 54, 100
 Spinning gait
 Secuencia que describe una rotación 31, 76, 77
 Standard gait
 Secuencia con mejor comportamiento en cuanto
 estabilidad estática 30, 31, 42, 65, 77

T

Tetrápodo
 Referente a cuatro extremidades no
 necesariamente empleadas en la locomoción 18, 27,
 41

W

Webots
 Simulador robótico 20

Resumen

El robot Mecabot 5.0 corresponde a la quinta versión de robots modulares creados por el grupo de investigación DAVINCI de la Universidad Militar Nueva Granada. Con las anteriores versiones del Mecabot se han logrado implementar las arquitecturas serpiente, oruga, rueda y la primera configuración con patas: el hexápodo. La presente tesis aborda el planteamiento, desarrollo, programación, ensamble e implementación de una arquitectura cuadrúpeda con el robot Mecabot 5.0.

Se utiliza un enfoque bioinspirado en la arquitectura y para las secuencias de desplazamiento y giro. La rotación del robot es planteada basándose en secuencias características de los robots cuadrúpedos con pocos grados de libertad en las piernas. A partir del control de las otras configuraciones probadas en el Mecabot, se desarrolla un control descentralizado utilizando generadores sinusoidales y generadores sinusoidales compuestos.

Finalmente, el robot es ensamblado y probado en terrenos estructurados y no estructurados, donde su desempeño es medido a partir de los indicadores de rendimiento seleccionados después de haber realizado las simulaciones correspondientes en el ambiente de simulación Webots®.

Abstract

The Mecabot 5.0 robot corresponds to the fifth version of modular robots created by the DAVINCI research group of the Nueva Granada Military University. With the Mecabot previous versions, the architectures snake, caterpillar, wheel and the first configuration with legs: the hexapod have been implemented. This thesis addresses the approach, development, programming, assembly and physical implementation of a quadruped architecture with the Mecabot 5.0 robot.

A bioinspired approach is used in the architecture and the displacement and circling sequences. The rotation of the robot is based on characteristic sequences of quadruped robots with few degrees of freedom in the legs. Based on the control of the other tested Mecabot configurations, a decentralized control is developed using sinusoidal generators and composite sinusoidal generators.

Finally, the robot is assembled and tested on structured and unstructured terrains, its performance is measured based on the performance indicators selected after the corresponding simulations in the Webots® simulation environment.

Capítulo 1

1. Introducción

La etimología de la palabra robótica se remonta a la lengua eslava en donde hace referencia a labores de servidumbre y servicio. Parte de las aplicaciones de la robótica se relacionan con esta área en particular, brindando funciones en: la construcción, la medicina, en el hogar u oficina, la agricultura, el ambiente militar, seguridad y exploración, ocio, entre otras. [1] [2]

La robótica es concebida para apoyar labores humanas, realizar actividades que superan las capacidades físicas de las personas, ir donde estas no pueden ir y/o evitar riesgos humanos. Los robots están comprendidos en innumerables subclases tan variadas como podrían ser las aplicaciones de estos. Son los robots móviles los que rompen el esquema de anclaje que se evidencia en la robótica industrial y dan cabida a las aplicaciones orientadas a servicios. [2]

Dentro de los diez grandes campos de investigación en la robótica que más impacto se presume tendrá en los próximos años se hace referencia a la tendencia a: llevar a cabo diseños bioinspirados, y a crear unidades modulares. El enfoque bioinspirado busca emplear pautas fundamentales de los seres vivos en los ámbitos de la robótica, abarcando el diseño y control de estos. Las unidades modulares son orientadas a estructuras más simples y menos costosas. [3]

La presente tesis se enmarca en el ámbito de la robótica modular, empleándola en la creación de una arquitectura tipo móvil de clase cuadrúpeda, para ello parte de la propuesta de la arquitectura se realiza basándose en mecanismos bioinspirados de animales cuadrúpedos y tetrápodos. Para implementar la arquitectura se emplea la quinta versión de robots modulares creada en la Universidad Militar Nueva Granada por el grupo de investigación Davinci: El Mecabot 5.0.

Este trabajo de grado está dividido en siete secciones, la primera hace referencia a la introducción, objetivos y delimitaciones de la tesis. La segunda sección explica el marco referencial entorno a la robótica modular y robots cuadrúpedos, haciendo hincapié en los robots bioinspirados en salamandras.

La tercera sección ilustra el desarrollo de la arquitectura a implementar, posteriormente las distintas ejecuciones de movimiento son analizadas por medio de simulaciones en la sección cuatro. La sección cinco y seis explica el proceso de ensamblaje en el Mecabot 5.0 y muestra los resultados de las pruebas físicas. Finalmente, la sección siete presenta conclusiones y recomendaciones a trabajos futuros.

1.1.Planteamiento del Problema

La robótica modular consiste en una serie de módulos interconectados entre sí que pueden conformar una estructura de mayor complejidad que un robot individual, la implementación de estos sistemas permite entre otras cosas una mejor adaptabilidad al medio y mayor economía respecto a robots especializados en un solo tipo de locomoción. Este tipo de mecanismos son indispensables y mucho más aptos para variedad de aplicaciones, como lo pueden ser: búsqueda y rescate, la industria, área recreativa, aeroespacial con labores de exploración y demás.[4], [5]

El grupo de investigación DAVINCI ha favorecido la indagación en este campo de acción con el diseño y fabricación del robot MECABOT, a lo largo de los años se han presentado varias actualizaciones, entre estas el MECABOT 5.0. Igualmente, se ha investigado y desarrollado configuraciones con los modelos anteriores, sin embargo, el amplio bagaje de oportunidades que favorece este tipo de mecanismos no ha sido aun totalmente explorado.

Inicialmente, la primera versión del MECABOT es diseñada para configuraciones tipo oruga, serpiente y rueda. Las características de este primer modelo y la de sus siguientes versiones han sido orientadas a labores de búsqueda y rescate. Sus virtudes en cuanto a versatilidad, adaptabilidad y bajo costo de producción hacen del MECABOT un candidato idóneo para misiones de exploración de carácter científico y militar.

Las constantes pruebas realizadas sobre los módulos reales del MECABOT han conllevado a un enorme mejoramiento de sus características. Tras haber sido implementadas las arquitecturas serpiente, oruga y rueda es probada una configuración tipo hexápodo. El paso a mecanismos de movilidad con patas aumenta significativamente la capacidad de locomoción en terrenos irregulares, sin embargo, existen diversas clases de arquitecturas robóticas por piernas.

Dependiendo del número de patas estas pueden llegar a ser más estables o a consumir menos energía.

A nivel general, una configuración cuadrúpeda presenta un menor consumo que una hexápoda debido a que dispone de menos piernas, igualmente es más fácil de controlar que una bípeda ya que tiene mayor estabilidad. De esta manera la pregunta que se pretende responder con el desarrollo de este trabajo es: ¿Puede una configuración cuadrúpeda físicamente implementada en el MECABOT 5.0 permitir una adecuada locomoción en terrenos regulares e irregulares?

1.2.Objetivo General

Simular e implementar físicamente una arquitectura tipo cuadrúpedo utilizando los módulos robóticos MECABOT, de forma que se permitan desplazamientos y giros en terrenos irregulares.

1.3.Objetivos Específicos

- Ensamblar la arquitectura tipo cuadrúpedo dentro del entorno de simulación de robots Webots
- Desarrollar un software para simular los movimientos básicos (desplazamientos y giro) de la arquitectura tipo cuadrúpedo del sistema robótico modular MECABOT dentro del entorno Webots
- Implementar físicamente la configuración cuadrúpeda utilizando los módulos reales del sistema robótico modular MECABOT 5.0
- Realizar pruebas básicas (desplazamiento, giro) de movimiento con la configuración, seleccionando y calculando indicadores de rendimiento.

1.4.Delimitación

La siguiente propuesta pretende enfocarse únicamente en la simulación e implementación de la configuración cuadrúpeda con el sistema robótico MECABOT desarrollado por la Universidad Militar Nueva Granada. Posteriormente realizar la evaluación concerniente a los resultados, de modo tal que los datos puedan servir de realimentación en el desarrollo de la actual versión del MECABOT.

Se resalta que las modificaciones al diseño mecánico y electrónico de los módulos individuales MECABOT, empleados en el ensamble de la arquitectura cuadrúpedo no son objetivos de esta propuesta de trabajo de grado.

1.5. Justificación

La robótica modular a comparación de la robótica tradicional permite adaptabilidad al cambio de circunstancias de funcionamiento, de modo tal que puede llegar a realizar labores varias (búsqueda y rescate, la industria, área recreativa, aéreo espacial). En contraparte, un robot tradicional al tener estructura fija y especializada solo se desenvuelve en un número limitado de actividades. [4], [5]

Dentro de las principales ventajas que trae consigo un enfoque modular se encuentra la versatilidad, robustez y disminución de costos. Debido a la capacidad que el robot tiene de cambiar su configuración o disposición de los módulos, es posible adaptar su forma a las aplicaciones y condiciones medioambientales existentes. [6]

Además, debido a que se dispone de un número elevado de módulos individuales similares entre sí, se facilita hacer frente a posibles contingencias, esto debido a que las partes del robot pueden ser reemplazadas rápidamente por otras con las mismas características. La homogeneidad de los módulos también facilita la producción en masa y por ende reduce los costos de fabricación.[7]

El grupo de investigación DAVINCI ha diseñado e implementado diferentes prototipos de MECABOT, igualmente cuatro distintas configuraciones ya han sido probadas. Cada una de estas investigaciones individuales han aportado datos que permiten el mejoramiento continuo en el diseño del robot MECABOT y aumenta su capacidad de adaptabilidad, sin embargo, el amplio número de posibilidades que involucra consigo este enfoque modular, hace necesario la exploración de otro tipo de configuraciones que, a su vez, se espera contribuyan al enriquecimiento del proyecto, que está lejos de terminar.

Inicialmente el diseño de la primera versión del MECABOT es pensado para llevar a cabo las configuraciones oruga, serpiente y rueda. El mecanismo del robot es orientado a labores de búsqueda y rescate, en conjunto con la posibilidad de realizar exploraciones ya sean de carácter científico o militar. Ello es útil, considerando que al ser Colombia uno de los diez países más vulnerables al cambio climático (Ministro de Medio Ambiente) la nación es propensa a riesgos derivados a desastres naturales. Además, teniendo en cuenta el contexto de violencia en el país, y las políticas del gobierno actual en busca de la paz, es necesario labores que subsanen y ayuden

a la normalización de un ambiente seguro y próspero, por lo que es de esperarse que las labores de exploración militar sean requeridas.[8] [9] [10]

En un comienzo, la implementación física de las dos primeras disposiciones: oruga y serpiente, trae consigo el mejoramiento de las características del robot y la creación de una versión 4.0 de este. Posteriormente, es probada la arquitectura tipo rueda. Debido al visible avance evidenciado gracias a las mejoras previamente propuestas se ensaya finalmente el mecanismo en configuración con patas.

Un robot con patas permite entre otras cosas sortear fácilmente terrenos irregulares, esto debido a que posee distintos puntos de apoyo. La configuración que se implementa en ese entonces es de tipo hexápoda. Sin embargo, existen distintas clases de mecanismos de movilidad por piernas, entre estas resalta la cuadrúpeda.[11]

A la hora de plantear diseños a través de estructuras con patas es necesario sopesar estabilidad y redundancia, con costos y consumo. En general, un robot cuadrúpedo emplea menos energía que un hexápodo ya que dispone de menos piernas, igualmente es más estable y fácil de controlar que un robot bípedo.[11]

Al tener menos puntos de apoyo que un hexápodo, el robot cuadrúpedo puede llegar a presentar menos estabilidad e incluso ser lento en su desplazamiento, sin embargo, el estudio en esta clase de morfología ha demostrado que empleando ciertas configuraciones específicas cuadrúpedas (en su mayoría bio inspiradas) se puede compensar estos factores y lograr un correcto funcionamiento. Por lo tanto, vale la pena abordar otro enfoque de movilidad por patas en la nueva versión de este robot modular: MECABOT 5.0.[11]

1.6. Metodología

El orden de la metodología aplicada en el desarrollo de esta tesis es mostrado en el diagrama de la *Figura 1.1* . Primeramente, se realiza la revisión de la literatura entorno a los aspectos concernientes a la tesis, posteriormente a partir de lo encontrado se plantea la arquitectura tipo cuadrúpeda y se realizan las simulaciones concernientes. De acuerdo con los resultados de la simulación y la familiarización con el Mecabot 5.0 se realizan las pruebas físicas de funcionamiento. De lo observado durante el desarrollo de la tesis y de la experiencia con los módulos físicos del Mecabot 5.0 se hace la realimentación y recomendaciones a trabajos futuros.

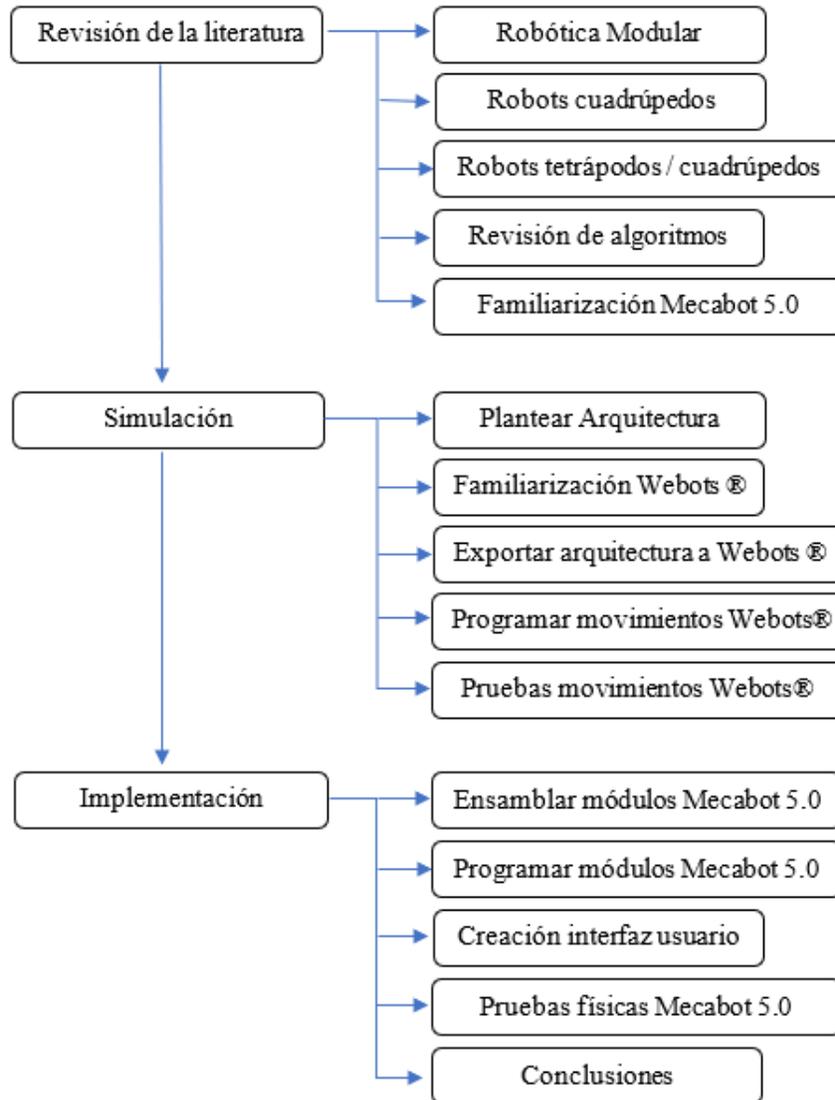


Figura 1.1. Metodología
 Elaboración propia

Capítulo 2

2. Marco Referencial

La siguiente sección describe de manera breve los conceptos de robótica, robótica móvil y robots con patas, para luego centrarse en los aspectos teóricos relacionados con los robots cuadrúpedos.

Posteriormente se realiza una breve revisión del trasfondo teórico asociado a los robots modulares, mostrando algunas estrategias de control comúnmente empleadas y dando ejemplos de robots cuadrúpedos y anfibios (tetrápodos) implementados en robótica modular.

Por último, se hace una revisión en los conceptos asociados a los robots bioinspirados en salamandras, ilustrando sus principios de locomoción.

2.1. Robótica y Breve Historia

El término robot fue acuñado por primera vez en 1921 por el escritor checo Karel Capek, la palabra deriva del eslavo *robota*, relacionado con el concepto de trabajo forzoso y servidumbre. Posteriormente, Isaac Asimov determinó el afianzamiento definitivo de este término con la redacción de las tres leyes de la robótica en 1945. [2] [12]

Los primeros inicios de los robots se remontan a los *autómatas* creados por el griego Herón de Alejandría (85 d.C.), estos eran mecanismos conformados por dispositivos hidráulicos, poleas y palancas que imitaban movimientos de seres animados. Siglos después, en 1948, con el auge de los procesos industriales surgen los telemanipuladores: los progenitores más directos de los robots actuales. [2]

Lo que en un comienzo era robótica industrial se extiende hasta conformar diversas subclases, entre estas la robótica móvil y robótica modular, campos explorados en esta tesis.

2.2. Robótica Móvil

La robótica móvil es la respuesta ante la búsqueda de la ampliación de los campos de aplicación de la robótica en general, pasa de estar restringida a una estructura mecánica anclada a permitir el desplazamiento a través de distintos terrenos. [12]

Dentro de la robótica móvil se identifican dos tipos principales de mecanismos de locomoción: ruedas (wheeled robots) y patas (legged robots). Dentro de aquellas dos subclases existen infinidad de diferentes configuraciones y estrategias de movimiento, muchas de las cuales involucran incluso dispositivos híbridos, como lo son los denominados Whegs nombre conformado por la conjunción de Wheel-legs. Con motivo de la tesis, únicamente se aborda las generalidades de los robots con patas.[13] [14]

2.3. Robots Caminantes o con Patas

Los robots con patas tienen su primera diferenciación de los robots con ruedas en el carácter de su concepción: siendo las ruedas un invento puramente humano mientras que las piernas son un elemento biológico. No es de extrañar que en muchas de las investigaciones asociadas a los robots con patas sea común el diseño bioinspirado, es decir, basados en mecanismos biológicos de locomoción (guepardos, lagartijas, arañas y demás.). Los animales son excelentes modelos a seguir y este aspecto es usado en la generación de secuencias de pasos, control, sistemas de sensores e incluso en la creación de reacciones ante estímulos ambientales. [13] [15] [16]

2.3.1. Ventajas y Desventajas

Los robots caminantes tienen la capacidad de evadir más fácilmente los obstáculos llegando en muchos casos a pasar por encima de ellos. En cuanto a la velocidad de locomoción, los robots con patas son, en general, más rápidos que los de ruedas, siempre y cuando el terreno sea irregular, este fenómeno es debido en gran parte a que el punto de contacto de un robot con patas es discreto por lo que se evita el derrape en terrenos naturales, cuestión que ocurre con las ruedas. En contraparte, los robots con ruedas son mucho más veloces en terrenos preparados. [16] [17]

El hecho de que exista un punto de apoyo discreto minimiza el daño ambiental sobre el terreno, por lo que un robot con patas tendrá menos impacto ecológico que un robot con ruedas. (ver *Figura 2.1. Resumen de las ventajas de los robots con patas*).[16] [17]

Obstacle surmounting	
Natural terrain (non-continuous terrain)	
Slippage and jamming	
Environmental damage	
Average speed	

Figura 2.1. Resumen de las ventajas de los robots con patas
Tomado de: [17]

Los robots con patas también tienden a presentar ciertas desventajas con respecto a los de ruedas, el aumento del costo es uno de ellos, mientras que por rueda se usa como mínimo un motor, para una pata es necesario de entre dos o tres actuadores, además que con el incremento de elementos electrónicos aumenta el grado de complejidad del control. Cabe mencionar también que a pesar de que los robots caminantes proporcionan puntos de apoyo discretos, y con ello se garantizan las ventajas mencionadas, la existencia de estos implícitamente involucra la necesidad de un estudio de estabilidad como se verá más adelante. [17]

Teniendo en cuenta la virtudes e desventajas que conlleva los robots caminantes las principales aplicaciones para ellos son: militares, desminado humanitario, exploración (en tierra, submarina y planetaria), tareas forestales y en agricultura, construcción y en proyectos civiles, asistencia a personas discapacitadas, testeo de nuevas técnicas de IA (Inteligencia Artificial) y en estudios de movimiento de las criaturas vivientes.[17]

2.4.Robots Cuadrúpedos

La clasificación empleada para los robots caminantes está relacionada con el número de puntos de apoyo que este posea, pasando principalmente por los hexápodos, cuadrúpedos, bípedos y monópodos, siendo los cuadrúpedos los que emplean cuatro patas como soporte. [16]

En biología se hace presente el término de tetrápodo, el cual hace referencia a la existencia de dos pares de extremidades en el animal, sin embargo, es necesario destacar que tetrápodo no es equivalente a cuadrúpedo, ya que el tetrápodo puede o no emplear esas extremidades como punto de apoyo, por lo que el término es extendido a anfibios, reptiles, aves y mamíferos. Por supuesto que en este amplio grupo efectivamente hay cuadrúpedos, pero no todos los tetrápodos son cuadrúpedos, ni todos los cuadrúpedos son tetrápodos. [18] [19]

2.4.1.Estabilidad

Es necesario tener en cuenta la estabilidad durante el movimiento, se dice que el robot es estáticamente estable si el centro de gravedad de este se encuentra dentro del *polígono de sustentación*, es decir, el *polígono* generado por las piernas que se encuentran en fase de estancia. Para que exista estabilidad estática debe haber como mínimo tres piernas en fase de apoyo, de lo contrario al no haber polígono, la estabilidad estática se perderá. (ver *Figura 2.2. Robot cuadrúpedo polígono de estabilidad*) [17]

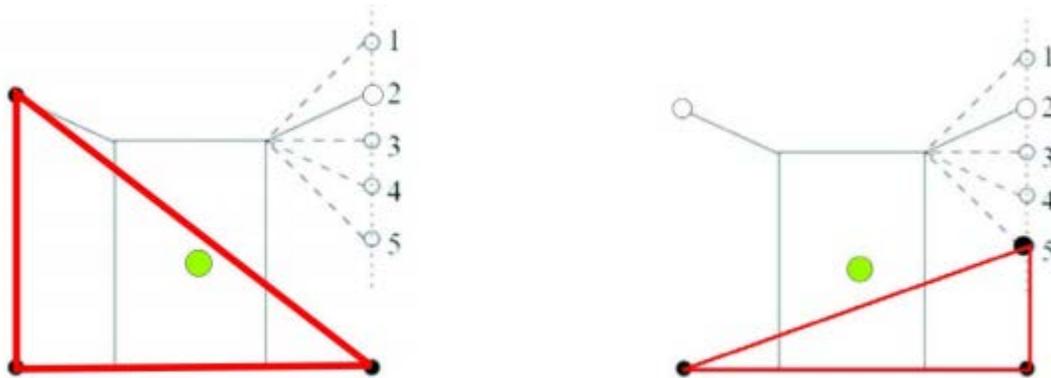


Figura 2.2. Robot cuadrúpedo polígono de estabilidad
Posición estable (izquierda) e inestable (derecha). Las piernas en estancia son representadas por círculos rellenos y el centro de gravedad del robot por el círculo verde. Tomado de: [20]

Existe también la denominada estabilidad dinámica en donde el balance estático no se cumple, en estos casos se garantiza que el sistema no se torne inestable realizando la acción durante periodos cortos de tiempo, de este modo se experimenta un breve instante de caída, pero en el suficiente grado como para que el robot no caiga totalmente. [11]

2.4.2. Disposición de las Extremidades

En general, en la naturaleza se pueden observar dos clases de movimientos distintos efectuados: por mamíferos y reptiles. El de los reptiles proporciona una base muy estable, la cual es ideal para desplazamiento sobre superficies irregulares, pantanosas o lodosas.[11] [21]

Por otro lado, los mamíferos disponen de menor estabilidad, sin embargo, demandan en general menos potencia de consumo por lo que les resulta adecuado el desplazamiento sobre superficies llanas alcanzando mayores velocidades. [11]

Respecto a las disposiciones de las extremidades, estas pueden ser clasificadas según sea la posición de las piernas con relación al cuerpo en: frontal o sagital, si las piernas son perpendiculares o paralelas a la dirección de movimiento, o ser circular, si se ubican en forma radial. Las disposiciones frontal y sagital son bioinspiradas, mientras que la circular no tiene cabida en la naturaleza (ver *Figura 2.3. Disposiciones de las piernas en robots cuadrúpedos*)[11].

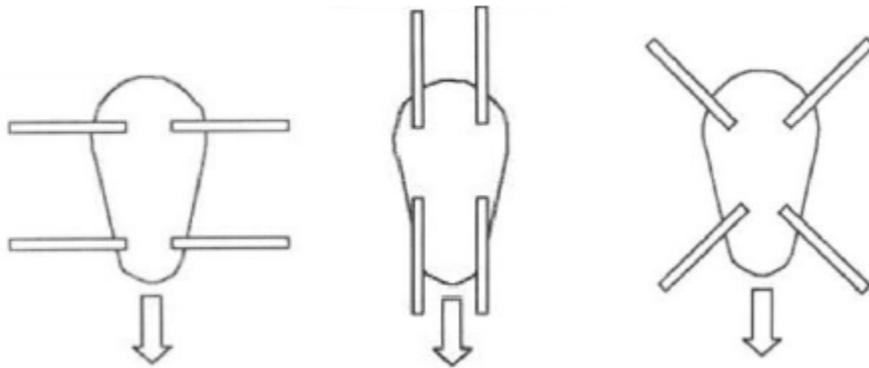


Figura 2.3. Disposiciones de las piernas en robots cuadrúpedos
Disposición frontal (izquierda), sagital (centro) y circular (derecha). Tomado de:[11]

En conjunto con las distintas disposiciones se encuentran las posibles posturas que pueden ser adoptadas en función de las rodillas de las piernas: [11]

Mamífero: Común en la disposición sagital. Las tres posibles configuraciones mamíferas son: piernas debajo del cuerpo con las rodillas en la misma orientación, hacia afuera o hacia dentro (ver *Figura 2.4. Postura de mamífero*)



Figura 2.4. Postura de mamífero
Tomado de: [11]

Reptiles y arácnidos: Común en la disposición frontal. Las rodillas pueden sobresalir a los costados o en la parte superior del cuerpo (ver *Figura 2.5. Postura de reptil y de arácnido*)



Figura 2.5. Postura de reptil y de arácnido
Postura reptil (izquierda) y arácnida (derecha). Tomado de: [11]

2.4.3. Secuencia (gait)

La secuencia o gait (en inglés), es la coordinación del cuerpo en conjunto con el movimiento descrito por cada pie. El movimiento de cada pata se conoce como *evento* y puede ser de *estancia* (pie en el suelo) o de *levantamiento* (transferencia/pie elevado). Los gaits son fácilmente representados por los diagramas de estado como se ilustra en la *Figura 2.6.* [17] [22]

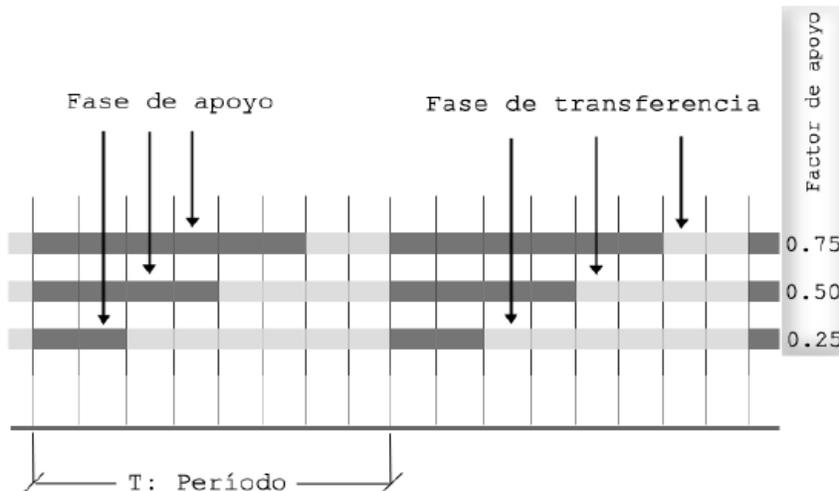


Figura 2.6. Interpretación de un diagrama de estado.
Tomado de: [22]

Una secuencia singular es aquella en la que ocurren dos eventos al mismo tiempo, es decir, posicionamiento o levantamiento de dos pies distintos. Una secuencia no singular, es aquella en la que no hay dos eventos al mismo tiempo. [17]

2.4.4. Movimiento en Línea Recta

Si se decide escoger cualquiera de las cuatro piernas como la primera que inicie una serie de *eventos* para formar una *secuencia*, existen 5040 posibilidades de hacerlo, de las cuales, solo seis cumplen con la estabilidad estática (levantan una pierna a la vez), estas últimas reciben el nombre de *creeping gaits* [17]

Del estudio de las *creeping gaits* se llega a la conclusión que la que es simétrica (el par del costado izquierdo realiza la misma secuencia que el par al costado derecho) y regular (movimiento similar en todas las piernas) es la que mejor comportamiento presenta en cuanto a estabilidad estática, esa secuencia es conocida como *standard gait* (ver *Figura 2.7*) y es empleada por muchos animales cuadrúpedos para realizar marcha lenta, es esta secuencia la que en otros capítulos será estudiada. [17]

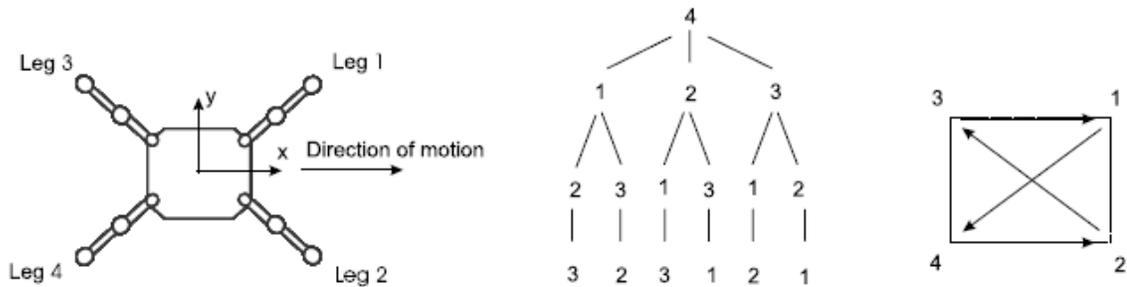


Figura 2.7. Ejemplo de creeping y standard gait

Robot SILO4 (izquierda). *Creeping gaits* con pierna 4 como inicio de la secuencia (centro). *Standard gait* (derecha) Tomado de: [17]

2.4.5. Movimiento de Giro

El movimiento de giro o *turning gait*, es empleado por lo general en el seguimiento de trayectorias. Dentro de esta clase de desplazamiento se encuentra el *circling gait* el cual, como su nombre lo indica, describe una trayectoria circular. [17]

Por lo general, a medida que disminuye el radio de la circunferencia descrita, el nivel de estabilidad estática se reduce ya que el robot debe realizar giros en ángulos mucho más cerrados. El disminuir el radio de giro hasta que este sea nulo conlleva a realizar otra clase de turning gait conocida como *spinning gait*, en este caso el standard gait muchas veces es insuficiente para mantener la estabilidad y por ende es necesario modificar la secuencia. [17]

Dentro de las dos opciones más comunes para llevar a cabo un spinning gait se encuentra la transición progresiva y la transición dos a dos. La primera es no singular y la segunda es singular.[23] [24]

En la *transición progresiva* se acostumbra a acompañar los eventos de estancia y levantamiento con fases de movimiento del cuerpo, estas fases disponen la orientación del tronco de modo tal que los posteriores eventos de las extremidades se puedan realizar dentro de los límites mecánicos del robot y/o que no se pierda la estabilidad estática de este. Pese a los beneficios que expone este tipo de secuencia, esta es limitada por los grados de libertad en la estructura y es bastante lenta. [17] [23] [24]

La *transición dos a dos* se construye a partir de la llamada secuencia de trote en la que las piernas diagonales del robot se levantan al mismo tiempo mientras que las otras dos se encuentran en fase de estancia, al realizar esta acción el equilibrio estático se pierde. Para realizar el giro los pares de piernas diagonales deben estar en contrafase. Con el fin de lograr una estabilidad dinámica adecuada el movimiento debe ser preferiblemente simétrico. La ventaja de este tipo de secuencia es el incremento de la velocidad. [23] [24] [25]

2.5.Robótica Modular

Como bien se había mencionado ya, dentro de las dos categorías a abordar en esta tesis una es la de los robots móviles y la otra es la robótica modular. La robótica modular es la familia de sistemas robóticos compuestos por pequeñas unidades interconectadas llamadas módulos. Los módulos se unen a través de interfaces de acoplamiento. [26]

2.5.1.Módulos

Son estructuras simples (a comparación del robot completo y especializado), que disponen por lo general de su propio sistema de actuación, sensores, interfaz de comunicación y de cálculo. Los módulos pueden tener distintas formas: cubos, paralelepípedos, esféricos, etc. Además de contener uno o más sensores y actuadores. Igualmente pueden permitir distintos grados de libertad o ninguno (ver *Figura 2.8*). [26] [27]

En el sentido estricto del concepto, los módulos están conformados por dos segmentos similares unidos por una articulación [5]

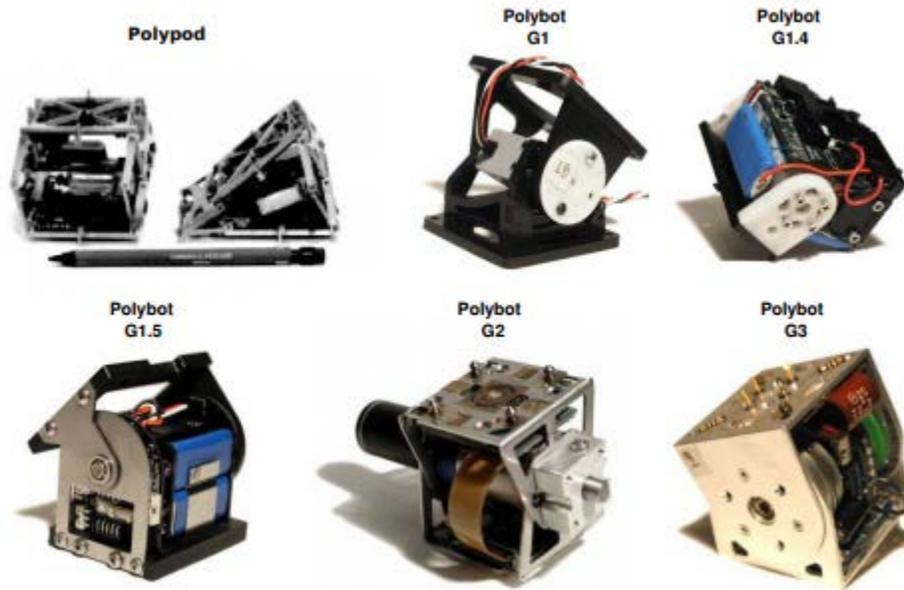


Figura 2.8. Módulos individuales de PolyBot y PolyPod.
Tomado de:[5]

2.5.2. Interfaces o mecanismos de acoplamiento

Son los métodos empleados para unir los distintos módulos, un módulo puede hacer uso de una o más de las siguientes interfaces de acoplamiento:[26]

- Fuerzas mecánicas
- Fuerzas magnéticas/ electromagnéticas
- Fuerzas electroestáticas
- Fuerzas hidrostáticas (líquidos) o neumáticas (gases)

2.6. Clasificación de robots modulares

Los robots modulares se pueden clasificar según sus patrones de movimiento y estructura:[26]

2.6.1. Configuración Móvil

Sus módulos son independientes permitiendo que uno solo de estos pueda interactuar eficazmente con el medio que lo rodea, un ejemplo son los Kilobots de la *Figura 2.9* que pueden moverse libremente cada uno.

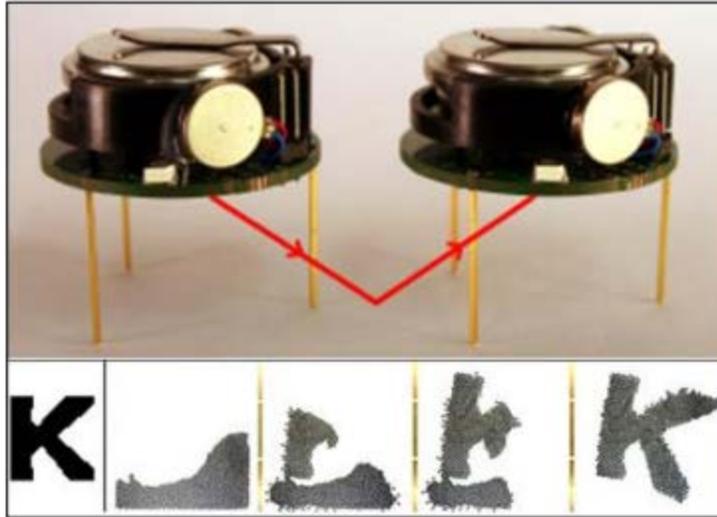


Figura 2.9. Kilobots que forman la letra K.
Tomado de: [26]

2.6.2. Locomoción de cuerpo completo

Los módulos no son independientes, dependen de otros módulos para poder realizar una interacción con el medio, por ejemplo, desplazarse formando arquitecturas varias. (ver *Figura 2.10. Robot Modular M-TRAN.*)

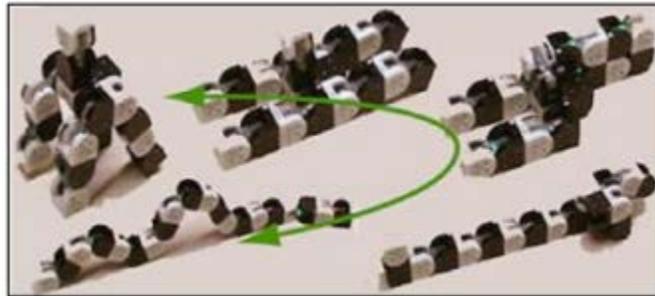


Figura 2.10. Robot Modular M-TRAN.
Tomado de:[26]

Otro modo de clasificación de los robots modulares se realiza según la arquitectura adoptada:
[5] [26]

2.6.3.Arquitectura de red, retículo, lattice o malla

Por lo general se evidencia con módulos cúbicos o paralelepípedos. Esta arquitectura imita en cierta medida la forma en que los átomos se juntan para formar moléculas por lo que permite tres grados de libertad, sin embargo, esta solo puede tener un número limitado de módulos (ver *Figura 2.11. Robot Modular Odín.*).



Figura 2.11. Robot Modular Odín.
Tomado de:[26]

2.6.4.Arquitectura cadena, árbol o chain

Es común en robots con configuración móvil permitiendo un número infinito de módulos. Esta arquitectura admite configuraciones simples como lo son la serpiente o la oruga, a más elaboradas, por ejemplo, los cuadrúpedos, entendidos como un conjunto de cinco cadenas. (ver *Figura 2.12. Robot Modular PolyBot.*)



Figura 2.12. Robot Modular PolyBot.
Arquitectura cuadrúpeda. Tomado de:[26]

2.6.5.Arquitectura híbrida.

La arquitectura híbrida emplea tanto la de red como la de cadena, permitiendo versatilidad en el diseño de configuraciones, un claro ejemplo se evidencia con el SuperBot que puede adoptar estructuras en línea, bípedas, entre otras (ver *Figura 2.13. Robot Modular SuperBot.*)

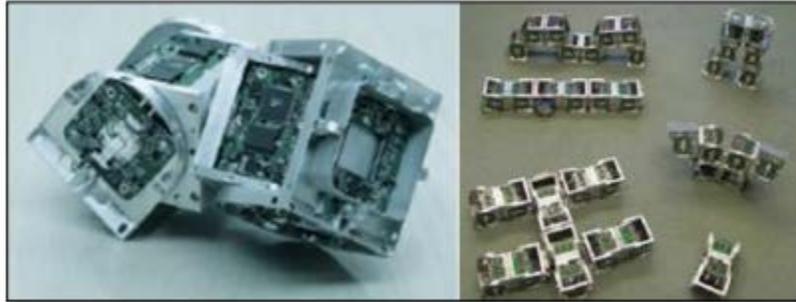


Figura 2.13. Robot Modular SuperBot.
Tomado de:[26]

2.7.Configuraciones cuadrúpedas modulares y breve historia

La idea de la robótica distribuida surge en 1980 con Toshio Fukuda quien acuña el término de robots celulares para referirse a la unidad de hardware simple que conforma una estructura compleja, el mismo investigador más tarde construiría CEBOT (CELLular roBOT) uno de los tantos tipos de robots modulares que posteriormente tendrían cabida.[27]

El primer robot modular aparece en 1993 con PolyBot el cual podía adoptar estructuras en forma de cadena/anillo. Posteriormente aparecen mecanismos mejorados: los Fracta robot desarrollados por Satoshi Murata, Haruhisarobot Kurokawa y Shigeru Kokaji (Instituto Nacional de Ciencia Avanzadas y Tecnología, Japón), y el robot Metamórfico construido por Gregory Chirikjian de la Universidad Johns Hopkins, Maryland. A diferencia de su predecesor estos dos robots podían cambiar su estructura en dos dimensiones.[27]

En 1997, Murata (Darmouth College, New Hampshire) presenta el primer robot auto reconfigurable en tres dimensiones, el 3D-Unit. En 1999 el mismo investigador contribuye a la creación del M-TRAN, robot modular con estructura en cadena y entramado. Este nuevo robot abre una nueva puerta a las estructuras híbridas.

Entre el año 2000 y 2002 PolyBot es perfeccionado por la compañía Xerox (Palo Alto) llegando a realizar estructuras bípedas, tipo serpiente, rueda y cuadrúpedas, esta última se implementa en tres configuraciones distintas: con movimiento alternante de dos piernas a la vez, con imitación lagartija por piernas compuestas con no más de un módulo y en configuración de araña. (ver *Figura 2.14. Polybot configuraciones cuadrúpedas*) [6] [28]

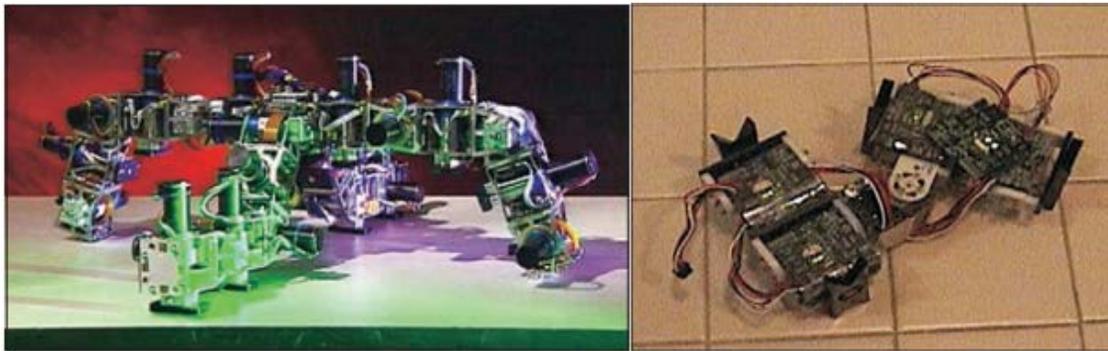


Figura 2.14. Polybot configuraciones cuadrúpedas
 Configuración araña (izquierda) y lagartija (derecha). Tomado de: [6]

En 2006 es lanzado SuperBot que incluye tres grados libertad, uno adicional a comparación del M-TRAN. En los últimos años se han venido realizando mejoras a los modelos anteriormente planteados, estos nuevos robots modulares permiten la configuración tridimensional y su auto reconfiguración. El M-TRAN ha evolucionado a M-TRAN II y M-TRAN III el cual permite la adaptación a estructuras tipo H, oruga y cuadrúpedos. [27] [29] [30] [31]

Muchos fueron los robots desarrollados en el ámbito modular desde 1997, en la *Tabla 2.1* se observan algunos de los principales robots modulares creados hasta el año 2007, los mecanismos de unión de estos robots en conjunto con los grados de libertad que aquellos permiten son variados.[32]

System	Class	DOF	Author	Affiliation	Year
CEBOT	mobile	various	Fukuda et al.	Nagoya	1988
Polypod	chain	2 3-D	Yim	Stanford	1993
Metamorphic	lattice	3 2-D	Chirikjian	JHU	1993
Fracta	lattice	3 2-D	Murata	MEL	1994
Tetrobot	chain	1 3-D	Hamiin et al.	RPI	1996
3D Fracta	lattice	6 3-D	Murata et al.	MEL	1998
Molecule	lattice	4 3-D	Kotay & Rus	Dartmouth	1998
CONRO	chain	2 3-D	Will & Shen	USC/ISI	1998
PolyBot	chain	1 3-D	Yim et al.	PARC	1998
TeleCube	lattice	6 3-D	Suh et al.	PARC	1998
Vertical	lattice	2-D	Hosakawa et al.	Riken	1998
Crystal	lattice	4 2-D	Vona & Rus	Dartmouth	1999
I-Cube	lattice	3-D	Unsal	CMU	1999
Pneumatic	lattice	2-D	Inoue et al.	TiTech	2002
Uni Rover	mobile	2 2-D	Hirose et al.	TiTech	2002
MTRAN II	hybrid	2 3-D	Murata et al.	AIST	2002
Atron	lattice	1 3-D	Stoy et al.	U.S Denmark	2003
Swarm-bot	mobile	3 2-D	Mondada et al.	EPFL	2003
Stochastic 2D	stochastic	0 2-D	White et al.	Cornell U.	2004
Superbot	hybrid	3 3-D	Shen et al.	USC/ISI	2005
Stochastic 3D	stochastic	0 3-D	White et al.	Cornell U.	2005
Catom	lattice	0 2-D	Goldstein et al.	CMU	2005
Prog. parts	stochastic	0 2-D	Klavins	U. Washington	2005
Molecube	chain	1 3-D	Zykov et al.	Cornell U.	2005
YaMoR	chain	1 2-D	Ijspeert et al.	EPFL	2005
Miche	lattice	0 3-D	Rus et al.	MIT	2006

Tabla 2.1. Principales exponentes de la robótica modular desde 1988 hasta el año 2007.
 Tomado de: [32]

A medida que avanzan las investigaciones en robótica modular son cada vez más las arquitecturas exploradas, en el año 2009 es presentado el CKBot en una conferencia en Londres, este es desarrollado por investigadores de la Universidad de Filadelfia el cual puede adoptar estructura de oruga, cuadrúpeda, entre otros. (ver *Figura 2.15 CKBot Configuración Cudrúpeda*) [33] [34]

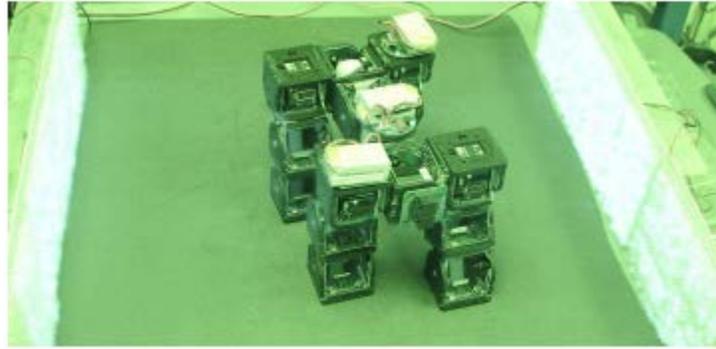


Figura 2.15 CKBot Configuración Cudrúpeda
Tomado de:[33]

En 2016 científicos de la Universidad de Pennsylvania realizaron un sistema de acoplamiento de tareas para el robot SMORE-EP, un robot modular equipado con llantas, el cual permite la adopción de la configuración *swerve driver* (ver *Figura 2.16*), muy similar a un cuadrúpedo en cuanto a su número de puntos de apoyo. Un año después, investigadores de la misma universidad, realizaron simulaciones en ROS con configuraciones tipo Centauro para robots modulares la cual buscaba ampliar las aplicaciones de su robot Walbot (cuadrúpedo). [35] [36]

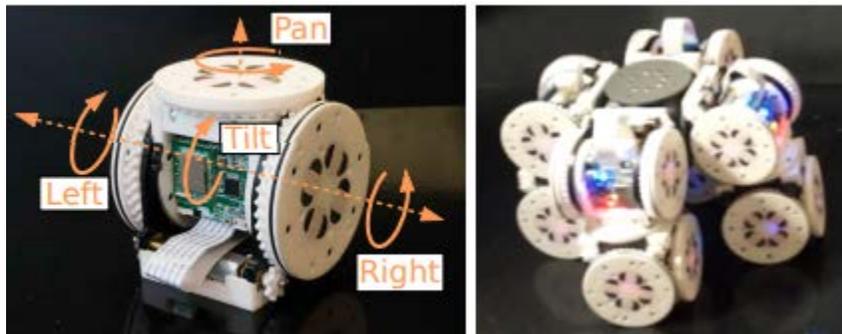


Figura 2.16. Walbot Configuración swerve driver.
Tomado de: [36]

2.8. Algoritmos de locomoción usados en robots modulares

De la sección *Configuraciones cuadrúpedas modulares y breve historia* se sabe que desde la concepción de la robótica modular hasta la fecha ya han transcurrido 38 años por lo que no es de extrañarse que exista un amplio repertorio de técnicas informáticas asociadas a esta área de la robótica.

Buscar leer todas las investigaciones asociadas a la robótica modular en lo respectivo al planteamiento y ejecución de secuencias (gaits) es una tarea ardua, difícil y humanamente imposible, por fortuna en 2015 es publicada “*Modular robotic systems: Methods and algorithms for abstraction, planning, control, and synchronization*” que resume las principales técnicas empleadas en secuencias de locomoción, la *Tabla 2.2* las expone. [37]

Method	Advantages	Weaknesses
Control Tables	<ul style="list-style-type: none"> • Simple and easy to implement especially when implemented in centralized manner 	<ul style="list-style-type: none"> • Hard to design control tables • Faulty modules impair harmony of the MRS • Modules cannot be added/ removed during runtime • Not scalable as the number of modules increases [204] • Cannot generate non-periodic gaits • Not adaptable to environment changes
Distributed Reinforcement Learning	<ul style="list-style-type: none"> • Can learn simple control tables • Can recover the gait in case of module failure or configuration change 	<ul style="list-style-type: none"> • Learning convergence is slow • Acceleration heuristics may keep the learning process longer at local minima states
Phase Automata	<ul style="list-style-type: none"> • Produces periodic and non-periodic gaits • Able to generate complex gaits • Generates scalable gaits • Applicable to MRS with many DOFs • Can generate terrain-adaptive gaits 	<ul style="list-style-type: none"> • Needs manual design of transition rules
Central Pattern Generators (CPG)	<ul style="list-style-type: none"> • Produces periodic and non-periodic gaits • Automates gait controller development • Can produce coordinated patterns in absence of feedbacks • Can generate terrain-adaptive gaits 	<ul style="list-style-type: none"> • Parameters optimization becomes challenging as DOF increases [133]
Neuroevolution	<ul style="list-style-type: none"> • Can develop controllers in conformance with the module position within the body • Can evolve reactive gait controllers that take sensor feedbacks into account, e.g. gaits with obstacle avoidance capability 	<ul style="list-style-type: none"> • The method has been implemented only on a specific quadruped morphology, and its effectiveness in different morphologies and scales needs to be assessed
Brain and Body Coevolution	<ul style="list-style-type: none"> • Develops body and gait controller simultaneously • The GRN generates global behaviors automatically through implicit local interaction rules [80] • The Morphogenetic method provides a unified framework for multirobot shape formation [81] • The Morphogenetic method can automatically generate adaptive controllers for dynamic environments [107] 	<ul style="list-style-type: none"> • Many underlying genetic and cellular mechanisms in biological morphogenesis remain undiscovered • Morphogenetic robotics is currently limited to simulation

Tabla 2.2 Métodos en gait locomotion.
Tomado de:[37]

Como puede observarse muchas de estas estrategias acaparan el campo de la inteligencia artificial y el estudio neurológico, mientras que otras tantas son más tradicionalistas. De los métodos expuestos anteriormente las tablas de control en conjunto con una simplificación de los CPG han sido empleados para configuraciones del Mecabot dando buenos resultados.

Los CPG permiten ejecutar movimientos complicados con pocos parámetros de control, además de proporcionar una respuesta más suave y armoniosa que los métodos tradicionalistas, sin embargo, en muchos casos demandan un alto costo computacional, al ser basados en mecanismos biológicos son muy especializados y redundantes. [38] [39]

Juan Gonzalez propone una estrategia en la cual el robot no sea considerado como un medio para probar estos mecanismos neurocomputacionales, sino que desde la perspectiva tecnológica imitar estos patrones, los generadores sinusoidales como versiones simplificadas de los CPG son ideales para ello ya que demandan menos cálculos y siguen conservando los beneficios de los CPG. [5]

2.9. Configuración Tetrápoda Modular

Es interesante resaltar la investigación dirigida por el École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) con respecto a la salamandra robótica (anfibia). El robot es concebido con el objetivo principal de estudiar teorías de movimiento discutidas en el ámbito de la biología, para ello se diseña una serie de módulos denominados *elementos* que permiten la reconfiguración de la topología de este: se puede incrementar o disminuir la longitud del cuerpo por medio de la adición o remoción de *elementos* y cambiar la posición de las piernas. [40] [41]

Adicionalmente con los *elementos* se puede formar una serpiente, un pez o una salamandra como se muestra en la *Figura 2.17*. Los *elementos* son fabricados a prueba de agua y cada uno es totalmente independiente al disponer de su propia fuente de poder, motores y control. [40] [41]

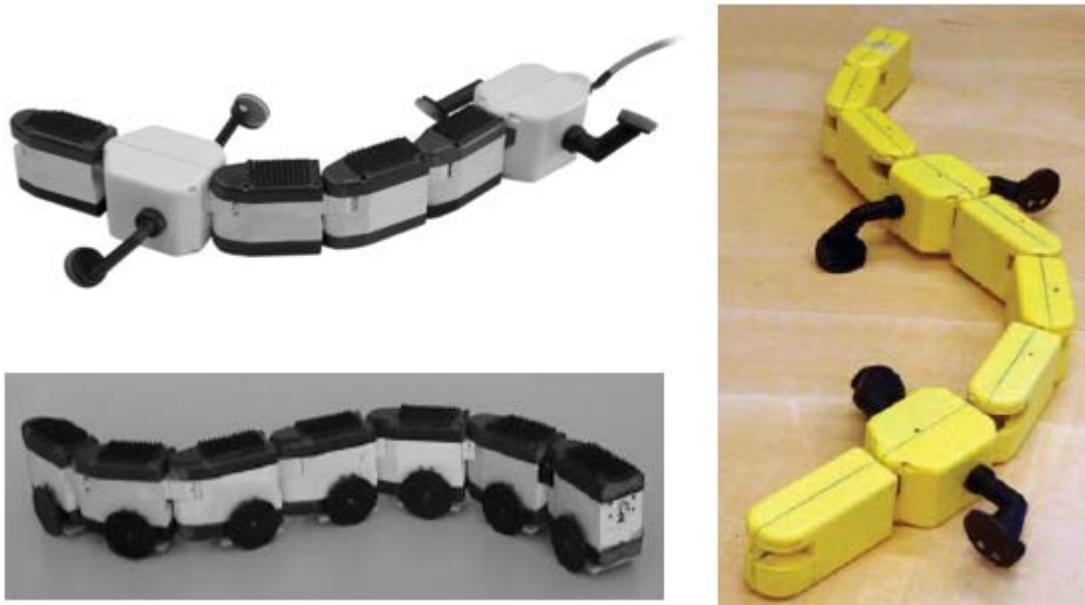


Figura 2.17. Robot modular Amphibot
Configuración serpiente con ruedas pasivas (izquierda abajo). Salamandra robótica primer prototipo (izquierda arriba) y posterior mejora (derecha). Tomado de: [40] [42] [43]

2.10. Mecabot

Como bien se ha visto la robótica modular tuvo su origen hace ya muchos años (ver *sección 2.7*), el inicio en esta área de estudio sienta sus bases en la Universidad Militar Nueva Granada en el año 2013 con el planteamiento de diseño del robot Mecabot 1.0 [44]

Esta primera versión contaba con cinco servomotores, un controlador PIC24HJ12GP201 de Microchip, Driver Micro Maestro 6 de Pololu, comunicación RF Transceptor +0dBm, sensores de proximidad y cuatro baterías de litio. [44] [45] [46]

El diseño original permitía el movimiento rotacional tanto en los extremos de los módulos como en los costados y el acople entre estos era mecánico. Pese a permitir estas prestaciones los módulos eran extremadamente grandes y los motores insuficientes para mover el peso, por lo que el Mecabot 1.0 era incapaz de llevar a cabo alguna configuración. [45]

Con la versión 2.0 se cambia el acople mecánico por el de imanes permanentes, el controlador es reemplazado por un Arduino Nano, la comunicación se realiza por medio de una Xbee Pro-serie 1. Se conservan la misma cantidad de servomotores, aunque el peso y las dimensiones por módulo son reducidas casi a la mitad. Pese a esto el robot es incapaz de mover y mantener una configuración (ver *Figura 2.18*) [45]



Figura 2.18. Cambios en la versión Mecabot 2.0
Módulo del Mecabot 2.0 (negro) en comparación al módulo del Mecabot 1.0 (rojo). Tomado de: [45]

Finalmente, en 2016 es implementado con éxito la configuración tipo oruga y serpiente en la versión 3.0 del Mecabot, el controlador es nuevamente reemplazado, esta vez por una Teensy 3.2. La nueva estructura en aquel entonces disponía de 6 servomotores de 1.8 Kg y 1.3 Kg, por lo que podía ejercer más fuerza que su predecesor, el tamaño en comparación al Mecabot 2.0 es

menor. Pese a las notorias mejorías se reportaron problemas de fricción y de acople entre los módulos, ambos factores afectaron la ejecución del movimiento. [46]

En el siguiente año se construye la versión 4.0 la cual reduce el peso de 500g a 380g. Se eliminan los motores rotacionales de los costados (ver *Figura 2.19*), motivo por el cual el módulo pasa a disponer únicamente de cuatro servomotores de un torque mayor (4 Kg). Adicionalmente, se incluye un regulador Step-Down contra sobre picos de corriente y dos baterías de litio. Con la nueva versión se realiza la configuración de rueda y la primera disposición con patas: un hexápodo. [46] [10]

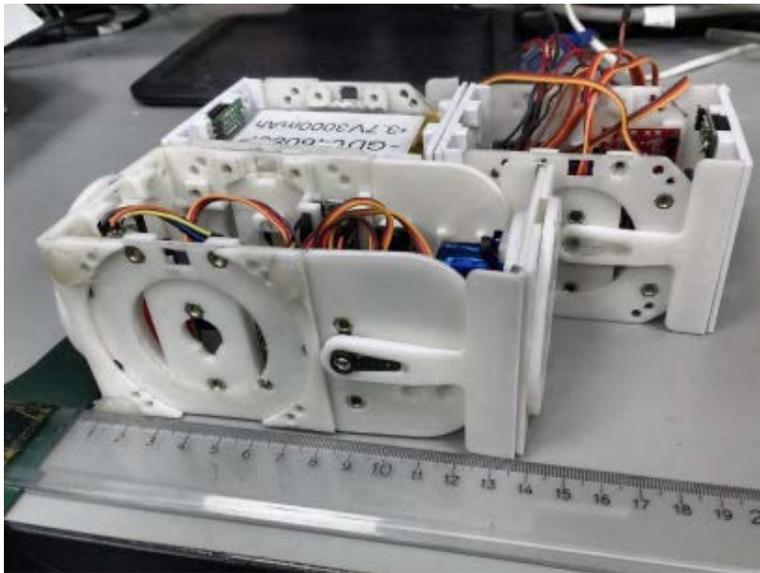


Figura 2.19. Cambios en la versión Mecabot 4.0
Módulo Mecabot 4.0 (atrás) en comparación al Semi-módulo Mecabot 3.0 (al frente). Tomado de: [10]

2.11. Salamandra: Principios de Locomoción

La salamandra al ser un anfibio es considerada tetrápodo, acapara especial interés en el área de la biología debido a la capacidad que tiene de realizar transiciones terrestres/acuáticas, por tal motivo numerosas investigaciones relacionadas con salamandras han sido producidas por casi un siglo asociadas en gran parte a temas evolutivos, a la cinemática y movimiento de estas. [21] [47]

Pero no sólo los biólogos han puesto sus ojos en esta clase de animales, su singular capacidad de escalar, locomoción terrestre y nado han servido de inspiración en la creación de nuevos robots (ver *Figura 2.20*) como lo es: el Stickybot basado en el gecko, el Amphibot y el Pleurobot del EPFL basado en el Pleurodeles waltl, el Chigon (chinese dragon), la salamandra bioinspirada en el cryptobranchidae, el AMOS WD02, entre otros. [15] [40] [48] [49] [50]

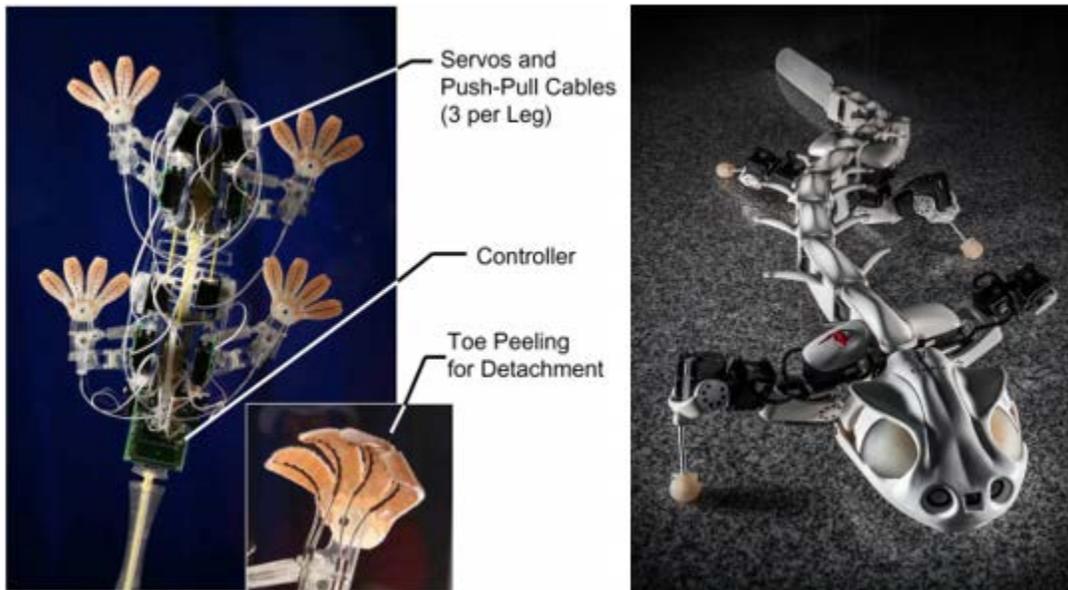


Figura 2.20. Algunos robots salamandra
StickyBot (izquierda), *Pleurobot* (derecha). Tomado de: [48] [51]

En los siguientes apartados se describen los principales principios asociados a los robots bioinspirados en salamandras, geckos o lagartijas sin importar si estos son o no modulares.

2.11.1. Secuencias de movimiento en una salamandra

En la locomoción terrestre, en cuanto a trayectoria recta, la salamandra presenta cuatro tipos de secuencias: lateral y retroceso, trote y paso acuático. En todas ellas la columna actúa en sincronía con el movimiento de las piernas. (ver *Figura 2.21*) [21]

La secuencia lateral es usada para el caminado lento, de todas es la más estable y con mayor duty cycle. Coincide con la forma de un *standard gait* (ver *Movimiento en Línea Recta*), pero en esta ocasión la secuencia comienza por la extremidad inferior izquierda (ipsilateral). [21]

La secuencia de retroceso es similar en a su ejecución a la secuencia lateral, sin embargo, esta es mucho más lenta y el factor de apoyo mayor. En el retroceso parte del tronco es apoyado sobre el suelo. [21]

El trote es utilizado para alcanzar velocidades mucho mayores, emplea secuencias singulares, levanta las extremidades diagonales casi que en sincronía ocasionando que se pierda la estabilidad estática, sin embargo, es una de las secuencias que mejor estabilidad dinámica presenta en el reino animal. [21]

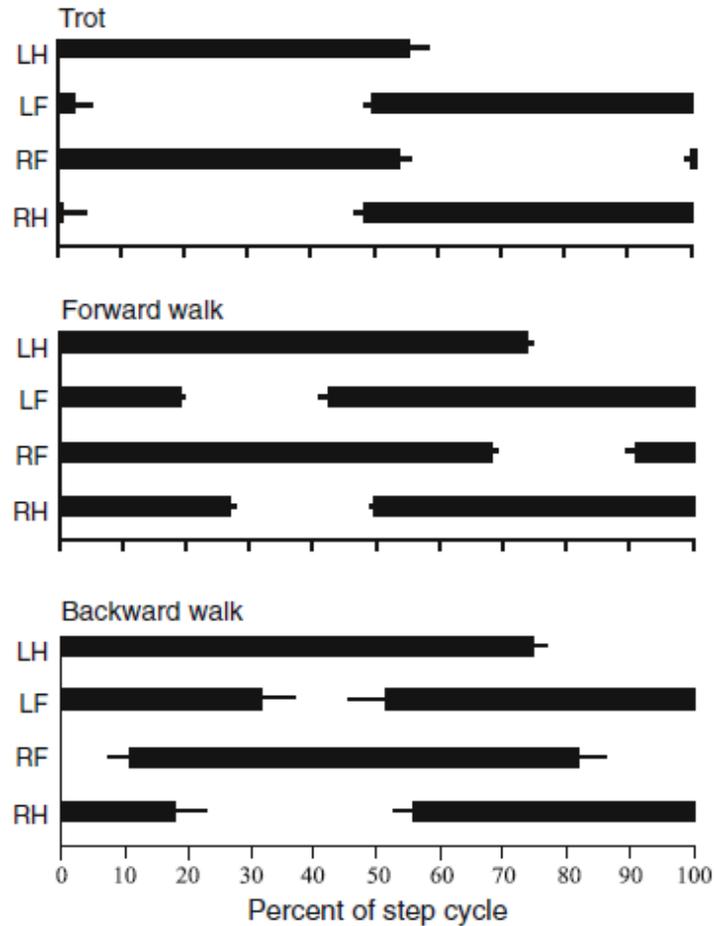


Figura 2.21. Diagrama de estado secuencias de movimiento en salamandras
 Diagrama con barras de error para: trote, caminado lateral y retroceso. Tomado de: [21]

El paso acuático es empleado en la transición de la locomoción terrestre a la acuática, usa el mismo principio del trote, con la diferencia que este tiene un duty cycle menor siendo la fase de estancia mucho más corta. En lo respectivo a los movimiento de giro en las salamandras estos han sido poco estudiados [21] [52] [53] [54]

2.11.2. La cola de la salamandra

El adoptar el modo de locomoción de estos anfibios involucra el interrogante de la necesidad de implementar en el diseño una cola. A nivel biológico, la cola ve su máxima expresión en: la locomoción acuática donde aporta un mayor movimiento, en maniobras aéreas cuando escala o cuando el animal cae. [21] [55]

En lo que respecta a la locomoción terrestre, se cree que esta puede llegar a funcionar como una quinta pierna, sin embargo, en muchas ocasiones llega a ser un peso muerto, las investigaciones del EPFL recomiendan eliminar la cola en misiones puramente terrestres. [21] [56]

2.11.3. Simplificación de los grados de libertad

En lo que respecta a la biología del animal este dispone de numerosos grados de libertad (ver *Figura 2.22*) presentes en las escápulas delantera y trasera, otros tantos en la columna, y finalmente en las piernas.

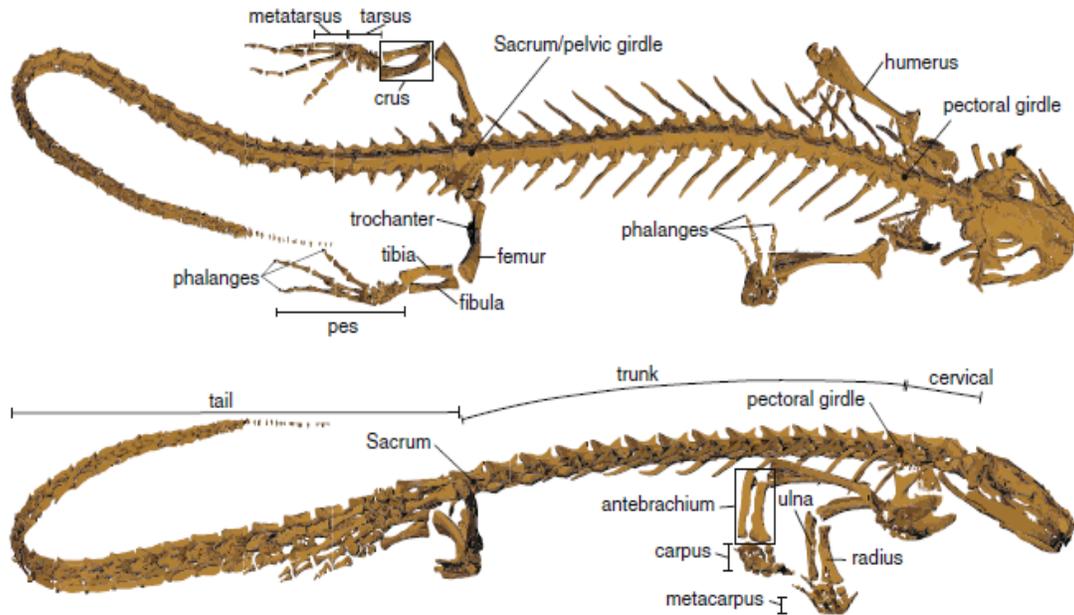


Figura 2.22. Esqueleto del *Pleurodeles waltl*
Tomado de: [21]

Existen distintas propuestas respecto a que grados de libertad deberían ser adoptados en la construcción de los robots bioinspirados. El Pleurobot (versión más avanzada del EPFL) simplifica en lo posible muchos de los DOF de la columna, sin embargo, las extremidades disponen de cuatro grados de libertad cada una. [57]

Manoonpong, por otro lado, propone una configuración con tan sólo dos grados de libertad en las piernas, la locomoción del AMOS-WD02 emplea muy poco la flexión del tronco, pero demuestra que los 2 DOF adoptados son suficientes para realizar giros abiertos y trayectorias rectas. (ver *Figura 2.23*) [15]

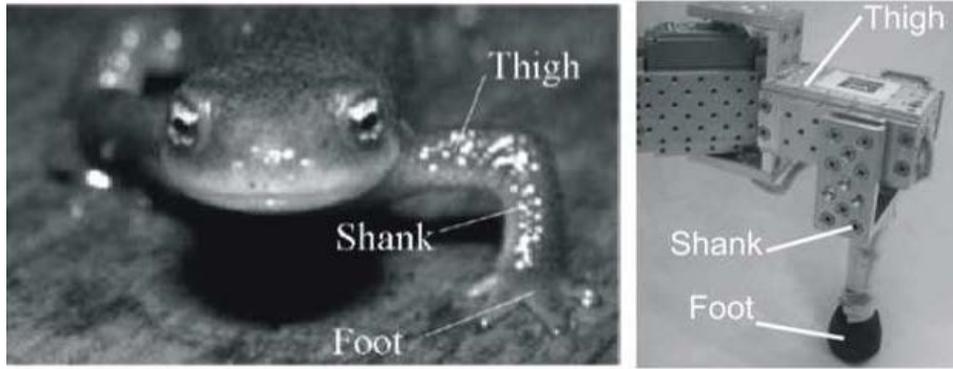


Figura 2.23. Robot AMOS-WD02 bioinspirado en lagartijas
Ejemplo de la simplificación de los grados de libertad de las piernas, Tomado de:[15]

2.11.4. Columna y extremidades

Como ya se dijo antes, la secuencia lateral emplea el mismo principio evidenciado en la secuencia estándar con la salvedad que el duty cycle es mayor al 0.5, es decir, que las extremidades se encuentran la mayor parte del tiempo en fase de estancia (ver *sección 2.7*). En términos generales las piernas pasan a fase de transición cuando realizan la protracción, este movimiento es más rápido que el realizado en la retracción. [21] [52] [53]

La coordinación columna-piernas es crucial para lograr una locomoción adecuada, una mala coordinación puede causar inestabilidad, breves lapsos de retroceso en la secuencia y por ende enlentecerla. El grado de desfase o error permitido es sumamente pequeño, fuera de este las variaciones en velocidad y estabilidad son altas. [21] [41] [58]

La columna alcanza su máxima contracción poco después de que la fase de transición de la pierna trasera (ipsilateral o contralateral) termine, así mismo, el inicio de la fase de levantamiento de las piernas delanteras debe coincidir con la máxima retracción de su opuesta diagonal trasero. [21]

En lo que respecta a la columna, las vértebras más próximas a la clavícula delantera tienen un menor grado de apertura en relación con las más cercanas a la clavícula trasera. El movimiento de esta puede ser controlada por funciones sinusoidales, las investigaciones del EPFL revelan que el carácter de la actividad de la columna es estacionario, es decir, que entre ambas escápulas la posición adoptada por las vértebras forma una C, únicamente en la locomoción acuática la onda es propagada (similar al de una serpiente). [21] [59]

2.11.5. Revisión de los algoritmos de locomoción en robots salamandra

Las técnicas basadas en neuro computación son predominantes: los CPG, redes neuronales con enlaces de inhibición y excitación, mapas de autoorganización de Kohonen, entre otros. Estas estrategias llaman bastante la atención entre los investigadores por las pocas variables de control que involucran y/o la posibilidad de ser adaptadas frente a reacciones exteriores basándose en los mecanismos de presa o depredador (huida o asecho). [15] [38] [60] [61]

La principal desventaja de estas técnicas sigue siendo la misma que se presenta con los algoritmos de este tipo en la robótica modular: el alto costo computacional, en conjunto con los intrincados métodos de aprendizaje en el caso de las redes neuronales. Así mismo, dependiendo del CPG utilizado puede ser más o menos difícil el tuning de las variables de control, ello debido a que se emplean infinidad de generadores cuyas características como la frecuencia o la fase son expresadas implícitamente en el modelo y no de manera explícita [15] [39].

Los CPG propuestos por los investigadores del EPFL para el Amphibot son de carácter sinusoidal por lo que variar las características del control es mucho más fácil ya que los parámetros se muestran de manera explícita, sin embargo, los *generadores sinusoidales* denominados en algunas ocasiones *control sinusoidal*, requieren menos costo computacional y son empleados en más de una vez. La forma general de los generadores sinusoidales se muestra en la *ecuación (1)*, nótese que la fórmula varía en relación a la empleada en los robots ápodos debido al carácter estacionario de la onda. [5], [45] [49] [58] [62]

$$\theta_{[i]} = A_{[i]} * \text{Sin}(\pi * F * t + \text{bias}_{[i]}) + \text{offset}_{[i]} \quad (1)$$

2.11.6. Variación de parámetros e influencia en la locomoción del robot

Indistintamente que se use el control sinusoidal especificado en la *ecuación (1)* o los generadores de patrones centrales del EPFL, la influencia que tienen los parámetros de control es bastante similar.

La velocidad puede ser incrementada de tres modos distintos: aumentando la amplitud de contracción de la columna, la amplitud de paso de las piernas o la frecuencia. Una amplitud muy elevada en la columna puede ocasionar que el robot se deslice, disminuir en gran medida el ángulo de paso en las piernas y por lo tanto llegar a afectar negativamente el desempeño.[21] [58]

Para aumentar la velocidad es preferible incrementar la frecuencia (como lo hacen los animales) o el ángulo de las piernas teniendo en cuenta que el movimiento debe ser regular y no debe chocar con la columna. [21] [58]

El bias es empleado para garantizar una correcta coordinación piernas-tronco, en general se tiene que el desfase entre los eslabones de la columna es nulo ya que la onda es estacionaria, entre columna y cola el desfase es de π aproximadamente. [21] [58]

Los ángulos de la columna desempeñan un papel importante en la generación de trayectorias, si las vértebras de los extremos se encuentran sobre el mismo plano horizontal el robot podrá ir en línea recta, de lo contrario generan giros. Para lograr el cambio de rumbo del robot empleando los eslabones de la columna es necesario realizar una interpolación y adicionalmente emplear algoritmos de optimización. [52]

Una manera más sencilla de lograr un giro es por medio del offset. El offset es empleado para dar giros abiertos generando trayectorias de carácter circular cuyo radio disminuye a medida que esta variable aumenta (ver *Figura 2.24*). Un offset acompañado de una amplitud elevada en el movimiento de la columna conlleva a un deterioro de la trayectoria circular debido al movimiento excesivo de lado a lado del robot. [21] [49] [58]

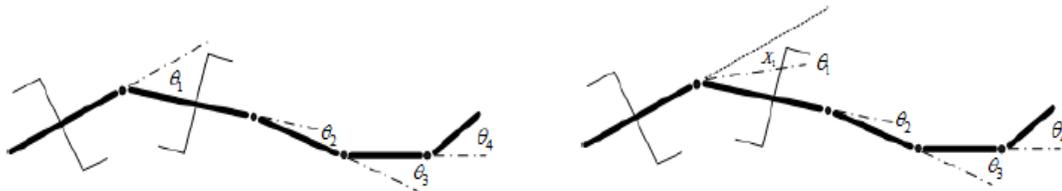


Figura 2.24. Caminado lateral robot salamandra: parámetro de offset
Sin offset (izquierda), con giro debido al offset (derecha). Tomado de: [49]

Capítulo 3

3. Desarrollo de la arquitectura tipo salamandra utilizando Webots [®]

En el presente capítulo se exponen los principales modos de acople que se podría adoptar con el Mecabot 5.0. Posteriormente se estudia distintas posibilidades de la arquitectura cuadrúpeda para luego optar por un estilo tipo salamandra.

La interacción entre la columna y las patas es descrita a través de la cinemática y el análisis de movimiento en una salamandra real. Finalmente se plantea la secuencia de movimiento para tres tipos de locomoción distinta: avance en línea recta, giro abierto y giro cerrado o rotación. La secuencia se desarrolla por medio de generadores sinusoidales sencillos y/o compuestos.

3.1. Clases de acoples entre módulos del Mecabot 5.0

El Mecabot 5.0 puede adoptar distintos modos de acople. Las ruedas provistas de imanes facilitan la unión, por lo que en algunos casos basta con solo despegar las caras en donde estos están presentes y volverlas a juntar con la disposición deseada. En otros casos es necesario desacoplar por completo una cara y volverla a atornillar para obtener el acople requerido.

3.1.1. Acople Cara-Pivote

Esta es la configuración más común empleada en el Mecabot, en la *Figura 3.1* se observan la vista lateral de dos semi módulos acoplados por cara-pivote. Debido a la presencia de las ruedas es posible girar los semi módulos para adoptar diferentes configuraciones cara-pivote.

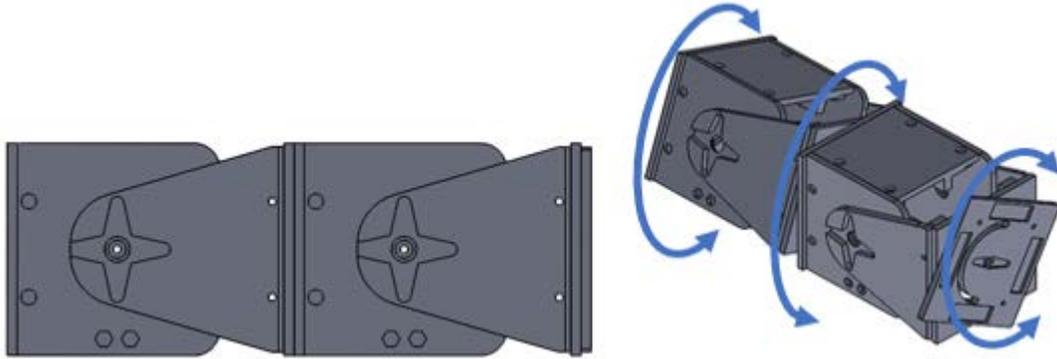


Figura 3.1. Acople Cara-Pivote

Vista lateral (izquierda), movimientos permitidos en las ruedas con imanes (derecha). Elaboración propia

En la *Figura 3.2* se evidencia la cara-pivote invertida y no invertida, para ello es necesario mantener la señal correspondiente en el motor de la rueda central. Si se desea acoplar otro módulo en configuración cara-pivote se emplean los imanes de las ruedas exteriores, en cuyo caso estos son acoplados manualmente con o sin inversión.

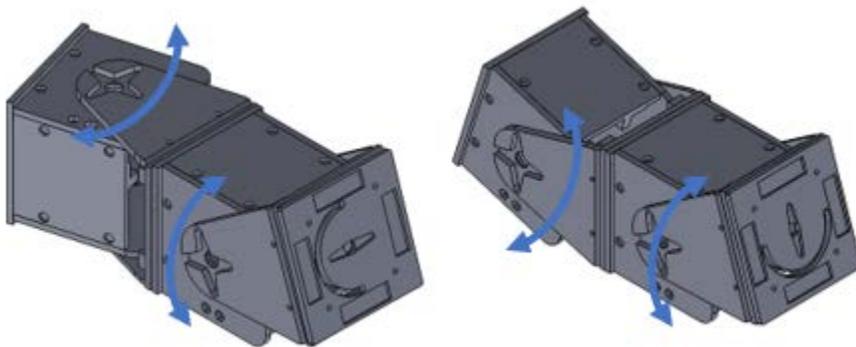


Figura 3.2. Acople Cara-Pivote con y sin inversión

Cara-Pivote invertida (izquierda) y no invertida (derecha). Elaboración propia

Ante la necesidad de variar la distancia existente entre las articulaciones de los semi módulos se emplean las configuraciones cara-cara y pivote-pivote.

3.1.2. Acople Pivote-Pivote

El Pivote-Pivote se muestra en la *Figura 3.3*. La configuración se realiza reemplazando la cara del pivote de la parte trasera por una que permita la implementación de una rueda con imán. Posteriormente se juntan las dos ruedas con imanes.

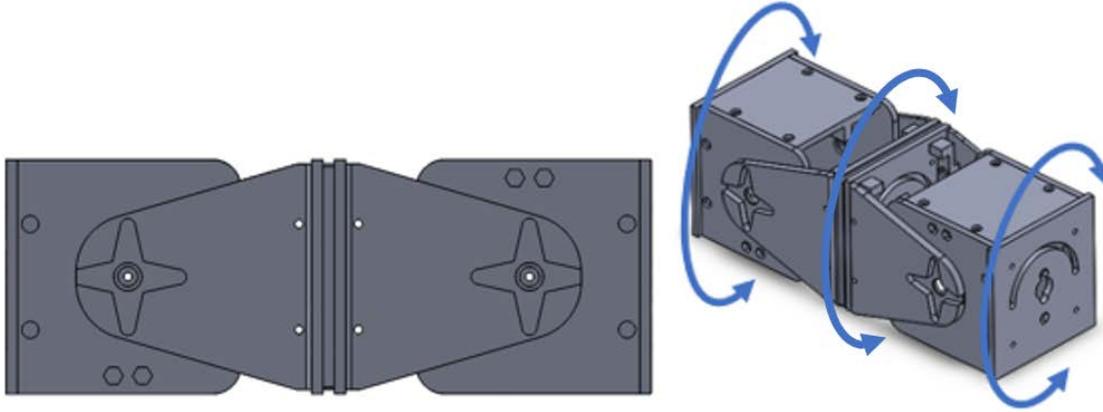


Figura 3.3. Acople Pivote-Pivote

Vista lateral (izquierda), movimientos permitidos en las ruedas con imanes (derecha). Elaboración propia

En la *Figura 3.4* se muestra la configuración invertida y no invertida. Para lograrlas es necesario disponer los imanes manualmente como se requiere o programar los dos motores de los pivotes para que alcancen la posición deseada.

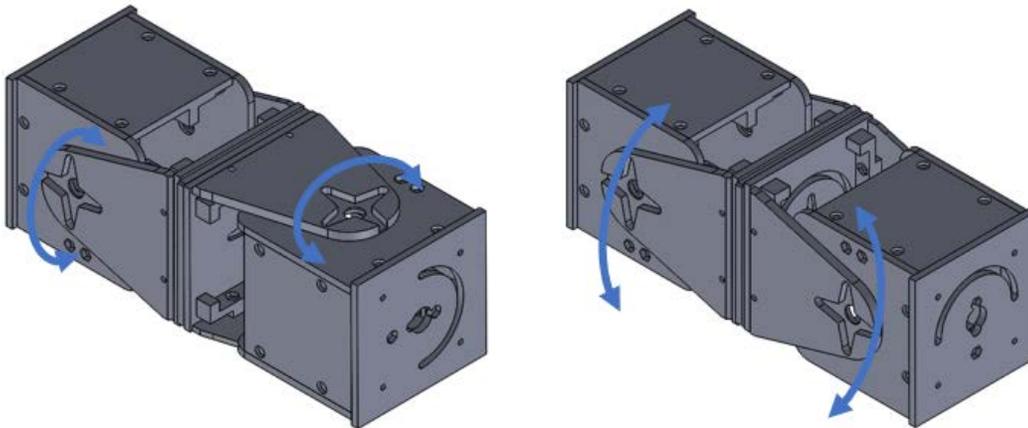


Figura 3.4 Acople Pivote-Pivote con y sin inversión

Pivote-Pivote invertida (izquierda) y no invertida (derecha). Elaboración propia

Debido a que la unión entre los dos semi módulos se realiza con imanes es la configuración que tiene el acople más débil, adicionalmente es la configuración que puede llegar a emplear más ruedas con imanes según sea el caso.

3.1.3. Acople Cara-Cara

En la *Figura 3.5* se observa el acople cara-cara. Para implementar dicha configuración es necesario desatornillar las caras laterales del cuerpo de uno de los semi módulos y cambiar su disposición para hacerla contraria a las caras del otro semi módulo, se emplean dos topes para acoplar la rueda del pivote que contiene el imán.

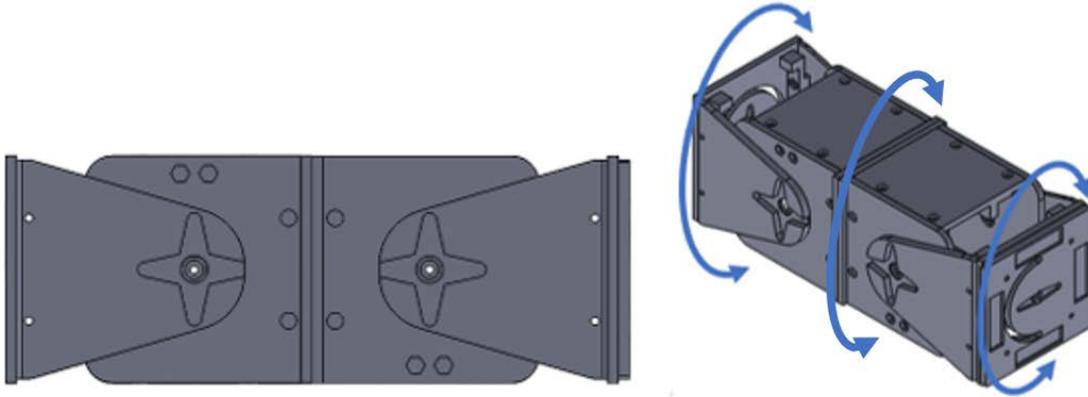


Figura 3.5. Acople Cara-Cara

Vista lateral (izquierda), movimientos permitidos en las ruedas con imanes (derecha). Elaboración propia

Para ejecutar una configuración invertida o no invertida basta con mantener la señal del motor intermedio de modo tal que preserve la posición deseada (ver *Figura 3.6*). Al igual que en la configuración cara-pivote el acople al resto de los módulos se realiza a través de las ruedas con imanes invirtiendo o no invirtiendo la disposición manualmente.

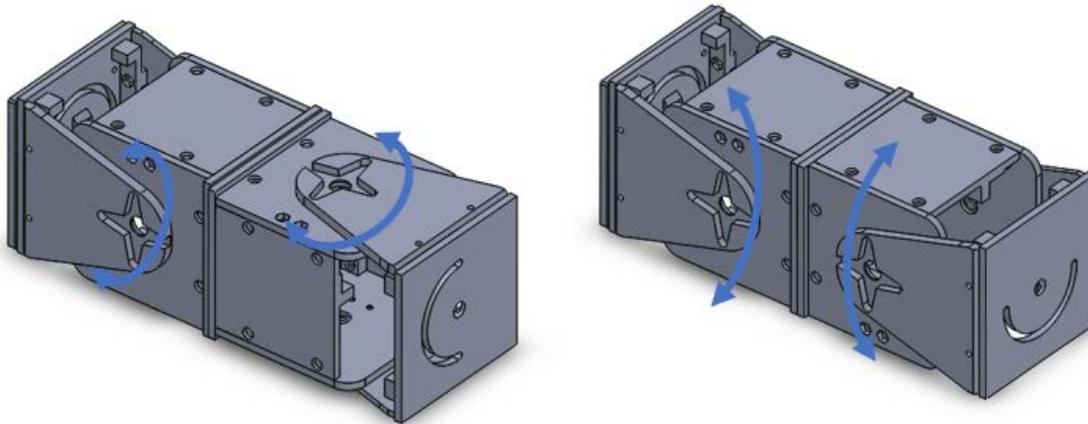


Figura 3.6 Acople Cara-Cara con y sin inversión

Cara- Cara invertida (izquierda) y no invertida (derecha). Elaboración propia

3.1.4. Acople a caras laterales del cuerpo

Esta configuración es empleada si se requiere adjuntar módulos o semi módulos perpendicularmente. Se realiza acoplando por medio de tornillos el pivote o el cuerpo del submódulo. Esta configuración se hace únicamente a las caras laterales del otro submódulo, de lo contrario se presentarían problemas de interferencia con los pivotes. Dependiendo de la configuración adoptada se puede llegar a tener más o menos apertura, siendo el acople con pivote la que menor limitación mecánica presenta (ver *Figura 3.7*).

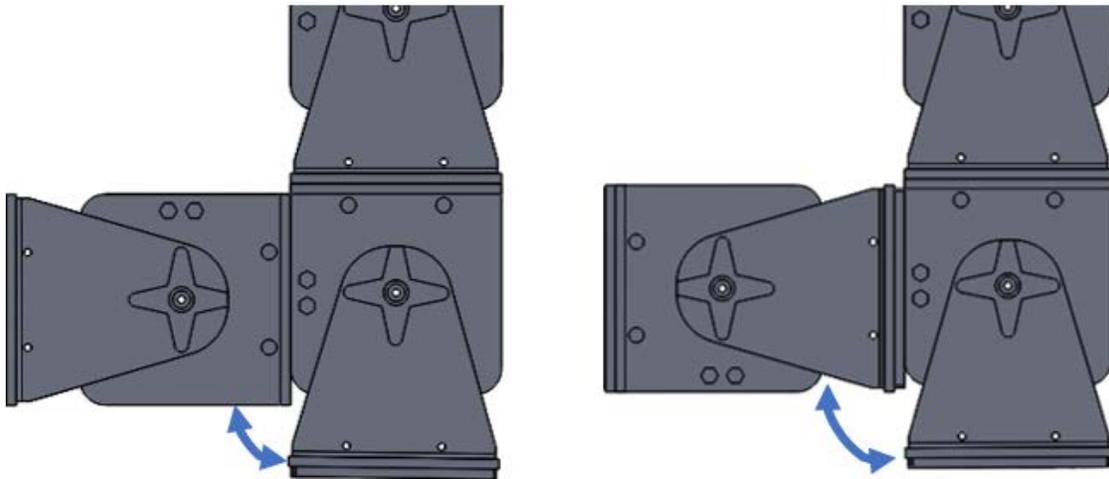


Figura 3.7. Acople a caras laterales del cuerpo.

Acople con cuerpo(izquierda) y con pivote (derecha). El acople con pivote permite mayor apertura. Elaboración propia

3.2. Propuesta de arquitecturas tipo salamandra utilizando sistema Mecabot 5.0

Como se menciona en la sección de *Robots Cuadrúpedos* hay infinidad de diferentes configuraciones que bien podrían realizarse con los módulos del Mecabot, sin embargo, en virtud de que el robot es concebido para operaciones de exploración se opta por una disposición frontal ya que esta es la más ideal para desplazarse en terreno irregular.

En cuanto a los grados de libertad por pierna, se sabe que el mínimo requerido por extremidad es, según la aplicación, de dos o tres. Así mismo, se conoce que el incremento sustancial en DOF conlleva a un aumento en el costo computacional, el control y el consumo. Según esto se opta por disponer únicamente de dos grados de libertad por lo que finalmente la arquitectura presentará una postura tipo reptil (ver *Disposición de las Extremidades*).

Es importante resaltar que la disposición frontal debe garantizar un espacio de trabajo conveniente, de modo tal que la retracción y protracción de las extremidades se realice de manera adecuada y así procurar que la longitud de paso no sea demasiado corta y por lo tanto la velocidad pueda verse reducida. Así mismo, por motivos de facilidad en el análisis y planeación de secuencias es aconsejable que el robot sea simétrico.

Según los criterios anteriormente descritos y a partir del apartado *Clases de acoples entre módulos del Mecabot* se proponen dos posibles configuraciones frontales reptiles mostradas en la *Figura 3.8*.

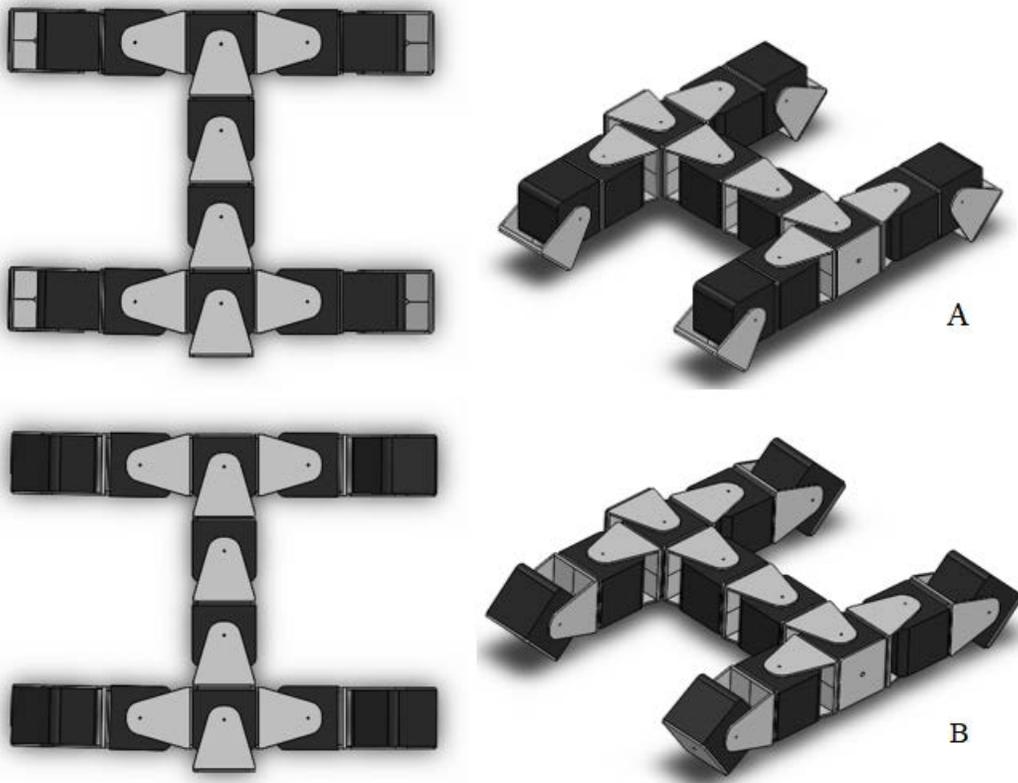


Figura 3.8. Posibles arquitecturas con disposición frontal en el Mecabot
Propuesta A (arriba) y Propuesta B (Abajo). Elaboración propia

De las dos posibles configuraciones propuestas, en ambas la columna tiene la misma disposición, variando únicamente entre estas el modo de acople en los módulos de las piernas. La opción A emplea un acople cara-cara invertido, mientras que la opción B tiene un acople cara-pivote invertido, como resultado de aquello el nivel de elevación del cuerpo con respecto al suelo en la opción A es de 36.4 mm (ver *Figura 3.8 propuesta A*), mientras que el de la opción B es de 17.94 mm (ver *Figura 3.8 propuesta B*).

Teniendo en cuenta que el robot se va a desempeñar en terrenos no estructurados se opta por escoger la propuesta A, ya que una mayor altura facilitaría la maniobrabilidad.

Respecto al acople de la columna a las piernas, este se debe únicamente en las caras laterales de los módulos de la columna, de lo contrario habría problemas de interferencia con los pivotes de la columna.

El número de módulos que conforman el tronco son necesarios para garantizar el libre movimiento de las piernas hasta su grado de doblaje máximo (ver *Figura 3.9. Límites mecánicos en la propuesta A*), sin embargo, es aconsejable evitar el sobreesfuerzo que conllevaría llevar el motor desde una de sus posiciones extremas a la otra, por lo que a altas frecuencias de movimiento estas posiciones deben ser evitadas.

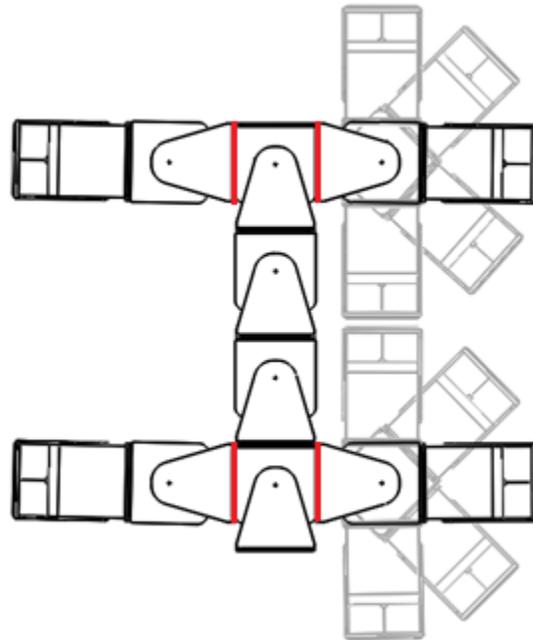


Figura 3.9. Límites mecánicos en la propuesta A
Movimiento en las extremidades delantera y trasera del costado derecho del robot Mecabot (disposición frontal). El acople a columna por pivote se realiza en las caras laterales(rojo) Elaboración propia

3.3. Arquitectura tipo Columna activa

De la configuración adoptada se sabe entonces que la disposición de la columna está limitada al correcto acople con las piernas por lo que solo se puede realizar en las caras laterales (ver *Figura 3.9*), si se decidiera explorar diversas alternativas en la conexión de la columna, estas solo podrían variar en los dos semi módulos centrales y no alterarían en gran medida el desempeño del robot (ver *Figura 3.10*)

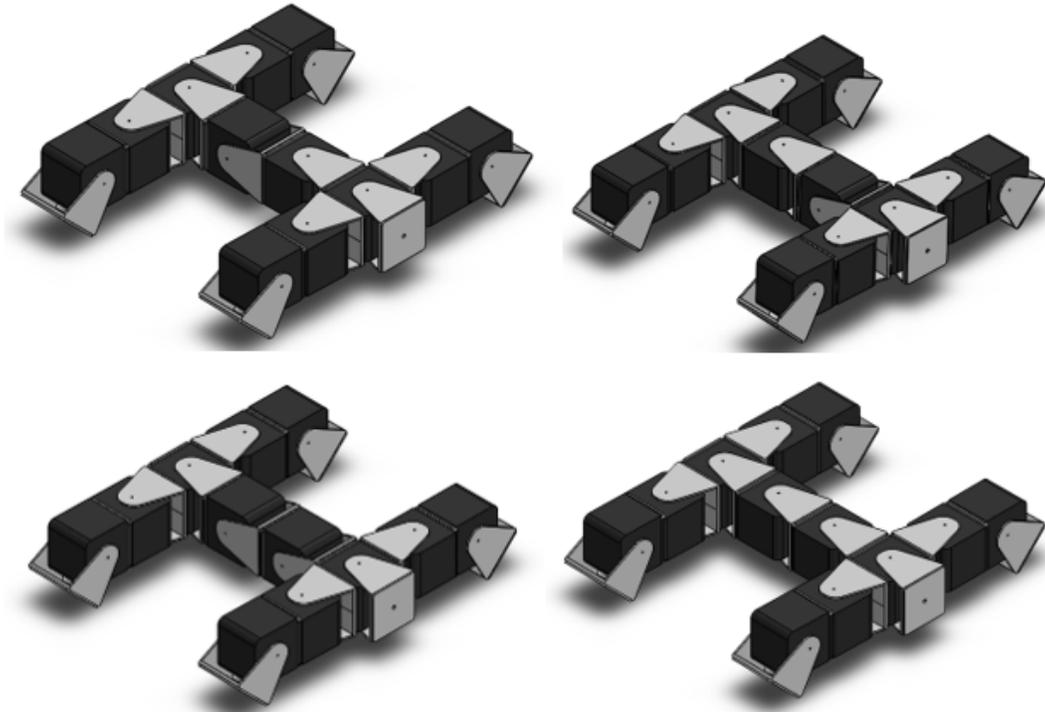


Figura 3.10. Posibles configuraciones en los semi-módulos centrales de la columna en la propuesta A
 Arriba: Cara pivote invertido conservando el segundo semi-módulo (izquierda) y conservando el primer semi-módulo (derecha).
 Abajo: Conexión a escápula invertida (izquierda) y sin invertir (derecha).
 Elaboración propia

La disposición de la conexión en los módulos de la columna tal cual ha sido propuesta en la opción A (ver *Figura 3.8 propuesta A*) permite abordar una posibilidad interesante: la de implementar una columna activa, el movimiento que esta puede realizar en el plano transversal aportaría longitud de paso por lo que las piernas ya no tendrían que adoptar ángulos máximos en su trayectoria (ver *Figura 3.11*), la columna trabajando en conjunto con las extremidades tampoco tendría que adoptar posiciones extremas por lo que se decide basar parte del movimiento en el de la salamandra.

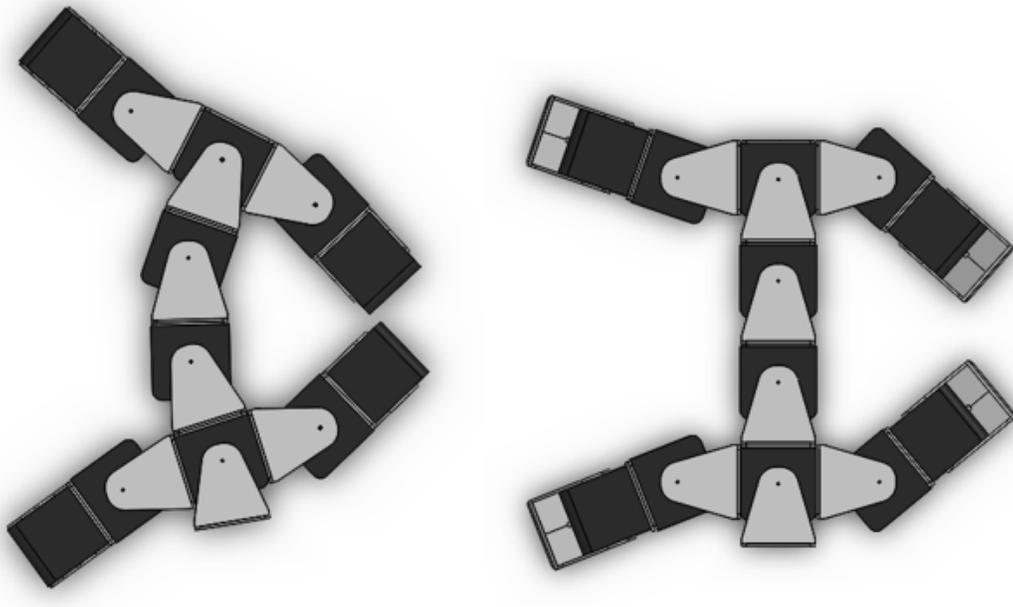


Figura 3.11. Columna activa VS columna pasiva en la propuesta A
Para alcanzar puntos similares el movimiento de las piernas debe ser mayor con columna pasiva (derecha). Elaboración propia

El fenómeno evidenciado en la *Figura 3.11* tiene su explicación en los siguientes dos apartados. La influencia del movimiento de la columna en las piernas puede observarse en el desarrollo de la cinemática, en donde la columna proporciona un grado de libertad adicional a las extremidades (ver *Figura 3.14*). La escápula trasera, que aporta un DOF a las piernas traseras, es influenciada a su vez por el movimiento de la escápula delantera y las articulaciones intermedias de la columna (ver *Figura 3.12*).

3.4. Cinemática de la columna

Los grados de libertad de la columna se muestran en la *Figura 3.12*, se omiten los DOF relacionados con las ruedas ubicadas en los pivotes, ya que estas no son empleadas en la locomoción. El sistema coordinado cero y tres corresponde a las escápulas delantera y trasera, respectivamente.

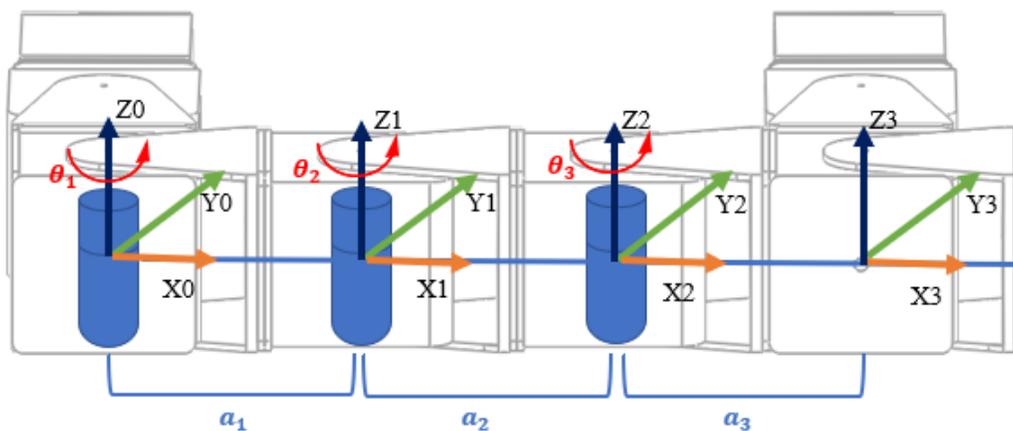


Figura 3.12. Diagrama de DOF y sistema coordinado columna

Para hallar la cinemática directa se plantea los parámetros de Denavit Hartenberg como se ilustra en la *Tabla 3.1*.

Articulación	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1	0	a_1	0
2	θ_2	0	a_2	0
3	θ_3	0	a_3	0

Tabla 3.1 Parámetros Denavit Hartenberg columna
Elaboración propia

La matriz de transformación está dada por la *ecuación (2)*.

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

Donde:

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

Resolviendo finalmente se llega a la matriz A_0^3 de la *ecuación (3)*.

$$\begin{bmatrix} -C\theta_1(S\theta_{23} - C\theta_{23}) - S\theta_1(C\theta_2 S\theta_3 + S\theta_2 C\theta_3) & -C\theta_1(C\theta_2 S\theta_3 + S\theta_2 C\theta_3) - S\theta_1(C\theta_{23} - S\theta_{23}) \\ C\theta_1(C\theta_2 S\theta_3 + S\theta_2 C\theta_3) + S\theta_1(C\theta_{23} - S\theta_{23}) & -C\theta_1(S\theta_{23} - C\theta_{23}) + S\theta_1(C\theta_2 S\theta_3 + S\theta_2 C\theta_3) \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & C\theta_1(a_1 + C\theta_2(a_2 + a_3 C\theta_3) - a_3 S\theta_{23}) - S\theta_1(a_3 C\theta_2 S\theta_3 + S\theta_2(a_2 + a_3 C\theta_3)) \\ 0 & C\theta_1(a_3 C\theta_2 S\theta_3 + S\theta_2(a_2 + a_3 C\theta_3)) + S\theta_1(a_1 C\theta_2(a_2 + a_3 C\theta_3) - a_3 S\theta_{23}) \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

El planteamiento de la cinemática inversa requiere un esfuerzo mayor de cálculo y su dificultad va en aumento dependiendo del número de eslabones de los cuales disponga la columna incrementando a medida que estos son más.

Para el cálculo de la cinemática se emplea el método geométrico. Debido a que este dispone de 3DOF se requiere suponer uno de los ángulos, de lo contrario el sistema tendría infinitas soluciones. Se considera θ_3 (el eslabón de la escápula trasera) como el valor conocido, con esta condición el sistema puede adoptar dos posibilidades distintas (ver *Figura 3.13*).

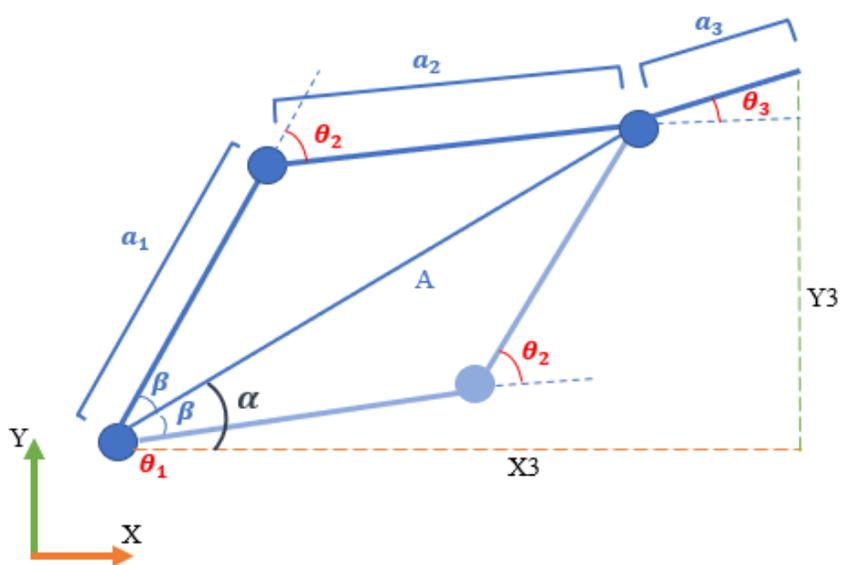


Figura 3.13. Análisis geométrico columna plano XY
Primera (azul oscuro) y segunda (azul claro) posibilidad. Elaboración propia

La apertura θ_1 puede ser encontrada por medio de las operaciones con los ángulos α y β . Dependiendo de si se trata de la primera o segunda posibilidad (ver *Figura 3.13*) se requiere sumar o restar los valores (ver *ec. (4)*).

$$\theta_1 = \alpha \pm |\beta| \quad (4)$$

Para calcular el ángulo α es necesario encontrar las coordenadas correspondientes a la articulación 3, para ello se emplea la ubicación conocida del efector final y el ángulo θ_3 (ver *ec.(5)*).

$$\begin{aligned} X &= X3 - a_3 \cos(\theta_3) \\ Y &= Y3 - a_3 \sin(\theta_3) \end{aligned} \quad (5)$$

Una vez hallada la posición de la articulación 3 se prosigue a expresar el ángulo α en función de estas coordenadas (ver *ec.(6)*).

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{Y}{X} \right] \quad (6)$$

El ángulo β es calculado por medio del teorema del coseno como sigue (*ec. (7)*):

$$(a_2)^2 = A^2 + a_1^2 - 2Aa_1 \cos(\beta)$$

$$\beta = \frac{\cos^{-1}[(a_2)^2 - A^2 - a_1^2]}{-2Aa_1} \quad (7)$$

La variable A puede ser expresada en términos de las coordenadas de la articulación 3 (ver *ec.(8)*), reemplazando esta expresión en la ecuación (7) se obtiene finalmente la *ecuación (9)*.

$$A^2 = X^2 + Y^2 \quad (8)$$

$$\beta = \frac{\cos^{-1}[(a_2)^2 - X^2 - Y^2 - a_1^2]}{-2Aa_1} \quad (9)$$

Para encontrar el ángulo θ_2 se utiliza nuevamente el teorema del coseno (ver *ec.(10)*).

$$A^2 = (a_2)^2 + a_1^2 - 2(a_2 + a_3')a_1 \cos(\pi - \theta_2)$$

$$\theta_2 = \frac{\cos^{-1} [A^2 - a_2^2 - a_1^2]}{2a_2 a_1} \quad (10)$$

La fórmula final (11) se obtiene reemplazando el término A de la ecuación (8) en la ecuación (10).

$$\theta_2 = \frac{\cos^{-1} [X^2 + Y^2 - (a_2 + Z * \tan(\theta_3))^2 - a_1^2]}{2(a_2 + a_3')a_1} \quad (11)$$

Por último, para expresar las dos posibilidades distintas se emplea la ecuación (12).

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left[\frac{\mp \sin(\theta_2)}{\cos(\theta_2)} \right] \quad (12)$$

3.5. Cinemática de las piernas

Los grados de libertad relacionados con las piernas se muestran en la *Figura 3.14*, como puede observarse se omiten los DOF relacionados con las ruedas ubicadas en los pivotes, ya que estas no son empleadas en la locomoción.

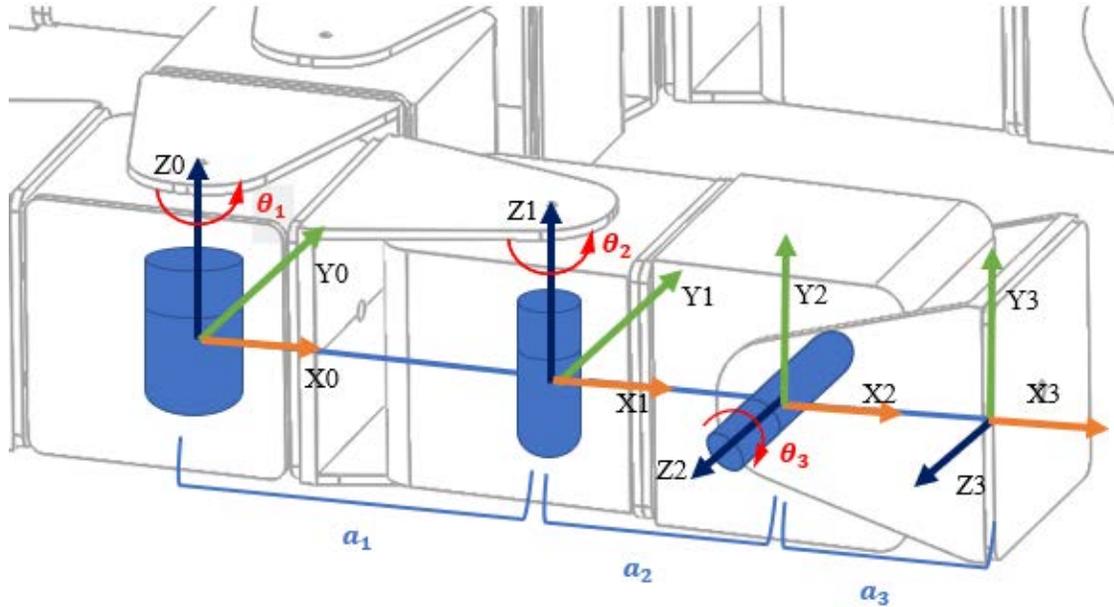


Figura 3.14. Diagrama de DOF y sistema coordenado pierna.
Elaboración propia

La columna aporta un grado de libertad adicional a las piernas. En la *Figura 3.14* se considera la escápula delantera, sin embargo, la escápula trasera dispone del mismo sistema por lo que el procedimiento es similar. Con el planteamiento de los sistemas coordenados se prosigue a hallar los parámetros de Denavit Hartenberg como se muestra en la *Tabla 3.2*.

Articulación	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1	0	a_1	0
2	θ_2	0	a_2	$\pi/2$
3	θ_3	0	a_3	0

Tabla 3.2. Parámetros Denavit Hartenberg Pierna

La matriz de transformación está dada por la *ecuación (13)*.

$$A_0^3 = A_0^1 A_1^2 A_2^3 \quad (13)$$

Donde:

$$A_0^1 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & -S\theta_1 & 0 & a_1C\theta_1 \\ S\theta_1 & C\theta_1 & 0 & a_1S\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} A_1^2 = \begin{bmatrix} C\theta_2 & 0 & S\theta_2 & a_2C\theta_2 \\ S\theta_2 & 0 & -C\theta_2 & a_2S\theta_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} A_2^3 = \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & a_3C\theta_3 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & a_3S\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Desarrollando la ecuación (13) finalmente se llega a la matriz de la ecuación (14).

$$A_0^3 = \begin{bmatrix} -C\theta_3(S\theta_{12} - C\theta_{12}) & S\theta_3(S\theta_{12} - C\theta_{12}) \\ C\theta_3(C\theta_1S\theta_2 + S\theta_1C\theta_2) & -S\theta_3(C\theta_1S\theta_2 + S\theta_1C\theta_2) \\ S\theta_3 & C\theta_3 \\ 0 & 0 \\ C\theta_1S\theta_2 + S\theta_1C\theta_2 & C\theta_1(a_1 + C\theta_2(a_2 + a_3C\theta_3)) - S\theta_{12}(a_2 + a_3C\theta_3) \\ S\theta_{12} - C\theta_{12} & C\theta_1S\theta_2(a_2 + a_3C\theta_3) + S\theta_1(a_1 + C\theta_2(a_2 + a_3C\theta_3)) \\ 0 & a_3S\theta_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

La cinemática inversa se soluciona a través del método geométrico, la extremidad vista desde el plano XZ se muestra en *Figura 3.15*. Nuevamente se considera la escápula delantera, el procedimiento para la escápula trasera es similar, con la diferencia que el ángulo correspondiente al eslabón de la columna es predeterminado (ver *Cinemática de la columna*).

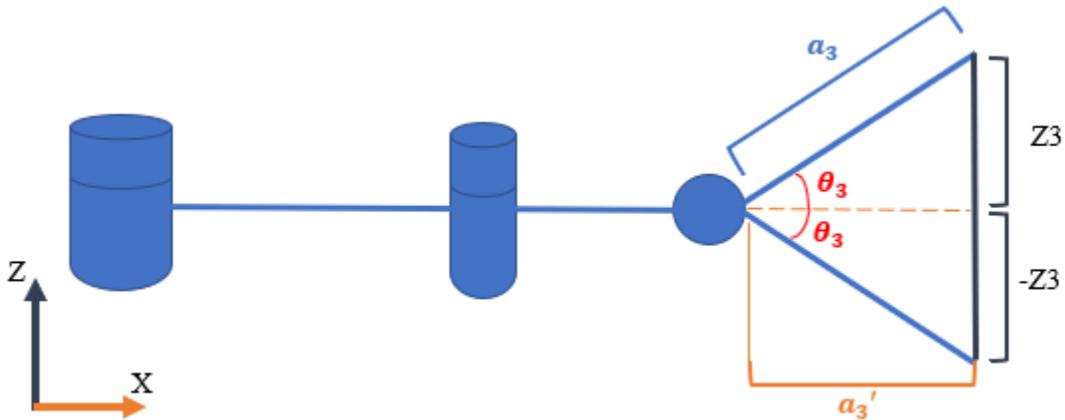


Figura 3.15. Análisis geométrico pierna plano XZ
Elaboración propia

Desde el plano XZ (ver *Figura 3.15*) es posible extraer el valor del ángulo de la última articulación a partir de la coordenada en Z del punto final del último eslabón. El desarrollo se muestra en la ecuación (15), el signo indica si la extremidad se encuentra en estancia (negativo) o levantamiento (positivo).

$$\sin(\theta_3) = \frac{\pm Z}{a_3}$$

$$\theta_3 = \sin^{-1} \left[\frac{\pm Z}{a_3} \right] \quad (15)$$

El movimiento visto desde el plano XY se muestra en *Figura 3.16*. Se observan las dos posibilidades dependiendo del grado de apertura de θ_1 y θ_2 .

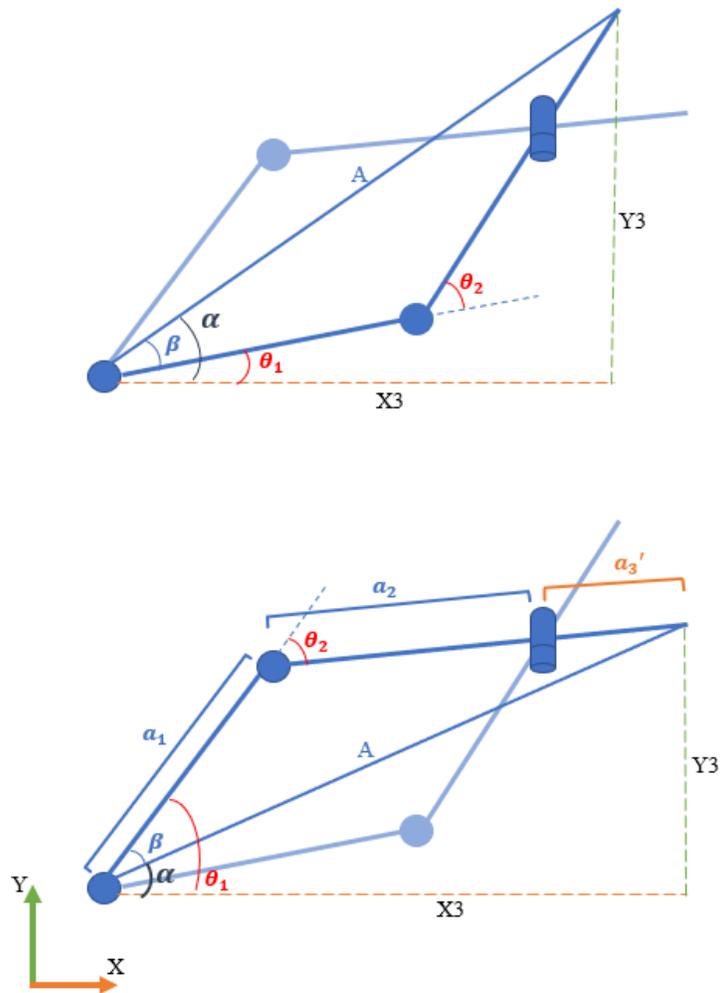


Figura 3.16 Análisis geométrico pierna plano XY
Primera (arriba) y segunda (abajo) posibilidad. Elaboración propia

La hipotenusa A es expresada en términos de las coordenadas del punto final del último eslabón como sigue (ver *ec.(16)*).

$$A^2 = X^2 + Y^2 \quad (16)$$

Según sea el caso especificado (ver *Figura 3.16.*) el ángulo de apertura θ_1 es expresado en términos de β y α (ver *ec.(17)*).

$$\theta_1 = \alpha \pm |\beta| \quad (17)$$

El ángulo α es calculado a través de las coordenadas del efector final (ver *ec.(18)*).

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{Y}{X} \right] \quad (18)$$

La apertura β es hallada por medio del teorema del coseno como se ve en la *ecuación (19)*.

$$(a_2 + a_3')^2 = A^2 + a_1^2 - 2Aa_1 \cos(\beta)$$

$$\beta = \frac{\cos^{-1}[(a_2 + a_3')^2 - A^2 - a_1^2]}{-2Aa_1} \quad (19)$$

La expresión a_3' es extraída del análisis en el plano XZ (ver *Figura 3.15*) por medio de la *ecuación (20)*. La variable θ_3 ha sido hallada previamente en la *ec. (15)*.

$$a_3' = Z * \tan(\theta_3) \quad (20)$$

Reemplazando la variable A y a_3' (*ec. (15)* y *(16)*) en la *ecuación (19)* se obtiene finalmente la *ecuación (21)*.

$$\beta = \frac{\cos^{-1}[(a_2 + Z * \tan(\theta_3))^2 - X^2 - Y^2 - a_1^2]}{-2Aa_1} \quad (21)$$

El ángulo de apertura θ_2 es calculado por medio del teorema del coseno como sigue (ver *ec.(22)*).

$$A^2 = (a_2 + a_3')^2 + a_1^2 - 2(a_2 + a_3')a_1 \cos(\pi - \theta_2)$$

$$\theta_2 = \frac{\cos^{-1} \left[A^2 - (a_2 + a_3')^2 - a_1^2 \right]}{2(a_2 + a_3')a_1} \quad (22)$$

Las variables A y a_3' han sido previamente halladas por medio de las ecuaciones (16) y (20), reemplazándolas en la *ecuación (22)* se obtiene finalmente la expresión que relaciona el grado de apertura de la segunda articulación (ver *ec. (23)*).

$$\theta_2 = \frac{\cos^{-1} \left[X^2 + Y^2 - (a_2 + Z * \tan(\theta_3))^2 - a_1^2 \right]}{2(a_2 + a_3')a_1} \quad (23)$$

3.6. Influencia de la cola en el diseño

Se realizan algunas simulaciones en Webots® de una posible configuración con cola. Se observa que el peso de esta desestabiliza al robot llevándolo hacia atrás y provocando que las patas delanteras (ipsilateral o contralateral) se eleven (ver *Figura 3.17*). Esta acción causa la disminución de la velocidad de desplazamiento del robot. La cola es descartada.

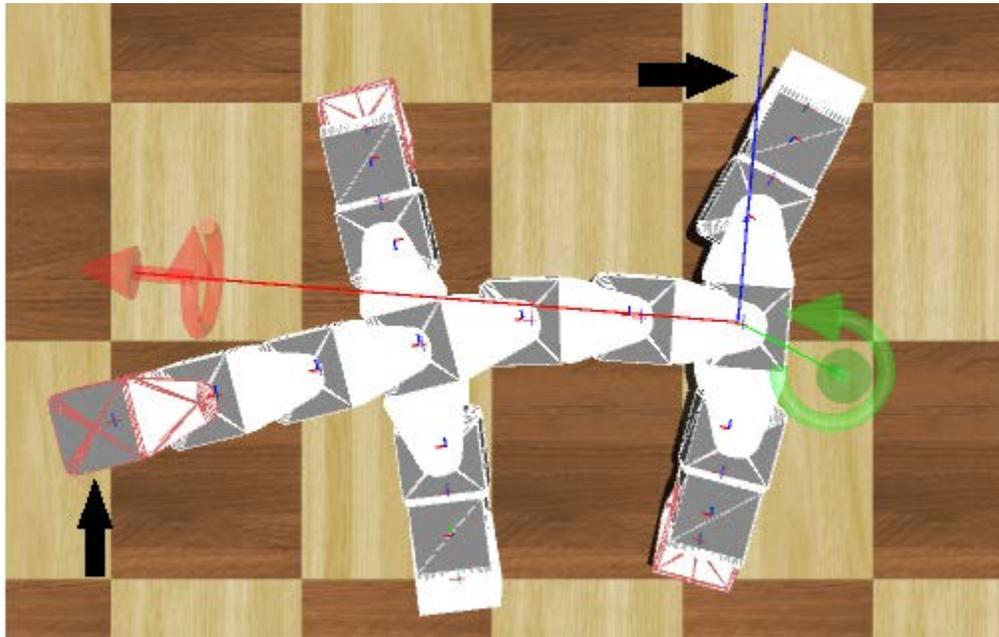


Figura 3.17. Simulación en Webots® de la versión con cola
El peso hala el robot hacia atrás y provoca que la pierna se despegue del suelo (flechas). Elaboración propia

3.7. Propuesta de Perfiles en Locomoción en Línea recta: columna

A diferencia de los generadores sinusoidales que han sido implementados en las configuraciones oruga y serpiente, los de la configuración salamandra deben ejecutar ondas estacionarias en la columna por lo que se utiliza la misma forma de la *ecuación (1)* para manipularla, con la excepción que la amplitud de esta será negativa (ver *ec. (24)*). El signo es debido al orden realizado de la secuencia, dando prioridad al movimiento de las piernas, ajustando la columna a este.

$$\theta_{[i]} = -(A_{[i]} * \text{Sin}(\pi * F * t + \text{bias}_{[i]}) + \text{offset}_{[i]}) \quad (24)$$

Donde:

Parámetro	Definición
$\theta_{[i]}$	Posición angular del motor i
$A_{[i]}$	Amplitud del motor i
F	Frecuencia de movimiento de la salamandra
$bias_{[i]}$	Desfase angular del motor i
$offset_{[i]}$	Desfase de amplitud del motor de la columna i

Tabla 3.3.Locomoción en línea recta. Parámetros de Control columna

3.8.Propuesta de Perfiles en Locomoción en Línea recta: piernas

Se sabe que la secuencia de movimiento de las piernas es la de una *standard gait* (ver *Figura 3.18*). Como no todos los eslabones de la columna disponen de las mismas limitaciones mecánicas, el frente del robot es escogido teniendo en cuenta que en las salamandras las vértebras más cercanas a la escápula delantera presentan menos apertura que las cercanas a la escápula trasera (ver *Salamandra: Principios de Locomoción*).

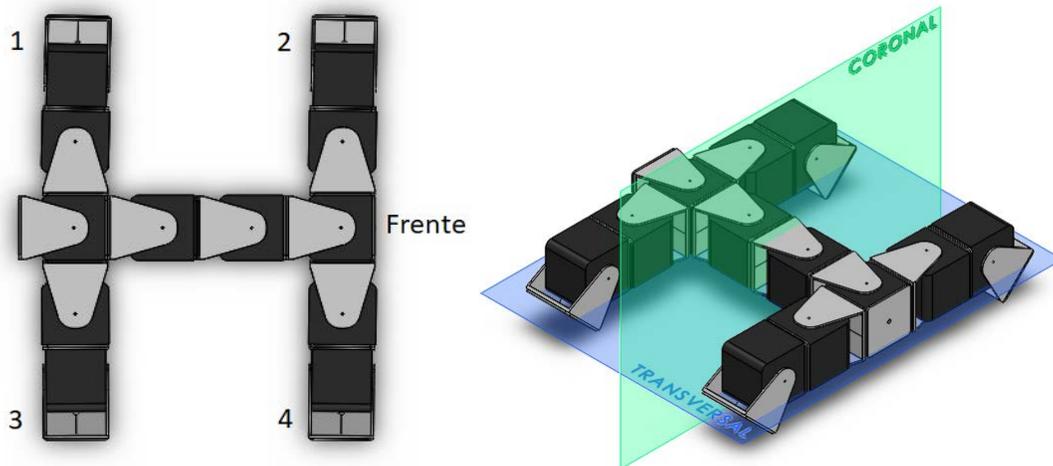


Figura 3.18. Orden de secuencia y DOFs del robot según el plano de movimiento.
Elaboración propia

El movimiento de las piernas debe estar bien coordinado con la columna para lograr una locomoción adecuada y evitar inestabilidad, está sujeto a una serie de condiciones y restricciones que hacen que su implementación sea más elaborada que la empleada en la columna. A pesar de que la cinemática proporciona una idea de la relación existente entre la columna y las piernas identificar los perfiles de movimiento es clave.

Para tal fin se usa el material complementario aportado por los investigadores del EPFL, específicamente el *Movie S5 Tracking for Pleurodeles waltlii in cineradiographic recordings*, este video es tomado a través de novedosas técnicas de rayos X permitiendo analizar el movimiento óseo del animal, para la tesis se estudia únicamente las articulaciones de las piernas.[63]

3.8.1.Procedimiento

Del video de 15 segundos se toma un breve fragmento de tiempo (5 seg.) correspondiente al ciclo de movimiento básico, posteriormente se extraen los fotogramas de este: un total de 135 frames. [63]

Con ayuda de SolidWorks® se miden los ángulos correspondientes a las articulaciones de cada pierna en cada instante de tiempo, la adquisición se realiza en la vista frontal y no en la lateral, esto es debido a que se quiere observar sólo el movimiento en el plano transversal ya que únicamente se dispone de 2 DOF por pierna. [63]

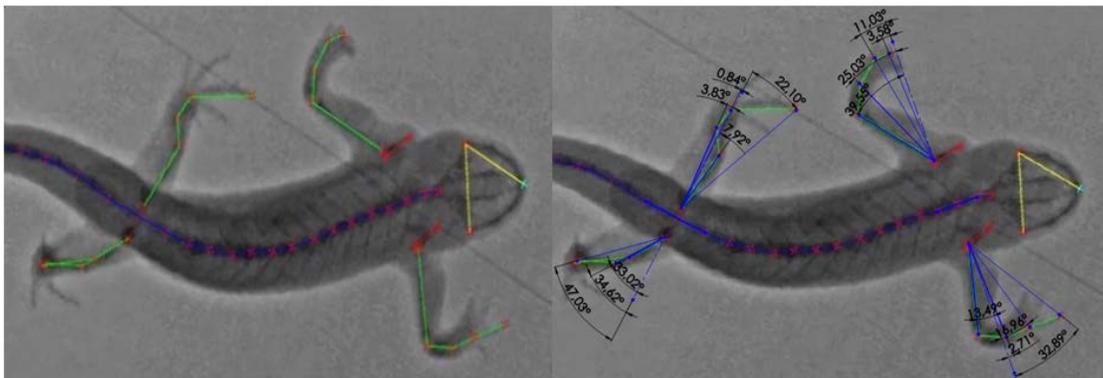


Figura 3.19. Medición en SolidWorks ® de los puntos del fragmento del Movie S5. *Fotograma original del video en la vista frontal (izquierdo), adquisición de ángulos en Solid Works (derecha).* Tomado de: [63]

Una vez extraídos todos los puntos, se identifican las articulaciones de interés. Por pierna hay un total de cuatro puntos de interés (equis en rojo de la *Figura 3.19*). En general, casi todas las articulaciones analizadas de las piernas ejecutan perfiles de movimiento similares, sin embargo, debido a que el Mecabot sólo dispone de dos grados de libertad, se toman únicamente los últimos dos puntos por pierna, que son los asociados a los pies (ver *Figura 3.20*).

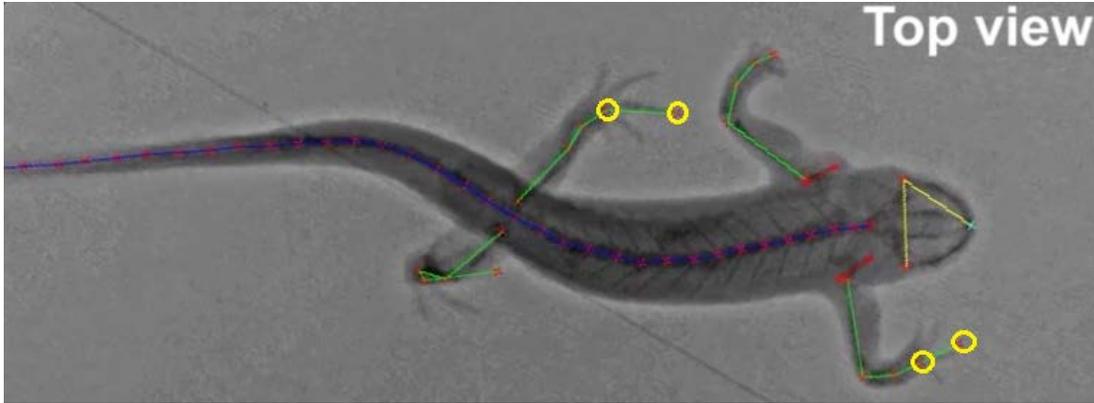


Figura 3.20. Fotograma del fragmento del Movie S5.
 Puntos extremos en una pierna delantera y otra trasera. Tomado de:[63]

Se evidencia que el perfil de los puntos más extremos de las piernas traseras tiene un movimiento diferente al resto, esto debido a que la salamandra realiza una fase de arrastre por lo que los pies traseros se repliegan sobre ellos mismos. Este repliegue no puede ser realizado por el Mecabot motivo por el cual se descartan los puntos más extremos de las patas traseras (ver *Figura 3.20*).

Obedeciendo a los DOF de la arquitectura del robot se escoge finalmente los segundos puntos más extremos en las piernas delanteras y traseras. Las cuatro referencias efectivamente ejecutan perfiles similares lo cual permite realizar la misma interpolación para todas las piernas a partir de una sola, aquello facilita cumplir con el criterio de regularidad de las secuencias estándar (ver *Movimiento en Línea Recta*).

Con fines prácticos la interpolación debe tener un mecanismo similar al de los generadores sinusoidales propuestos para la columna (ver *ec. (24)*), por lo que son atractivos los métodos por Series de Fourier (*ec.(26)*), o por Suma de Senos (*ec.(25)*), de estos dos la simplicidad que involucra la suma de senos conlleva a elegir esta última.

$$y = \sum_{i=1}^n a_i \sin(b_i x + c_i) \quad (25)$$

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cos(iwx) + b_i \sin(iwx) \quad (26)$$

La interpolación debe permitir variar la amplitud y la frecuencia tal y como se muestra que se puede hacer con la columna (ver *Tabla 3.3.Locomoción en línea recta. Parámetros de Control*). La frecuencia está implícita en la interpolación, sin embargo, la amplitud variable conlleva a involucrar otro tipo de análisis, para ello se realiza una interpolación a groso modo con ayuda

del toolbox de Matlab® *Curve Fitting Tool* (cftool) pero todos los ajustes finales y gran parte del proceso son a prueba y error.

La ecuación final (ver *ec. (27)*) da como resultado una suma de senos con amplitud uno (ver *Figura 3.21*) que al ser multiplicada por el ángulo deseado permite alcanzar diferentes aperturas, esto se evidencia incluso cuando se necesitan amplitudes diferentes para una sola pierna (el avance y el retroceso).

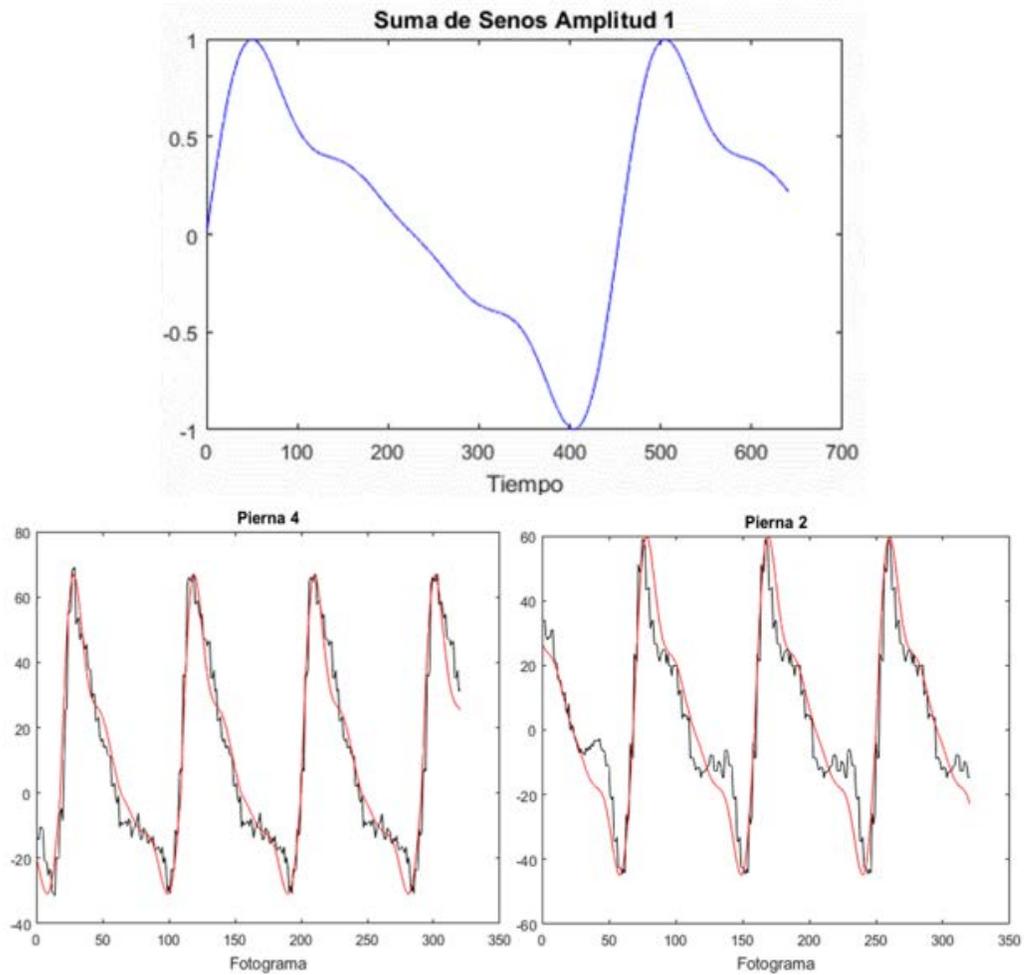


Figura 3.21. Interpolación para locomoción recta

Arriba: Interpolación propuesta con amplitud uno. Abajo: Interpolación con variación de amplitud (rojo) ajustada a los datos tomados del video (negro). Pierna 2 y 4: apertura de avance mayor a la de retroceso. Elaboración propia

3.9. Ajuste de la coordinación en locomoción recta

Para una correcta ejecución del movimiento es necesario cumplir con los requisitos de coordinación entre las piernas y de la columna con las extremidades. La ecuación (27) describe el movimiento para una pierna.

$$\theta_{[i]} = E1 + E2 + E3 + E4 \quad (27)$$

Los parámetros E_n corresponden a las siguientes expresiones:

$$E1 = A_{[i]} * \text{Sin}(\pi * F * t + \text{bias}_{[i]})$$

$$E2 = \frac{A_{[i]}}{2} * \text{Sin}(2\pi * F * t + 2\text{bias}_{[i]})$$

$$E3 = \frac{A_{[i]}}{3} * \text{Sin}(3\pi * F * t + 3\text{bias}_{[i]})$$

$$E4 = \frac{A_{[i]}}{8} * \text{Sin}(4\pi * F * t + 4\text{bias}_{[i]})$$

Se sabe que las piernas efectúan la secuencia estándar con la condición de que cuando la extremidad delantera alcance su máximo avance, su opuesta diagonal se encuentre en la mínima posición. El bias de las extremidades se ajusta manualmente para que los pares 4 y 1, 2 y 3 cumplan con los requerimientos. El bias de la extremidad 1 es cero ya que esta comienza la secuencia, para las piernas 2,3 y 4 estos son de: $-\pi + \frac{\pi}{2.25}$, de $-\pi$ y de $\frac{\pi}{2.25}$ respectivamente.

En la *Figura 3.22* se observan los perfiles de movimiento, la extremidad cuatro (cian) alcanza su amplitud 1 en el mismo instante en que la pierna uno (rojo) se encuentra con amplitud -1, lo mismo para el par dos y tres. Nótese que ello también garantiza que se levante una sola pierna a la vez, conservando así el polígono de estabilidad en el robot. El perfil de movimiento para todas las extremidades es el mismo, cumpliendo así el criterio de regularidad de las *secuencias estándar* (ver diagrama de estado de *Figura 3.22*).

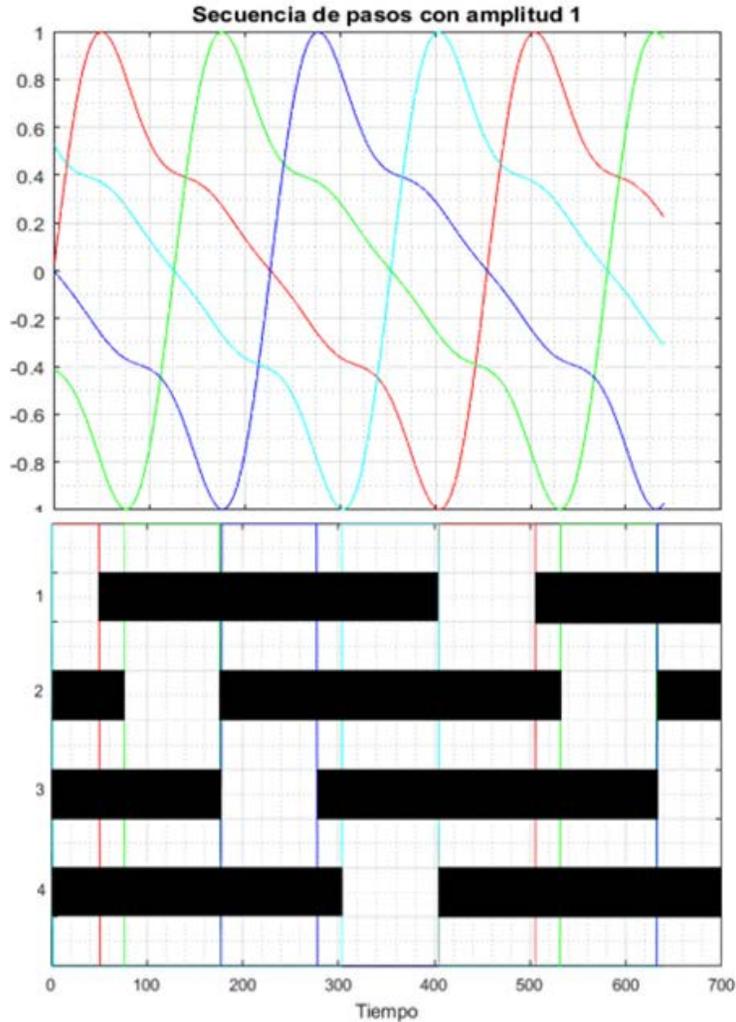


Figura 3.22. Trayectoria Recta. Secuencia de pasos con amplitud uno
 Arriba: Perfil de locomoción. Abajo: Diagrama de estado. Pierna 1 (rojo), 2(verde), 3(azul) y 4 (cian).
 Elaboración propia

Respecto a la coordinación de la columna con las piernas, se sabe que la máxima contracción de la columna se realiza poco después de que la pierna trasera ha terminado su fase de estancia, el bias de los eslabones de la columna se adecuan para que ello pase. Como entre los módulos de la espina no hay desfase ya que la onda es de carácter estacionario, el bias de todos es de $\frac{\pi}{3.6}$. En la *Figura 3.23* se observa que el eslabón (negro) alcanza su mínima contracción justo en el instante que la fase de estancia de la pierna uno (rojo) termina, y su máxima contracción cuando la pierna tres (azul) finaliza su levantamiento.

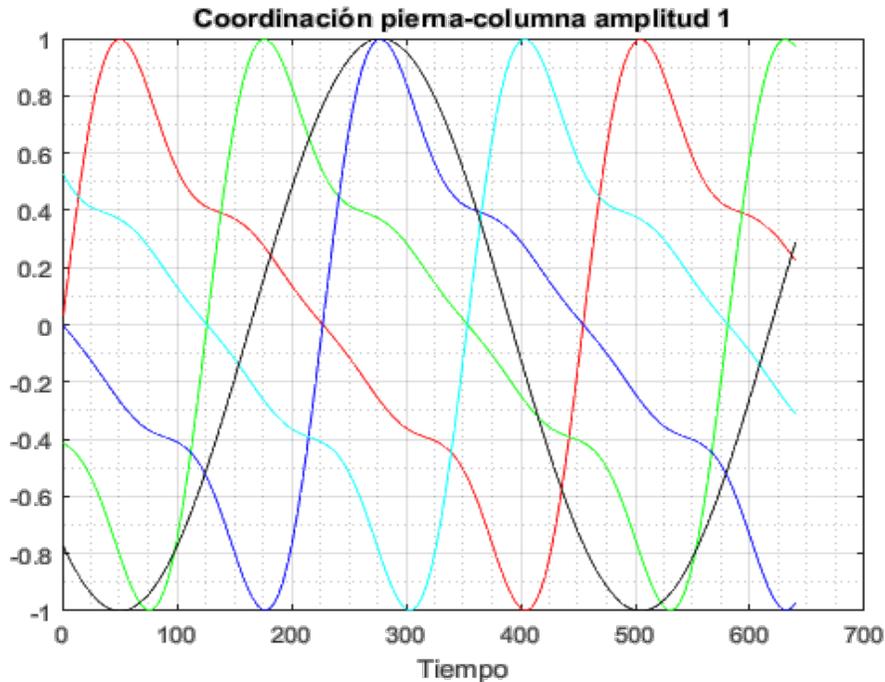


Figura 3.23. Trayectoria Recta. Coordinación pierna-columna con amplitud uno. Pierna 1 (rojo), 2(verde), 3(azul) y 4 (cian). Eslabón cualquiera de la columna (negro). Elaboración propia

El diagrama de flujo relacionado con el desplazamiento en línea recta se muestra en la *Figura 3.24. Diagrama de flujo Locomoción en línea recta.*

Las variables $\theta_{DOF_1_pierna[i]}$ corresponden al primer grado de libertad de las piernas del robot, son los encargados de realizar el movimiento en el plano transversal (ver *Figura 3.18*) y describen los perfiles especificados de la *Figura 3.22*.

El segundo grado de libertad en las extremidades lleva a cabo el movimiento de estancia o levantamiento en el plano coronal (ver *Figura 3.18*Figura 3.12) y está identificado con $\theta_{DOF_2_pierna[i]}$. La variable $resta[i]$ es un indicativo que permite saber cuándo la pierna está en protracción o en retracción y así coordinar los eventos en la secuencia.

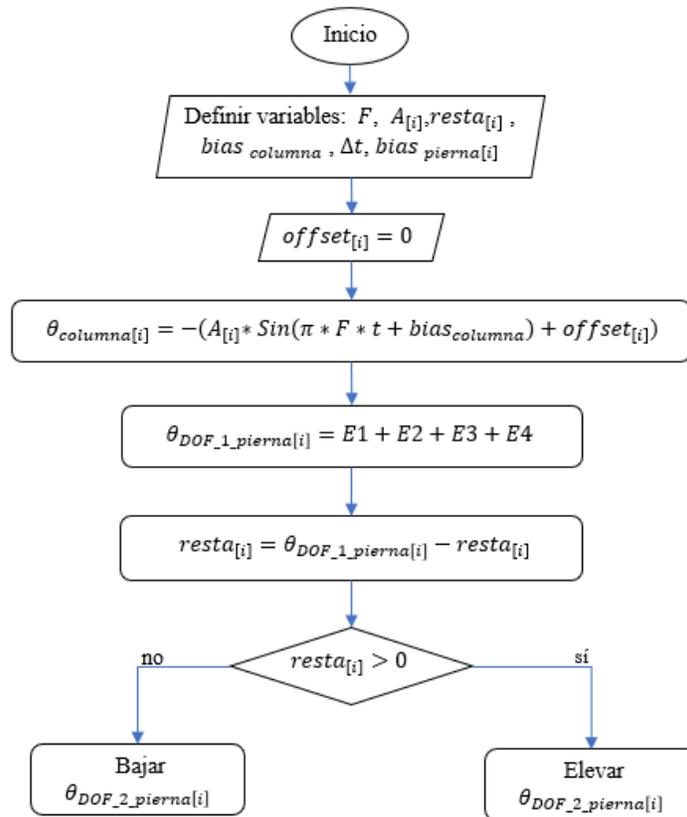


Figura 3.24. Diagrama de flujo Locomoción en línea recta
Elaboración propia

3.10. Propuesta de Perfil en Locomoción: giro abierto

El giro en las salamandras ha sido poco estudiado, sin embargo, se sabe que para implementar un cambio de dirección basta con variar el offset en los eslabones de la columna, para ello es importante tener en cuenta las limitaciones mecánicas: la amplitud de las piernas ubicadas en el costado a la dirección del giro debe disminuir su ángulo de apertura, el par ubicado en el costado opuesto puede conservar o aumentar su amplitud.

Como ya se sabe, la coordinación entre piernas-columna es esencial para garantizar un correcto movimiento, en la trayectoria recta el buen acople de la columna con las piernas mantiene al robot estable pese a que el centro de gravedad varía de posición debido a la contracción de la espina (ver *Figura 3.25*).

Este aspecto parece no tener mucha influencia en el movimiento en línea recta ya que al momento de extraer el perfil de locomoción el problema es resuelto al limitarse a imitar la naturaleza, sin embargo, al existir un offset en la columna el comportamiento del centro de gravedad será diferente.

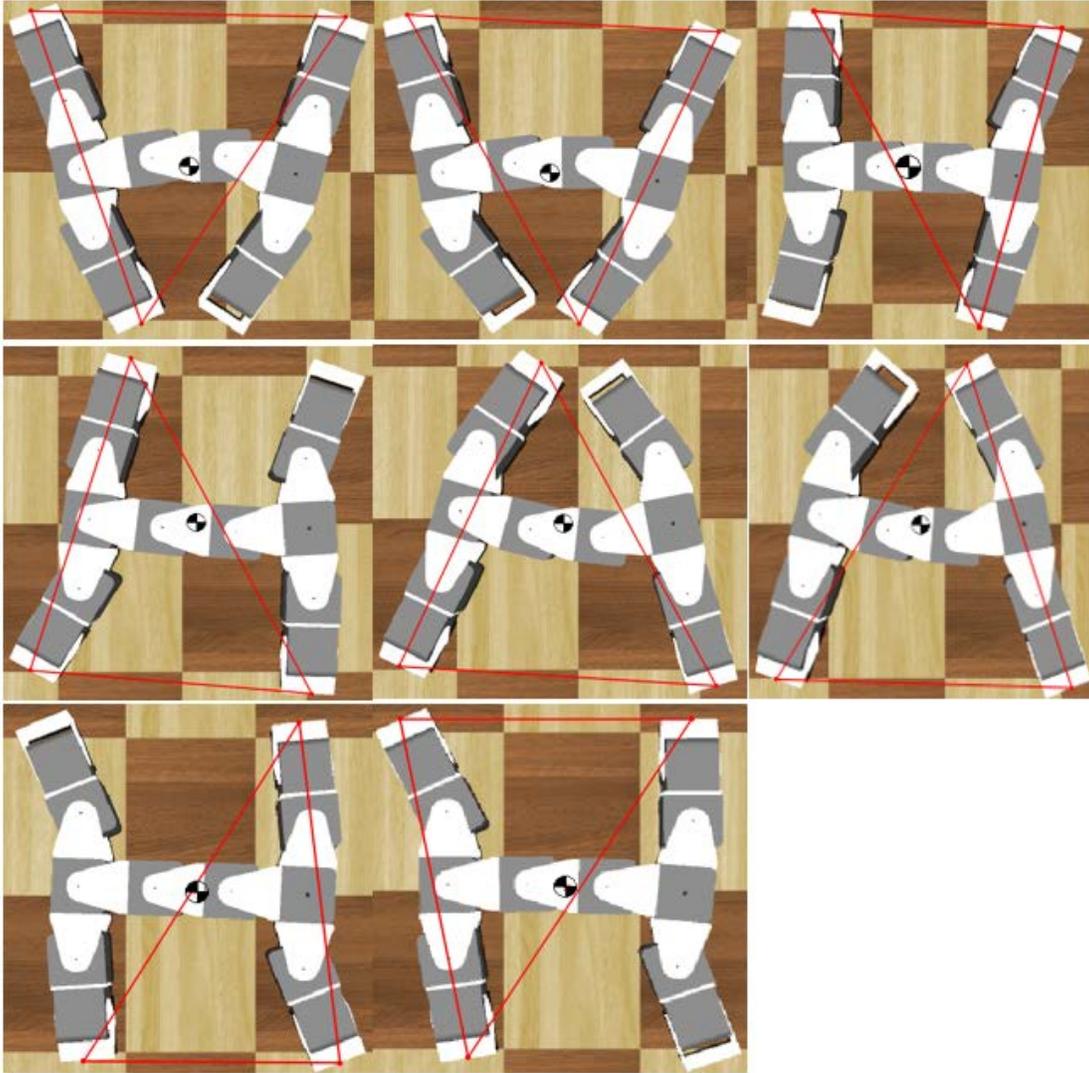


Figura 3.25. Movimiento del centro de gravedad, secuencia estándar de locomoción en línea recta
Elaboración propia

El duty cycle de las piernas debe responder a la variación de tiempo en el cual permanece el centro de gravedad en un costado de la columna. Cuando la trayectoria es recta el centro de gravedad dura el mismo lapso en el lado izquierdo y en el derecho, con la implementación del offset el tiempo es desigual. Por tal motivo las piernas ubicadas en el costado a la dirección de giro deben aumentar su tiempo de levantamiento mientras que el par del costado opuesto debe disminuirlo. Para realizar este cambio se debe modificar la interpolación propuesta (ec.(27)).

El robot comienza la fase de transición en el instante en que la función de interpolación pasa de su máximo negativo a su máximo positivo, la pendiente en este punto debe poderse aumentar o disminuir lo suficiente como para que el robot no pierda el equilibrio. La variación de esta pendiente se ve influida directamente por el número de términos En de la ecuación (27), por tal motivo se prosigue por medio de prueba y error a adecuar dichos parámetros.

Usando Webots® se implementan las distintas fórmulas hasta que finalmente se encuentran las adecuadas por prueba y error:

Para aumentar el tiempo de la fase de transición se disminuye el número de términos E_n a tres (ec. (28)).

$$\theta_{[i]} = E1 + E2 + E3 \quad (28)$$

Donde:

$$E1 = A_{[i]} * \text{Sin}(\pi * F * t + \text{bias}_{[i]})$$

$$E2 = \frac{A_{[i]}}{2} * \text{Sin}(2\pi * F * t + 2\text{bias}_{[i]})$$

$$E3 = \frac{A_{[i]}}{4} * \text{Sin}(3\pi * F * t + 3\text{bias}_{[i]})$$

Para disminuir el tiempo de la fase de transición se agregan términos E_n , para un total de cinco (ec.(29)).

$$\theta_{[i]} = E1 + E2 + E3 + E4 + E5 \quad (29)$$

Donde:

$$E1 = A_{[i]} * \text{Sin}(\pi * F * t + \text{bias}_{[i]})$$

$$E2 = \frac{A_{[i]}}{2} * \text{Sin}(2\pi * F * t + 2\text{bias}_{[i]})$$

$$E3 = \frac{A_{[i]}}{3} * \text{Sin}(3\pi * F * t + 3\text{bias}_{[i]})$$

$$E4 = \frac{A_{[i]}}{4.05} * \text{Sin}(4\pi * F * t + 4\text{bias}_{[i]})$$

$$E5 = \frac{A_{[i]}}{16} * \text{Sin}(5\pi * F * t + 5\text{bias}_{[i]})$$

El perfil de movimiento correspondiente a un giro abierto realizado hacia el lado izquierdo se muestra en la *Figura 3.25* . Las piernas ubicadas en el costado del giro, es decir, la una y la dos (ver *Figura 3.18*) deben aumentar su tiempo en fase de transición (ec.(28)), mientras que el par conformado por la tres y cuatro debe disminuirlo (ec.(29)).

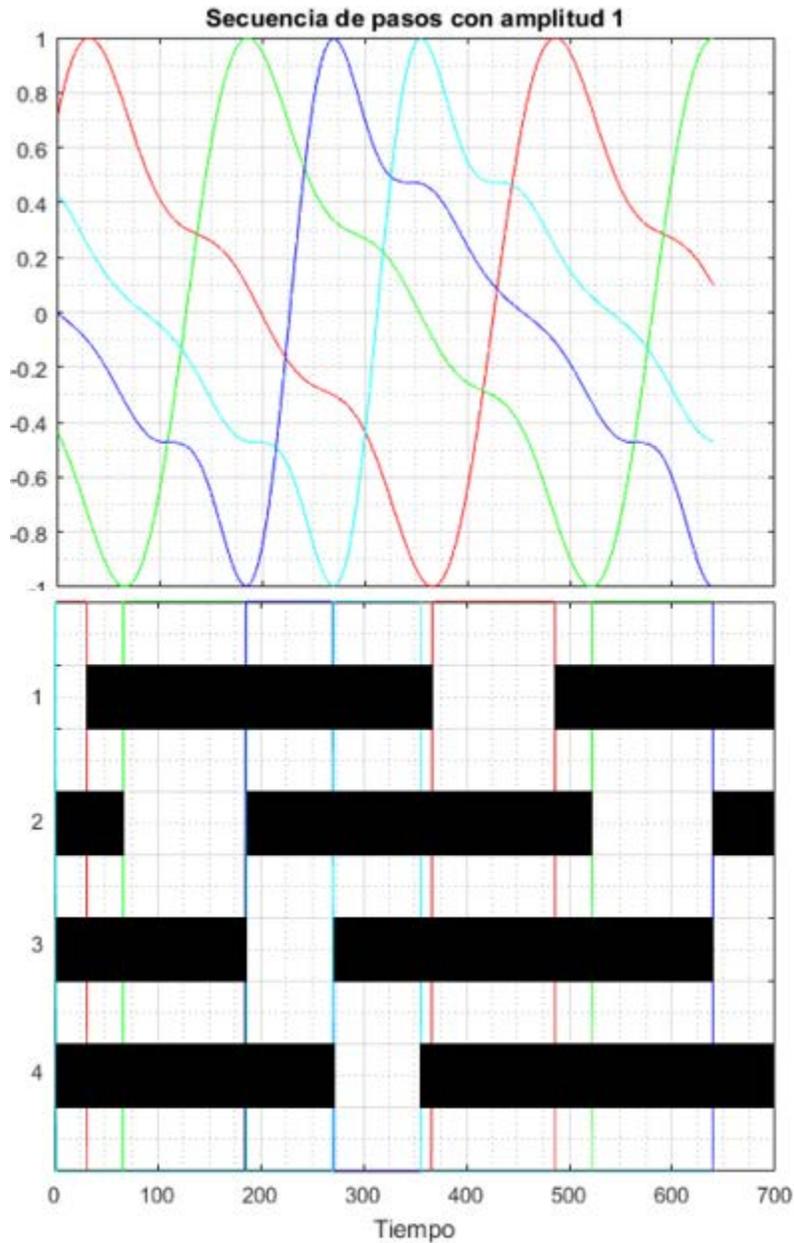


Figura 3.26. Giro abierto. Secuencia de pasos con amplitud uno. *Pierna 1 (rojo), 2(verde), 3(azul) y 4 (cian). Nótese la diferencia del tiempo de levantamiento entre el primer par (1 y 2) con el segundo (3 y 4) Elaboración propia*

El diagrama de flujo relacionado con el desplazamiento de giro abierto se muestra en la *Figura 3.27*. Debido a que el perfil de movimiento de la columna es adaptado en función de la coordinación con las piernas la amplitud de los eslabones de la columna es por defecto negativa (ver ec.(24)), por tal motivo un offset positivo causa un giro a la izquierda y uno negativo a la derecha, en función de este criterio se debe variar el factor de apoyo.

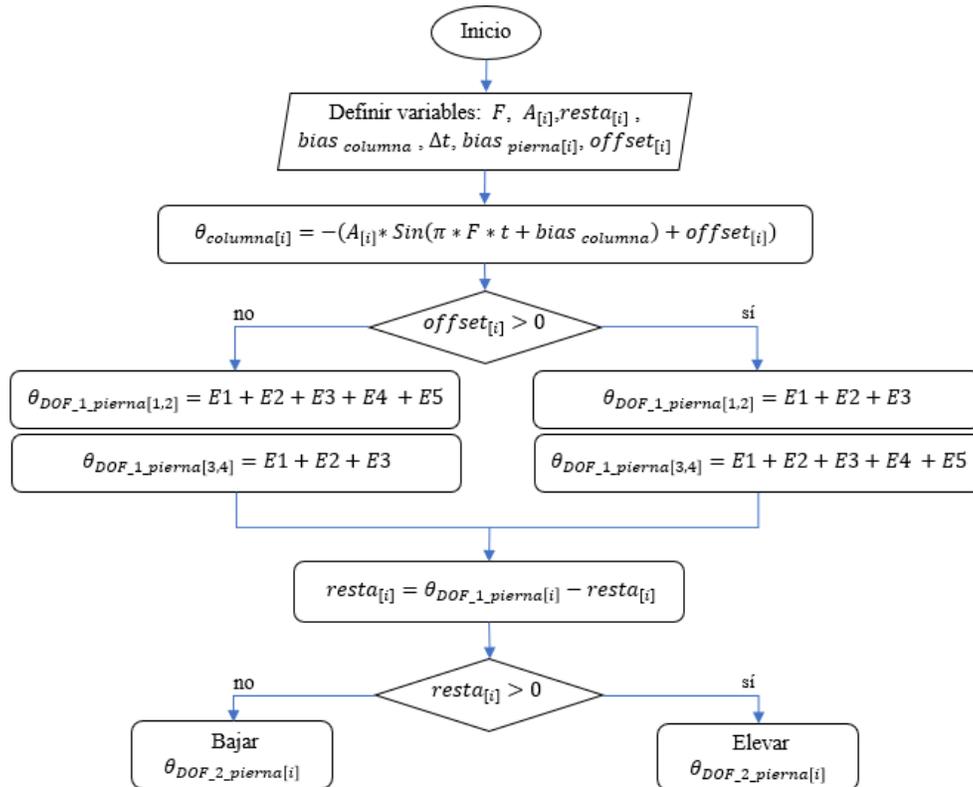


Figura 3.27. Diagrama de flujo Locomoción giro abierto
Elaboración propia

3.11. Propuesta de Perfil en Locomoción: giro cerrado o rotación

Del marco referencial (*Movimiento de Giro*) se sabe que a medida que el radio descrito por una *circling gait* disminuye, su estabilidad también. Un *spinning gait* tiene radio nulo y por ende el robot rota sobre el eje, en el caso del Mecabot el *spinning gait* correspondería a una amplitud cero y un offset máximo en columna, dentro de las limitaciones mecánicas del robot. El ángulo de apertura de las piernas del costado ubicado en el sentido de giro no variaría y se mantendría en su máximo positivo o negativo permitido ya que de lo contrario el robot no daría un giro cerrado.

Bajo estas condiciones el robot es completamente inestable, por más que se extienda la amplitud de las piernas del costado opuesto al sentido de giro no se logrará un polígono de sustentación que abarque el centro de gravedad. Esto es debido a que en la naturaleza para este tipo de giros la salamandra consigue su estabilidad flectando las piernas por debajo del abdomen, lo cual sí garantiza un polígono de estabilidad adecuado (ver *Figura 3.28*). Debido a que el Mecabot solo dispone de dos grados de libertad por pierna, es imposible realizar un *spinning* empleando la misma *standard gait* que se ha venido utilizando (ver *Figura 3.18*).

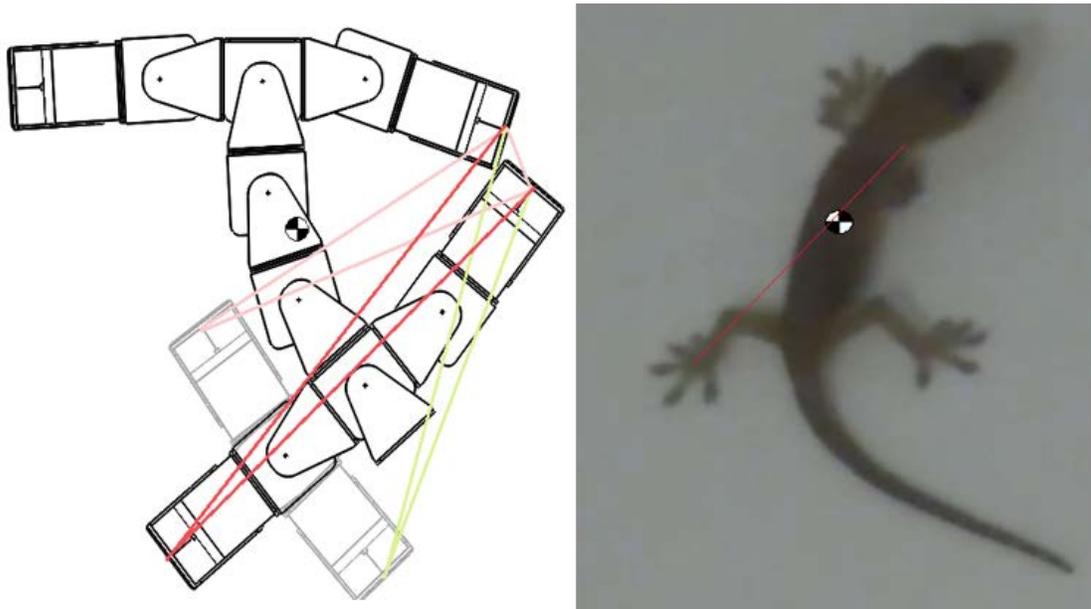


Figura 3.28. Giro cerrado. Limitaciones del Mecabot vs Salamandra Real

Izquierda: Pierna 2 al aire, polígonos de sustentación (rosado, rojo y verde) nunca alcanzan a abarcar el centro de gravedad., elaboración propia. Derecha: Estrategia natural, flectar la pierna por debajo del abdomen. Tomado de: [64]

Para hacer la rotación sobre un eje se opta por evitar mover la columna. En cuanto a la secuencia de pasos se realiza una transición dos a dos, esta es escogida por encima de la progresiva por ser mucho más rápida y requerir pocos grados de libertad. La dos a dos es similar al trote y por lo tanto es una secuencia singular, razón por la cual es aconsejable que el movimiento sea simétrico en los pares diagonales, tal y como se muestra en la *Figura 3.29*.

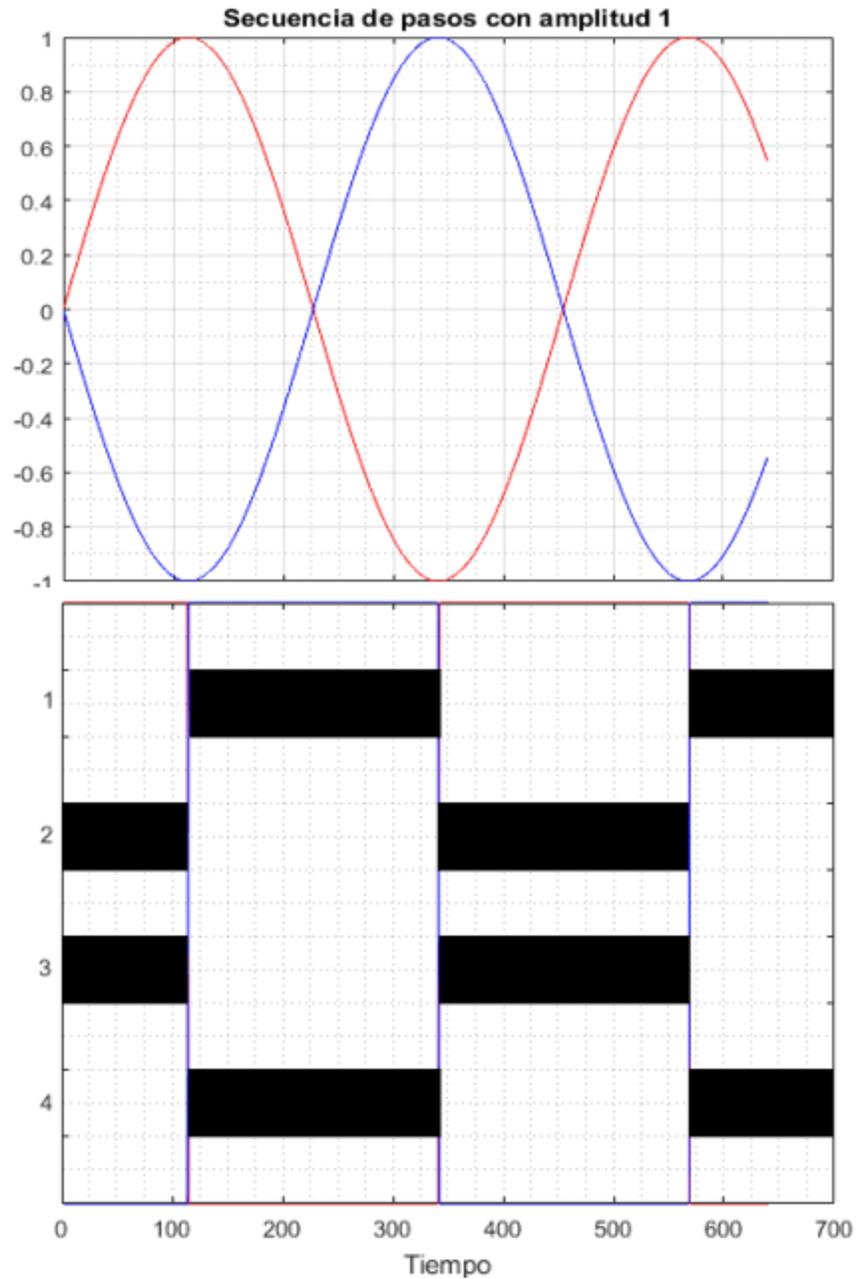


Figura 3.29. Giro cerrado. Secuencia de pasos con amplitud uno.
Piernas 1 y 3(rojo), piernas 2 y 4 (azul)

Para implementar la secuencia se cambia la suma de senos realizada en la interpolación por dos generadores sinusoidales sencillos con desfase de 90° . La ecuación (30) es aplicada en cada par diagonal.

$$\theta_{[i]} = A_{[i]} * \text{Sin}(\pi * F * t + \text{bias}_{[i]}) \quad (30)$$

El bias cambia en función de la pierna i en cuestión:

$$bias_{[i]} = \begin{cases} 0, & i = 1,3 \\ -\pi, & i = 2,4 \end{cases}$$

El diagrama de flujo relacionado con la rotación se muestra en la *Figura 3.30*. La variable *giro* indica si la rotación se realiza hacia la derecha (positiva) o hacia la izquierda (negativo), el sentido de rotación se maneja a través de los eventos de levantamiento o estancia en los pares diagonales del robot.

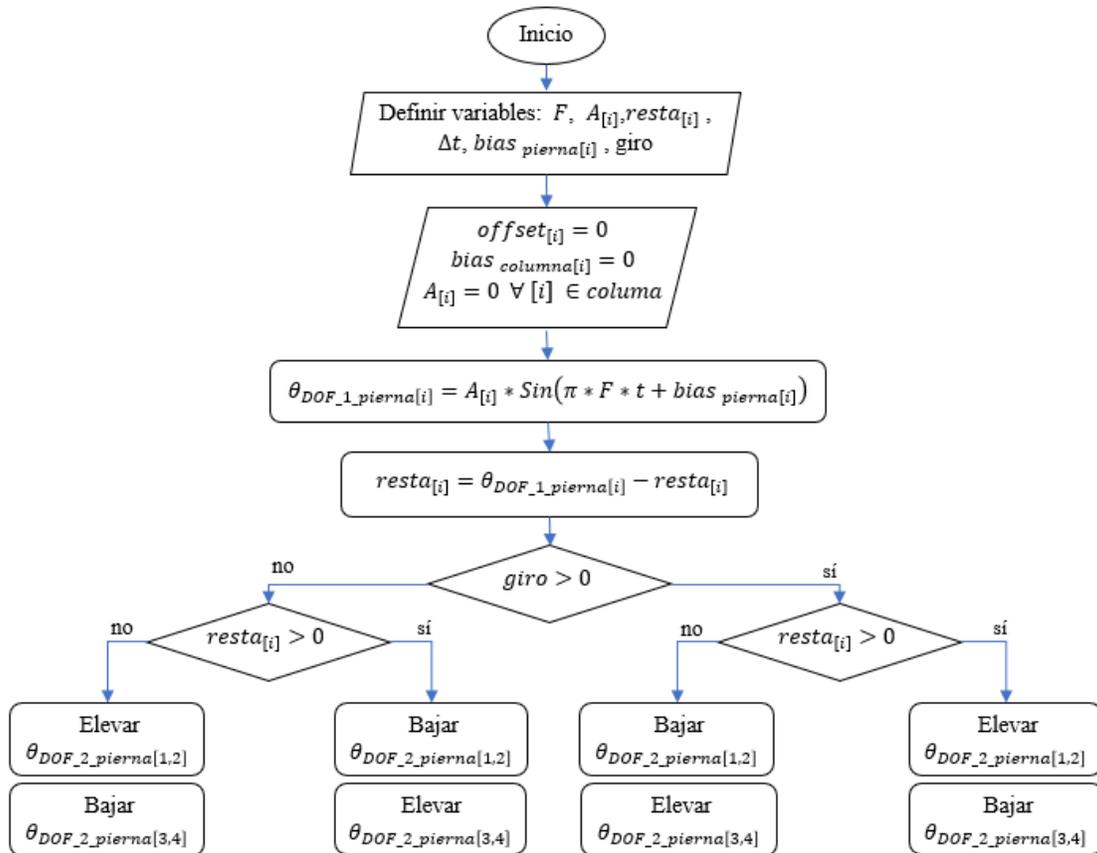


Figura 3.30. Diagrama de flujo rotación
Elaboración propia

3.12. Conclusiones del capítulo

En general la perspectiva bioinspirada es útil en el desarrollo de las secuencias en línea recta y giro abierto ya que:

- Al adoptar una columna activa tipo salamandra se evita el tener que adoptar aperturas próximas a los límites mecánicos del motor ($\pm 90^\circ$) ya que se aporta un DOF adicional a las piernas (tal y como se ve en la cinemática), por lo que los motores no son forzados en movimientos rápidos.
- Facilita la extracción de los perfiles de locomoción adecuados para una arquitectura tipo columna activa.
- Evita tener que diseñar una secuencia entera de movimientos adaptados a la traslación del centro de gravedad en la columna porque al imitar la locomoción natural se tiene un punto de partida (hecho que no es evidenciado con el sólo análisis cinemático).

Sin embargo, las ejecuciones bioinspiradas tienen su límite en cuanto a relación complejidad y ventajas se refiere. Este hecho se evidencia en:

- La rotación, ya que al disponer de 2 DOF la arquitectura es incapaz de alcanzar el grado de flexión de todos los movimientos propios del animal, por lo que es necesario emplear una secuencia característica de los robots cuadrúpedos y evitar así tener que agregar otro DOF adicional.
- Los generadores sinusoidales como versiones simplificadas de los Central Pattern Generators. La programación de un generador en comparación de los CPG es menos tediosa y disminuye el número de cálculos a realizar, por lo que el emplear la suma de senos en los perfiles de locomoción es más práctico de hacer con generadores sinusoidales.

Capítulo 4

4. Simulación de la arquitectura utilizando software Webots ®

En esta sección se describen las pruebas simuladas realizadas en el entorno Webots® para los tres tipos de locomoción: línea recta, giro abierto y giro cerrado. Así mismo se proporcionan nociones básicas del software utilizado.

La simulación permite obtener nociones básicas del comportamiento del robot, pero por encima de todo, probar los algoritmos: verificar que efectivamente las secuencias planteadas se lleven a cabo en el orden correcto y que la coordinación sea la adecuada, observar la posible influencia de los parámetros de control basados en los resultados de anteriores investigaciones en lo respectivo a la arquitectura escogida.

4.1. Webots ®

Webots ® es un software que permite desarrollar modelos, programar y simular un robot bajo diferentes ambientes. Es creado en 1996 con el apoyo del EPFL. Maneja distintos lenguajes: C, C++, Java, Python, Matlab y ROS, además permite la comunicación TCP/IP con otras interfaces de simulación o control. [65]

El principio de funcionamiento de Webots® gira entorno a la creación de un archivo principal denominado *World* al cual se le adicionan nodos en una estructura jerárquica conocida como *scene tree*. Los nodos pueden definir conceptos del mundo o referirse a recursos externos (controladores, texturas, plugins, sonidos, etc.), estos tienen relación padre-hijo dada en el *scene tree*. [66]

En la *Figura 4.1* se muestra un World básico con los nodos WorldInfo, Background (fondo), DirectionalLight (iluminación), Viewpoint (cámara) y RectangleArena (piso, paredes). Estos nodos pueden ser nombrados a través del DEF para ser posteriormente reutilizados mediante el comando USE.

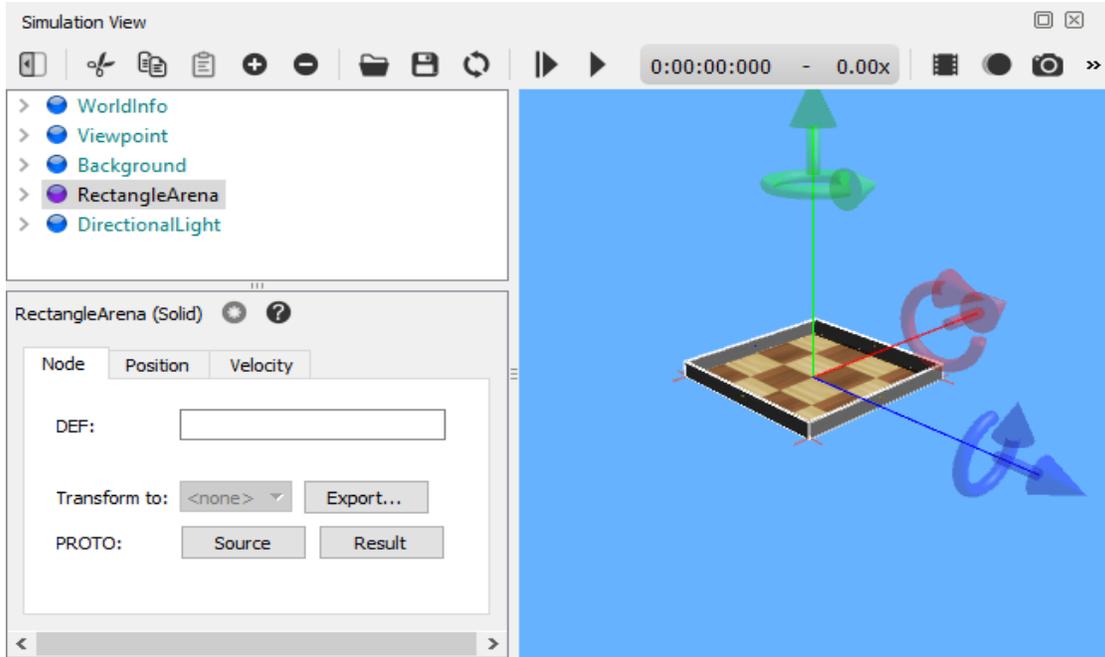


Figura 4.1. Ejemplo de un World básico en Webots ®

Los nodos se adicionan o retiran a través del + – de la barra de comandos. Pantallazo del entorno de trabajo creado para explorar la arquitectura tipo salamandra en el Mecabot 5.0.

Adicional a las clases de nodos asociados a la creación del entorno existen otros tipos que permiten el modelo, creación, simulación y control del robot. A continuación, se listan los principales nodos y conceptos asociados para realizar una simulación en Webots ®: [66]

Actuator: Estos nodos reciben los comandos de un *Controller*, son llamados a través de este por medio del nombre asignado al actuador en sus propiedades.

Basic Time Step: Es un campo asociado al nodo *WorldInfo*, define el incremento discreto de tiempo de la simulación. Se da en milisegundos.

Controller: Recurso asociado al *Robot*. Puede ser programado en C, C++, Python, Java o Matlab. Se adiciona a través de Wizards > New Robot Controller

Controller time step: Incremento discreto de tiempo dentro del *control loop*. Se cambia a través del *wb_robot_step* en el archivo del *Controller*.

Device: Término asociado a un *Actuator* o un *Sensor*.

Dynamic/ Kinematic solid: A diferencia de un *Kinematic solid*, el *Dynamic Solid* tiene asociado un nodo *Physics* que permite movimiento bajo ciertas condiciones de peso, fricción, etc.

Robot: Nodo utilizado para definir un robot predeterminado o con modelo propio. Asociado a este están: *Controller*, actuadores, sensores, *Physics*, entre otros.

Sensor: Estos nodos reciben los comandos de un *Controller*, son llamados a través de este por medio del nombre asignado al sensor en sus propiedades.

Solid: Nodo que define un elemento cualquiera el cual puede tener asociado los nodos *Shape*, *Transform*, actuadores, sensores, etc. También puede estar asociado a un nodo *Robot*.

En la Figura 4.2 se observan algunos de los nodos más relevantes de Webots ® y su relación.

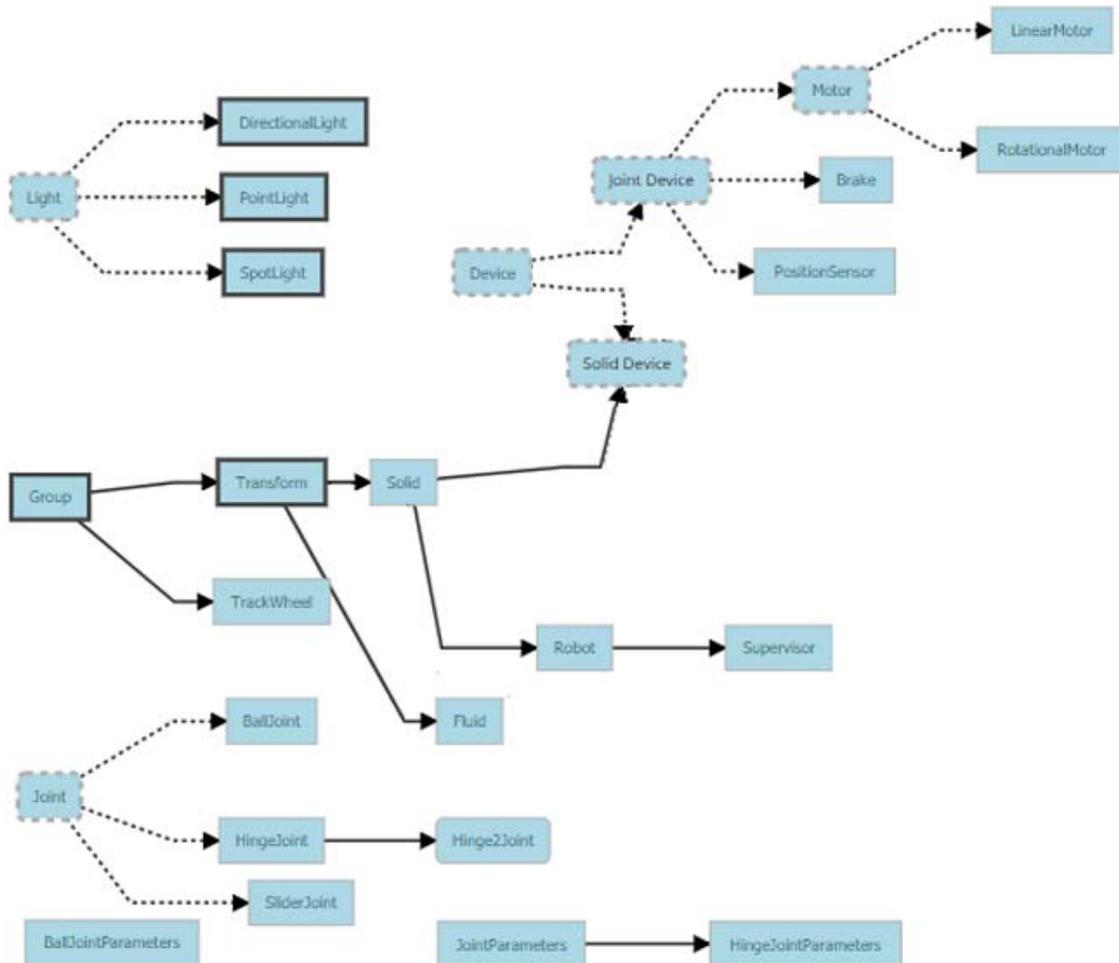


Figura 4.2. Esquema de nodos y propiedades en Webots ®
Tomado de: [67] (Simplificado y Modificado)

4.2. Modelamiento CAD e importación de los Semi-módulos

Para importar los módulos del Mecabot 5.0 el CAD es simplificado obviando la electrónica, tornillos y demás. Cada una de las partes de los módulos son representadas como sólidos, en la *Figura 4.3* se observa el cuerpo (negro), los pivotes (gris) y las ruedas (cuadrados grises).

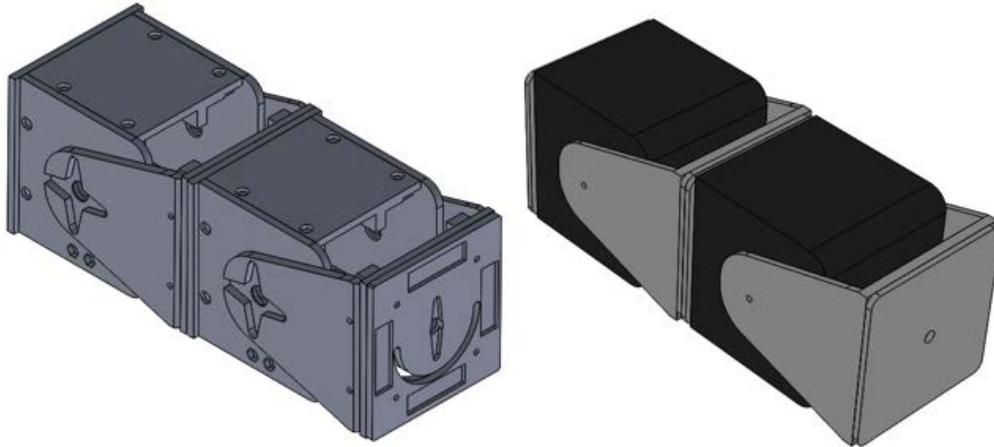


Figura 4.3. Simplificación del CAD para la simulación en Webots®
CAD completo (izquierda) vs CAD simplificado (derecha). Elaboración propia

Para poder exportar las piezas de SolidWorks® a Webots® es necesario guardar los tres componentes (cuerpo, pivote, rueda) por separado y en formato VRML97. Este procedimiento se observa en al *Figura 4.4*.

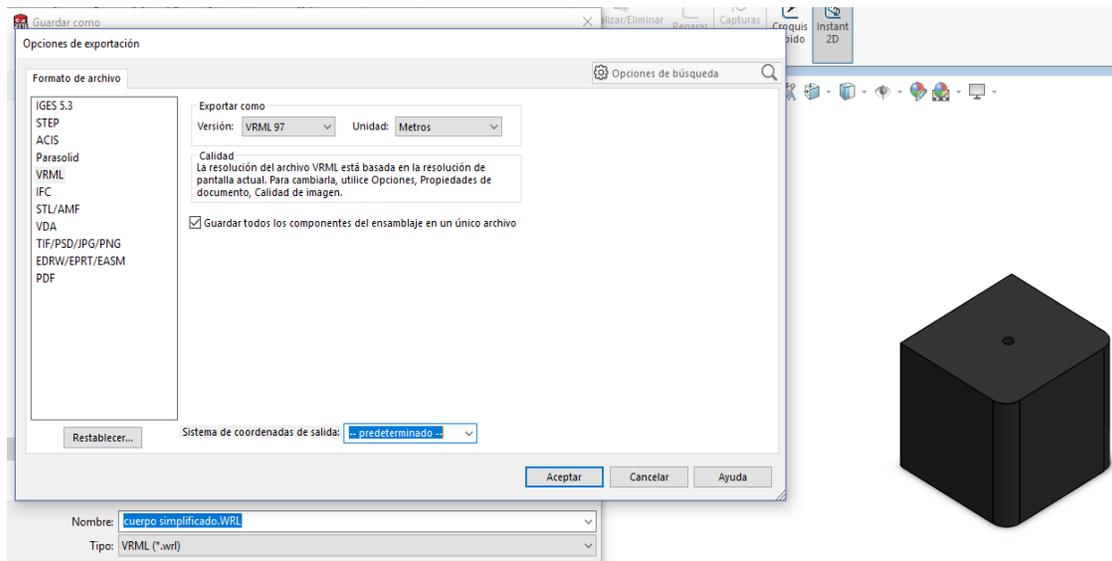


Figura 4.4. Exportación de pieza en SolidWorks®
Cuerpo del Mecabot 5.0. Pantallazo

Una vez guardadas las piezas estas se importan una a una en el ambiente creado en Webots® a través del comando Import VRML97, estas son insertadas como un nodo *Transform* el cual tiene asociado un *Shape* como hijo (ver *Figura 4.5*).

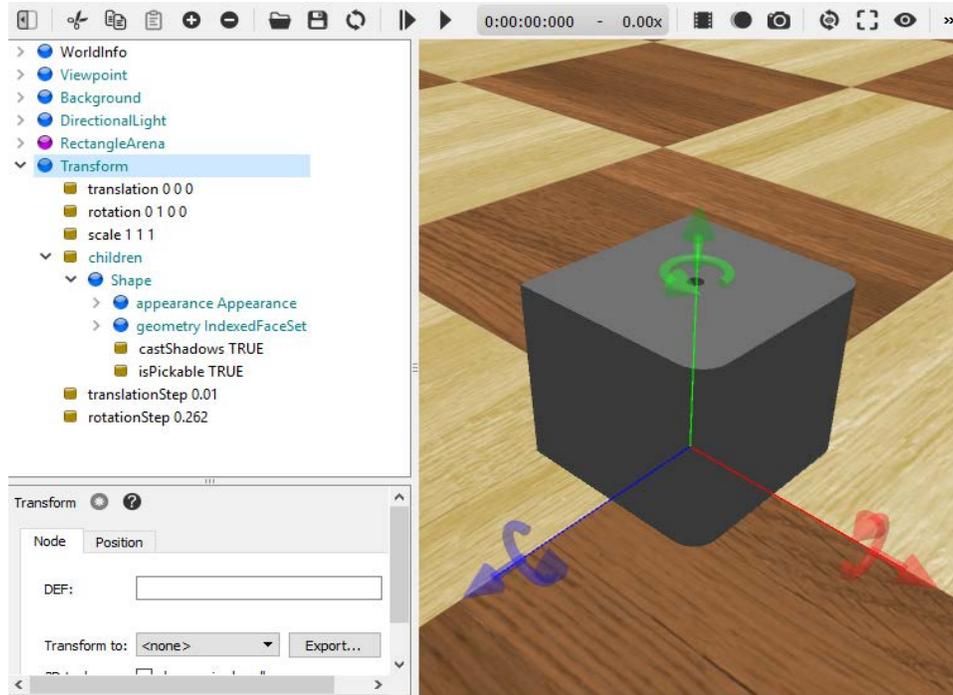


Figura 4.5. Importación de pieza en Webots®
Cuerpo del Mecabot 5.0. Pantallazo

Para facilitar el acople se crean distintos grupos de nodos que representen las estructuras que se repiten en el robot para poder reutilizarlas utilizando los comando DEF y USE. Los grupos corresponden a la escápula (ver *Figura 4.6*), la configuración cara-cara invertida de las piernas (ver *Figura 4.7*), y la disposición de los eslabones en la columna (ver *Figura 4.8*).

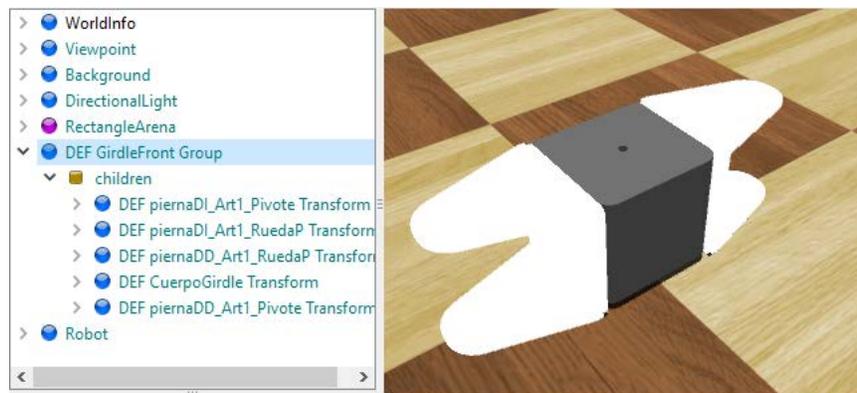


Figura 4.6. Grupo de nodos para la escápula
Escápula de la arquitectura salamandra en el Mecabot 5.0. Pantallazo

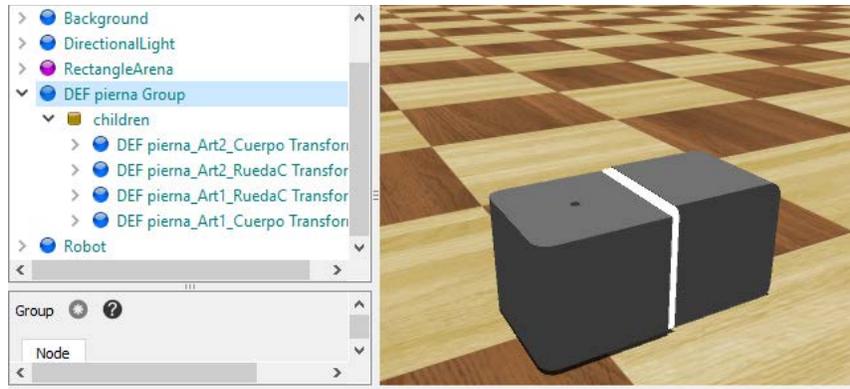


Figura 4.7. Grupo de nodos pierna cara-cara invertida
 Sección de la pierna de la arquitectura salamandra en el Mecabot 5.0. Pantallazo

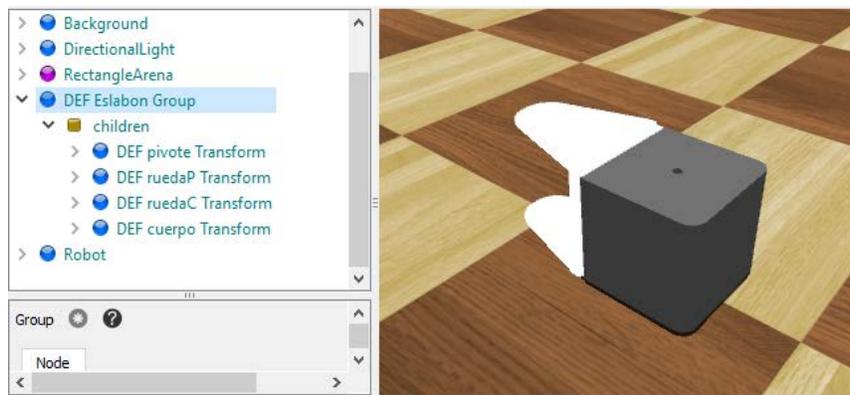


Figura 4.8. Grupo de nodos para eslabón de columna
 Eslabón de la columna de la arquitectura salamandra en el Mecabot 5.0. Pantallazo

Finalmente, los grupos y los nodos independientes son acoplados en el robot. Se insertan los *HingeJoint* correspondientes, se especifican los *boundingObject* de los elementos y se nombran los motores de cada articulación (ver Figura 4.9).

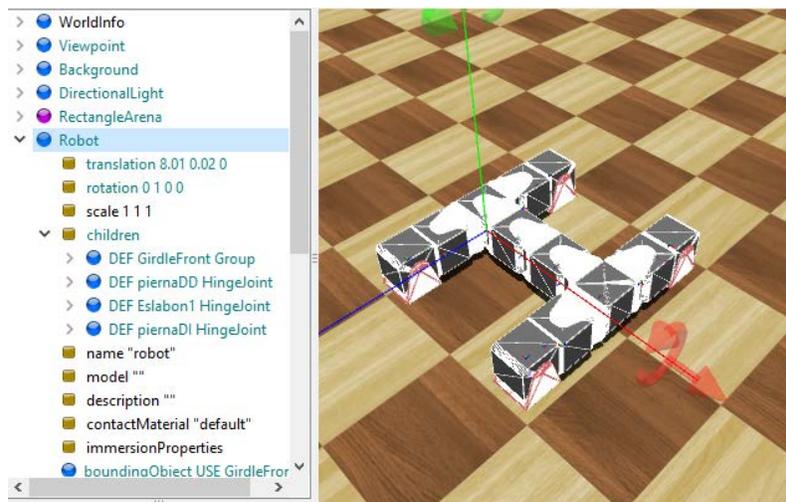


Figura 4.9. Ensamble final en Webots®
 Se observan los *boundingObject* del robot, en rojo los puntos de contacto con el suelo. Pantallazo

4.3. Simulación de la locomoción recta

La programación en Webots® de la locomoción es realizada en función del diagrama de flujo de la *Figura 3.24*. Se emplean las librerías *robot.h* y *motor.h* para poder enlazar con el robot y llamar los motores de este. Por pierna se asignan dos motores, uno para el movimiento en el plano transversal y el otro para el coronal (ver *Figura 3.18*). Para la columna se asignan tres motores, uno por cada eslabón.

Los ángulos de la columna son hallados teniendo en cuenta las limitaciones mecánicas del robot por lo que el grado de apertura del primer eslabón siempre será menor al del resto (ver *sección 3.8*). Para garantizar una locomoción recta es necesario que el primer y último eslabón de la columna se encuentren descritos en el mismo plano horizontal.

La velocidad en la locomoción puede variarse modificando los parámetros de amplitud en la columna, en las piernas o cambiando la frecuencia del movimiento (ver *ec.(24)* y *ec.(27)*).

Se escoge la amplitud de los eslabones de la espina de modo tal que permita una buena apertura en las piernas sin demandar posiciones extremas en ninguno de los 11 motores.

El *punto de partida en amplitud* es: $\frac{\pi}{90}$, $\frac{2\pi}{45}$, $\frac{\pi}{10}$ para el primer, segundo y tercer eslabón respectivamente, esta permitirá aplicar pruebas en cualquiera de las tres modalidades de variación de velocidad (amplitud columna, amplitud piernas, frecuencia) ya que se encuentra en un punto intermedio de apertura.

4.3.1. Análisis variación de la amplitud en columna

Es el primer método empleado para cambiar la velocidad de locomoción. Las pruebas se realizan en el software de simulación Webots® con una frecuencia fija de 0.1 Hz, se varía únicamente la amplitud de partida (ver *Simulación de la locomoción recta*) por medio de un factor multiplicativo determinado. De acuerdo con la *ecuación (31)* si el factor es mayor a uno la amplitud de los tres eslabones aumentará, de lo contrario esta disminuirá.

$$A_{nuevo[i]} = factor * A_{[i]} \quad (31)$$

Un incremento en la amplitud conlleva a un decremento sustancial del valor de apertura de las piernas, esto debido a las limitaciones mecánicas del robot.

Al contraerse más la columna, las extremidades no deben alcanzar amplitudes grandes ya que pueden llegar a chocar con la espina al momento de la máxima contracción. Así mismo, una disminución de la amplitud en la columna permite una mayor apertura de las piernas. La relación entre ambos parámetros se muestra en la *Figura 4.10*.

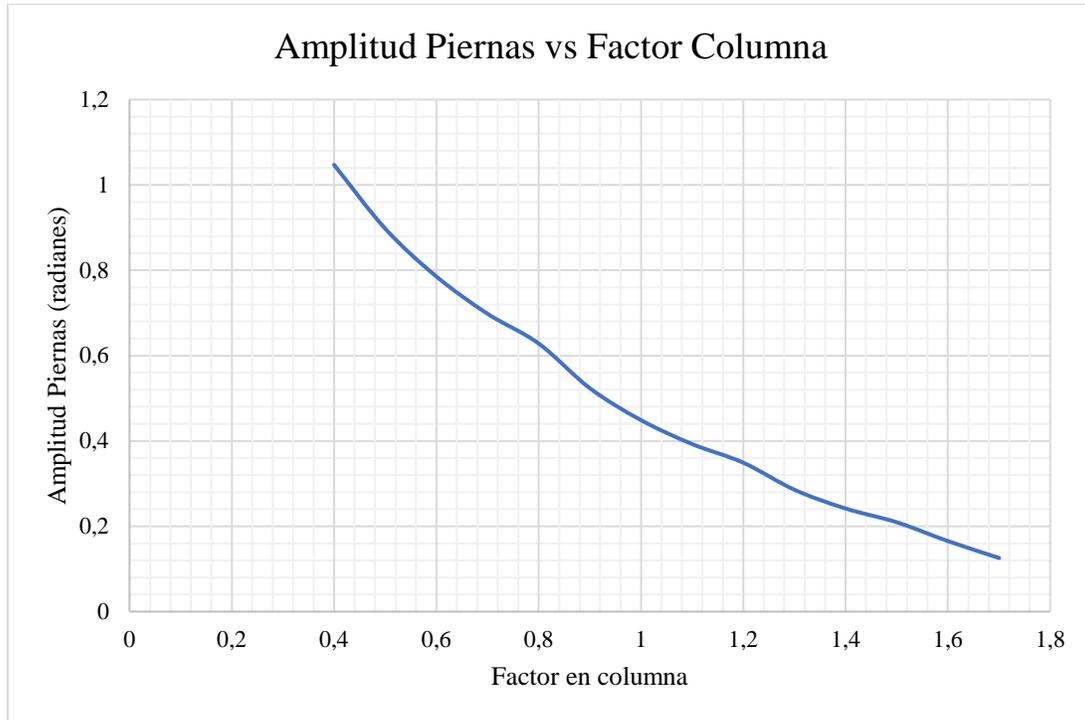


Figura 4.10. Locomoción recta: Relación entre la amplitud de la columna y de las piernas.

Aunque se sabe que la amplitud de las piernas es el segundo método que permite variar la velocidad, la evidente disminución que esta variable sufre debido al aumento de la apertura de la columna no impide un incremento de la velocidad de locomoción.

La velocidad es extraída en la simulación mediante la toma del tiempo que tarda el robot en recorrer la distancia de 1 m para los diferentes valores de amplitud, los resultados de la simulación en Webots® se muestran en la *Figura 4.11*.

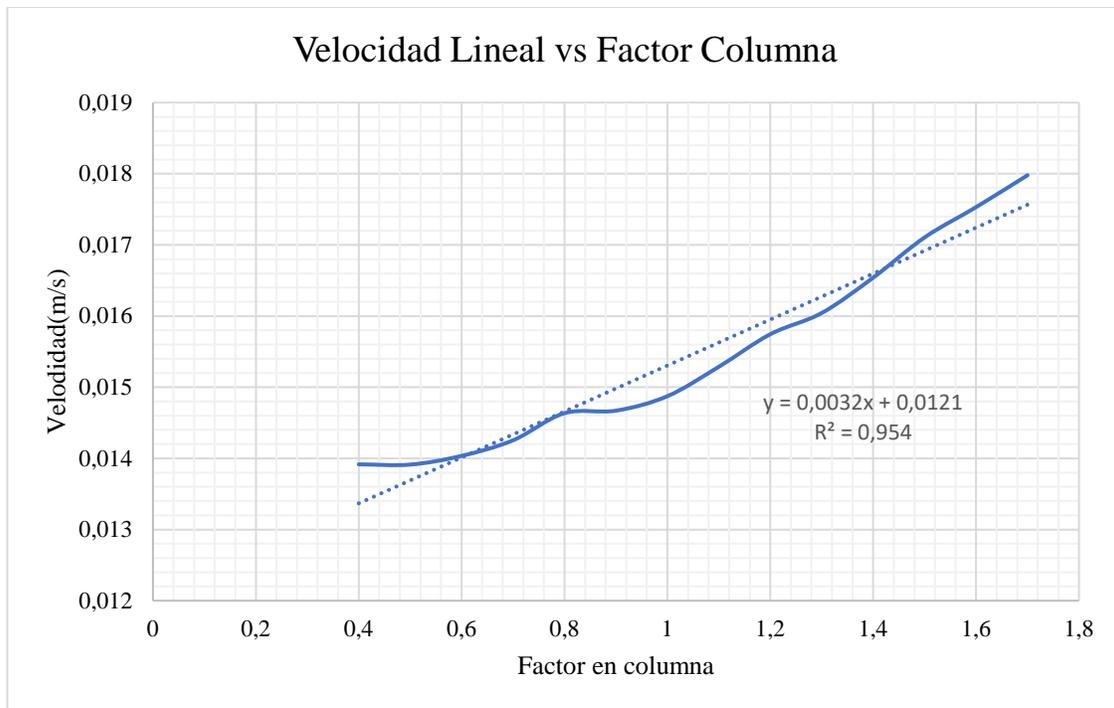


Figura 4.11. Locomoción recta: Relación entre amplitud columna y velocidad.

A medida que se incrementa la amplitud en los eslabones de la columna, la velocidad del robot aumenta, sin embargo, la amplitud de las piernas disminuye.

4.3.2. Análisis variación de la amplitud de las piernas

Es el segundo método empleado para cambiar la velocidad de locomoción. La simulación se realiza en Webots® con frecuencia fija de 0.1 Hz midiendo el tiempo transcurrido por el robot en recorrer la distancia aproximada de 1 m. Los resultados se muestran en la *Figura 4.12*.

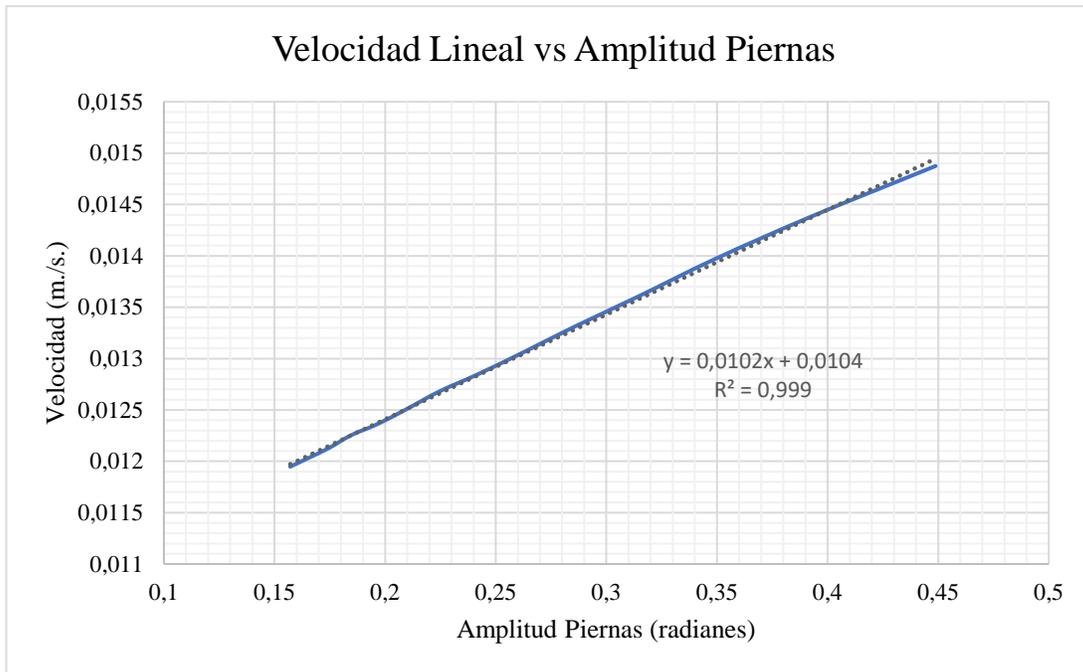


Figura 4.12. Locomoción recta: Relación entre amplitud de las piernas y velocidad.

A medida que aumenta la apertura de las piernas, incrementa la velocidad de locomoción, sin embargo, el aumento de esta no puede realizarse más allá de las limitaciones mecánicas de robot, ya que de otro modo las piernas chocarían con la columna o interferían entre sí.

El no aprovechar la máxima apertura permitida, en este caso de $\pi/7$ (ver *Figura 4.12*), conlleva a una disminución innecesaria de la velocidad, ya que los ángulos alcanzados por las extremidades se encuentran dentro del rango adecuado de movimiento en los motores por lo que no habría necesidad de limitar la amplitud y se estaría desaprovechando la capacidad de protracción y retracción máxima.

4.3.3. Análisis variación de la frecuencia de movimiento

Es el tercer método empleado para cambiar la velocidad de locomoción. La simulación en Webots® se realiza con la amplitud de partida de la columna (ver *Simulación de la locomoción recta*) y la máxima apertura permitida por las extremidades (ver *Figura 4.12*). La velocidad es calculada al medir el tiempo que emplea el robot en recorrer 1 m, los resultados se muestran en la *Figura 4.13*.

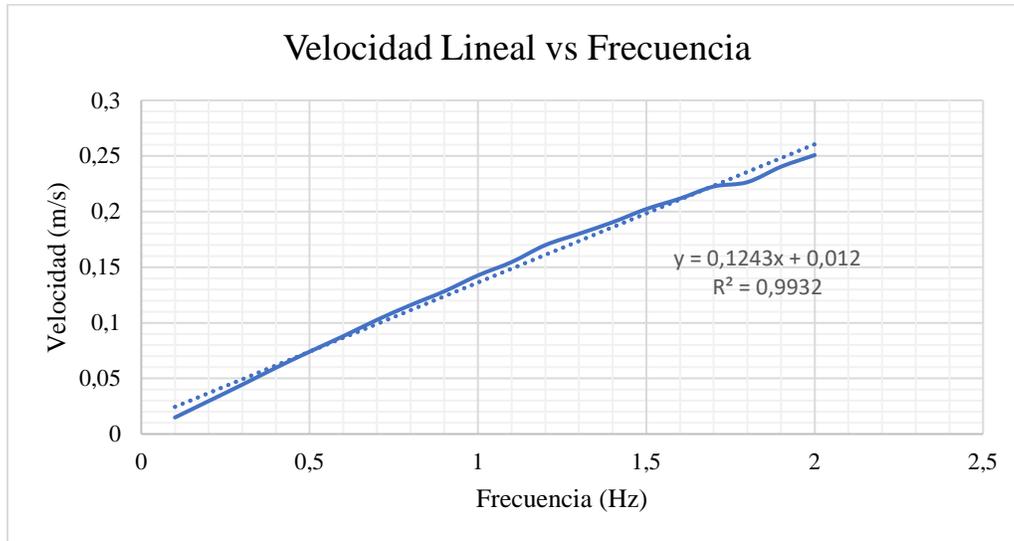


Figura 4.13. Locomoción recta: Relación entre la frecuencia y velocidad

A medida que incrementa la frecuencia aumenta la velocidad. Nótese que de los tres métodos la pendiente descrita por este último es mayor (ver *Figura 4.11*, *Figura 4.12*, *Figura 4.13*), es decir que un aumento en la frecuencia provocaría un incremento mayor en la velocidad a comparación del causado por un aumento en la amplitud de la columna o de las piernas.

Este fenómeno podría deberse a que en la primera estrategia el incremento de la amplitud de la columna conlleva a una disminución de la amplitud de las piernas, factor que influye directamente en la velocidad. A pesar de que se comprueba que efectivamente el incremento de la amplitud de la columna provoca un aumento de velocidad, este crecimiento se evidencia so pena de otra variable importante.

El segundo método corrobora que siempre y cuando la amplitud de las piernas no alcance posiciones extremas ($\pm 90^\circ$) es aconsejable llevar la apertura a su máximo permitido por el movimiento de la columna, sin embargo, esta estrategia es restringida por las limitaciones mecánicas en el robot, de modo tal que una vez llegado a la apertura mayor es imposible seguir aumentando la velocidad por este método por lo que se hace necesario optar por el aumento de frecuencia.

4.4. Simulación del giro abierto

La programación en Webots® de la locomoción es realizada en función del diagrama de flujo de la *Figura 3.27*, empleando las mismas librerías de la locomoción en línea recta. Para las pruebas en Webots® se usa la *amplitud de partida* de la simulación del movimiento recto (ver *sección 4.3*), con la excepción de que la amplitud del primer eslabón es cero y su offset toma el valor fijo de $\pi/90$.

Aquello se hace debido a que por principio se sabe que el primer eslabón es el que menos grados de apertura puede llegar a tener y por lo tanto el offset aplicado a este sería insignificante comparado con el de los otros dos eslabones, por lo que sólo se cambiará el offset de los últimos dos segmentos de la columna.

Además, la variación de la amplitud a través del tiempo interfiere en cierta medida en el movimiento circular descrito por el robot, así que asignar un valor fijo al primer motor mejoraría la locomoción y facilitaría el análisis.

Las pruebas simuladas se realizan para un giro en dirección izquierda. Teniendo en cuenta que el robot es simétrico y el protocolo para el giro a la derecha es el mismo, los resultados tanto para giro izquierdo como para giro derecho serán similares.

A continuación, se analizan los resultados correspondientes a la influencia de la variación de la amplitud de las piernas del borde externo, el offset y la amplitud de la columna en el radio de la circunferencia descrita.

4.4.1. Análisis variación de la amplitud de las piernas borde externo

Dependiendo del grado de contracción de la columna provocado por el offset es necesario limitar el movimiento de las piernas ubicadas en el costado del sentido de giro. Sin embargo, las otras extremidades: las del borde externo, no están restringidas por la espina, al contrario, estas pueden llegar a alcanzar amplitudes mayores a las que se evidenciarían en la locomoción recta siempre y cuando ambas piernas no choquen entre sí.

En la *Figura 4.14* se muestra la relación de la amplitud de las piernas del borde externo con el radio de la circunferencia descrita por el robot, la frecuencia es de 0.5 Hz.

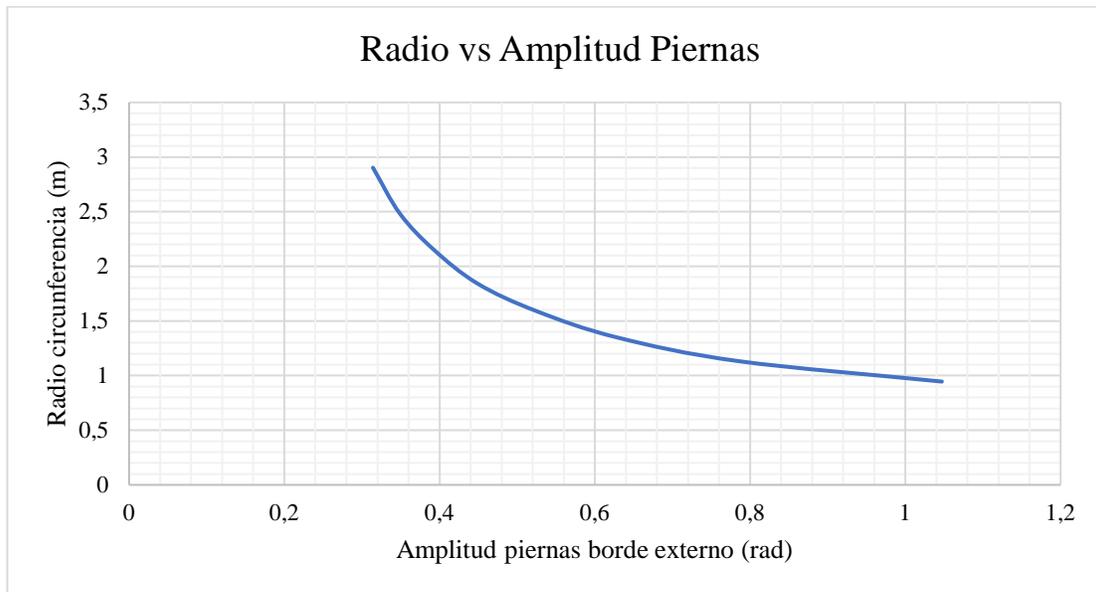


Figura 4.14. Locomoción giro abierto: Relación entre la amplitud de las piernas borde externo con el radio de la circunferencia descrita

Estas pruebas son realizadas con un offset de $\pi/19$ aplicado al segundo y tercer eslabón de la columna, debido a este offset la amplitud de las piernas en el costado del sentido de giro (borde interno) es limitada a $\pi/30$.

A medida que disminuye la amplitud de las piernas del borde externo el radio de giro incrementa, incluso cuando el offset no se varía, si se pretende alcanzar un radio de giro mínimo es necesario que las piernas del borde externo alcancen la máxima apertura permitida por el espacio entre estas, esta acción debe realizarse con el cuidado de no forzar los motores con posiciones extremas ($\pm\pi/2$).

4.4.2. Análisis variación del offset

Como ya se menciona anteriormente un incremento del offset conlleva a una disminución de la apertura de las piernas del costado izquierdo y un aumento de amplitud en el par del costado derecho. La relación entre el offset y los dos pares de piernas se muestra en la *Figura 4.15* y *Figura 4.16*.

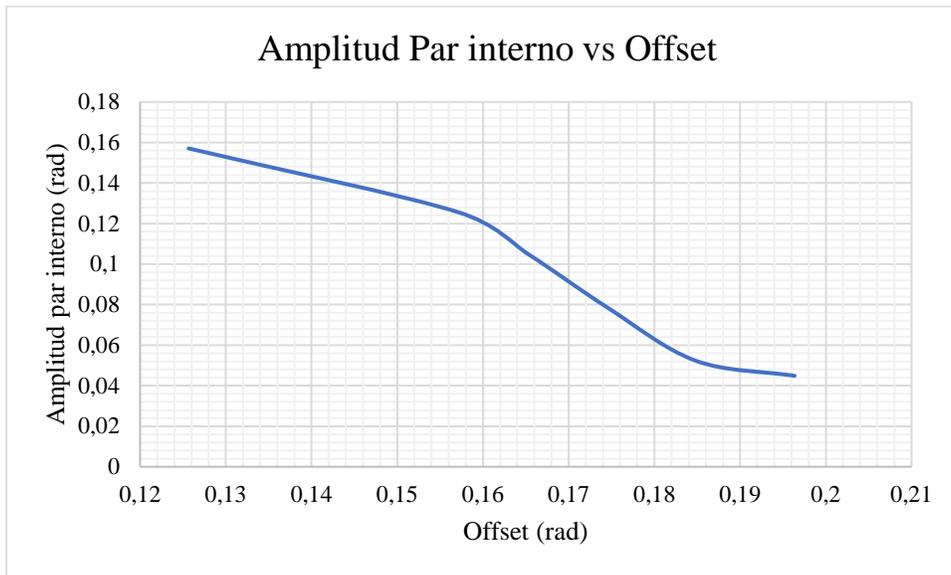


Figura 4.15. Locomoción giro abierto: Relación entre el offset con la amplitud del par interno de piernas

El offset aumenta siempre restringido en el movimiento de las piernas internas, un offset excesivo puede provocar el choque entre el par de extremidades interno incluso cuando estas alcancen una amplitud de cero.

Por otro lado, el offset no está limitado al movimiento de las piernas externas, sin embargo, estas sí están restringidas por a evitar alcanzar posiciones extremas ($\pm\pi/2$). Como se ve en la *Figura 4.16*, este límite nunca es alcanzado debido a que primero se llega al límite en el par interno.

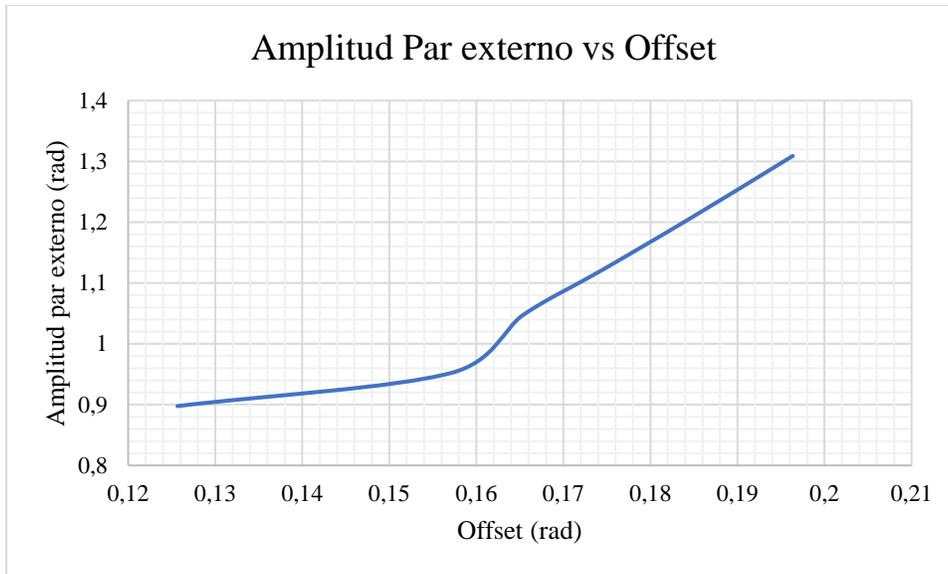


Figura 4.16. Locomoción giro abierto: Relación entre el offset con la amplitud del par externo de piernas

Para los valores de offset especificados es también recogido el radio de la circunferencia descrita en cada uno de los casos (ver *Figura 4.17*), en términos generales a medida que aumenta el offset el radio disminuye.

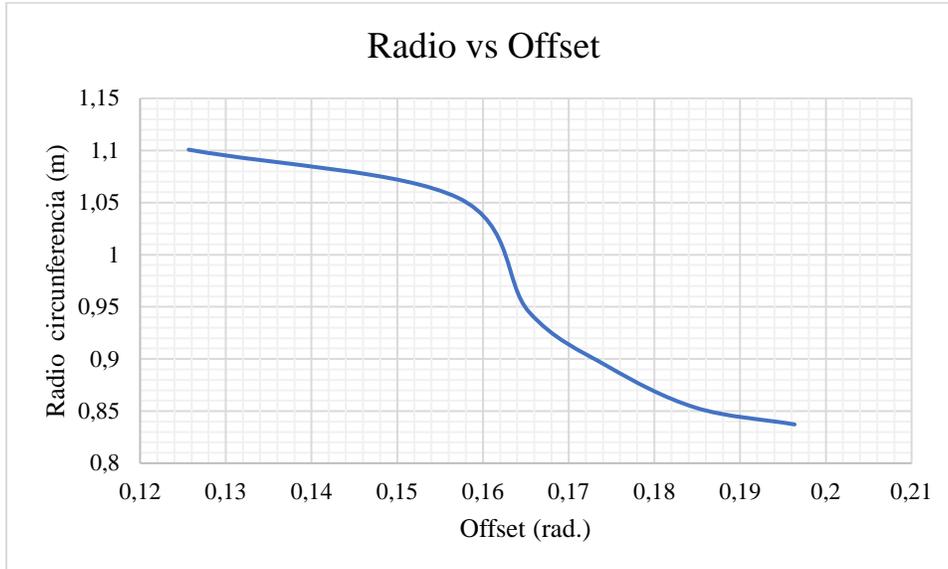


Figura 4.17. Locomoción giro abierto: Relación entre el offset con el radio de la circunferencia descrita

Las pruebas simuladas finalizan por la restricción del ángulo descrito por el par interno de extremidades siendo este de $2,5^\circ$ y el radio mínimo alcanzado es de 83 cm aproximadamente.

4.4.3. Análisis variación de la amplitud/offset en la columna

El radio alcanzado obedece a la restricción por par interno de extremidades, sin embargo, se sabe que el desempeño del robot es afectado por la relación amplitud/offset, la variación de estos dos parámetros (amplitud/offset) es un proceso tira y afloja que en últimas puede conllevar a disminuir el radio de la circunferencia descrita. A nivel general una amplitud reducida puede provocar condiciones de inestabilidad (ver *sección 3.11*), mientras que una apertura excesiva evitaría poder alcanzar variaciones significativas en el radio descrito.

Se decide realizar pruebas simuladas en Webots® manteniendo el grado de apertura en ambos pares de extremidades y multiplicando la amplitud de los eslabones 2 y 3 por un factor (ver *ec.(31)*), los resultados se muestran en la *Figura 4.18*.

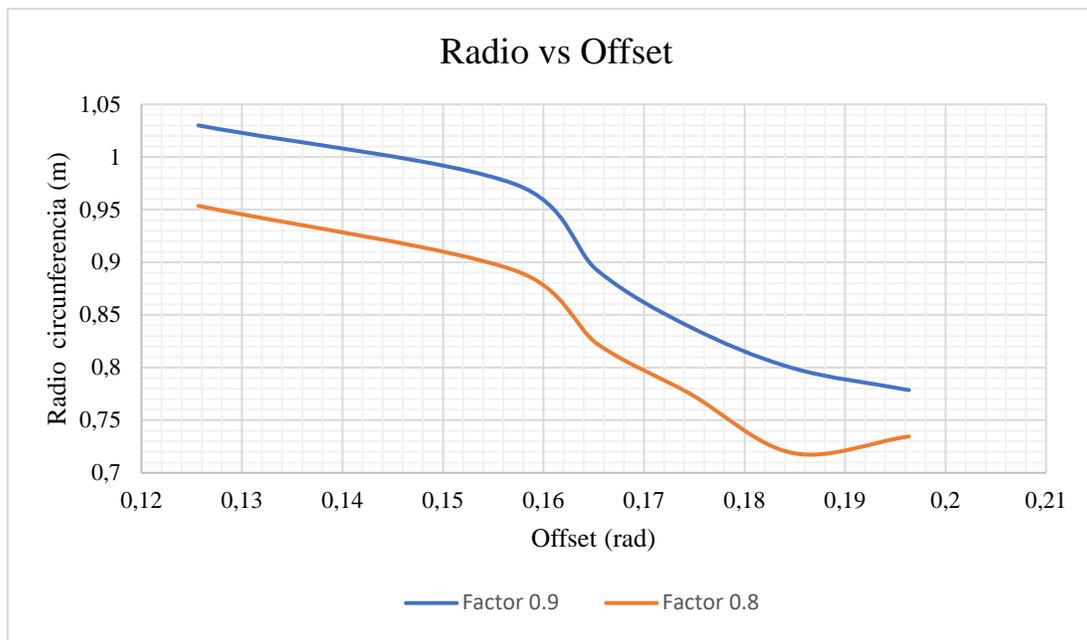


Figura 4.18. Locomoción giro abierto: Relación entre el offset con el radio de la circunferencia descrita. Variación en la amplitud de la columna

Como puede observarse en la *Figura 4.18* a medida que disminuye la amplitud de la columna el radio es menor: el offset tiene mayor efecto.

El último dato correspondiente a la amplitud con factor multiplicativo de 0.8 presenta un ligero sobressalto, esto debido a que ya comienzan a hacerse presentes condiciones cercanas a la inestabilidad, causando que el robot pierda contacto con tierra en dos de sus piernas por breves lapsos de tiempo. Finalmente, se tiene que el menor radio descrito es de 72 cm aproximadamente.

4.5. Simulación de la rotación

La rotación responde a la necesidad de poder realizar giros cerrados sobre un eje. La programación en Webots® de la locomoción es realizada en función del diagrama de flujo de la *Figura 3.30* empleando las mismas librerías de la locomoción en línea recta.

Debido al carácter del movimiento existen solo dos posibles métodos para variar la velocidad: por cambio de amplitud en el movimiento de las piernas o por frecuencia.

Las pruebas se realizan para el giro a la derecha, sin embargo, debido a la simetría del robot y a la similitud de los protocolos para ambas rotaciones derecha e izquierda, los resultados presentados se suponen análogos para ambos casos.

4.5.1. Análisis variación de la amplitud de las piernas

En la simulación de Webots® se mide la velocidad angular observando el tiempo que tarda el robot en llegar a un ángulo de 90° . Con el fin de mantener la simetría en el movimiento, la amplitud de las cuatro extremidades es la misma. Las pruebas se realizan a una frecuencia fija de 0.1 Hz, los resultados se muestran en *Figura 4.19*.

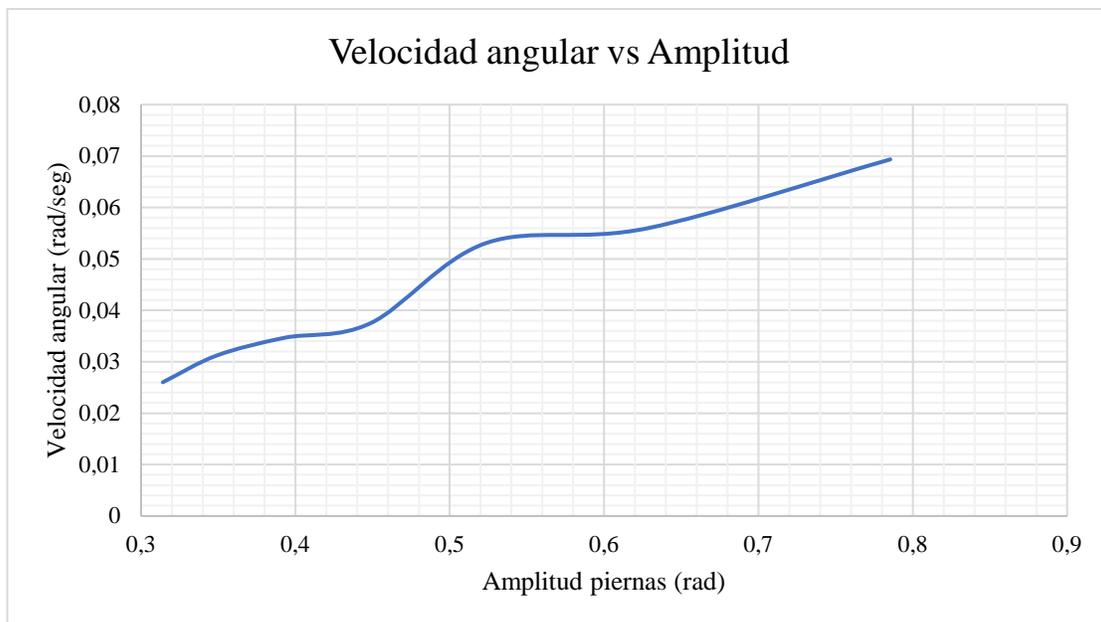


Figura 4.19. Locomoción rotación: Relación entre amplitud de las piernas con velocidad angular

A medida que incrementa la amplitud aumenta la velocidad angular, para una amplitud nula la velocidad será cero. Al alcanzar una amplitud mayor de los $\pi/4$ el robot se torna inestable y cae sobre las piernas ubicadas en el costado correspondiente al sentido de giro (ver *Figura 4.20*).

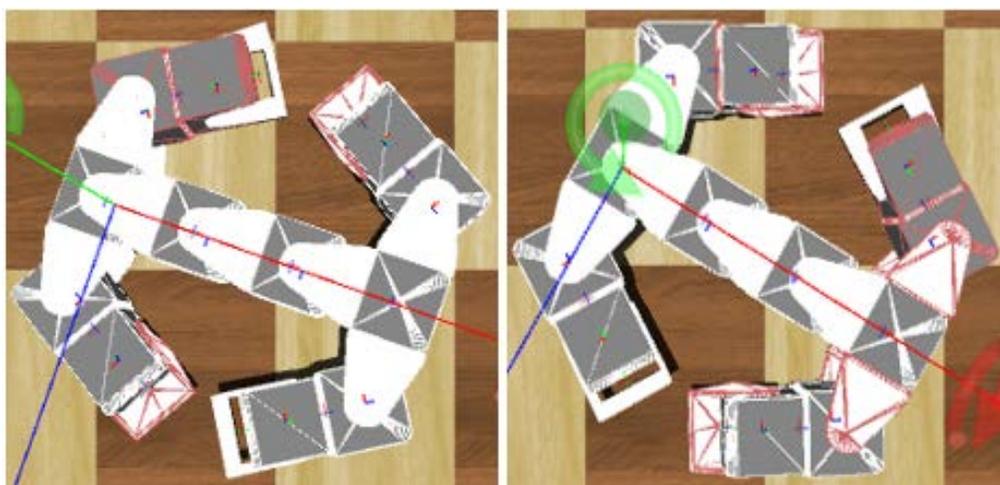


Figura 4.20. Pérdida de estabilidad. Amplitud de $\pi/3$

4.5.2. Análisis variación de la frecuencia

De los valores de amplitud empleados en el análisis anterior se escoge el valor intermedio de $\pi/7$ como valor fijo y se cambia esta vez la frecuencia de los generadores. Los resultados se muestran en *Figura 4.21*.

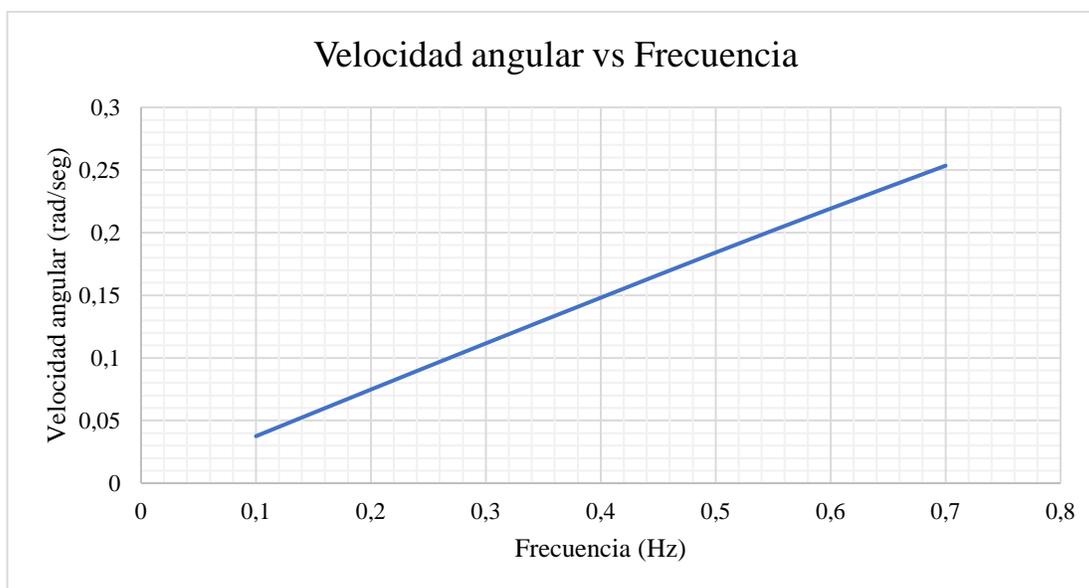


Figura 4.21. Locomoción rotación: Relación entre frecuencia con velocidad angular

A medida que la frecuencia aumenta la velocidad lo hace de forma lineal. Nótese que con una frecuencia cercana a los 0.25Hz se puede lograr una velocidad mayor a la alcanzada con la máxima amplitud de las piernas permitida en el robot (ver *Figura 4.20*. y *Figura 4.21*.)

4.6. Conclusiones del capítulo

En lo que respecta a las pruebas simuladas para la locomoción en línea recta se evidencia que:

- El incremento de la amplitud de la columna y de la amplitud de las piernas conlleva a un aumento de la velocidad alcanzada.
- La variación de frecuencia supone ser la mejor estrategia para cambiar la velocidad del robot en esta modalidad, siempre y cuando se alcance la máxima apertura en las piernas (sin llegar nunca los $\pm 90^\circ$) permitida por la contracción de la columna.

De las pruebas simuladas en giro abierto se observa que:

- La disminución de la amplitud a través de un factor multiplicativo permite alcanzar radios de circunferencia mucho menores. El radio mínimo alcanzado es de aproximadamente 72 cm, por lo que el giro abierto es útil únicamente si se quiere rodear obstáculos grandes.
- Una disminución excesiva de la amplitud de la columna en conjunto con el aumento del offset puede llevar la amplitud de las piernas del costado de giro a 0° y generar condiciones de inestabilidad.

En la rotación simulada en Webots ® se concluye que:

- El incremento de la amplitud de las piernas provoca un aumento de la velocidad alcanzada, pero llevarla a valores más allá de los 45° puede generar inestabilidad.
- El cambio de frecuencia es la mejor estrategia de variar la velocidad en esta modalidad.
- La rotación es útil si se quiere cambiar la dirección de locomoción del robot. Debido a que el giro abierto sólo es útil para rodear grandes objetos, esta también puede llegar a emplearse para bordear pequeños obstáculos.

Capítulo 5

5. Ensamble de la arquitectura tipo salamandra con el Mecabot 5.0

En la presente sección se explica el proceso de ensamblaje y configuración de los componentes electrónicos de la arquitectura tipo cuadrúpedo.

Se realiza una breve descripción de los sistemas electrónicos que conforman el Mecabot 5.0, así mismo se identifican los programas asociados a dichos componentes que facilitan su configuración y manejo.

5.1.Mecabot 5.0

En la *Figura 5.1* se observan las principales partes del Mecabot 5.0. Un módulo está conformado por dos semi módulos provisto cada uno de cuerpo y pivote, en el cuerpo se encuentran la mayoría de los componentes electrónicos.

Los módulos pueden disponer de ruedas sin imanes que permiten ser acopladas a otros módulos a través de tornillos o un motor común, cuando hay ruedas con imanes basta con unirlas con las ruedas con imanes de otros módulos.

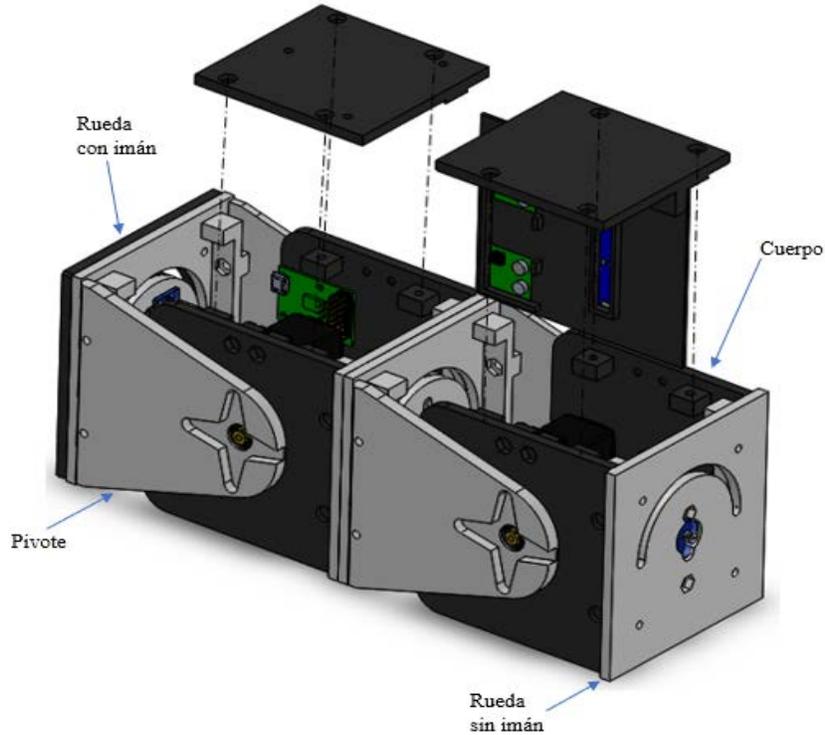


Figura 5.1. Partes estructurales del Mecabot 5.0
Elaboración propia

Los principales componentes electrónicos del Mecabot 5.0 se observan en las vistas de sección de la *Figura 5.2*. A diferencia de su predecesor la nueva versión dispone únicamente de un motor para mover los pivotes, se conservan los motores pequeños para las ruedas. Con menos motores que la versión 4.0 el número de drivers es reducido a uno. La alimentación entre las tarjetas y los motores es separada luego de observar problemas de interferencia (ver *sección 5.4*) motivo por el cual se emplean dos reguladores.

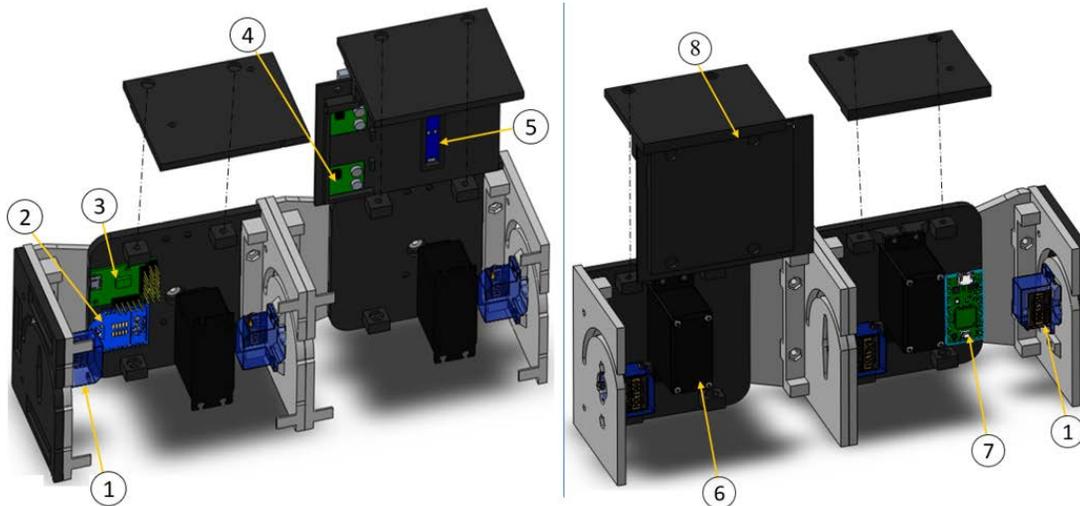


Figura 5.2. Vistas de sección con los componentes electrónicos Mecabot 5.0
1: Motor rueda. 2: Xbee. 3: Driver. 4: Regulador. 5: Tarjeta de protección. 6: Motor pivote. 7: Teensy. 8: Baterías. Elaboración propia

5.2. Componentes electrónicos en el Mecabot 5.0

Los componentes electrónicos que conforman el Mecabot 5.0 se describen en las siguientes subsecciones. Los programas asociados a la configuración de estos componentes se especifican con cada una de ellas.

5.2.1. Xbee S2

Los módulos Xbee son basados en el estándar Zigbee de redes Mesh. Permiten un alto tráfico de datos, baja latencia y una buena sincronización. La tarjeta que se utiliza en el Mecabot 5.0 corresponde a las Series 2 ZB de la familia de Xbee, las especificaciones se muestran en la *Figura 5.3* [68].

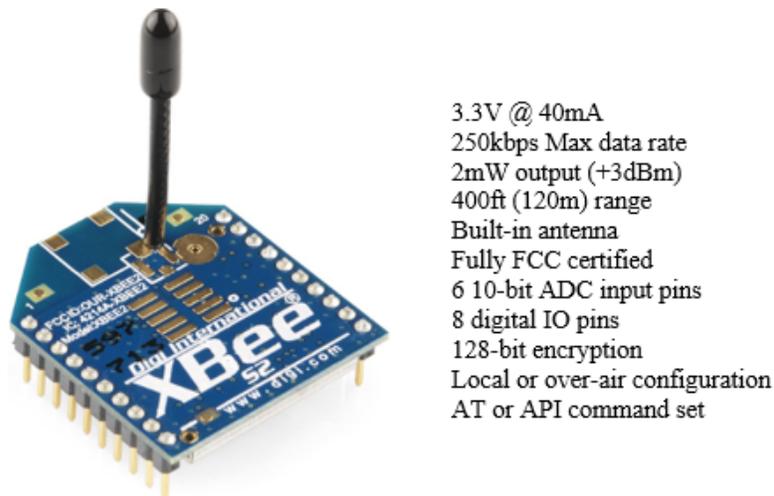


Figura 5.3. Especificaciones Xbee XB24-Z7WIT
Extraído de: [69]

La programación de la tarjeta se realiza a través del programa XCTU®, en este se establece la configuración del módulo (coordinador, router, end device), la dirección de red, la velocidad de transmisión, entre otros. [70]

Para la arquitectura tipo salamandra es necesario programar todos los dispositivos en configuración transparente (AT), aquello permitirá manejar una comunicación serial punto a multi punto. En la *Figura 5.4* se ilustra la programación del módulo Xbee S2 para cumplir la función de coordinador. El parámetro *DL* es puesto en FFFF con el fin de que todos los dispositivos conectados a la red reciban los datos enviados del coordinador, los demás dispositivos deben tener este campo con el valor default: 0. [70]

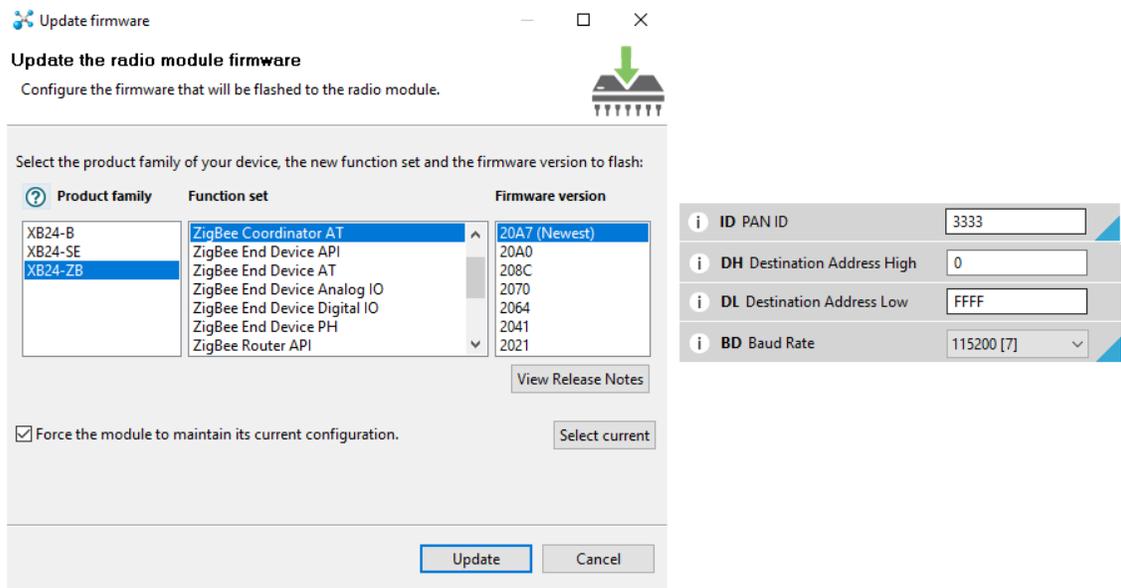


Figura 5.4. Parámetros Xbee en modo Coordinador AT
 Pantallazo de la configuración en el programa XCTU®

El esquema general de la trama de datos empleada en la comunicación de la arquitectura tipo salamandra se observa en la *Tabla 5.1*. La *modalidad* indica la acción que quiere realizar el usuario, este bit es representado por letras, siendo M: Manual, T: Tiempo, P: Parámetros y L: Locomoción. Los otros bits corresponden a valores que especifican el carácter de la acción.

bit	0	1	2	3	4	5
	Modalidad	Complemento				

Tabla 5.1. Trama de datos comunicación configuración tipo cuadrúpeda
 Elaboración propia

La modalidad manual (M) permite mover los motores de los módulos individualmente, la trama de datos se muestra en la *Tabla 5.2*. Los ángulos tienen un valor correspondiente a 0° cuando el pivote se encuentra alineado con el cuerpo del submódulo del Mecabot 5.0, el signo determina si el giro del pivote se realiza hacia la izquierda o a la derecha del cuerpo.

bit	0	1	2	3	4	5
	M	ID módulo	ID motor	signo	ángulo (°)	

Tabla 5.2. Trama de datos para modalidad Manual (M)
 Elaboración propia

La ID asignada a cada uno de los módulos se muestra en la *Figura 5.5*. El módulo correspondiente al coordinador AT es asignado al computador para permitir la interacción desde una interfaz de usuario.

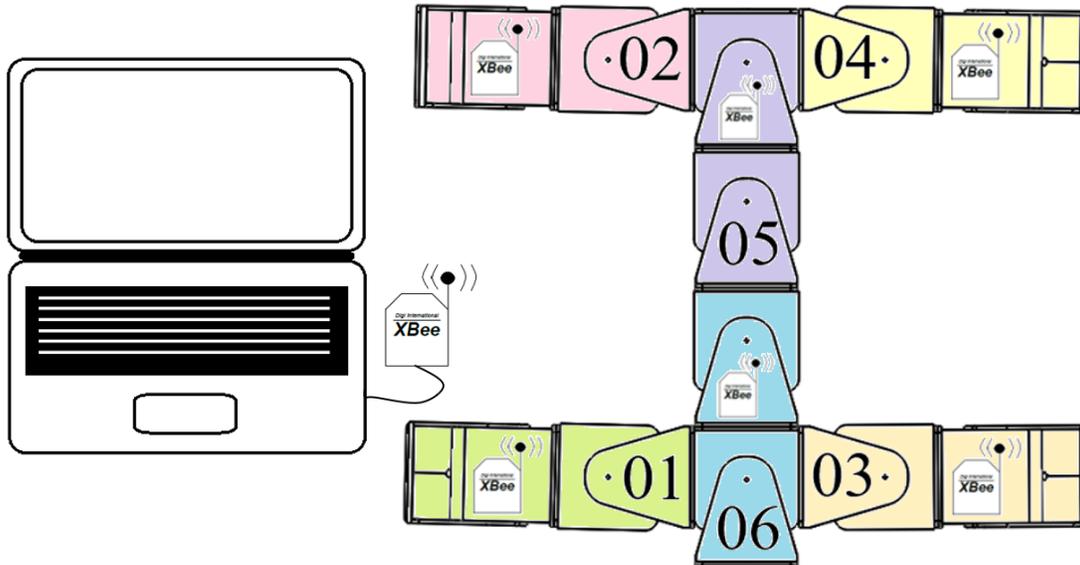


Figura 5.5. Comunicación serial Xbee computador-Mecabot 5.0
 ID asignada a cada uno de los 6 módulos: configuración salamandra Mecabot 5.0. Elaboración propia

La modalidad de parámetros (P) permite cambiar algunas variables de los generadores sinusoidales: frecuencia, offset (sólo eslabones de columna), amplitud en pares específicos de piernas ubicadas en el costado derecho o izquierdo y amplitud en todos los pares de piernas al mismo tiempo.

En la *Tabla 5.3* se observan la trama de datos según sea el parámetro en cuestión, en gris aparecen los valores en default.

bit	0	1	2	3	4	5
	P		1	1	0	Frecuencia (Hz)
		2	1	0	Factor offset (rad)	
		3	Costado	0	Factor amplitud (rad)	
		4	Costado	0	Factor amplitud (rad)	
		5	1	0	Factor amplitud (rad)	

Tabla 5.3 Trama de datos para modalidad Parámetros (P)
 Elaboración propia

En la *Tabla 5.4* se observa la trama de datos correspondiente a la modalidad de Tiempo (T), el bit 1 resetea todos los módulos incluidas las interrupciones de todos ellos, o por el contrario inicializa las interrupciones.

bit	0	1	2	3	4	5
T	set/reset	1	0	0	0	0

Tabla 5.4 Trama de datos para modalidad Tiempo (T)
Elaboración propia

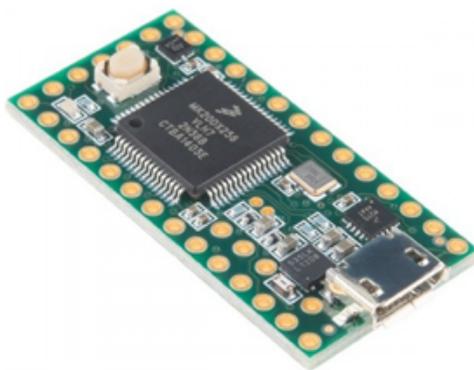
En la *Tabla 5.5* se observa la trama de la modalidad Locomoción (L) que indica si se debe realizar un desplazamiento en línea recta, giro abierto o rotación. En gris se muestran los datos en default.

bit	0	1	2	3	4	5
L	Tipo loc.	1	0	0	0	0

Tabla 5.5 Trama de datos para modalidad Locomoción (L)
Elaboración propia

5.2.2. Teensy

En el Mecabot 5.0 se utiliza una Teensy 3.2. Esta tarjeta puede ser configurada como mouse, teclado, joystick, MIDI, touchscreen, Audio, serial, entre otros. Las especificaciones de la Teensy se observan en la *Figura 5.6*. [71]



Dimensiones: 35 mm x 18 mm
 Procesador: 32 bits ARM Cortex- M4 48 MHz CPU
 128K de memoria Flash, 16K RAM, EEPROM 2K
 14 entradas analógicas de alta resolución (13 bits utilizable, hardware de 16 bits)
 34 digital I / O Pins (10 compartido con analógico)
 10 salidas PWM
 7 temporizadores de intervalos / retrasos, separadas de PWM
 3 UARTs (puertos serie)
 SPI, I2C, I2S, IR modulador
 I2S (para la interfaz de audio de alta calidad)

Figura 5.6. Especificaciones de Teensy 3.2
Tomado de:[71]

Para facilitar su programación se descarga el software Teensyduino compatible con Arduino. El pseudo código asociado a la programación de la Teensy se muestra en el *Anexo D*.

En algunos casos es necesario instalar el *Windows Serial Installer* cuando el computador no dispone de este. En otros casos es necesario configurar la tarjeta Teensy como Serial, este procedimiento se realiza únicamente una sola vez cuando la tarjeta es nueva y se hace a través de la interfaz Arduino, subiendo un programa en blanco sin especificar el puerto COM.

Para programar la Teensy se debe seleccionar desde la interfaz de Arduino el puerto serial, la versión de la tarjeta y el USB Type. Al momento de cargar el programa un cuadro de diálogo adicional es abierto, si este aparece por primera vez es necesario presionar el botón de reset para programarla. Con el fin de evitar este procedimiento cada vez que se re programe la tarjeta, es necesario seleccionar la opción *Auto* del cuadro de diálogo (ver *Figura 5.7*).

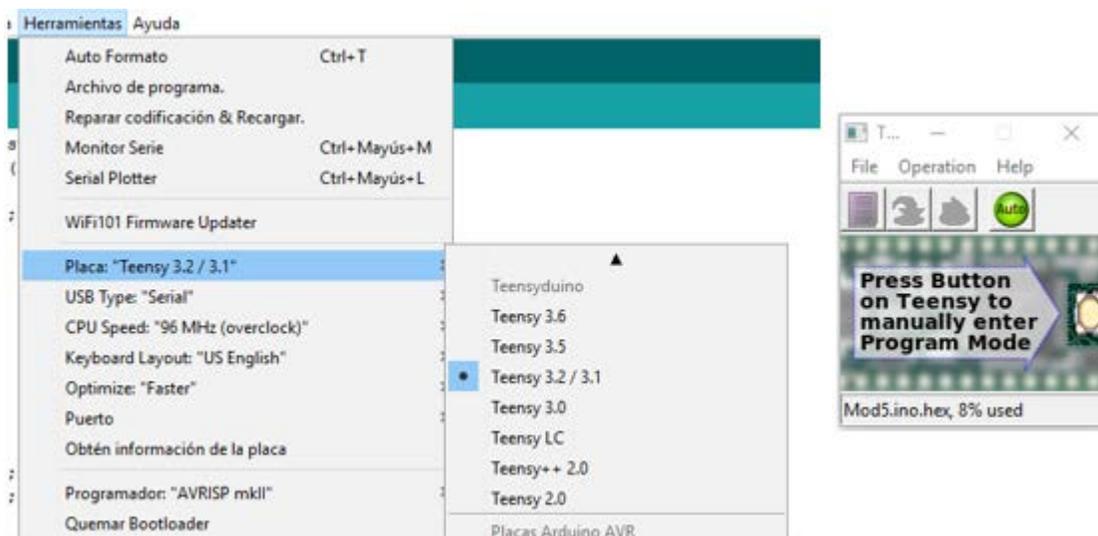


Figura 5.7. Programación de la Teensy 3.2 con Arduino
Izquierda: Pantallazo configuración en Interfaz Arduino. Derecha: Pantallazo cuadro de diálogo

5.2.3.Motores

Para el movimiento de las ruedas se emplean los mismos motores utilizados en el Mecabot 4.0. Las especificaciones de estos se observan en la *Figura 5.8*.



Peso: 15,8 g
Dimensiones: 23 x 12 x 29 mm
Torque @ 4.8V: 3,1 kg / cm
Torque @ 6.0V: 3,9 kg / cm
@ 4.8V Velocidad: 0.16 sec / 60 ° sin carga
@ 6.0V Velocidad: 0.13 sec / 60 ° sin carga
Engranaje: Metal gear rodamiento / bola

Figura 5.8.Especificaciones Servomotor Power HD 1810MG
Tomado de:[72]

En el Mecabot 4.0 se utilizaban dos servomotores para mover el pivote, en la versión 5.0 estos fueron reemplazados por uno sólo de mayor torque. Las especificaciones del motor en el pivote se muestran en la *Figura 5.9*.



Torque(4.8V): 15.5 kg-cm (215.3 oz/in)
Torque(6.0V): 17.0 kg-cm (236.1 oz/in)
Velocidad: 0.16 sec (4.8V) | 0.14 sec (6.0V)
Rango de operación: 4.8 ~ 6.0 DC Volts
Peso: 63.0 g (2.22 oz)
Tipo de rodamiento: rodamiento de bola x 2
Tipo de Motor : Motor DC
Temperatura de operación: -20°C~60°C
Frecuencia de trabajo: 1520µs / 50hz
Dimensiones: 40.7 x 20.5 x 39.5 mm

Figura 5.9.Especificaciones Servomotor HD 1501MG
Tomado de: [73]

5.2.4. Driver Pololu

El driver Pololu en el Mecabot 5.0 es el mismo que el usado en la versión 4.0. Debido a que el número de motores por semi módulo se redujo a tres, únicamente se utiliza un driver por módulo, en la versión 4.0 era necesario emplear dos drivers por módulo. Las especificaciones del Driver Pololu se muestran en *Figura 5.10*.



Dimensiones: 2.16 cm x 3.05 cm
Peso: 4.8 g
Canales: 6
Baud: 300-200000 bps
Voltaje mínimo de operación: 5 V
Voltaje máximo de operación: 16 V

Figura 5.10. Especificaciones de Driver Micro Maestro Pololu 6 canales
Tomado de: [74]

Para poder controlar el driver es necesario descargar la librería *PololuMaestro* para Arduino, así mismo, instalar el Maestro Control Center® de Pololu para poder configurar parámetros de comunicación, límites de Target, entre otros.

5.2.5. Regulador Pololu y Protection Circuit Module

El regulador, al igual que el driver, es exactamente el mismo que el empleado en la versión 4.0 del Mecabot, las características de este se ilustran en la *Figura 5.11*.



Dimensiones: 0.7" x 0.7" x 0.31"
Peso: 2.3 g
Voltaje mínimo de operación: 5.3 V
Voltaje máximo de operación: 36 V
Corriente de salida continua: 2.5 A
Voltaje de salida: 5 V
Protección contra voltaje reverso

Figura 5.11. Especificaciones Regulador D24V22F5 Pololu
Tomado de: [75]

Para la conexión en serie de las baterías LIPO se usa una tarjeta con circuito de protección (PCB) cuya función es: evitar daños por cortocircuito, cuidar las baterías de sobrecargas, de sobre descargas y de sobre corriente debido a la carga. Las especificaciones de la tarjeta, en conjunto con un diagrama de conexión se observa en la *Figura 5.12*. [76]

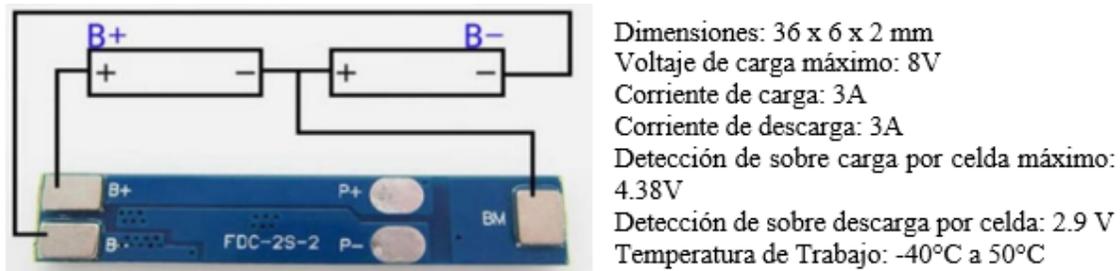


Figura 5.12. Especificaciones PCB FDC-2S-2
 Tomado de: [76][77]

En muchas ocasiones es necesario aplicar un voltaje de entrada en las terminales P+ y P- para activar la salida del PCB. Para permitir aquello se implementa un circuito conformado por un switch de 2 posiciones 6 pines el cual permite alternar entre cargar las baterías LIPO y alimentar la electrónica del Mecabot 5.0. Cuando el PCB requiera activar las terminales se cambia por un breve periodo de tiempo a modo carga y se regresa luego a alimentación.

5.3. Procedimiento de Ensamblaje de los módulos del Mecabot 5.0

A continuación, se hace una breve descripción del procedimiento general de ensamblado que se realizó:

5.3.1. Impresión 3D de las piezas y pegado

Debido a que la totalidad de las piezas del Mecabot 5.0 no ha sido impresa es necesario terminar de imprimir las partes faltantes. Se utiliza el software Repetier® para configurar los parámetros de temperatura, ancho de material, entre otros para la impresión.

Una vez impresas las partes faltantes es necesario pegar las piezas de las camas de la Teensy, Xbee y Driver Pololu. Antes de pegar las camas se introducen las tuercas en los agujeros de la cara que se va a adherir. Posteriormente con cloruro de metileno se pega la cama a una de las caras del cuerpo de uno de los dos semi módulos del Mecabot (ver *Figura 5.13*).



Figura 5.13. Fase de Pegado del Mecabot 5.0
*Pegado de las camas de la Xbee y el Driver Pololu a una cara del cuerpo de un semi módulo.
Elaboración propia*

Para el acople cara-cara es necesario cambiar la disposición de los componentes electrónicos adjuntos a las baterías con el fin de que los reguladores dispongan del espacio necesario para su instalación.

Así mismo, debido a que los agujeros de las tapas del cuerpo no coinciden con el de los pivotes (hecho que si ocurría en la versión 4.0) es necesario agregar otros dos pares de agujeros a las tapas para poder hacer el acople a caras laterales.

5.3.2. Ensamble de los elementos electrónicos

Para realizar el ensamble de los elementos electrónicos es necesario modificar la distribución del cableado Teensy-Xbee-Driver para que la alimentación se realice de manera separada a las tarjetas y a los actuadores. Se retira el puente existente en el Driver y se vuelve a soldar parte del cableado de alimentación.

Igualmente, se deben cortar los tornillos correspondientes a la cama del Driver a medida. Una vez realizado los pasos anteriores se pueden atornillar las tarjetas y los servomotores a los semi módulos del Mecabot 5.0. (ver *Figura 5.14*).



Figura 5.14. Fase de ensamble de elementos electrónicos del Mecabot 5.0.
Ensamble de Motores de pivote y rueda, Xbee, Driver Pololu y Teensy. Elaboración propia

Debido a que para el Mecabot 5.0 se emplea una tarjeta de protección de baterías LIPO, es necesario soldar el cableado correspondiente (ver *Regulador Pololu* y). La caja que contiene las baterías y sus dos reguladores es atornillada a una de las caras de los semi módulos del Mecabot tal y como se muestra en la *Figura 5.15*.



Figura 5.15 Fase de ensamble de elementos electrónicos del Mecabot 5.0.
Derecha: Soldando el circuito a la tarjeta PCB. Izquierda: Atornillando la caja de las baterías con la tapa de los circuitos. Elaboración propia

5.3.3. Ensamble de la estructura

A diferencia del Mecabot 4.0, la nueva versión permite ensamblar todas sus caras con tornillos, ello facilita cambiar de acople y retirar las partes electrónicas sin forzar la estructura en caso de alguna contingencia. El peso del módulo es de 587.29g, el costo aproximado de fabricación individual es de \$867.106. Las dimensiones del Mecabot 4.0 son de 6.5 cm x 7 cm x 19 cm. Las dimensiones de la versión 5.0 son de 8.5 cm x 7.5 cm x 22cm. El incremento de las dimensiones

se debe en gran parte a que el nuevo motor implementado en los pivotes es mucho más grande que su predecesor (ver *Figura 5.16*).

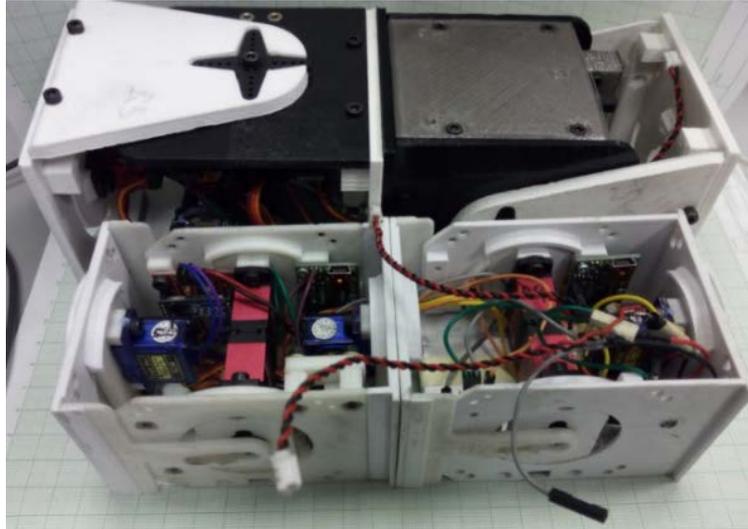


Figura 5.16. Diferencias de tamaños entre Mecabot 4.0 y 5.0.
La nueva versión del Mecabot 5.0 es más grande que su predecesor. Elaboración propia

Independiente de la clase de acople a implementar, primero se recomienda atornillar las partes correspondientes a los pivotes con las caras del cuerpo y posteriormente unirlos al armazón (ver *Figura 5.17*).

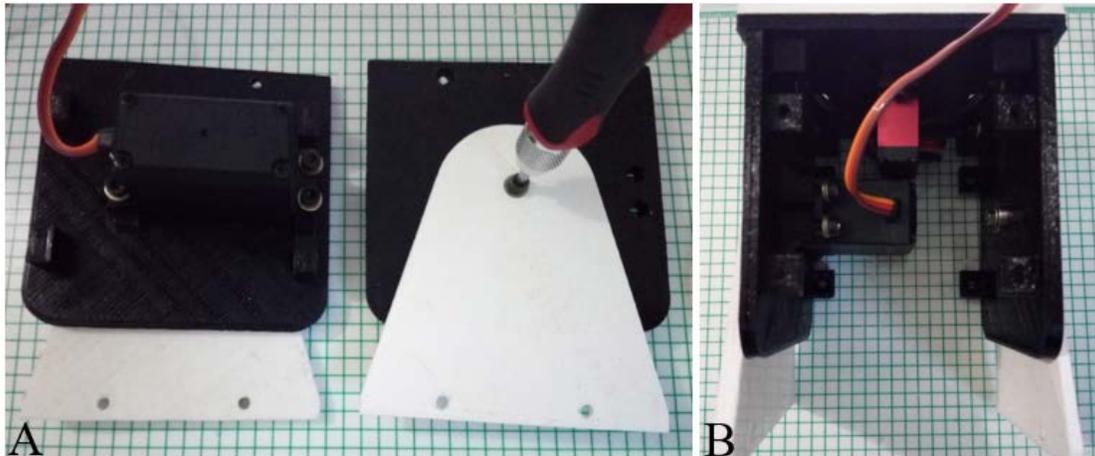


Figura 5.17. Fase de ensamble de la estructura del Mecabot 5.0.
Primero ensamblar los pivotes al cuerpo (A) y posteriormente acoplarlos a la estructura general (B). Elaboración propia

Una vez realizado el procedimiento anterior se debe atornillar el otro par de caras del cuerpo y finalmente poner las ruedas (ver *Figura 5.18*).

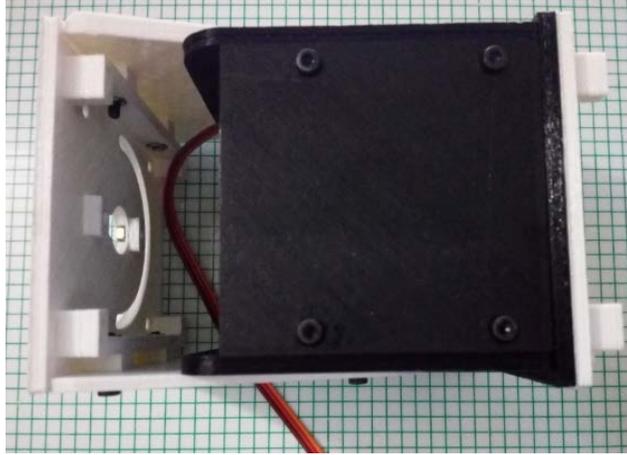


Figura 5.18. Parte final de fase de ensamble de la estructura del Mecabot 5.0
Elaboración propia

Si las ruedas requieren imanes con su respectivo motor, estas deben ser acopladas antes de realizar el ensamblaje.

5.4. Caracterización de los motores

Para la locomoción terrestre de la configuración tipo salamandra no es necesario utilizar los motores pequeños ubicados en las ruedas, este grado de libertad es restringido a una sola posición y se prosigue a la correspondiente caracterización de los servomotores de los pivotes.

Para la caracterización se emplea el Maestro Control Center® (ver *Componentes electrónicos en el Mecabot 5.0*). Es necesario modificar el Serial Settings con una baud rate de 115200 para que coincida con los parámetros de la comunicación serial (ver *Figura 5.19*).

Según el datasheet de los motores ([73]) el rango de movimiento se encuentra entre los 800-2200 μ s, en la práctica el rango de movimiento de los servomotores de los pivotes se encuentra en un *Target* entre los 500 y 2500 correspondiente a $\pm 90^\circ$, de acuerdo a ello se sitúa la posición cero del motor y se ensambla el pivote según ese cero.

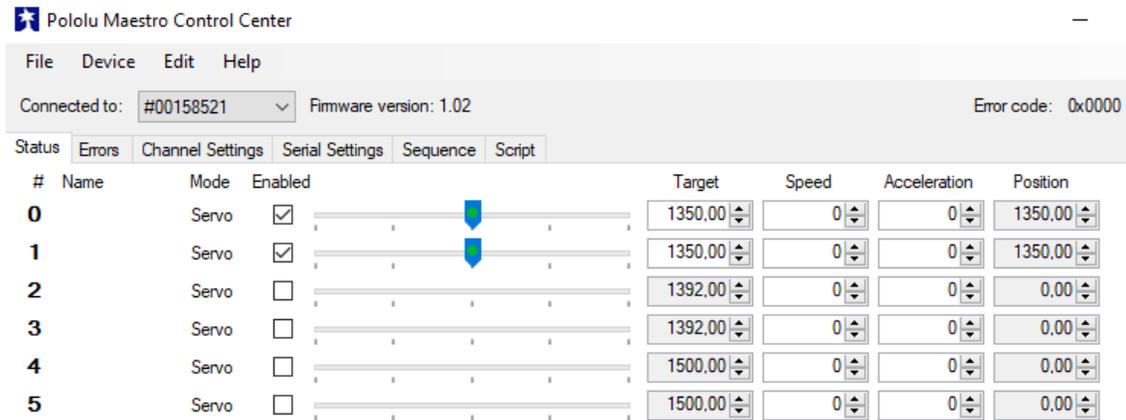


Figura 5.19. Caracterización a través del Maestro Control Center®
Pantallazo de la interfaz Pololu Maestro Control Center

Al probar el desempeño de los motores se evidencia que al aproximarse a un *Target* cercano a los 2500 automáticamente este comienza a oscilar, ello provoca que el servomotor se demore en alcanzar la posición deseada y a la larga causar problemas en la ejecución de las secuencias de locomoción.

Se decide cambiar el rango de *Target* a través de la opción *Channel Settings* (ver *Figura 5.19*), situar la apertura entre los 500 y 2200, con esta modificación se eliminan las oscilaciones. Al variar los límites de *Target* el cero cambia, por lo que es necesario soltar el pivote y situarlo en el nuevo cero.

Pese a que todos los motores son de la misma referencia, el cero en todos ellos no es siempre el mismo, variando entre un *Target* de 1300 y 1400. Esta diferencia es debida en parte a la orientación del piñón que se conecta con la cruz de apoyo ubicada en el pivote, al existir una pequeña variación en la orientación de estos piñones las muescas no quedan siempre en la misma posición y ello causa que al momento de acoplar la cruz esta pueda o no corresponder al cero prescrito (*target* de 1350).

El nuevo rango genera una apertura no mayor de los $\pm 78^\circ$, la variación del cero entre cada uno de los servomotores hace necesario caracterizar cada uno. En la *Figura 5.20* y en la *Figura 5.21* se ilustran las ecuaciones halladas para los dos pivotes del módulo 6.

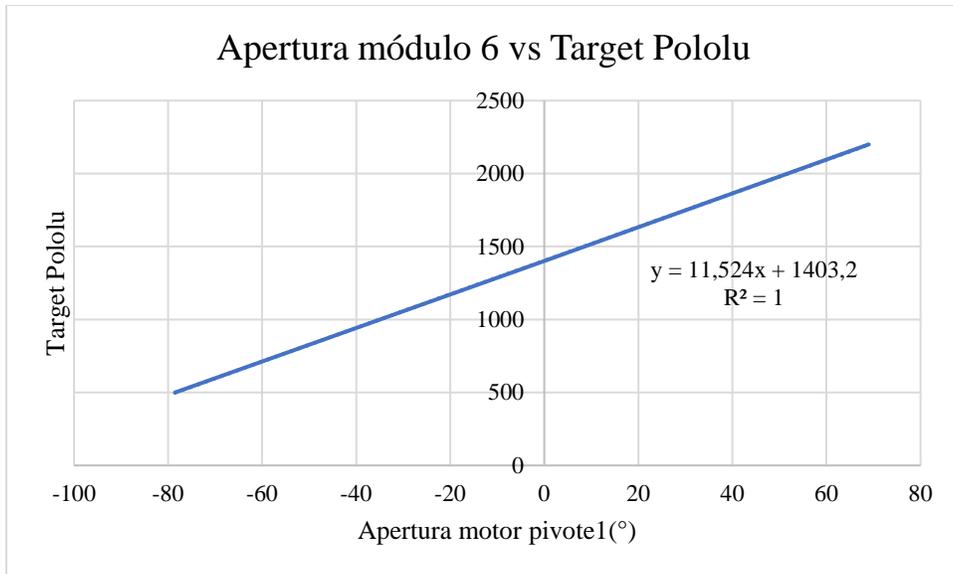


Figura 5.20. Caracterización motor pivote 1 módulo 6

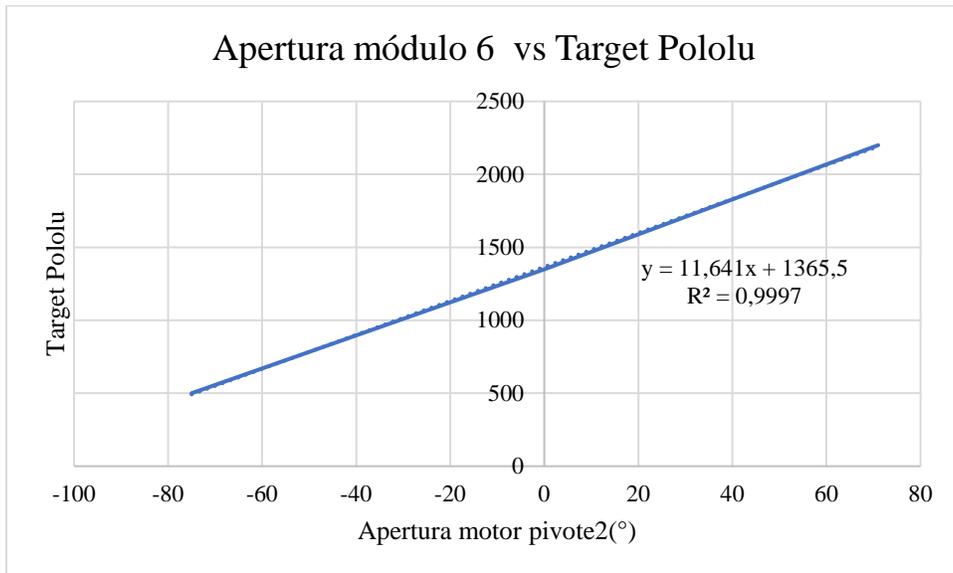


Figura 5.21. Caracterización motor pivote 2 módulo 6

Posterior al procedimiento mencionado se comprueba la caracterización de los motores con una breve programación en la Teensy, el motor realiza una secuencia entre distintas amplitudes y estas son medidas con un transportador.

Al emplear esta estrategia se hizo evidente que existía interferencia en el Pololu Maestro, la aceleración evidenciada no era la misma que había sido programada en el Maestro Control Center®. Se descubre que el motivo de esto radica en la unión existente entre la línea de poder y de alimentación en el driver, motivo por el cual esta es retirada y se emplean dos reguladores: uno para las tarjetas y otro para los motores.

Igualmente, factores como una impedancia por encima de lo normal en los cables de fuente (de 1.7Ω o más) en conjunto con una alimentación por debajo de los 6V pueden llegar a causar oscilaciones o vibraciones en el motor. Por tal motivo o se debe asegurar una impedancia baja en los cables de alimentación (a batería/fuente) o se debe emplear el voltaje máximo permitido para evitar oscilaciones.

5.5. Conclusiones

Para garantizar un correcto desempeño de los servomotores HD 1501MG se debe:

- Procurar una baja impedancia en los cables a conexión a poder (batería o fuente), de lo contrario alimentar a 6V.
- Evitar el puente de interconexión entre la alimentación del driver Pololu Maestro (6 canales) y su línea de alimentación a motores para obtener una aceleración acorde a lo programado en el Pololu Maestro.
- Procurar un rango de movimiento entre los 500-2200 μ s.

Capítulo 6

6. Pruebas de la arquitectura tipo salamandra en el Mecabot 5.0

En el presente capítulo se describen las pruebas correspondientes a: *locomoción en línea recta*, *giro abierto* y *rotación*. Los indicadores de rendimiento corresponden a: la velocidad en el caso de la *locomoción en línea recta* y *rotación*, al radio de circunferencia en el caso del *giro abierto*.

Debido a que el robot Mecabot 5.0 es pensado para operaciones de exploración, los movimientos son probados en distintas superficies, primeramente, en ambientes estructurados en el laboratorio, donde la superficie es totalmente plana, pero presenta diferentes grados de fricción (lisa o rugosa) y firmeza (blanda o dura). Posteriormente se prueba el robot en ambientes no estructurados fuera del laboratorio que presentan distintos grados de irregularidad: andén, pasto y rocoso, siendo el andén el terreno que menos irregularidades tiene.

6.1. Interfaz de usuario en Matlab®

La interfaz de usuario se desarrolla en Matlab®, la disposición de esta se muestra en la *Figura 6.1*. La interfaz tiene cuatro paneles para las funciones de comunicación, modalidades de movimiento y modificación de parámetros.

El panel de *comunicación* permite abrir y cerrar el puerto serial ligado a la Xbee (ver *Figura 5.5*). En este se observa el número del puerto COM y su estado.

El panel de *modalidad manual* ejecuta el movimiento hasta una apertura especificada en un sólo módulo y pivote determinado, este panel permite probar ejecuciones simples y observar la cadena de 5 bits enviada.

Las secuencias de movimientos se seleccionan a través del panel de *modalidad de movimiento*, por medio de *Parámetros variables* se cambian los parámetros de control en estas secuencias.

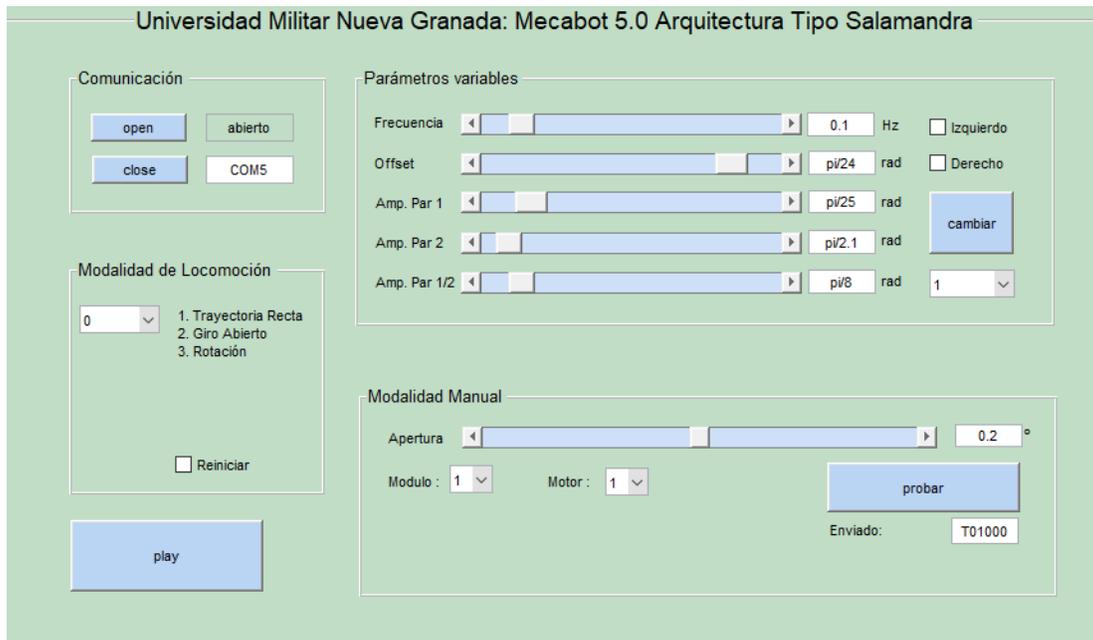


Figura 6.1. Interfaz de usuario en Matlab®
Pantallazo de la interfaz de usuario creada en Matlab ®

6.2. Pruebas preliminares con la Interfaz de usuario

Una vez planteada la interfaz de usuario se prosiguen a realizar pruebas diagnósticas en distintos ámbitos:

6.2.1. Algoritmo de Control

La programación de la Teensy emplea un control descentralizado (ver *Anexo D*), la función del computador es el de indicar que acciones debe realizar el robot según sea la modalidad a ejecutar (ver *sección Xbee S2*).

La elección entre un control centralizado o descentralizado se realiza después de analizar las estrategias llevadas a cabo en las anteriores tesis: la implementación de la locomoción tipo serpiente y oruga emplea un control centralizado el cual depende exclusivamente de los cálculos

realizados en el computador. La locomoción tipo rueda y hexápoda emplea tabla de datos y su ejecución no depende de algún cálculo realizado por el computador.

En la presente tesis se usan los generadores sinusoidales, estos son ejecutados de manera centralizada en la locomoción tipo oruga y serpiente, sin embargo, la cantidad de cálculos que debe realizar y enviar el computador a cada uno de los módulos hace poco deseable emplear esta estrategia. Si a aquello se suma el hecho de que cada módulo dispone de una unidad de cálculo de altas prestaciones es preferible ejecutar un control descentralizado.

El principal reto de abordar este tipo de control empleando generadores sinusoidales radica en el hecho de lograr una correcta coordinación entre los generadores de cada uno de los módulos, para ello en la programación se incluye una modalidad exclusiva de manipulación de tiempo (ver *sección Xbee S2*). Con la modalidad de tiempo se busca aprovechar la conexión punto a multipunto para inicializar la interrupción interna en cada Teensy mediante una orden serial enviada a todas ellas una sola vez al mismo tiempo.

Para comprobar si esta estrategia es o no factible, se realiza una modificación al código base en dos Teensy, se programan dos generadores con la misma fase, uno en cada tarjeta. La señal de cada generador es direccionada a la salida DAC y observada mediante un osciloscopio. Los resultados muestran que efectivamente ambas señales se encuentran en fase tras la orden serial. (ver *Figura 6.2*).

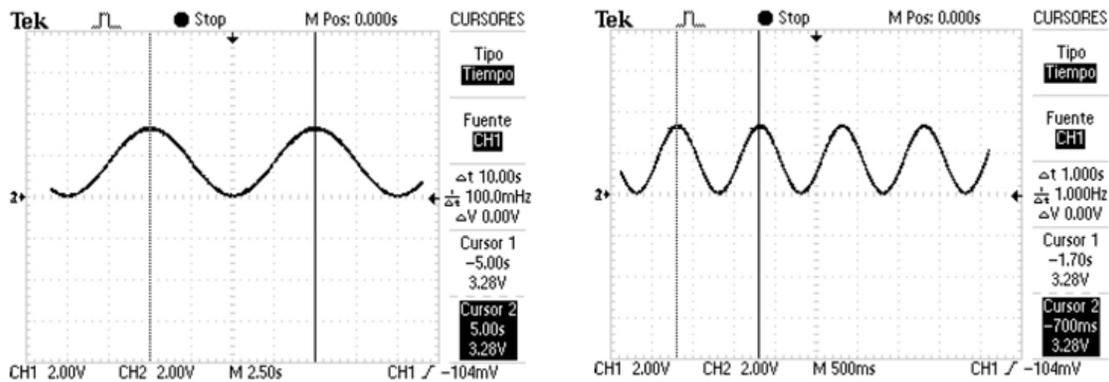


Figura 6.2. Generadores sinusoidales correctamente coordinados

Ambas señales parecen una sola. A la izquierda: las dos señales a 0.1Hz. A la derecha: las dos señales a 1Hz. Elaboración propia

Sin embargo, debido a que la orden de inicialización debe ser enviada una sola vez a todos los módulos pronto surge una interrogante: ¿qué pasaría si algún módulo nuevo necesita ser integrado al sistema? o ¿qué pasaría si se desconectara uno de los módulos ya existentes y se requiriera una reconexión?

Para poder evidenciar la influencia de estos posibles escenarios se realiza otra prueba, se desconecta una de las Teensy mientras que la otra permanece habilitada por la fuente de poder. La Teensy que se ha desconectado es nuevamente alimentada y el comando de inicialización es enviado a ambas tarjetas. Los resultados de la *Figura 6.3* muestran que las señales pierden coordinación, esto debido a que el contador de *tiempo* asociado a la interrupción no es inicializado en las dos Teensy. Adicionalmente, el comando de *begin()* empleado para comenzar la ejecución de las interrupciones no tiene el efecto de reiniciar el momento justo en el que la tarjeta comienza a llevar a cabo el conteo para desborde en la interrupción. Mientras la Teensy que se ha desconectado sufre un reset total de sus parámetros, la otra tarjeta que seguía en funcionamiento no lo hace.

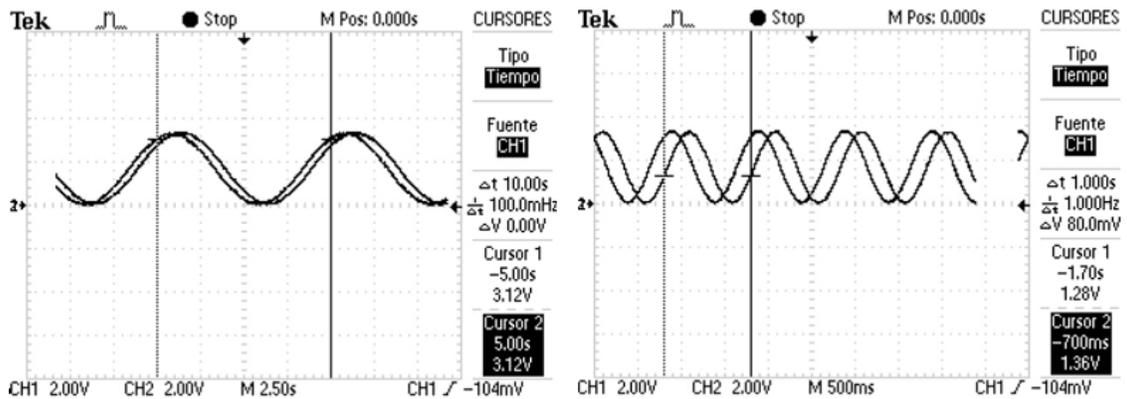


Figura 6.3 Generadores sinusoidales no coordinados

A la izquierda: las dos señales a 0.1Hz. A la derecha: las dos señales a 1Hz. Elaboración propia

Se implementa entonces el comando de reset a través de código ([78]) en cada una de las Teensy. Este es agregado de modo tal que reinicialice todas las tarjetas conectadas al maestro AT al enviar la orden comando desde el computador una sola vez a todos los dispositivos comunicados. Con el reset se realizan las pruebas de manera exitosa, inclusive en la ejecución de generadores sinusoidales por suma de senos (ver *Figura 6.4*).

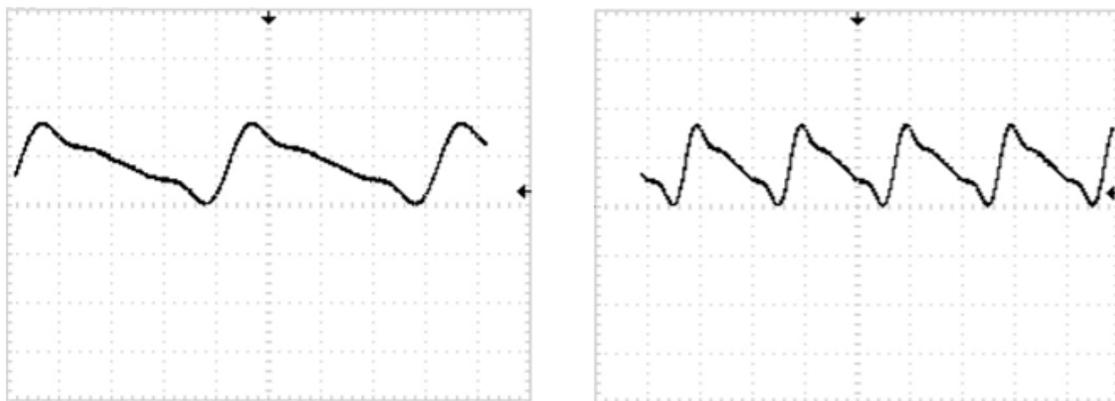


Figura 6.4 Generadores sinusoidales por suma de senos coordinados después de reconexión. Las dos señales de los generadores se encuentran coordinadas como si se tratara de una sola. Izquierda: Frecuencia 0.1HZ. Derecha: Frecuencia 1HZ. Elaboración Propia

Una vez garantizada la correcta coordinación de los generadores, incluso después de una reconexión, se realizan las pruebas con variación de parámetros de control. Los generadores siguen coordinados permitiendo cambiar el bias, el offset, la amplitud e incluso la frecuencia. (ver *Figura 6.5*).

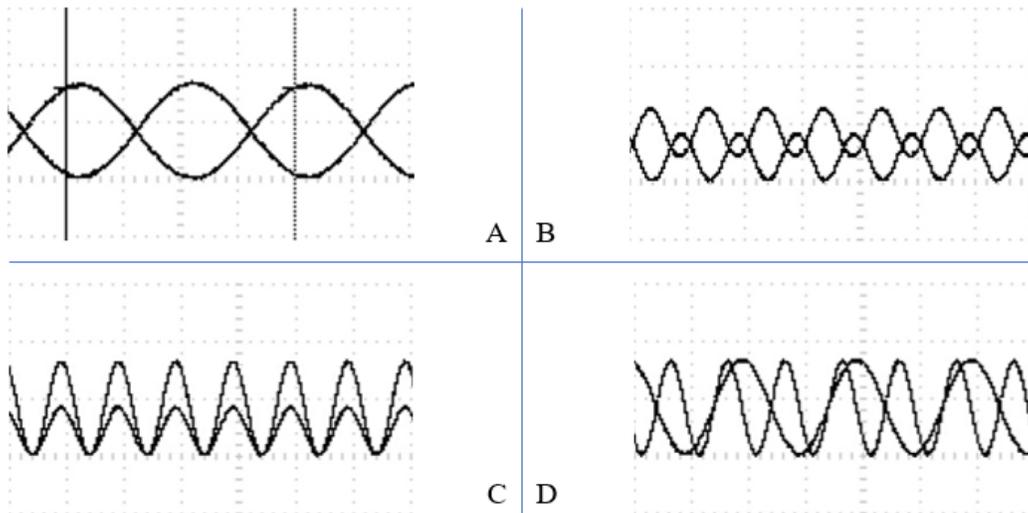


Figura 6.5. Generadores sinusoidales coordinados con variación de parámetros de control
A: Diferencia de bias de 90°. B: Diferencia de offset con bias. C: Diferencia de amplitud. D: Diferencia de frecuencia (1Hz y 0.5Hz). Elaboración Propia

Comprobado el correcto funcionamiento del control se prosigue a probar el código base (ver *Anexo D*) en más módulos. Se ejecuta la secuencia correspondiente a la pierna 1 a distintas frecuencias entre 0.1Hz y 1Hz. Efectivamente todos los seis módulos se encuentran coordinados (ver *Figura 6.6*).

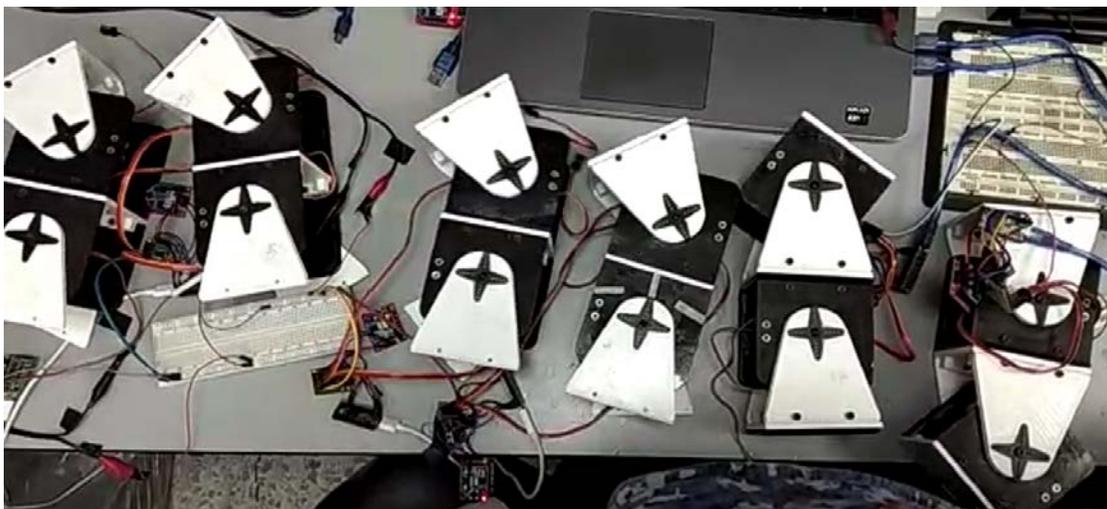


Figura 6.6. Pruebas preliminares de coordinación
Los seis módulos empleados en la arquitectura se encuentran coordinados. Elaboración Propia

De estas últimas pruebas se observa que debido a que los cálculos no dependen exclusivamente del computador, si por algún motivo se llega a perder comunicación con el maestro AT, los módulos continúan con la última secuencia indicada.

6.2.2. Pruebas diagnóstico de la configuración cuadrúpeda ensamblada

Una vez garantizada la coordinación, se prosigue a ensamblar la estructura tipo cuadrúpeda y a realizar pruebas de diagnóstico, en ellas se observa que:

- El robot es incapaz de mantener la pata en transición elevada del suelo: Este hecho se evidencia incluso cuando el polígono de sustentación produce condiciones de estabilidad. La causa que se atribuye a este fenómeno es la falta de rigidez del robot: existe cierto nivel de juego entre el pivote y el cuerpo de cada módulo, adicional, debido al incremento de peso en los módulos, los motores de las ruedas no son suficientes para inmovilizar la columna en el plano coronal (ver *Figura 3.18*).

Estos dos aspectos en conjunto con el hecho de que el ABS puede llegar a flexionarse conllevan a que al aplicar peso de un lado de la columna (cuando hay fase de transición) esta se alcance a flectar en el plano coronal (ver *Figura 3.18*), motivo por el cual ni la columna ni las piernas llegan a estar paralelas al suelo.

- El robot presenta en algunas ocasiones dificultad para ponerse de pie por si solo y disminución en el movimiento de los eslabones de la columna, no alcanzando el ángulo de apertura deseado: Dichos escenarios se presentan en superficies no lisas, lo cual parece indicar que el torque de los motores es suficiente para mover la estructura, pero no para ejercer la fuerza necesaria en condiciones de alta fricción o que requieran esfuerzo.

Teniendo en cuenta que en la anterior versión (Mecabot 4.0) se documentaron interferencias con el regulador de voltaje debido a la limitación de corriente, este aspecto es revisado. Sin embargo, es descartado al comprobar que la corriente nominal consumida por cada módulo no supera los 2.32A, salvo en condiciones extremas (1 Hz y sobre superficie rugosa) donde la corriente puede alcanzar picos espontáneos de hasta 3.1A, pese a ello el regulador permite un paso de corriente mayor a 2.5A durante estos periodos breves de tiempo.

Frente a estas dos situaciones se busca: lograr una mayor rigidez y reducir en lo posible el esfuerzo de los eslabones de la columna. Para lograr lo primero se inmovilizan las ruedas de los eslabones de la espina con tornillos, se dejan las tapas laterales de estos módulos y se cambian los tornillos de las cruces de los servos con el fin de que estos queden más ajustados al armazón, ello causa que el movimiento en el plano coronal sea menor, pero no lo elimina por completo ya que pese a todo sigue presente el juego entre pivote y cara.

La disminución del movimiento en el plano coronal permite aliviar parte del esfuerzo de los motores de la columna, adicional a lo anterior se reduce el peso retirando las tapas laterales en

los módulos de las patas y las cajas de las baterías. Sin embargo, debido a que el robot es incapaz de mantener la pata en transición elevada del suelo, la fricción que genera el cuerpo del robot con el suelo podría llegar a disminuir la apertura alcanzada por los eslabones de la columna. Aperturas pequeñas conllevan a la disminución consecuente del movimiento en las piernas (ver *Cinemática de la columna* y *Cinemática de las piernas*) y por ende a la disminución de la velocidad.

Frente a la imposibilidad de lograr un armazón más rígido se opta por buscar reducir en lo posible la fricción del robot con el suelo. Se experimenta con distintos aditamentos, se realizan pruebas poniendo rodachines, ruedas de Icopor e incluso elevando al robot por medio de ruedas fijas alargadas en lugar de las convencionales ruedas con imanes (ver *Figura 6.7*).



Figura 6.7 Algunas pruebas con aditamentos en el Mecabot 5.0. *Ruedas de Icopor (izquierda), ruedas fijas alargadas (centro) y robot sin aditamento sobre superficie en fomi (derecha). Elaboración Propia.*

El robot es probado en una superficie lisa (piso del laboratorio) y en una superficie que presente mayor fricción (fomi). Se testea su comportamiento sin ningún aditamento y con aditamentos: con ruedas de icopor, con ruedas de icopor y elevado, con rodachines, con rodachines y elevado, elevado únicamente.

En superficie lisa, las ruedas de icopor o los rodachines mejoran la capacidad de apertura de la columna (esté o no elevado el robot). En general, elevar el robot permite compensar en parte el movimiento de la columna en el plano coronal, a pesar de que con este método el cuerpo no entra en contacto con el suelo si es necesario reducir la fricción o con ruedas de icopor o con rodachines.

Sobre el fomi, los métodos que no son combinados con una elevación del robot conllevan a una menor apertura en la columna. De las tres estrategias de elevación (con ruedas de icopor, con rodachines, elevado únicamente) la que mejor desempeño presenta en fomi es la de rodachines, está permite alcanzar las mayores aperturas en la columna. A partir de lo anterior, se opta por

emplear en las pruebas de los siguientes apartados los rodachines con el robot elevado siempre que sea posible.

6.2.3. Pruebas diagnóstico con alimentación a baterías

Debido a que el robot será probado en terrenos no estructurados se realizan pruebas diagnósticas con alimentación a baterías, pronto se observa que el robot es capaz de moverse correctamente en la superficie lisa, pero al momento de ser puesto en las superficies blanda o rugosa, este se apaga ipso facto. Contrario a lo que se creería, el fenómeno no es debido al regulador pololu, pues como se ha mencionado antes este permite sobre picos de corriente por breves lapsos de tiempo.

Si es posible que parte del comportamiento se deba a la implementación del PCB (ver *Regulador Pololu y Protection Circuit Module*) ya que no permite corrientes superiores a 3A, pero teniendo en cuenta que este fenómeno se presenta también en la versión Mecabot 4.0 que no dispone de placa PCB es posible que parte del problema radique también en las baterías.

Las baterías tipo lipo empleadas en ambas versiones de Mecabot son de 3.7V @ 3000mAh, pero disponen de una máxima corriente de descarga a 1C. Se mide el voltaje de las baterías antes y después de que el robot se apague, en el peor de los casos el voltaje llega a verse disminuido en 1.17V, a comparación de 0.1V cuando el robot no se apaga sobre superficie lisa (transcurrido un minuto de operación). Ello parece indicar que el incremento de consumo de corriente producto de ambientes que demanden mayor esfuerzo descarga las baterías extremadamente rápido conllevando a que el PCB se apague para proteger las baterías.

Si el robot dispusiera de baterías de mayor capacidad y corriente de descarga es posible que este fenómeno no vuelva a presentarse en el Mecabot, aquella hipótesis es comprobada al probar el robot con un arreglo nuevo de alimentación a dos baterías tipo lipo de 5200mAh con 35 C cada una. Cada una de estas baterías dispone de cuatro celdas, por canal de salida de 7.65V se conecta o un par de patas o un módulo de la columna. El robot no se apaga en ningún momento independientemente de la superficie.

Teniendo en cuenta que este tipo de baterías incrementan el peso del Mecabot, aumentando por ende el torque requerido y que el diseño no ha sido pensado para un tamaño diferente de baterías. Estas dos baterías tipo lipo son ubicadas por fuera del robot.

6.3. Implementación locomoción recta

Las pruebas de locomoción recta se realizan variando la frecuencia de los generadores sinusoidales y midiendo el tiempo que tarda el robot en recorrer 1 m. Las primeras pruebas se realizan dentro del laboratorio en tres distintas superficies estructuradas: lisa (piso del laboratorio), blanda (fomi) y rugosa (lija 220). Los resultados se muestran en la *Figura 6.8*.

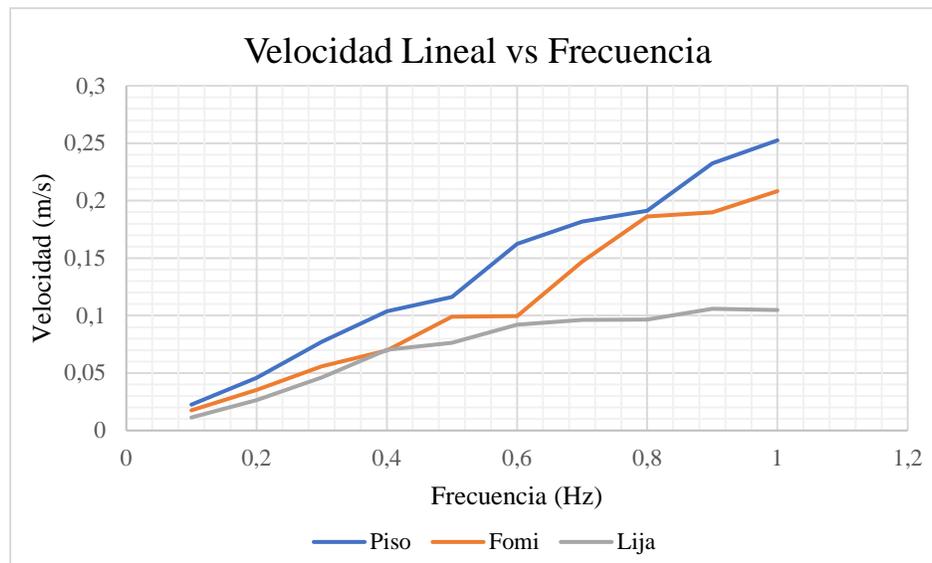


Figura 6.8 Locomoción recta pruebas físicas en terrenos estructurados: Relación entre la frecuencia y velocidad.

Al igual que lo evidenciado en la simulación, un incremento en la frecuencia provoca aumento en la velocidad. A nivel general entre más fricción exista entre el robot y la superficie, menor será la velocidad. En superficie lisa la velocidad máxima resultante a 1Hz equivale a la simulada a 2Hz. Entre mayor sea la facilidad de apertura, en especial en los eslabones de la columna, mejores son los resultados.

En las pruebas con la superficie blanda a altas frecuencias se observa dificultad del robot para moverse, ello debido a que entre más rápido sea el movimiento, más material arrastra el robot con las patas. En la superficie rugosa se observa una disminución del ángulo de apertura de la columna ($\pm 10^\circ$ aproximadamente) debido a la fricción, a pesar de ello, esta reducción no desvía en gran medida la locomoción en línea recta en el trayecto de 1m.

Durante las pruebas, algunas cruces de plástico de los servomotores fallaron mecánicamente en las esquinas, se descubre que se debe a la existencia de juego entre el pivote y estas, por lo que es necesario limitar dicho movimiento entre ambos componentes para estas pruebas y la de los siguientes apartados.

Una vez hechas las mediciones en superficie estructuradas se realizan las pruebas en superficies no estructuradas por fuera del laboratorio. Se escogen tres distintas superficies con distintos grados de dificultad: andén, pasto y rocoso, donde el andén será la superficie con menos irregularidades y por ende la más fácil de sortear. Durante las pruebas se observa que los rodachines con el robot elevado se hunden dificultando el movimiento en las superficies terrosas, por lo que estos son utilizados únicamente en el andén. Los resultados se observan en la *Figura 6.9*.

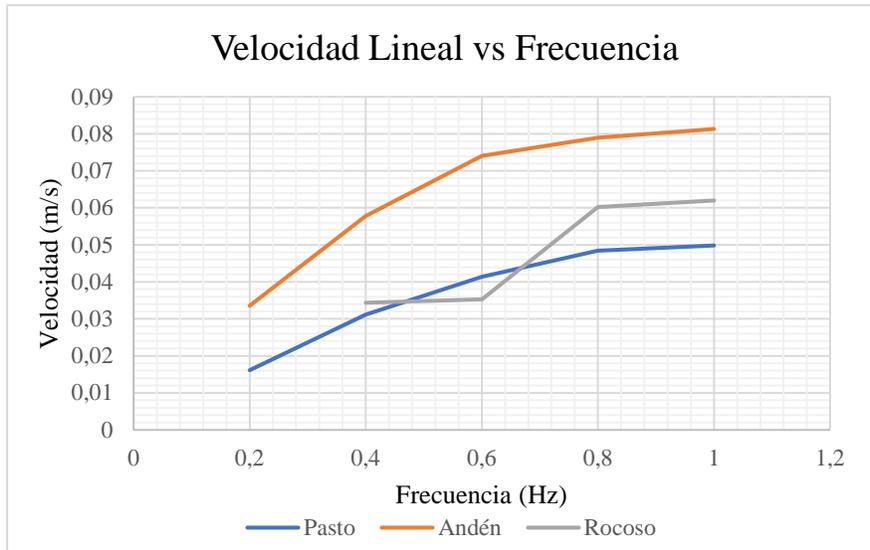


Figura 6.9. Locomoción recta pruebas físicas en terrenos no estructurados: Relación entre la frecuencia y velocidad

En general las velocidades alcanzadas en superficies no estructuradas son menores incluso a las velocidades alcanzadas sobre la superficie rugosa estructurada, presentándose una disminución de velocidad mayor en el pasto, en este terreno el robot es continuamente frenado no sólo debido a los altibajos de la superficie sino a las fibras de pasto y raíz. A una frecuencia de 1Hz el robot tiende a resbalarse en el pasto.

El perfil de comportamiento del robot en superficie rocosa no es tan suave como el presentado en las otras dos superficies (ver *Figura 6.9*), aquello debido a que el robot puede llegar a patinar sobre las rocas del terreno. Nótese además que las bajas frecuencias no son probadas en esta superficie, a nivel general se observa que el desempeño a bajas frecuencias es sumamente lento y no se recomienda.

Si se comparan las máximas velocidades alcanzadas en cada una de las superficies con respecto a la que mejor desempeño presenta que es la lisa se tiene que: en superficie blanda la máxima velocidad alcanzada equivale a un 82,5%, en rugosa a un 41,5%, en andén a un 32,2%, en rocoso a un 24,5% y en pasto a un 19,74%.

6.4. Implementación giro abierto

Las pruebas de locomoción de giro abierto se realizan variando el offset de los generadores sinusoidales de la columna y midiendo el radio descrito por el robot. Debido a que por simulación se comprueba que el reducir en un factor de 0.8 la amplitud de la espina mejora el comportamiento del robot las pruebas se realizan bajo estas condiciones (ver apartado 4.4.3).

Las pruebas se hacen para el giro abierto en dirección izquierda, sobre superficie lisa (piso del laboratorio) y con frecuencia fija de 0.5 Hz. Al robot se adhiere un marcador de modo tal que a medida que vaya describiendo la circunferencia marque su trayectoria, después de que el robot halla descrito dos vueltas completas se mide el diámetro descrito en cada una de las dos. Los resultados se muestran en la *Figura 6.10*.

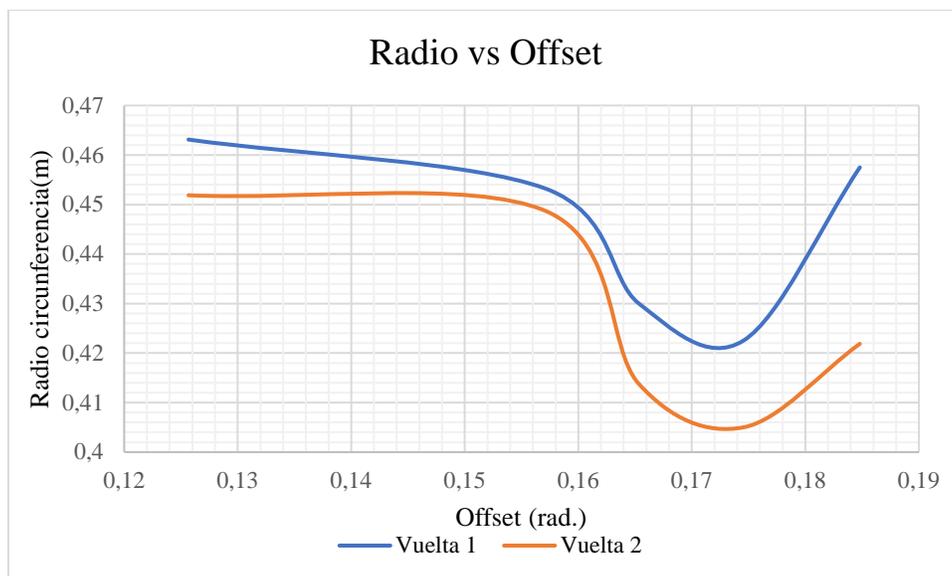


Figura 6.10 Locomoción giro pruebas físicas: Relación entre la offset y radio en diferentes vueltas

Al igual que en la simulación, a medida que aumenta el offset el radio de la circunferencia descrita disminuye. En las pruebas físicas se alcanza un radio mínimo por debajo del simulado y la variación que este tiene en función al offset es menor. A diferencia de la simulación, el robot registra un aumento en el radio con un offset de $\pi/17$ y no de $\pi/16$. Esta situación podría tener su explicación en que las condiciones simuladas para el robot son ideales, siendo considerado perfectamente rígido.

Durante las pruebas físicas se hace evidente la influencia que el factor rigidez tiene en el movimiento: el pivote en su cara superior está sujeto al cuerpo a través del motor, en su cara inferior lo hace por medio de un arreglo rodamiento-tuerca-tornillo. Debido a la flexión que aún sufre la columna y la escápula en el plano coronal, este arreglo con el paso del tiempo se va

aflojando, a medida que esto ocurre el pivote de la cara inferior pierde agarre y el juego entre el pivote y la cara del módulo aumenta, con ello se pierde la precisión de la totalidad del movimiento ya que las piernas tienden a abrirse o contraerse más. Debido a esta variación el grado de diferencia entre la primera y la segunda vuelta es de máximo $\pm 8\text{cm}$, este se presenta en el offset de $\pi/17$.

Para las pruebas en terreno no estructurado se decide tomar los datos de una sola vuelta únicamente en la primera mitad de esta, aquello debido a que entre más difícil sea el terreno más rápido se aflojará el arreglo rodamiento-tuerca-tornillo y por ende los resultados serían más dispares en la segunda vuelta. Los resultados se muestran en la *Figura 6.11*.

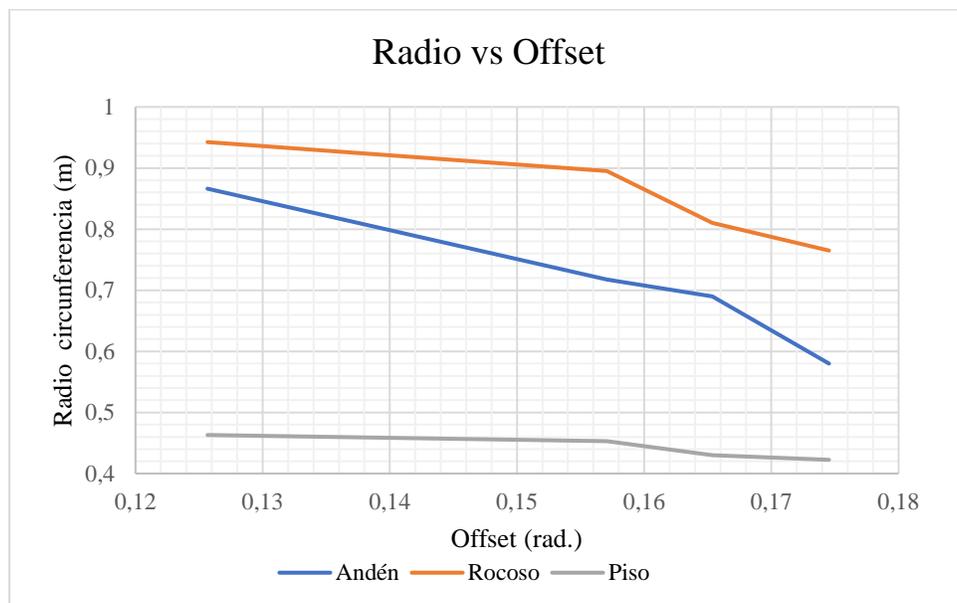


Figura 6.11. Locomoción giro pruebas físicas: Relación entre la offset y radio

Las pruebas se realizan para un offset máximo de $\pi/18$. Nótese que entre más dificultad presente el terreno mayor será radio alcanzado en la circunferencia, ello debido a que la columna no alcanza a doblarse lo suficiente y que las irregularidades del terreno tienden a desviar el robot. Los radios mínimos alcanzados en la primera vuelta son de 42.25 cm en piso, 58cm en andén y 76.5 cm para rocoso.

6.5. Implementación rotación

Al igual que las pruebas de locomoción en línea recta se varía la frecuencia de los generadores sinusoidales y se mide el tiempo que toma el robot en recorrer 1m sobre tres distintas superficies: lisa (piso del laboratorio), blanda (fomi) y rugosa (lija 220). La rotación se realiza en sentido horario y antihorario. Los resultados se muestran en la *Figura 6.12* y la *Figura 6.13*.

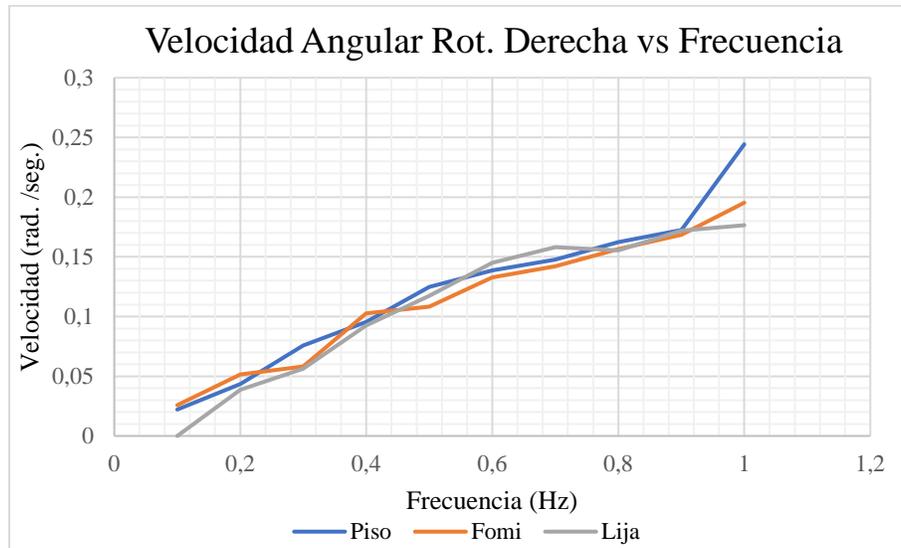


Figura 6.12. Locomoción rotación derecha pruebas físicas: Relación entre la frecuencia y velocidad.

Según lo evidenciado en la simulación y en las pruebas físicas, un incremento en la frecuencia efectivamente provoca aumento de la velocidad angular. La velocidad sobre superficie lisa a 1Hz es similar a la alcanzada en simulación a 0.7Hz.

En general en ambos sentidos de giro el comportamiento del robot es bastante similar en la superficie lisa (ver *Figura 6.13*), entre más fricción aporte la superficie los resultados tienden a diferir un poco más. Para piso liso la media se encuentra en ± 0.0068 rad/s, mientras que para fomi esta aumenta a ± 0.02026 rad/s. Se presume que esta diferencia entre ambos sentidos de rotación aumenta conforme sea la dificultad que presenta el robot para moverse en un entorno, sin embargo, esta no es muy grande.

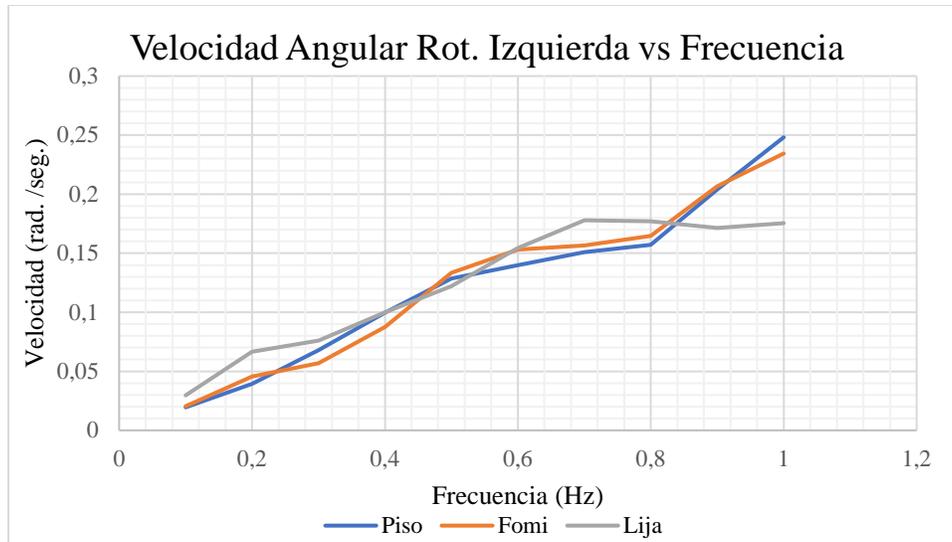


Figura 6.13. Locomoción rotación izquierda pruebas físicas: Relación entre la frecuencia y velocidad.

A diferencia del movimiento en línea recta, una mayor fricción no decrementa tanto la velocidad, siempre y cuando, esta no sea excesiva. Es importante resaltar que tanto en fomi como en lija el eje de giro se desvía en algunas ocasiones en función de la fricción con el material, siendo en lija más frecuente este suceso. En superficie rugosa se evidencia una mejora en velocidad a frecuencias medias altas, a frecuencias bajas el movimiento es muy lento siendo nada recomendable emplearlas (ver *Figura 6.12*).

Para la superficie rugosa se encuentra que el desempeño del robot puede ser mejorado variando el ángulo de apertura del segundo grado de libertad de las piernas, este procedimiento se realiza en la rotación izquierda para frecuencias menores o iguales a 0.4Hz. En la *Figura 6.14* se observa el comportamiento detallado con un ángulo de apertura de 45° en la rotación derecha y uno de 40° en la rotación izquierda.

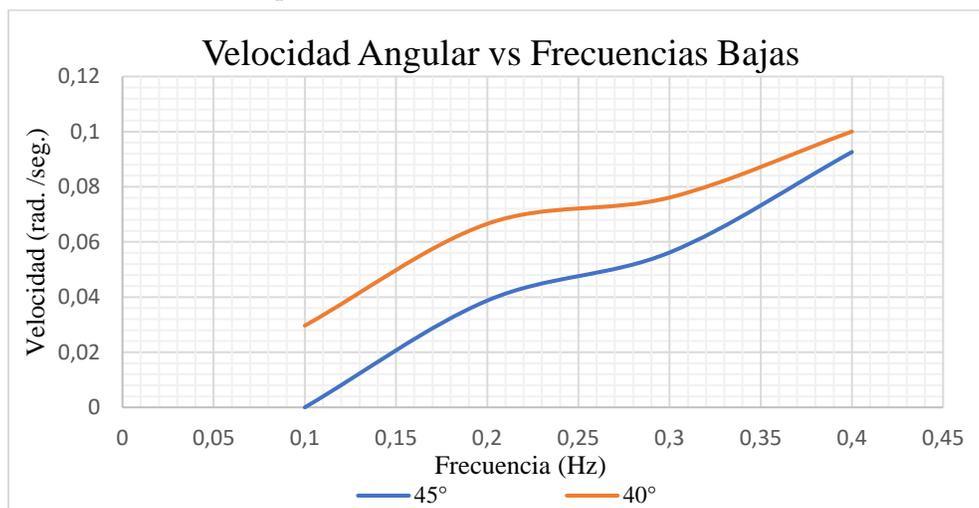


Figura 6.14. Comparación entre la velocidad en rotación según el ángulo del 2DOF. *Entre mayor sea el ángulo menor es la velocidad a bajas frecuencias.*

Entre menos lisa sea la superficie es aconsejable reducir el ángulo de apoyo de las piernas. Este fenómeno es más evidente en la rotación que en la locomoción recta ya que todo el peso se soporta sobre un par diagonal de piernas.

Las pruebas sobre las superficies no estructuradas son realizadas teniendo en cuenta este fenómeno, por lo que los ángulos del 2DOF serán de 40° . Debido a que a nivel general los resultados obtenidos en ambos sentidos de rotación son similares, las pruebas en terrenos irregulares se realizan sólo para rotación derecha. Los resultados se muestran en la *Figura 6.15*.

El mejor resultado en superficies no estructuradas corresponde a la superficie que menor irregularidad presenta (andén), los resultados tanto en pasto como en terreno rocoso son similares salvo a frecuencias altas, esto debido a que en estas condiciones el robot se resbala un poco sobre el pasto. Si se comparan las máximas velocidades alcanzadas en cada una de las superficies con respecto a la que mejor desempeño presenta que es la lisa se tiene que: en andén la máxima velocidad alcanzada equivale a un 73,6%, en rocoso a un 45,1% y en pasto a un 35,28%. Nótese que esta diferencia es menor comparada a la locomoción en línea recta, ello debido a que en este caso una disminución en la apertura de la columna no tiene ningún impacto adicional.

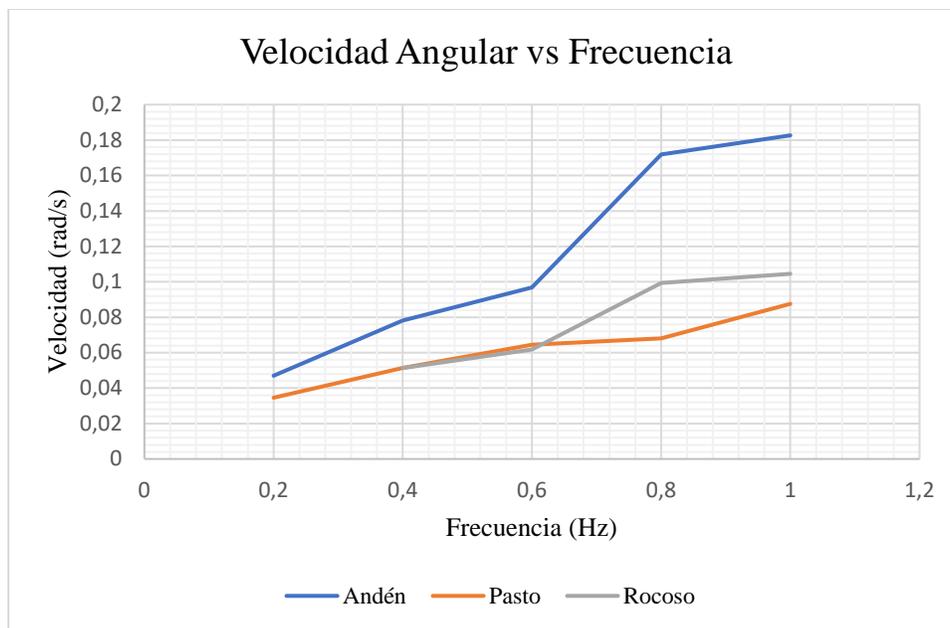


Figura 6.15. Locomoción rotación derecha pruebas físicas en terrenos no estructurados: Relación entre la frecuencia y velocidad

6.6. Conclusiones

En lo que respecta a las pruebas físicas para la locomoción en línea recta se evidencia que:

- El aumento de la frecuencia efectivamente provoca el incremento de la velocidad lineal del robot.
- La irregularidad del terreno afecta el desempeño del robot provocando la disminución de la velocidad conforme sea la dificultad de este.
- Las bajas frecuencias menores de 0.4 Hz no son recomendables en terrenos muy irregulares o muy rugosos.

De las pruebas físicas en giro abierto se observa que:

- El incremento del offset efectivamente provoca la disminución en el radio de la circunferencia descrita.
- El radio mínimo de giro alcanzado es de 42.25 cm por lo que el giro abierto es efectivamente útil para rodear obstáculos grandes, pero también para rodear obstáculos de tamaño intermedio en superficies con poca irregularidad.
- Este método de giro requiere precisión en los movimientos del robot y es influido por variables externas tales como la rigidez de este y los altibajos en el terreno.

De las pruebas físicas en la rotación se concluye que:

- El aumento de la frecuencia efectivamente provoca el incremento de la velocidad angular del robot.
- La irregularidad del terreno puede llegar a desviar el eje de rotación y provocar disminución en la velocidad.
- Las bajas frecuencias (por debajo de 0.4 Hz) no son recomendadas en superficies difíciles salvo que se modifique el ángulo de apertura del 2DOF en las piernas y que sea estrictamente necesario.

Capítulo 7

7. Conclusiones y Recomendaciones a trabajos futuros

A partir del comportamiento evidenciado en la simulación en el ambiente virtual Webots, se logra programar exitosamente una secuencia estándar bioinspirada de avance y de giro abierto y una secuencia de giro cerrado para la configuración cuadrúpeda ensamblada con el Mecabot 5.0.

A partir del comportamiento evidenciado al variar los parámetros de control en la simulación en el ambiente virtual Webots, los indicadores de rendimiento para la locomoción en línea recta y rotación son la velocidad lineal y angular en función de la variable *frecuencia*, al ser esta la que mayor influencia tiene.

A partir del comportamiento evidenciado al variar los parámetros de control en la simulación en el ambiente virtual Webots, el indicador de rendimiento para el giro abierto es el radio de la circunferencia descrita en función del *offset*, garantizando su mayor influencia con un grado de apertura máximo en las piernas del borde externo y un factor de columna de 0,8.

Se comparó, analizó y concluyó aspectos positivos y negativos de los cambios de frecuencia y *offset* para la configuración cuadrúpeda a partir de la velocidad y el radio descrito como indicadores de rendimiento del sistema robótico implementado en el Mecabot 5.0.

La configuración cuadrúpeda implementada en el Mecabot 5.0 puede ejecutar desplazamientos, giros abiertos y giros cerrados en superficies irregulares, sin embargo, la dificultad del terreno disminuye la velocidad que el robot puede llegar a alcanzar, aumenta el radio descrito en el giro abierto.

A nivel general, la configuración tipo cuadrúpeda implementada en el Mecabot 5.0 es la que mayor velocidad ha llegado a alcanzar en desplazamiento en línea recta a comparación de las configuraciones serpiente, oruga, hexápoda y rueda. Además, supera la velocidad de rotación alcanzada por la configuración hexápoda.

Se comprueba la efectividad de los generadores sinusoidales en el control de los módulos Mecabot 5.0: como versiones simplificadas de los generadores de patrones centrales, al permitir un movimiento mucho más suave que los presentados por tablas de control, al ser implementado de manera descentralizada y lograr coordinación incluso después de una reconexión.

En lo relativo a la investigación realizada de locomoción cuadrúpeda y el desarrollo de esta tesis se sugiere los siguientes posibles trabajos futuros:

La creación de algoritmo de control adaptativo según condiciones del terreno para los módulos Mecabot basado en los generadores sinusoidales o los generadores de patrones centrales implementados de manera descentralizada.

El estudio y diseño de módulos especializados con patas que puedan acoplarse al Mecabot y que obedezcan a distintos posibles contextos en los que se pueda llegar a desempeñar el robot, ello de acuerdo con la mejora de desempeño evidenciada durante las pruebas al emplear rodachines elevados en terrenos con poca irregularidad.

La posibilidad de seguir con el estudio de la lagartija en robótica modular enfocada en otro tipo de contextos: el de escalado y la transición terrestre-acuática, empleando la secuencia estándar ya programada y probada en esta tesis o una secuencia de trote.

En el contexto de escalado en paredes se abre la posibilidad de emplear la columna con uno de sus eslabones en acople invertido con el fin de procurar movimiento no sólo en el plano coronal sino también en el sagital, aquello permitiría hacer transiciones de locomoción terrestre a escalado.

El estudio de otro tipo de configuración cuadrúpeda modular con disposición sagital tipo mamífero y/o disposición circular.

Referencias

- [1] J. A. S. Sánchez, *Avances en robótica y visión por computador*. Univ de Castilla La Mancha, 2002.
- [2] A. B. Cruz, *Fundamentos de robótica*. McGraw-Hill, 2007.
- [3] «Los diez grandes retos de la robótica», *ELESPECTADOR.COM*, 04-feb-2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.elespectador.com/noticias/ciencia/los-diez-grandes-retos-de-la-robotica-articulo-737149>. [Accedido: 04-may-2018].
- [4] T. Wang, H. Li, y C. Meng, «Collective grasping for non-cooperative objects using modular self-reconfigurable robots», en *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015, pp. 3296-3301.
- [5] J. González Gómez, «Robótica modular y locomoción: aplicación a robots ápodos», Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Madrid, Escuela Politécnica Superior, 2008.
- [6] M. Yim, D. G. Duff, y K. D. Roufas, «Walk on the wild side [modular robot motion]», *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 9, n.º 4, pp. 49-53, dic. 2002.
- [7] S. Murata, H. Kurokawa, y S. Kokaji, «Self-assembling machine», en *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1994, pp. 441-448 vol.1.
- [8] «Colombia, un país expuesto a desastres como el de Mocoa por vulnerabilidad al cambio climático». [En línea]. Disponible en: <http://www.elpais.com.co/colombia/un-pais-expuesto-a-desastres-como-el-de-mocoa-por-vulnerabilidad-al-cambio-climatico.html>. [Accedido: 03-abr-2018].
- [9] *Foro Educación y Seguridad en el Post Acuerdo*. Bogotá, Universidad Militar Nueva Granada, 2017.
- [10] W. A. M. Rubiano y R. A. C. Estepa, «Simulación e Implementación de Sistema Robótico en Arquitectura Tipo Rueda utilizando Robotica Modular», Trabajo de Grado para Optar por el Título de Ingeniero en Mecatrónica, Universidad Militar Nueva Granada, 2017.
- [11] E. Sedeño, «Locomoción de un Robot Cuadrúpedo: Un Enfoque a Celdas Neuronales Analógicas», Tesis para la obtención del grado de: Maestría en Ciencias en Ingeniería en Mecatrónica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México, 2011.
- [12] A. O. Baturone, *Robótica: manipuladores y robots móviles*. Marcombo, 2005.
- [13] S. G. Tzafestas, «Preface», en *Introduction to Mobile Robot Control*, Oxford: Elsevier, 2014, pp. xvii-xviii.

- [14] K. A. Daltorio, A. D. Horchler, S. Gorb, R. E. Ritzmann, y R. D. Quinn, «A small wall-walking robot with compliant, adhesive feet», en *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2005, pp. 3648-3653.
- [15] P. Manoonpong, *Neural Preprocessing and Control of Reactive Walking Machines: Towards Versatile Artificial Perception-Action Systems*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [16] E. Calle, I. Ávila, y J. Zambrano, «Diseño e Implementación de un Robot Móvil Cuadrúpedo», *Rev. Tecnológica - ESPOL*, vol. 20, n.º 1, 2007.
- [17] P. G. de Santos, E. Garcia, y J. Estremera, *Quadrupedal Locomotion: An Introduction to the Control of Four-legged Robots*. London: Springer-Verlag, 2006.
- [18] R.- ASALE, «tetrápodo, da», *Diccionario de la lengua española - Edición del Tricentenario*. [En línea]. Disponible en: <http://dle.rae.es/?id=ZgnLCL0>. [Accedido: 03-abr-2018].
- [19] «Tetrapod | animal», *Encyclopedia Britannica*. [En línea]. Disponible en: <https://www.britannica.com/animal/tetrapod-animal>. [Accedido: 03-abr-2018].
- [20] S. Böttcher, «Principles of robot locomotion», presentado en Seminar Human Robot Interaction, p. 25.
- [21] K. Karakasiliotis, N. Schilling, J.-M. Cabelguen, y A. J. Ijspeert, «Where are we in understanding salamander locomotion: biological and robotic perspectives on kinematics», *Biol. Cybern.*, vol. 107, n.º 5, pp. 529-544, oct. 2013.
- [22] J. Cappelletto, «Generador De Modos De Caminado Para Robot Cuadrúpedo Basado En Principios Neurofisiológicos», Tesis para optar al grado de Magíster en Ingeniería Electrónica, UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR, 2006.
- [23] P. Navarrete y A. De, «Proyecto AT-AS : diseño de un robot cuadrúpedo imprimible, fabricación e implementación de la locomoción», sep. 2012.
- [24] M. Rubio y J. Daniel, «Diseño e implementación de un robot cuadrúpedo 3GDL con microcontrolador de 32bits STM», oct. 2017.
- [25] M. Li, Z. Jiang, P. Wang, L. Sun, y S. Sam Ge, «Control of a Quadruped Robot with Bionic Springy Legs in Trotting Gait», *J. Bionic Eng.*, vol. 11, n.º 2, pp. 188-198, abr. 2014.
- [26] A. A. V. PULGAR, J. C. Z. MONTEALEGRE, R. H. PELLICER, y R. M. GARCÍA, «DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ROBOTS MODULARES BLANDOS», MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO, UNIVERSIDAD DE CHILE, SANTIAGO DE CHILE.
- [27] T. M. Press, «Self-Reconfigurable Robots», *The MIT Press*. [En línea]. Disponible en: <https://mitpress.mit.edu/books/self-reconfigurable-robots>. [Accedido: 03-abr-2018].
- [28] M. Yim, D. G. Duff, y K. D. Roufas, «PolyBot: a modular reconfigurable robot», en *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)*, 2000, vol. 1, pp. 514-520 vol.1.

- [29] H. Kurokawa, K. Tomita, A. Kamimura, E. Yoshida, S. Kokaji, y S. Murata, «Distributed self-reconfiguration control of modular robot M-TRAN», en *IEEE International Conference Mechatronics and Automation, 2005*, 2005, vol. 1, pp. 254-259 Vol. 1.
- [30] A. Kamimura, H. Kurokawa, E. Yoshida, K. Tomita, S. Kokaji, y S. Murata, «Distributed adaptive locomotion by a modular robotic system, M-TRAN II», en *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566)*, 2004, vol. 3, pp. 2370-2377 vol.3.
- [31] H. Kurokawa, A. Kamimura, E. Yoshida, K. Tomita, S. Kokaji, y S. Murata, «M-TRAN II: metamorphosis from a four-legged walker to a caterpillar», en *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003) (Cat. No.03CH37453)*, 2003, vol. 3, pp. 2454-2459 vol.3.
- [32] M. Yim *et al.*, «Modular Self-Reconfigurable Robot Systems [Grand Challenges of Robotics]», *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 14, n.º 1, pp. 43-52, mar. 2007.
- [33] M. Park y M. Yim, «Distributed control and communication fault tolerance for the CKBot», en *2009 ASME/IFTOMM International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots*, 2009, pp. 682-688.
- [34] S. Castro, S. Koehler, y H. Kress-Gazit, «High-level control of modular robots», en *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2011, pp. 3120-3125.
- [35] T. Tosun, G. Jing, H. Kress-Gazit, y M. Yim, «Computer-Aided Compositional Design and Verification for Modular Robots», en *Robotics Research*, Springer, Cham, 2018, pp. 237-252.
- [36] G. Jing, T. Tosun, M. Yim, y H. Kress-Gazit, «An End-to-End System for Accomplishing Tasks with Modular Robots: Perspectives for the AI community», 2017, pp. 4879-4883.
- [37] H. Ahmadzadeh y E. Masehian, «Modular robotic systems: Methods and algorithms for abstraction, planning, control, and synchronization», *Artif. Intell.*, vol. 223, pp. 27-64, jun. 2015.
- [38] A. J. Ijspeert, «Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review», *Neural Netw.*, vol. 21, n.º 4, pp. 642-653, may 2008.
- [39] A. Alberca, C. Adrián, R. Sánchez, y D. Xavier, «Diseño e implementación de algoritmos de control inteligente para un robot Phoenix tipo hexápodo mediante la tarjeta STM32F4 discovery y simulink de matlab», Trabajo para la obtención de Título de Ingeniero Electrónico, Automatización y Control., Universidad de las Fuerzas Armadas, 2016.
- [40] A. J. Ijspeert, A. Crespi, y J.-M. Cabelguen, «Simulation and robotics studies of salamander locomotion», *Neuroinformatics*, vol. 3, n.º 3, pp. 171-195, sep. 2005.
- [41] A. Crespi, K. Karakasiliotis, A. Guignard, y A. J. Ijspeert, «Salamandra Robotica II: An Amphibious Robot to Study Salamander-Like Swimming and Walking Gaits», *IEEE Trans. Robot.*, vol. 29, n.º 2, pp. 308-320, abr. 2013.

- [42] A. J. Ijspeert, A. Crespi, D. Ryczko, y J.-M. Cabelguen, «From Swimming to Walking with a Salamander Robot Driven by a Spinal Cord Model», *Science*, vol. 315, n.º 5817, pp. 1416-1420, mar. 2007.
- [43] A. Crespi y A. J. Ijspeert, «Salamandra Robotica: A Biologically Inspired Amphibious Robot that Swims and Walks», en *Artificial Life Models in Hardware*, Springer, London, 2009, pp. 35-64.
- [44] R. Montaña, O. Gerardo, H. Erasso, y C. Andrés, «Diseño y simulación de un robot modular reconfigurable», Trabajo de Grado para Optar por el Título de Ingeniero en Mecatrónica, Universidad Militar Nueva Granada, 2013.
- [45] L. Guzmán, P. Natalia, S. Galvis, y L. Beatriz, «Simulación e Implementación de Movimientos para Sistema Robótico Modular Considerando Diferentes Configuraciones», Trabajo de Grado para Optar por el Título de Ingeniero en Mecatrónica, Universidad Militar Nueva Granada, 2016.
- [46] M. C. Berdugo, «Simulación e Implementación de una Configuración de Robot Hexápodo Utilizando Sistemas de Robótica Modular para Evaluar su Locomoción», Trabajo de Grado para Optar por el Título de Ingeniero en Mecatrónica, Universidad Militar Nueva Granada, 2017.
- [47] K. Karakasiliotis y A. J. Ijspeert, «Analysis of the terrestrial locomotion of a salamander robot», en *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009, pp. 5015-5020.
- [48] S. Kim, M. Spenko, S. Trujillo, B. Heyneman, D. Santos, y M. R. Cutkosky, «Smooth Vertical Surface Climbing With Directional Adhesion», *IEEE Trans. Robot.*, vol. 24, n.º 1, pp. 65-74, feb. 2008.
- [49] X. Yin, C. Wang, y G. Xie, «A salamander-like amphibious robot: System and control design», en *2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2012, pp. 956-961.
- [50] W. G. Aguilar, M. A. Luna, J. F. Moya, y V. Abad, «Robot Salamandra Anfíbio con Locomoción Bioinspirada», *Ingenius*, n.º 17, p. 51, dic. 2016.
- [51] T. Horvat, «Control of a Salamander-Like Robot for Search and Rescue Applications», p. 8.
- [52] T. Horvat, K. Melo, y A. J. Ijspeert, «Spine Controller for a Sprawling Posture Robot», *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 2, n.º 2, pp. 1195-1202, abr. 2017.
- [53] T. Horvat y A. J. Ijspeert, «Spine-Limb Coordination Controller for a Sprawling Posture Robot», p. 2.
- [54] M. Parsapour, K. Melo, T. Horvat, y A. J. Ijspeert, «Challenges in visual and inertial information gathering for a sprawling posture robot», en *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2017, pp. 2691-2697.
- [55] R. Full, *Robert Full: Aprendiendo de la cola del geco*. .

- [56] T. Horvat, K. Karakasiliotis, K. Melo, L. Fleury, R. Thandiackal, y A. J. Ijspeert, «Inverse kinematics and reflex based controller for body-limb coordination of a salamander-like robot walking on uneven terrain», en *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2015, pp. 195-201.
- [57] K. Karakasiliotis *et al.*, «From cineradiography to biorobots: an approach for designing robots to emulate and study animal locomotion», *J. R. Soc. Interface*, vol. 13, n.º 119, p. 20151089, jun. 2016.
- [58] J. Braure, «Participation to the Construction of a Salamander Robot: Exploration of the Morphological Configuration and the Locomotion Controller», Master Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, 2004.
- [59] N. Khajeh Mahabadi, «A Novel Design of a Salamander Robot Based on 3D Skeleton Kinematics of Real Salamanders.», Independent thesis Advanced level of Master, School of Computer Science and Communication, 2011.
- [60] G. Pierris y T. S. Dahl, «Learning Robot Control Using a Hierarchical SOM-Based Encoding», *IEEE Trans. Cogn. Dev. Syst.*, vol. 9, n.º 1, pp. 30-43, mar. 2017.
- [61] P. Manoonpong, U. Parlitz, y F. Wörgötter, «Neural control and adaptive neural forward models for insect-like, energy-efficient, and adaptable locomotion of walking machines», *Front. Neural Circuits*, vol. 7, 2013.
- [62] D. Ryczko, R. Thandiackal, y A. J. Ijspeert, «Interfacing a salamander brain with a salamander-like robot: Control of speed and direction with calcium signals from brainstem reticulospinal neurons», en *2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, 2016, pp. 1140-1147.
- [63] K. Karakasiliotis *et al.*, *Supplementary Material: From cineradiography to biorobots: an approach for designing robots to emulate and study animal locomotion*, vol. 13. 2016.
- [64] 이주은, *lizard walking*. .
- [65] «Webots: robot simulator». [En línea]. Disponible en: <https://www.cyberbotics.com/#webots>. [Accedido: 04-abr-2018].
- [66] «Webots documentation: Glossary». [En línea]. Disponible en: <https://www.cyberbotics.com/doc/reference/glossary>. [Accedido: 04-abr-2018].
- [67] «Webots documentation: Node Chart». [En línea]. Disponible en: <https://www.cyberbotics.com/doc/reference/node-chart>. [Accedido: 04-abr-2018].
- [68] «¿Qué es XBee?», *XBee.cl*. .
- [69] «XBee 2mW Wire Antenna - Series 2 (ZigBee Mesh) - WRL-10414 - SparkFun Electronics». [En línea]. Disponible en: <https://www.sparkfun.com/products/retired/10414>. [Accedido: 22-abr-2018].
- [70] «Videos», *XBee.cl*. .
- [71] «Teensy 3.2», *tdrobotica.co*. [En línea]. Disponible en: <http://tdrobotica.co/teensy-32/77.html>. [Accedido: 22-abr-2018].

- [72] «Poder 1810MG metal Gear HD sin núcleo Digital Servo 3,9 kg / 16g / .13sec», *Hobbyking*. [En línea]. Disponible en: https://hobbyking.com/es_es/power-hd-1810mg-metal-gear-coreless-digital-servo-3-9kg-13sec-16g.html?__store=es_es. [Accedido: 22-abr-2018].
- [73] «Servo giro limitado HD-1501MG 17.0 kg-cm». [En línea]. Disponible en: <http://tdrobotica.co/servo-giro-limitado-hd-1501mg-170-kg-cm/524.html>. [Accedido: 22-abr-2018].
- [74] «Pololu - Micro Maestro 6-Channel USB Servo Controller (Assembled)». [En línea]. Disponible en: <https://www.pololu.com/product/1350/faqs>. [Accedido: 22-abr-2018].
- [75] «Pololu 5V, 2.5A Step-Down Voltage Regulator D24V22F5». [En línea]. Disponible en: <https://www.pololu.com/product/2858/specs>. [Accedido: 22-abr-2018].
- [76] «Lithium Ion 2S 7.4V 3A Over Charge-Discharge Protection PCB», *mklec Inc.* [En línea]. Disponible en: <http://mklec.com/components/battery-protection/lithium-ion-7.4V-3A-protection-pcb>. [Accedido: 14-may-2018].
- [77] «Aliexpress.com: Comprar 1 unids 2 s 3A 7.4 V/8.4 V 18650 batería de litio cargador Junta carga de la batería del li ion BMS sobre carga descarga módulo de protección de li-ion charger board fiable proveedores en EC Buying Ali Store», *aliexpress.com*. [En línea]. Disponible en: [//es.aliexpress.com/store/product/1Pcs-2-S-3A-7-4V-8-4V-18650-Lithium-Battery-Charger-Board-Li-ion-Battery/1762106_32822717860.html?src=ibdm_d03p0558e02r02](https://es.aliexpress.com/store/product/1Pcs-2-S-3A-7-4V-8-4V-18650-Lithium-Battery-Charger-Board-Li-ion-Battery/1762106_32822717860.html?src=ibdm_d03p0558e02r02). [Accedido: 14-may-2018].
- [78] «How to Reset/Restart Teensy 3.5 using sotware». [En línea]. Disponible en: <https://forum.pjrc.com/threads/44857-How-to-Reset-Restart-Teensy-3-5-using-sotware>. [Accedido: 19-may-2018].

Anexos

Anexo A Tablas de recolección de pruebas simuladas en locomoción recta

Frecuencia (Hz)	Velocidad lineal (m/s)
0,1	0,014874316
0,2	0,02961046
0,3	0,044422875
0,4	0,059584316
0,5	0,074061763
0,6	0,087981285
0,7	0,10264926
0,8	0,115940075
0,9	0,128297073
1	0,142631279
1,1	0,154625
1,2	0,169872905
1,3	0,180048674
1,4	0,190440341
1,5	0,202295455
1,6	0,211715726
1,7	0,222527825
1,8	0,226445199
1,9	0,240336355
2	0,25081

Tabla Anexo 1. Relación Frecuencia y Velocidad lineal

Amplitud Piernas (rad.)	Velocidad lineal (m/s)
0,448798951	0,014874316
0,392699082	0,014383206
0,34906585	0,013968676
0,314159265	0,013601437
0,285599332	0,013310305
0,261799388	0,013053313
0,241660973	0,012844578
0,224399475	0,012678984
0,20943951	0,012504804
0,196349541	0,012360411
0,184799568	0,012255742
0,174532925	0,012128227
0,165346982	0,012032565
0,157079633	0,011947414

Tabla Anexo 2. Relación Amplitud piernas y Velocidad lineal

Factor columna	Amplitud piernas (rad.)	Velocidad lineal (m/s)
0,4	1,047197551	0,01391623
0,5	0,897597901	0,01391248
0,6	0,785398163	0,01403556
0,7	0,698131701	0,01425432
0,8	0,628318531	0,01463545
0,9	0,523598776	0,01467087
1	0,448798951	0,01487432
1,1	0,392699082	0,01528794
1,2	0,34906585	0,0157451
1,3	0,285599332	0,0160434
1,4	0,241660973	0,01654053
1,5	0,20943951	0,01710551
1,6	0,165346982	0,01753134
1,7	0,125663706	0,01797947

Tabla Anexo 3. Relación Factor columna y Velocidad lineal

Anexo B Tablas de recolección de pruebas simuladas en giro abierto

Offset (rad.)	Amplitud par piernas 1,2 (rad.)	Amplitud par piernas 3,4 (rad.)
0,1256637	0,157079633	0,897597901
0,1570796	0,125663706	0,951997774
0,165347	0,104719755	1,047197551
0,1745329	0,078539816	1,121997376
0,1847996	0,052359878	1,208304867
0,1963495	0,044879895	1,308996939

Tabla Anexo 4. Relación Offset y Amplitud de las piernas

Offset (rad.)	Radio (m) Factor columna 1	Radio (m) Factor columna 0,9	Radio (m) Factor columna 0,8
0,1256637	1,100825	1,03003	0,953585
0,1570796	1,05465	0,974485	0,89248
0,165347	0,94534	0,892295	0,822525
0,1745329	0,89301	0,83882	0,775385
0,1847996	0,85331	0,799475	0,7188
0,1963495	0,837215	0,77859	0,73456

Tabla Anexo 5. Relación Offset/ factor columna y Radio circunferencia descrita

Amplitud piernas 3,4 (rad.)	Radio (m)
1,047197551	0,94534
0,785398163	1,132145
0,628318531	1,34971
0,523598776	1,59363
0,448798951	1,84267
0,392699082	2,151265
0,34906585	2,48062
0,314159265	2,90275

Tabla Anexo 6. Relación Amplitud Piernas y Radio circunferencia descrita

Anexo C Tablas de recolección de pruebas simuladas en giro cerrado

Frecuencia (Hz)	Velocidad angular (rad/s)
0,1	0,037510735
0,2	0,074769662
0,3	0,111629972
0,4	0,148076054
0,5	0,184152622
0,6	0,219249442
0,7	0,253460168

Tabla Anexo 7. Relación Frecuencia y Velocidad Angular

Amplitud piernas (rad.)	Velocidad angular (rad/s)
0,314159265	0,026022336
0,34906585	0,03121223
0,392699082	0,034641628
0,448798951	0,037510735
0,523598776	0,053084634
0,628318531	0,055975584
0,785398164	0,069352048

Tabla Anexo 8. Relación Amplitud Piernas y Velocidad Angular

Anexo D. Pseudo código de la Teensy 3.2

```
#include <PololuMaestro.h>
MiniMaestro maestro(Serial2);
IntervalTimer myTimer;
volatile float t = 0;

char ID='1';
int contador=0;
int back=0;
char bit0=0;
char bit1=0;
char bit2=0;
char bit3=0;
char bit4=0;
char bit5=0;
float valorBit1=0;
float valorBit2=0;
float valorBit3=0;
float valorBit4=0;
float valorBit5=0;
const float pi = 3.14;
volatile float x1 = 0;
```

```

volatile float angulo1 = 0;
volatile float angulo2 = 0;
volatile float pivote1;
volatile float pivote2;
volatile float F = 0;
volatile float amplitud = 0;
volatile float bias = 0;
volatile float offset = 0;
#define RESTART_ADDR    0xE000ED0C
#define READ_RESTART()  (*(volatile uint32_t *)RESTART_ADDR)
#define WRITE_RESTART(val) ((*(volatile uint32_t *)RESTART_ADDR) = (val))

void setup() { Serial1.begin(115200);Serial2.begin(115200);}

Inicio loop() {
for(int k=0;k<6;k++){
if(Serial1.available()>0 && contador==0){bit0=Serial1.read();contador=1;}
if(Serial1.available()>0 && contador==1){bit1=Serial1.read();contador=2;}
if(Serial1.available()>0 && contador==2){bit2=Serial1.read();contador=3;}
if(Serial1.available()>0 && contador==3){bit3=Serial1.read();contador=4;}
if(Serial1.available()>0 && contador==4){bit4=Serial1.read();contador=5;}
if(Serial1.available()>0 && contador==5){bit5=Serial1.read();contador=0;}
}
if(bit3=='+'){valorBit3=1;}
if(bit3=='-'){valorBit3=-1;}
if(bit4=='0'){valorBit4=0;}if(bit4=='5'){valorBit4=5;}
if(bit4=='1'){valorBit4=1;}if(bit4=='6'){valorBit4=6;}
if(bit4=='2'){valorBit4=2;}if(bit4=='7'){valorBit4=7;}
if(bit4=='3'){valorBit4=3;}if(bit4=='8'){valorBit4=8;}
if(bit4=='4'){valorBit4=4;}if(bit4=='9'){valorBit4=9;}
if(bit5=='0'){valorBit5=0;}if(bit5=='5'){valorBit5=5;}
if(bit5=='1'){valorBit5=1;}if(bit5=='6'){valorBit5=6;}
if(bit5=='2'){valorBit5=2;}if(bit5=='7'){valorBit5=7;}
if(bit5=='3'){valorBit5=3;}if(bit5=='8'){valorBit5=8;}
if(bit5=='4'){valorBit5=4;}if(bit5=='9'){valorBit5=9;}
if(bit0=='T'){
if(bit1=='1'){ WRITE_RESTART(0x5FA0004);}
if(bit1=='0'){ Inicializar Timer}
}
if(bit0=='M'){ if(bit1==ID){ Ejecutar rutina Manual}}

if(bit0=='P'){
if(bit1=='1'){ Cambiar variable F} if(bit1=='4'){ Cambiar amplitud}
if(bit1=='2'){ Cambiar offset } if(bit1=='5'){ Cambiar amplitud}
if(bit1=='3'){ Cambiar amplitud}
}

if(bit0=='L'){
if(bit1=='1'){ Ejecutar rutina GeneradorA }
if(bit1=='2'){ Ejecutar rutina GeneradorB }
if(bit1=='3'){ Ejecutar rutina GeneradorC }
}
}
Fin loop()

void Timer (){ incrementar variable t}

```

```

void manual(){
  if(bit2=='1'){
    angulo1=valorBit3*((valorBit4*10)+(valorBit5));
    pivote1 = (11.524 * angulo1) + 1403.2;
    pivote1 = pivote1 * 4;
    maestro.setTarget(0, pivote1);
  }
  if(bit2=='2'){
    angulo2=valorBit3*((valorBit4*10)+(valorBit5));
    pivote2 = (11.641 * angulo2) + 1365.5;
    pivote2 = pivote2 * 4;
    maestro.setTarget(1, pivote2);
  }
}
void GeneradorA(){//Ejemplo de la ejecución de un generador cualesquiera
  x1 = (0.68 * sin(pi * F * t+bias)) + ((0.68 / 2) * sin(2 * pi * F * t+(2*bias))) + ((0.68 / 3) *
  sin(3 * pi * F * t+(3*bias)))+ ((0.68 / 8) * sin(4 * pi * F * t+(4*bias)));
  angulo1 = (x1) * amplitud;
  pivote1 = (11.524 * angulo1) + 1403.2;
  pivote1 = pivote1 * 4;
  maestro.setTarget(1, pivote1);
  if (x1>= -1 && x1 <= -0.99) {
    back=1;
  } else if (x1>= 0.99 && x1 <= 1) {
    back=0;
  }
  if (back==1) {
    pivote2 = 1400 * 4;
    maestro.setTarget(0, pivote2);
  } else {
    pivote2 = 1929 * 4;
    maestro.setTarget(0, pivote2);
  }
}
}

```

Anexo E. Tablas de recolección de pruebas en locomoción recta

Frecuencia (Hz)	Piso (m/s)	Fomi (m/s)	Lija (m/s)
0,1	0,02252252	0,0175531	0,01135074
0,2	0,04593477	0,03546099	0,02640613
0,3	0,07727975	0,05586592	0,04601933
0,4	0,10384216	0,06958942	0,07022472
0,5	0,11627907	0,0990099	0,07633588
0,6	0,16233766	0,09960159	0,09199632
0,7	0,18181818	0,14705882	0,09615385
0,8	0,19120459	0,18621974	0,09643202
0,9	0,23255814	0,18975332	0,1059322
1	0,25252525	0,20833333	0,10493179

Tabla Anexo 9. Relación Frecuencia y Velocidad lineal en terrenos estructurados

Frecuencia (Hz)	Pasto (m/s)	Andén (m/s)	Rocoso(m/s)
0,2	0,01613944	0,03355705	x
0,4	0,03119152	0,05780347	0,03436426
0,6	0,04135649	0,07407407	0,03531786
0,8	0,04842615	0,07894737	0,06024096
1	0,04983923	0,08131655	0,06199628

Tabla Anexo 10. Relación Frecuencia y Velocidad lineal en terrenos no estructurados

Anexo F. Tablas de recolección de pruebas en giro abierto

Offset (rad)	Radio (m)	
	Vuelta 1	Vuelta 2
$\pi/17$	0,4575	0,421875
$\pi/18$	0,4225	0,405
$\pi/19$	0,43	0,41375
$\pi/20$	0,45325	0,44875
$\pi/25$	0,463125	0,451875

Tabla Anexo 11. Relación Offset y Radio de circunferencia descrito según la vuelta dada

Offset (rad)	Piso (m)	Andén (m)	Rocoso (m)
$\pi/25$	0,463125	0,86625	0,9425
$\pi/20$	0,45325	0,7175	0,895
$\pi/19$	0,43	0,69	0,81
$\pi/18$	0,4225	0,58	0,765

Tabla Anexo 12. Relación Offset y Radio de circunferencia descrito en distintos terrenos

Anexo G. Tablas de recolección de pruebas en giro cerrado o rotación

Frecuencia (Hz)	ROTACIÓN DERECHA			ROTACIÓN IZQUIERDA		
	Piso (rad/s)	Fomi (rad/s)	Lija (rad/s)	Piso (rad/s)	Fomi (rad/s)	Lija (rad/s)
0,1	0,0221239	0,0258058	x	0,019513	0,0204345	0,0296545
0,2	0,0435486	0,051603	0,0387277	0,039398	0,0456627	0,0665592
0,3	0,0756281	0,0581776	0,0561801	0,0679116	0,0569129	0,0761045
0,4	0,0953732	0,1026664	0,0926177	0,0998599	0,0876072	0,1000507
0,5	0,1246664	0,1083308	0,1172236	0,128438	0,1334576	0,122051
0,6	0,1386405	0,1327808	0,1450412	0,139875	0,15295	0,1544539
0,7	0,1476312	0,142025	0,1581869	0,1510381	0,1566098	0,1778931
0,8	0,1624402	0,1564538	0,1555244	0,1570796	0,1646537	0,1770909
0,9	0,172615	0,1683597	0,1720478	0,2039995	0,2066837	0,1714843
1	0,2442918	0,1953727	0,176494	0,2481511	0,2344472	0,1753121

Tabla Anexo 13. Relación Frecuencia y Velocidad angular en terrenos estructurados

ROTACIÓN DERECHA			
Frecuencia (Hz)	Andén (rad/s)	Pasto (rad/s)	Rocoso (rad/s)
0,2	0,04698763	0,03457619	x
0,4	0,07814907	0,05138359	0,05131644
0,6	0,09678351	0,06445615	0,06184238
0,8	0,17185955	0,06811779	0,0992918
1	0,18265074	0,08755832	0,10451073

Tabla Anexo 14. Relación Frecuencia y Velocidad angular en terrenos no estructurados