



# **ESPE**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

## **DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

### **CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

#### **TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE  
PLATAFORMA ROBÓTICA ZOOMÓRFICA TELEOPERADA DE  
SEIS EXTREMIDADES CON DIECIOCHO GRADOS DE  
LIBERTAD PARA LA EXPLORACIÓN O INSPECCIÓN DE  
TERRENOS NO ESTRUCTURADOS**

#### **AUTORES:**

**GARCÉS MONTAÑO, ALEX GUSTAVO**

**VALLEJO ARÁUZ, DANIEL ANDRÉS**

**DIRECTOR: MSc. LOZA MATOVELLE, DAVID CÉSAR**

**SANGOLQUÍ**

**2017**



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**CERTIFICADO**

Certifico que el trabajo de titulación: "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE PLATAFORMA ROBÓTICA ZOOMÓRFICA TELEOPERADA DE SEIS EXTREMIDADES CON DIECIOCHO GRADOS DE LIBERTAD PARA LA EXPLORACIÓN O INSPECCIÓN DE TERRENOS NO ESTRUCTURADOS" realizado por los señores **ALEX GUSTAVO GARCÉS MONTAÑO** y **DANIEL ANDRÉS VALLEJO ARÁUZ**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **ALEX GUSTAVO GARCÉS MONTAÑO** y **DANIEL ANDRÉS VALLEJO ARÁUZ** para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 23 de noviembre del 2017



Ing. David Loza Matovelle  
Director



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, **ALEX GUSTAVO GARCÉS MONTAÑO**, con cédula de identidad N° 080293849-8 y **DANIEL ANDRÉS VALLEJO ARÁUZ**, con cédula de identidad N° 131143933-3, declaramos que el trabajo de titulación: **"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE PLATAFORMA ROBÓTICA ZOOMÓRFICA TELEOPERADA DE SEIS EXTREMIDADES CON DIECIOCHO GRADOS DE LIBERTAD PARA LA EXPLORACIÓN O INSPECCIÓN DE TERRENOS NO ESTRUCTURADOS"** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas. Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 23 de noviembre del 2017

  
\_\_\_\_\_  
Alex Gustavo Garcés Montaña  
C.I.: 080293849-8

  
\_\_\_\_\_  
Daniel Andrés Vallejo Aráuz  
C.I.: 131143933-3



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**AUTORIZACIÓN (PUBLICACIÓN REPOSITORIO)**

Nosotros, **ALEX GUSTAVO GARCÉS MONTAÑO**, con cédula de identidad N° 080293849-8 y **DANIEL ANDRÉS VALLEJO ARÁUZ**, con cédula de identidad N° 131143933-3, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la Biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación: **"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE PLATAFORMA ROBÓTICA ZOOMÓRFICA TELEOPERADA DE SEIS EXTREMIDADES CON DIECIOCHO GRADOS DE LIBERTAD PARA LA EXPLORACIÓN O INSPECCIÓN DE TERRENOS NO ESTRUCTURADOS"** cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 23 de noviembre del 2017

  
\_\_\_\_\_  
Alex Gustavo Garcés Montaña  
C.I.: 080293849-8

  
\_\_\_\_\_  
Daniel Andrés Vallejo Aráuz  
C.I.: 131143933-3

## DEDICATORIAS

Dedico este proyecto de tesis a Dios, quien ha estado a mi lado en cada paso dado durante mi formación académica, cuidándome y dándome fortaleza para continuar. A mis padres, quienes a lo largo de mi vida han procurado siempre mi bienandanza y educación, siendo un pilar fundamental en la culminación de esta etapa y en la consecución de este logro. A mi hermana, por su apoyo y afecto, y por impulsarme siempre a ser un modelo a seguir para ella. A mis amigos, con quienes superamos los retos que se presentaron a lo largo de nuestra vida universitaria apoyándonos mutuamente.

*Alex Garcés*

Dedico el proyecto realizado a Diosito que nunca me abandona, a mis ángeles del cielo María, Silvia y Adrián que guardan mis pasos, a mis padres que han sido pilar fundamental en mi crecimiento humano, a mi hermano de quien estoy orgulloso y espero ser un buen ejemplo, a cada uno de los integrantes de mi familia quienes me dieron palabras de aliento y su fiel apoyo durante mi aventura académica, a cada pieza de oro del maravilloso tesoro de la amistad y hermandad que he ido encontrando y atesorando con cariño en el intrigante camino llamado vida.

*Daniel Vallejo*

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la oportunidad de vivir y por haber permitido compartir mi camino con aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante esta etapa de mi vida.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, por haber sido un segundo hogar durante mi formación académica y a mis profesores, en especial al Ingeniero David Loza, por su apoyo y dedicación en pos de alcanzar la satisfactoria realización del presente trabajo

A mis padres, Gustavo y Jackeline, por ser ejemplo de dedicación, superación y ser una fuente inagotable de amor, apoyo y sabiduría; y mi hermana, Gaby, por estar a mi lado, apoyarme siempre e impulsarme a ser mejor cada día.

*Alex Garcés*

Me siento muy agradecido con Dios por brindarme cada día de vida en los que puedo conocer gente maravillosa y vivir un sin número de experiencias, las cuales me han llevado a la culminación de una etapa académica más.

A mis padres, Andrea y Armando, por ser los pilares en quienes he podido recostar mis penas y fatigas, y ser los trampolines a la hora de levantarme. A mi hermano por inspirarme a ser mejor cada día y ser mi amigo fiel.

A toda mi familia por su fe incansable, sabios consejos y momentos de alegría, en especial a mis abuelos Mario y Martha por llenarme de amor y enseñanzas desde temprana edad.

Al conjunto de pedazos de locura que se pueden llamar hermanos de otros padres quienes me alegran los días con sus ocurrencias y a cada uno de los ángeles sin alas que me impulsaron, apoyaron y animaron en cada momento, mi sincero cariño con ellos.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas y sus maestros, en especial al ingeniero David Loza por su apoyo con el fin de culminar este proyecto.

*Daniel Vallejo*

## ÍNDICE

<b>CERTIFICADO DEL DIRECTOR.....</b>	<b>ii</b>
<b>OFICIO DE AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....</b>	<b>iii</b>
<b>OFICIO DE AUTORIZACIÓN (Publicación Repositorio Institucional).....</b>	<b>iv</b>
<b>DEDICATORIAS .....</b>	<b>v</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE .....</b>	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>x</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>xiii</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>xviii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xix</b>
 <b>CAPÍTULO I</b>	 <b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
1.1. Motivación y problemática .....	1
1.2. Antecedentes .....	3
1.2.1. Robots móviles caminantes desarrollados en instituciones internacionales.....	3
1.2.2. Robots móviles caminantes desarrollados en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.....	4
1.3. Justificación e importancia .....	6
1.4. Objetivos .....	7
1.4.1. Objetivo general.....	7
1.5. Alcance del proyecto .....	8

1.6. Estructura del documento.....	9
------------------------------------	---

## **CAPÍTULO II** **10**

### **ESTADO DEL ARTE**

2.1. Robots zoomórficos.....	10
2.2. Clasificación de los robots zoomórficos.....	11
2.2.1. De acuerdo al sistema de locomoción.....	11
2.2.2. De acuerdo a la configuración de la extremidad .....	19
2.2.3. De acuerdo a la estabilidad del movimiento .....	20
2.3. Configuración física de los robots hexápodos .....	22
2.3.1. Configuración bilateral .....	22
2.3.2. Configuración radial .....	23
2.3.3. Grados de libertad de las extremidades.....	24
2.4. Métodos de desplazamiento de los robots hexápodos .....	26
2.4.1. Tres extremidades por movimiento .....	26
2.4.2. Dos extremidades por movimiento .....	28
2.4.3. Una extremidad por movimiento .....	30
2.5. Resumen.....	31

## **CAPÍTULO III** **32**

### **DISEÑO**

3.1. Metodología de diseño de despliegue de la función de calidad .....	32
3.2. Módulo 1. Estructura .....	36
3.2.1. Subsistema 1. Extremidades .....	36
3.2.2. Subsistema 2. Cubierta.....	74
3.3. Módulo 2. Locomoción .....	77
3.3.1. Arquitectura del sistema.....	77
3.3.2. Tarjeta de control ArbotiX-M .....	78
3.3.3. Secuencias de locomoción .....	80
3.3.4. Espacio de trabajo .....	83
3.4. Módulo 3. Monitoreo.....	83

3.4.1. Subsistema 1. Cámara.....	84
3.4.2. Subsistema 2. Interfaz .....	87
3.5. Módulo 4. Tele-operación.....	92
3.5.1. Subsistema 1. Comunicación.....	92
3.5.2. Subsistema 2. Mando .....	94
3.6. Diseño Final .....	96
3.7. Resumen.....	97
<b>CAPÍTULO IV</b>	<b>100</b>
<b>IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS</b>	
4.1. Implementación.....	100
4.1.1. Implementación de la estructura .....	100
4.1.2. Implementación del sistema de control .....	111
4.1.3. Implementación del sistema de comunicación .....	112
4.1.4. Implementación de la interfaz .....	114
4.1.5. Implementación del joystick .....	114
4.2. Pruebas y resultados.....	117
4.2.1. Pruebas de servomotores .....	117
4.2.2. Pruebas de comunicación.....	117
4.2.3. Duración de batería .....	118
4.2.4. Distancia cubierta en un paso.....	119
4.2.5. Pruebas de velocidades de cada caminata.....	120
4.2.6. Pruebas de caminatas sobre distintos terrenos.....	120
4.3. Resumen.....	123
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>124</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>127</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>129</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características principales de las diferentes estrategias de movimiento.....	26
Tabla 2: Matriz de la calidad del presente proyecto. ....	33
Tabla 3: Resultados de la matriz QFD. ....	34
Tabla 4: Módulos para el diseño. ....	35
Tabla 5: Parámetros de Denavit Hartenberg de la extremidad del robot hexápodo. ....	39
Tabla 6: Alternativas del material para la estructura. ....	57
Tabla 7: Ponderación de criterios para selección del material de extremidades. ....	58
Tabla 8: Evaluación de las alternativas respecto al costo. ....	58
Tabla 9: Evaluación de las alternativas respecto a las propiedades mecánicas.....	58
Tabla 10: Evaluación de las alternativas respecto a la resistencia a la intemperie. ....	59
Tabla 11: Evaluación de las alternativas respecto a la disponibilidad en el mercado. ....	59
Tabla 12: Evaluación de las alternativas respecto a su facilidad de manufactura. ....	59
Tabla 13: Resultados de prioridad para la selección del material de las extremidades. ....	59
Tabla 14: Parámetros físicos del robot.....	60
Tabla 15: Alternativas de servomotores.....	62
Tabla 16: Ponderación de criterios para la selección de los	

servomotores. ....	63
Tabla 17: Evaluación de las alternativas respecto al costo. ....	63
Tabla 18: Evaluación de las alternativas respecto al torque.....	63
Tabla 19: Evaluación de las alternativas respecto a la velocidad.....	64
Tabla 20: Evaluación de las alternativas respecto al peso. ....	64
Tabla 21: Evaluación de las alternativas respecto a la fácil sujeción. ....	64
Tabla 22: Evaluación de las alternativas respecto al tamaño.....	64
Tabla 23: Resultados de prioridad para la selección de los servomotores. ..	65
Tabla 24: Alternativas de baterías. ....	71
Tabla 25: Ponderación de criterios para la selección de la batería. ....	72
Tabla 26: Evaluación de las alternativas respecto al costo. ....	72
Tabla 27: Evaluación de las alternativas respecto a la densidad de almacenamiento.....	72
Tabla 28: Evaluación de las alternativas respecto a la auto-descarga. ....	73
Tabla 29: Evaluación de las alternativas respecto a la vida útil.....	73
Tabla 30: Resultados de prioridad para la selección de la batería. ....	73
Tabla 31: Voltajes y amperajes necesarios para los elementos del robot.....	74
Tabla 32: Ponderación de criterios para la selección del material de la cubierta. ....	75
Tabla 33: Resultados de prioridad para la selección del material de la cubierta. ....	75
Tabla 34: Características técnicas de la tarjeta de control arbotiX-M.....	79

Tabla 35: Características de la cámara seleccionada. ....	84
Tabla 36: Características técnicas de módulo conversor DC-DC MP2307 Mini-360. ....	87
Tabla 37: Detalles técnicos del robot hexápodo zoomórfico. ....	97
Tabla 38: Descripción de piezas de la estructura del robot. ....	102
Tabla 39: Tiempos de fabricación de piezas de la estructura del robot. ....	102
Tabla 40: Parámetros y resultados de pruebas de servomotores. ....	117
Tabla 41: Resultados de las pruebas de comunicación del robot con la HMI. ....	118
Tabla 42: Resultados de las pruebas de comunicación del robot con el joystick. ....	118
Tabla 43: Duración de la batería según el tipo de caminata. ....	119
Tabla 44: Distancia cubierta en un paso por cada tipo de caminata. ....	119
Tabla 45: Tiempo en recorrer 100 cm por cada tipo de caminata. ....	120

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Proporción de trabajo con robots. ....	2
Figura 2: Robot iStruct Demonstrator.....	3
Figura 3: Robot BigDog. ....	4
Figura 4: Robot cuadrúpedo de 12 grados de libertad. ....	5
Figura 5: Robot electro-neumático escalador.....	5
Figura 6: Robot tipo hexápodo teledirigido.....	6
Figura 7: Robot no caminante (izq.) y caminante (der.). ....	11
Figura 8: (a) Salamandra robótica. (b) BIOLOCH. ....	12
Figura 9: Robot langosta de Northeastern University.....	13
Figura 10: Robot MorpHex.....	14
Figura 11: Robot BiLBIQ 2.....	14
Figura 12: Robot ASIMO.....	15
Figura 13: Robot Stickybot.....	16
Figura 14: Cola del RoboTuna, MIT.....	17
Figura 15: Robot BionickKangaroo. ....	18
Figura 16: Robot Mentor. ....	19
Figura 17: Extremidades (a) Mamífera; (b) Reptiliana; (c) Insectoide. ....	19
Figura 18: Polígono de estabilidad para caminata trípode ....	21
Figura 19: Configuración Bilateral, tipo hormiga. ....	23
Figura 20: Configuración Radial, tipo araña.....	23

Figura 21: Robot hexápodo de 6 GDL. ....	24
Figura 22: Robot hexápodo de 12 GDL. ....	25
Figura 23: Robot hexápodo de 18 GDL. ....	25
Figura 24: Secuencia de trípodas simultáneas. ....	27
Figura 25: Secuencia de trípodas alternadas. ....	28
Figura 26: Secuencia de dos extremidades simultáneas. ....	29
Figura 27: Secuencia de una extremidad a la vez. ....	30
Figura 28: Patas de insecto típica y articulaciones. ....	37
Figura 29: Extremidad del robot. ....	37
Figura 30: Representación esquemática de extremidad. ....	38
Figura 31: Parámetros de Denavit Hartenberg. ....	38
Figura 32: Traslación del sistema de referencia. ....	41
Figura 33: Vista superior de extremidad. ....	44
Figura 34: Vista lateral de extremidad. ....	45
Figura 35: Esquema para análisis de energías. ....	48
Figura 36: Alternativa de servomotores escogidos. ....	65
Figura 37: Simulación de esfuerzos en el soporte a la coxa. ....	66
Figura 38: Factor de seguridad del soporte de la coxa. ....	67
Figura 39: Simulación de esfuerzos en el soporte del fémur. ....	67
Figura 40: Factor de seguridad del soporte del fémur. ....	68
Figura 41: Simulación de los esfuerzos en el soporte de la tibia. ....	68

Figura 42: Factor de seguridad del soporte de la tibia. ....	69
Figura 43: Simulación de esfuerzos en la tibia. ....	69
Figura 44: Factor de seguridad de la tibia. ....	70
Figura 45: Simulación de esfuerzos en el pie. ....	70
Figura 46: Factor de seguridad del pie. ....	71
Figura 47: Simulación de los esfuerzos en la base del robot. ....	76
Figura 48: Factor de seguridad de la base del robot. ....	76
Figura 49: Arquitectura del sistema del robot hexápodo. ....	77
Figura 50: Tarjeta de control ArbotiX-M. ....	79
Figura 51: Centralizador de conexiones. ....	80
Figura 52: Patrones de locomoción utilizados. ....	81
Figura 53: Espacio de trabajo de la extremidad. ....	83
Figura 54: Cámara wanscam HW0024 B. ....	85
Figura 55: Diagrama de conexiones con la cámara. ....	86
Figura 56: Módulo conversor DC-DC. ....	86
Figura 57: Ventana de inicio de la interfaz. ....	89
Figura 58: Verificación de usuario y contraseña. ....	89
Figura 59: Ventana de control, selección de mando remoto. ....	90
Figura 60: Ventana de control, selección de mando local. ....	91
Figura 61: Ventana de ayuda, instrucciones de control. ....	92
Figura 62: Módulo XBee. ....	94

Figura 63: Joystick del robot hexápodo.....	94
Figura 64: Tarjeta GeekDUINO.....	95
Figura 65: Controlador Arbotix Commander 2.0.....	96
Figura 66: Robot hexápodo zoomórfico. ....	96
Figura 67: Diagrama de flujo para la implementación de la estructura. ....	101
Figura 68: Soportes para motores y pies. ....	103
Figura 69: Cubiertas laterales. ....	103
Figura 70: Base, cubierta y tibias.....	104
Figura 71: Puntas de pies. ....	104
Figura 72: Elementos para el ensamblaje de soportes. ....	105
Figura 73: Ensamblaje entre soportes. ....	105
Figura 74: Eslabones ensamblados.....	106
Figura 75: Diagrama de conexión para servomotores.....	106
Figura 76: Conexión de servomotor.....	107
Figura 77: Asignación de identificadores - Dynamanager.....	107
Figura 78: Soportes ensamblados a servomotores. ....	108
Figura 79: Disposición de los eslabones en las extremidades. ....	108
Figura 80: Extremidades ensambladas.....	109
Figura 81: Ensamblaje de las extremidades a la base del cuerpo.....	109
Figura 82: Conexión de servomotores, batería y tarjeta de control. ....	110
Figura 83: Robot hexápodo ensamblado. ....	110

Figura 84: Diagrama de flujo del procesamiento de datos. ....	111
Figura 85: Diagrama de flujo para configuración de módulos XBee.....	112
Figura 86: Software XCTU para configuración de módulo XBee.....	113
Figura 87: Diagrama de flujo para la utilización de la interfaz. ....	114
Figura 88: Componentes del joystick. ....	115
Figura 89: Diagrama de flujo para la implementación del joystick.....	115
Figura 90: Comandos para el control del robot. ....	116
Figura 91: Caminata sobre concreto.....	121
Figura 92: Caminata en terreno orgánico.....	121
Figura 93: Caminata en terreno árido rocoso.....	122
Figura 94: Caminata sobre una superficie inclinada.....	122

## RESUMEN

El presente proyecto expone el diseño y construcción de un prototipo de plataforma robótica zoomórfica de seis extremidades con dieciocho grados de libertad, capaz de desplazarse sobre superficies no estructuradas por control tele-operado, mediante un joystick o desde un ordenador por medio de una interfaz gráfica. Inicialmente, se establecieron los alcances del proyecto y se recopiló información sobre trabajos ya realizados en la misma temática. De acuerdo a los diversos requerimientos para el diseño se establecieron características técnicas a conseguir mediante la implementación de elementos adecuados. Se realiza el modelamiento correspondiente para la locomoción del robot mediante el análisis de su cinemática y dinámica, garantizando su correcta traslación y evitando sobrecargas en los actuadores. Se diseñan las extremidades de acuerdo a la morfología insectoide, las cuales constan de tres miembros, denominados: coxa, fémur y tibia; correspondientes a los tres grados de libertad que posee cada extremidad. La programación de las secuencias de caminata se encuentra almacenada en la tarjeta de control del robot que se conecta inalámbricamente a los controladores, por medio de módulos XBee asignados a una misma red, y la cámara se enlaza a la interfaz, elaborada en software libre, por medio de un router. De las pruebas realizadas se obtuvo que el robot puede desplazarse sobre terrenos regulares en todos sus tipos de caminata, mientras que, en superficies áridas-rocosas y orgánicas solo mediante el tipo de caminata de paso de trípede; y también se traslada sobre pendientes de hasta 20°.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **PLATAFORMA ROBÓTICA**
- **ZOOMÓRFICA**
- **TELEOPERADO**

## **ABSTRACT**

The present project exposes the design and construction of six-limbed, eighteen-degrees of freedom, zoomorphic robotic platform prototype, capable of moving on unstructured surfaces, using a joystick or a graphical interface for its tele-operated control. As a starting point, the scope of the present thesis was established and a research of similar projects was carried out, in order to have the necessary background information. According to the different design requirements, technical characteristics were established to be achieved through the implementation of appropriate elements. The robot locomotion model is obtained, through the kinematic and dynamic analysis, guaranteeing its correct translation and avoiding overloads in the actuators. The limbs consist of three links according to the insectoid morphology, each link is denominated as: coxa, femur and tibia; which corresponds to the three degrees of freedom needed in each leg. The programming of the walking sequences is stored in the robot's control card, which connects to the controllers wirelessly, with XBee modules assigned to the same network. The camera is linked to the interface, designed in free software, using a wireless router. From the tests carried out, it was obtained that the robot can move on regular terrains with all of its gait types, whereas, in arid-rocky and organic surfaces only the tripod gait was effective for the robot's locomotion; and also the robotic platform can move on slopes of up to 20°.

### **KEYWORDS:**

- **ROBOTIC PLATFORM**
- **ZOOMORPHIC**
- **TELEOPERATED**

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

El primer capítulo expone la necesidad de construcción de una plataforma robótica caminante tipo zoomórfica para terrenos no estructurados. Se hace una breve revisión de distintos tipos de robots zoomórficos. Se justifica el desarrollo del presente trabajo y se menciona la importancia del mismo. Se definen el objetivo general y los específicos, base para establecer el alcance del proyecto. Se refieren algunos temas que serán desarrollados en los capítulos siguientes. Como parte final de este capítulo, se describe la estructura de la presente memoria.

### 1.1. Motivación y problemática

La robótica ha experimentado avances tecnológicos, que han permitido el desarrollo de dispositivos con mayor grado de complejidad para cumplir actividades que resultan peligrosas o imposibles de realizar para el ser humano. Como proyectos de factibilidad académica se han llevado a cabo aplicaciones encaminadas a reproducir distintos movimientos propios de los seres vivos.

Entre los múltiples tipos de robots existentes se encuentran los robots móviles, los cuales tienen gran capacidad de desplazamiento. Son encargados de actividades de transporte de piezas de un punto a otro en el área productiva, exploración tele-operada en operaciones armamentistas, espaciales, inspección de entornos de difícil acceso, mapeo de terrenos; también, existen robots móviles destinados a la compañía y el entretenimiento.

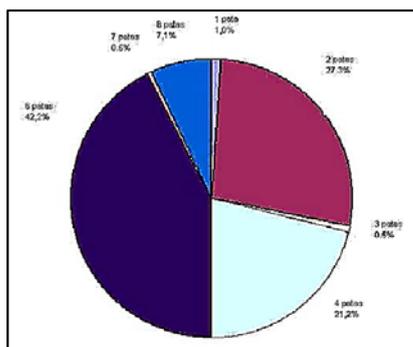
Dentro del campo de los robots móviles, en un mayor porcentaje, se hallan las plataformas con un sistema de locomoción de tipo rodante. Sus principales ventajas son: su facilidad de construcción y control, rápida implementación,

bajo consumo de energía, robustez, alta capacidad de carga, rapidez, entre otras. Sin embargo, su mayor problema consiste en no adaptarse a terrenos no estructurados.

Los robots móviles de acción caminante, poseen distinto número de extremidades, brindando puntos discretos de soporte a su cuerpo. Por lo cual, es posible que evadan obstáculos y se desplacen sobre superficies no estructuradas. Los robots de locomoción por patas, a pesar de su complejo diseño y construcción, resuelven gran variedad de problemáticas que tienen los robots móviles de acción rodante, debido a que son útiles en distintos entornos de trabajo, generalmente irregulares.

El diseño de robots con características zoomórficas de acción caminante ha avanzado en relación a como los elementos electrónicos y los suministros de energía disminuyen su tamaño. Debido a la simplificación de los componentes electrónicos, se posibilita la construcción de plataformas robóticas a menor escala, con peso reducido y mejor organización espacial de sus elementos. También, el desarrollo de componentes con mayores prestaciones, permite mejorar las características funcionales del sistema.

De acuerdo a la proporción de trabajos en los que se desarrollan los robots con extremidades, la implementación de robots hexápodos (seis patas) es dominante con respecto a los demás (ver Figura 1). Por lo tanto, se ha considerado en el proyecto la construcción de este tipo de plataforma.



**Figura 1: Proporción de trabajo con robots**

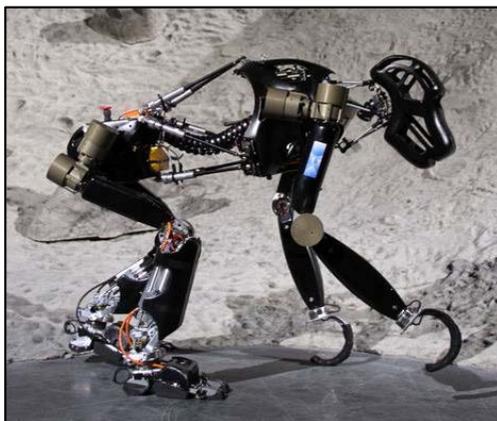
Fuente: (Escobar Olarte & Silva Ortega, 2011)

El proyecto planteado consiste en la implementación de una plataforma robótica zoomórfica de seis extremidades tipo radial, que permita la exploración e inspección, de forma tele-operada, sobre distintas superficies, especialmente no estructuradas. Se realizará el estudio del movimiento del robot y la interacción de sus partes que permitan un desplazamiento rápido y sin dificultades. Además, se adaptará una cámara que permita el seguimiento del terreno. El robot servirá como punto de partida para futuras investigaciones, motivando su construcción.

## 1.2. Antecedentes

### 1.2.1. Robots móviles caminantes desarrollados en instituciones internacionales.

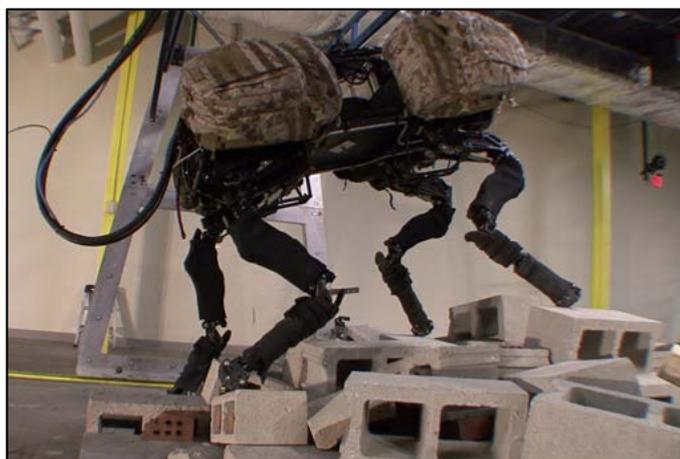
A nivel global se han desarrollado plataformas robóticas zoomórficas que buscan imitar la forma de locomoción de varios animales entre los que destacan: El iStruct Demonstrator realizado por la Universidad de Bremen (2013), robot zoomórfico de cuatro extremidades, similar a un simio. Se realizó con el objetivo de investigar localizaciones de difícil acceso tales como cráteres e incluso la superficie lunar.



**Figura 2: Robot iStruct Demonstrator.**

*Fuente: (Universidad de Bremen, 2013)*

La plataforma zoomórfica Big Dog desarrollado por Boston Dynamics (2011), es empleado para la exploración e inspección de terrenos irregulares. Tiene la capacidad de correr a cerca de 6.5 km/h, subir cuestras de hasta 35° y cargar más de 150 kg de peso.



**Figura 3: Robot BigDog.**

*Fuente: (Boston Dynamic, BigDog Team, 2011)*

### **1.2.2. Robots móviles caminantes desarrollados en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE**

En la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE se han desarrollado numerosos proyectos de titulación enfocados al ámbito de la robótica móvil. Algunos de los proyectos realizados hasta la actualidad son:

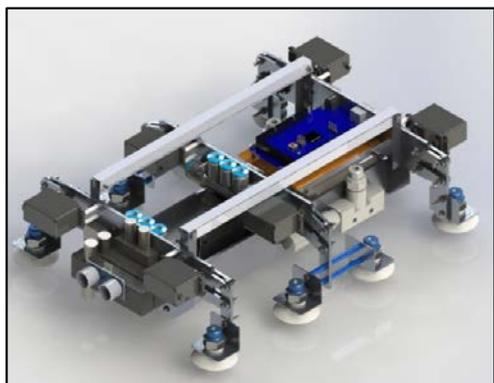
*Diseño y Construcción de una plataforma robótica zoomórfica de cuatro extremidades con doce grados de libertad.* El presente proyecto realizado por Benalcázar Redrobán & Noboa Encalada (2017), describe un robot zoomórfico el cual se desplaza por movimiento de una extremidad a la vez cuyo sistema de control está compuesto de una placa Arduino y 12 servomotores. Dicho robot puede ser controlado de forma remota mediante un joystick o también mediante un ordenador por ubicación de coordenadas.



**Figura 4: Robot cuadrúpedo de 12 GDL.**

**Fuente:** (Benalcázar Redrobán & Noboa Encalada, 2017)

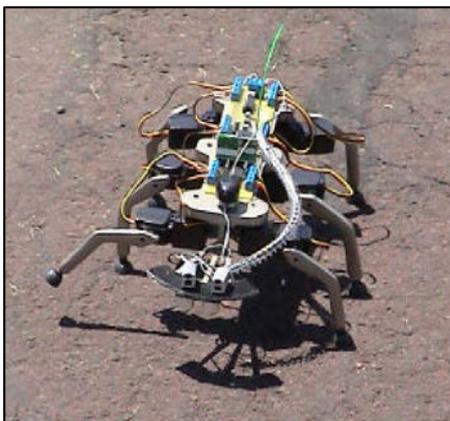
*Diseño y construcción de un prototipo de robot electro-neumático escalador para exploración de superficies verticales lisas.* El presente proyecto realizado por Salazar Guilcamaigua & Viteri Gaibor (2015), se basa en un trabajo previo realizado como tesis en el 2008. El robot puede moverse con libertad en superficies verticales o con una pendiente pronunciada, gracias a ventosas que se adhieren por la generación de vacío, siempre que la superficie sea lisa no porosa, con la finalidad de explorar espacios de acceso difícil o peligroso. El robot realiza sus movimientos, mediante una combinación de actuadores neumáticos y eléctricos controlados por un microprocesador en una placa Arduino y un operador envía comandos al mismo desde una cierta distancia.



**Figura 5: Robot electro-neumático escalador.**

**Fuente:** (Salazar Guilcamaigua & Viteri Gaibor, 2015)

En la Facultad de Ingeniería Electrónica se realizó una tesis con el tema “Diseño e implementación de un Robot Tipo Hexápodo Teledirigido” por Fuertes Rosero & Llumiquinga (2005). Dicha tesis se orientó principalmente al control teledirigido y también al estudio del movimiento del robot sobre distintos tipos de superficies, obteniéndose únicamente resultados aceptables al trasladarse sobre superficies lisas, mientras que en terrenos irregulares se presentaron grandes dificultades en su movimiento.



**Figura 6: Robot tipo hexápodo teledirigido.**

*Fuente: (Fuertes Rosero & Llumiquinga Llumiquinga, 2005)*

### **1.3. Justificación e importancia**

En la robótica móvil, las plataformas robóticas con extremidades han sido utilizadas como alternativa ante los robots con ruedas, debido a su gran versatilidad de movimiento en terrenos no estructurados. Dichas superficies conllevan un riesgo potencial para un robot móvil con ruedas, ya que éste puede volcarse y quedar inutilizado o simplemente no avanzar en su recorrido al encontrarse con terrenos de difícil navegación. Por lo tanto, los robots con extremidades son más aptos para aplicaciones de exploración e inspección de espacios con superficies irregulares.

Las plataformas robóticas caminantes pueden tener distinto número de extremidades, como es el caso de bípedos, cuadrúpedos, hexápodos, etc. El

sistema de locomoción hexápodo ofrece mayor estabilidad con relación a los demás sistemas robóticos de menos extremidades, ya que, al momento de realizar un paso, los puntos de apoyo en la superficie permiten que se distribuya el peso equitativamente sobre aquellos.

Para desplazarse de forma correctamente cinemática en una trayectoria arbitraria sobre un terreno no estructurado, cada pata del robot debe tener, independientemente de la configuración escogida para la extremidad, un mínimo de tres grados de libertad. La complejidad de los robots hexápodos depende del grado de libertad que se tiene para el desarrollo del movimiento, el sincronismo entre las extremidades y la comunicación entre partes, de forma local y remota. Dichos aspectos abarcan un área de investigación a estudiarse, relacionada a la integración de elementos mecánicos con electrónicos, propios de las competencias referentes a la Carrera de Ingeniería Mecatrónica.

Por último, en Ecuador se prioriza la política pública dirigida a promover el desarrollo tecnológico, con proyectos que impulsen la investigación y generación de conocimientos en los estudiantes, siendo la robótica uno de los principales campos a potencializar. En la actualidad, la comunidad científica ecuatoriana, han sido exhortados a través de la Secretaria Nacional de Ciencia y Tecnología (SENESCYT) a realizar trabajos investigativos con el objetivo de generar conocimiento, por ello la construcción de una plataforma robótica móvil será el punto de partida para realizar diversas investigaciones.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

- Diseñar y construir un prototipo de plataforma robótica zoomórfica teleoperada de seis extremidades con dieciocho grados de libertad para la exploración o inspección en terrenos no estructurados.

#### **1.4.2. Objetivo específicos**

- Diseñar y construir los elementos de soporte y los mecanismos de movimiento de las articulaciones que permitan un correcto desplazamiento del robot.
- Definir, diseñar e implementar los componentes electrónicos adecuados para el correcto funcionamiento del sistema.
- Dirigir al robot mediante un control tele-operado con ayuda de un sistema de visualización del entorno.

#### **1.5. Alcance del proyecto**

La plataforma robótica a desarrollarse será de tipo zoomórfica caminante con seis extremidades de configuración radial, cada extremidad constará de tres grados de libertad. Dicha plataforma será tele-operada mediante una interfaz desarrollada en un sistema operativo libre; constará de una cámara que permitirá visualizar su entorno y estará dotada de un movimiento giratorio de ciento ochenta grados con respecto a un plano horizontal para un trabajo de exploración completo.

Los terrenos en los cuales el robot se desplazará, además de una superficie de concreto duro, serán:

- Superficies rocosas tomando como superficie de prueba terrenos con rocas estratificadas.
- Terreno orgánico, tomando como superficie de prueba al césped.
- Terreno coherente, tomando como superficie de prueba el arcilloso duro.

## **1.6. Estructura del documento**

El presente proyecto se encuentra estructurado en cuatro capítulos, cuyo contenido se detalla a continuación: El primer capítulo brinda una introducción al proyecto realizado, en el que se realiza una revisión de los antecedentes, tanto nacionales como internacionales, relacionados al presente trabajo; la justificación e importancia de llevar a cabo el proyecto actual, los objetivos y alcance del mismo.

En el segundo capítulo se realizará una descripción del estado del arte correspondiente al proyecto. Se presentarán, a detalle, diversas categorías pertinentes a los robots zoomórficos, mostrando ejemplos de robots ya existentes pertenecientes a dichas categorías, y un análisis de sus posibles métodos de desplazamiento.

El tercer capítulo abordará el diseño mecatrónico del robot hexápodo propuesto, se empleará el método QFD para dividir al sistema en diversos módulos, en función de los cuales se obtendrán el modelo CAD y los distintos componentes mecánicos, electrónicos y de control tele-operado de la plataforma robótica a desarrollar. También, se realizará el análisis cinemático y el análisis dinámico del hexápodo, que son la base del control y dimensionamiento de los actuadores respectivamente.

En el cuarto capítulo se plasmará la implementación del diseño, realizado al capítulo anterior, de todos los componentes del robot. A su vez, se mostrarán los resultados de las pruebas realizadas para validar el correcto funcionamiento de la plataforma robótica sobre diversos terrenos. También, se presentarán conclusiones y recomendaciones, obtenidas a partir de la realización del proyecto.

## **CAPÍTULO II**

### **ESTADO DEL ARTE**

El capítulo presenta una descripción de los robots zoomórficos y sus distintas clasificaciones. Se detallan las distintas configuraciones físicas de los robots zoomórficos hexápodos y sus grados de libertad por extremidad. También, analiza los distintos métodos de desplazamiento de este tipo de robots.

#### **2.1. Robots zoomórficos**

De acuerdo Ruiz de Garibay Pascal (2006), los robots zoomórficos reproducen con mayor o menor grado de realismo, los sistemas de locomoción de diversos seres vivos. Sus aplicaciones van desde la industria del entretenimiento hasta áreas más avanzadas con fines investigativos y científicos. A pesar de la disparidad morfológica de sus posibles sistemas de locomoción, se pueden diferenciar dos grandes grupos: caminantes y no caminantes.

- Los robots zoomórficos caminantes son muy numerosos, debido al potencial de desarrollarse como auténticos vehículos de transporte, capaces de desplazarse por superficies muy accidentadas.
- Los robots zoomórficos no caminantes se encuentran poco evolucionados, debido a que en la actualidad no hay aplicaciones tan útiles como los antes mencionados. Cabe destacar los robots arrastrantes, robots nadadores, robots voladores, robots saltarines y robots escaladores, los cuales sirven para el análisis del movimiento de los distintos tipos de animales que imitan.

En las últimas tres décadas, según Nonami et al. (2014), se han incrementado los esfuerzos llevados a cabo para desarrollar robots

caminantes, fusionando la ingeniería con la observación de los mecanismos de locomoción y geometría de distintos organismos vivos. Dichos estudios han llevado a concluir que, el uso de extremidades en lugar de ruedas brinda ventajas cuando se analiza el desplazamiento de plataformas robóticas sobre terrenos irregulares, como: mayor eficiencia energética, posibilidad de alcanzar mayores velocidades y mejor maniobrabilidad. Por ello, es importante continuar con el desarrollo de plataformas robóticas zoomórficas ya que permiten cumplir las deficiencias que poseen los robots con locomoción rodante.



**Figura 7: Robot no caminante (izq.) y caminante (der.).**

*Fuente: (Ruiz de Garibay Pascual, 2006)*

## **2.2. Clasificación de los robots zoomórficos**

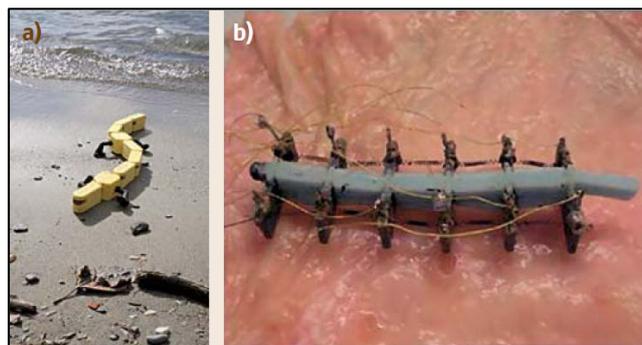
### **2.2.1. De acuerdo al sistema de locomoción**

#### **2.2.1.2. Robots arrastrantes**

De acuerdo a Siciliano & Khatib (2008) en “Handbook of Robotics”, los robots arrastrantes son aquellos similares a serpientes, capaces de moverse en entornos inaccesibles por los humanos, como tuberías y edificios colapsados. Son empleados en tareas de exploración e inspección, así como

también en misiones de búsqueda y rescate. Algunos de los robots arrastrantes que más destacan son:

- La “Salamandra Robótica” creada en la Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) en Suiza. Combina tres modos de locomoción: arrastre, caminata y nado para el análisis de la locomoción de las salamandras.
- El BIOLOCH project creado en la Scuola Superiore Santa Anna de Pisa en Italia. Es un robot, provisto de una cámara; diseñado para arrastrarse a través de las entrañas humanas, imitando el movimiento del gusado Polychaetes. Mediante su uso, se busca disminuir la posibilidad de dañar los órganos internos del paciente cuando se realiza una colonoscopia.



**Figura 8: (a) Salamandra robótica. (b) BIOLOCH.**

*Fuente: (Siciliano & Khatib, 2008)*

### 2.2.1.3. Robots caminantes

- **Ocho patas:** Es la configuración menos extendida dentro de los robots zoomórficos. Requiere un mayor número de actuadores, lo que representa un elevado gasto energético, más peso y un sistema de control, software y hardware más complejos.

De acuerdo a las reseñas mostradas en el sitio web de laboratorio de la universidad Northeastern (Marine Science Center, 2010) Joseph Ayers y un grupo de investigadores han desarrollado neurotecnología basada en la neurofisiología y el comportamiento de modelos animales como lo es “RoboLobster” un vehículo ambulatorio de 8 extremidades basado en la langosta, destinado a operaciones autónomas de teledetección en ríos y/o el fondo oceánico de la zona litoral con adaptaciones robustas a contornos irregulares del fondo, corrientes y mareas.

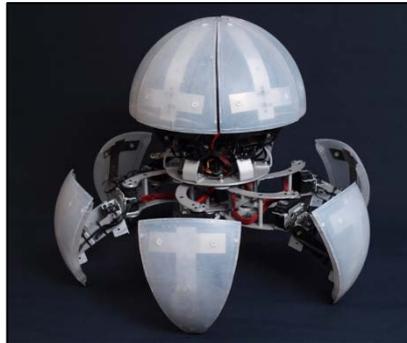


**Figura 9: Robot langosta de Northeastern University.**

*Fuente: (Marine Science Center, 2010)*

- **Seis patas:** Es la configuración más extendida de los robots zoomórficos. Presenta gran estabilidad y versatilidad en sus movimientos.

Un ejemplo de robot hexápodo descrito por Ralf Simon King (2013) es el “MorpHex”, creado por Kåre Halvorsen. El MorpHex muestra un acercamiento de cómo combinar un hexápodo con una estructura que permita locomoción rodante.



**Figura 10: Robot MorpHex.**

*Fuente: (King, 2013)*

- **Cuatro patas:** Es relativamente lento respecto a los robots con mayor número de extremidades, debido a que debe utilizar un método de locomoción paso a paso, para conservar su estabilidad mediante tres puntos de apoyo en la superficie. De acuerdo a Benalcázar & Noboa (2017), el robot cuadrúpedo resulta con una locomoción estable y coordinada usando el método de caminata discontinua de dos fases. BiLBIQ 2 es un prototipo de robot cuadrúpedo diseñado e implementado por Ralf Simon King (2013), basado en la araña *Cebrennus Villosus*. Tiene la capacidad de desplazarse rodando y caminando en terrenos irregulares, sin embargo, solo funciona a bajas velocidades, 0,06 m/s cuando camina y 0,7 m/s cuando rueda.

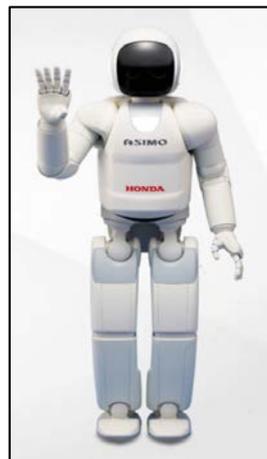


**Figura 11: Robot BiLBIQ 2.**

*Fuente: (King, 2013)*

- **Dos patas:** Robots que imitan la locomoción humana, son poco estables, por ello requieren una mayor acción de control para mantener el equilibrio. Para su locomoción utilizan la teoría del punto de momento cero (siglas en inglés ZMP), el cual se define como un centro de presión de la fuerza de reacción del suelo.

Uno de los robots bípedos más sobresalientes es el ASIMO, desarrollado por Honda Motor Co. en el 2000 con actualizaciones hasta el 2011. De acuerdo al sitio web oficial de Honda (s.f.), es un robot humanoide capaz de caminar, correr, correr en reversa, saltar en una o dos piernas de manera continua, además de mantener el equilibrio en superficies irregulares.



**Figura 12: Robot ASIMO.**

Fuente: (Honda, s.f.)

#### **2.2.1.4. Robots escaladores**

Los robots escaladores son capaces de desplazarse sobre superficies verticales e inclinadas, y vencer la fuerza de la gravedad y de su propio peso. Pueden adherirse de diversas formas, como: Aplicando presión a la superficie,

adherencia magnética, succión o vacío, y cualquier combinación de los antes mencionados.

Stickybot III, tercera iteración de la plataforma Stickybot, desarrollada por la Universidad de Stanford (2011). Diseñado para agarre y escalada de superficies verticales con adhesivos secos direccionales controlables inspirados en gecos. Tiene cuatro patas, cada una con cuatro grados de libertad, incluida la actuación en la muñeca para expandirse más allá de la escalada vertical de la primera plataforma. Actualmente puede escalar 5cm/seg.



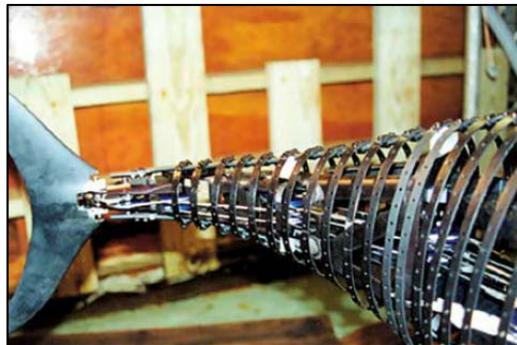
**Figura 13: Robot Stickybot.**

**Fuente:** *(Stanford University, 2011)*

#### **2.2.1.5. Robots nadadores**

Según Siciliano & Khatib (2008), se están produciendo robots zoomórficos que emulan los sistemas de propulsión de peces, delfines o focas, y exploran la compleja mecánica de fluidos que estos animales usan para propulsarse a sí mismos. El objetivo primario de este tipo de proyectos es construir robots que puedan maniobrar, tomando ventajas de los movimientos y posiciones corporales, permitiendo tener grandes ahorros de energía e incrementar sustancialmente el tiempo de nado.

En un periódico estudiantil del MIT (The Tech, 1995) se menciona a RoboTuna, un proyecto del Departamento de Ingeniería Oceánica; un robot que nada como un pez siguiendo la morfología del atún de aleta azul. Para su movimiento, las contracciones del pez son producidas por seis servomotores de dos caballos de fuerza de potencia. Los servomotores dirigen esa energía a través del cuerpo a través de un complejo sistema de cables y poleas de acero inoxidable, que actúan como músculos y tendones. Varios sensores de fuerza montados en el costado de las costillas proporcionan retroalimentación continua al robot para que pueda ajustar sus movimientos en tiempo real.



**Figura 14: Cola del RoboTuna, MIT.**

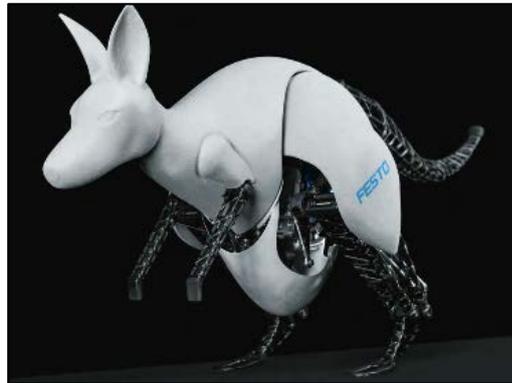
*Fuente: (Siciliano & Khatib, 2008)*

#### **2.2.1.6. Robots saltarines**

Lo que se busca de los robots capaces de saltar es poder detectar un obstáculo cerca, estimar la altura y la distancia, y calcular la mejor alternativa para esquivarlo. De acuerdo a los datos recopilados por el robot, se aplica una cantidad de fuerza concreta para ejercer el salto y aterrizar con seguridad.

FESTO (2014) presenta al BionickKangaroo, un robot capaz de reproducir la forma en que se mueven los canguros. Puede recuperar la energía cuando salta, almacenarla y usarla eficientemente para el próximo salto. Mide cien centímetros cuando está estirado y sesenta centímetros cuando está sentado,

pesa siete kilogramos. Al saltar alcanza una altura de cuarenta centímetros y una distancia de ochenta centímetros.



**Figura 15: Robot BionickKangaroo.**

*Fuente: (Festo AG & Co. KG., 2014)*

#### **2.2.1.7. Robots voladores**

De acuerdo Siciliano & Khatib (2008), el aleteo de las alas ofrece varias ventajas respecto a las alas fijas, como: Volar a bajas velocidades, permanecer suspendido en el aire, giros de ángulos agudos, e incluso volar hacia atrás. Como los animales, el vórtex creado debajo de cada ala es usado para crear el impulso necesario para que el robot despegue.

Siciliano & Khatib (2008), mencionaron que la Universidad de Toronto desarrolló el robot Mentor. Es el primer robot de cuatro alas de locomoción por aleteo capaz de mantenerse suspendido en el aire. Mide treinta cm y pesa medio kilogramo, y posee la capacidad de pasar de suspensión en el aire a vuelo horizontal.

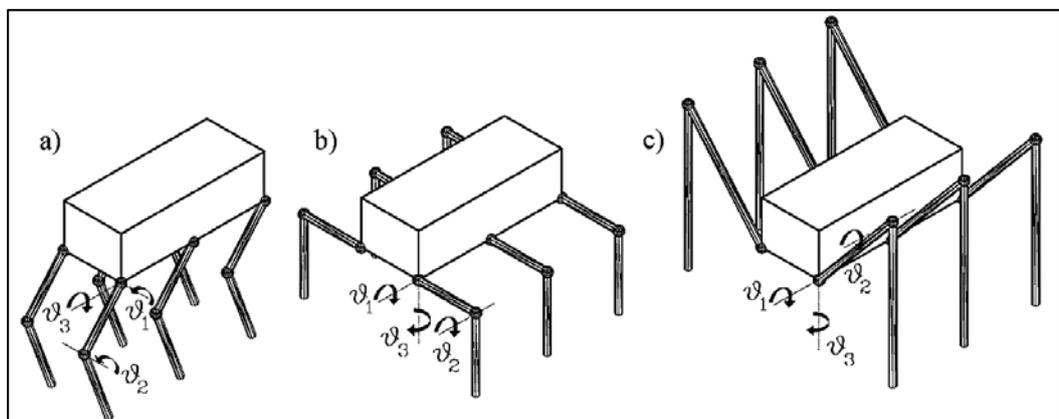


**Figura 16: Robot Mentor.**

Fuente: (Siciliano & Khatib, 2008)

### 2.2.2. De acuerdo a la configuración de la extremidad

De acuerdo a Genta Giancarlo (2012), independientemente del número de extremidades escogido, la configuración de la misma puede ser definida como: Mamífera, reptiliana o insectoide. Todos estos términos denotan el origen zoomórfico de estas configuraciones.



**Figura 17: Extremidades (a) Mamífera; (b) Reptiliana; (c) Insectoide.**

Fuente: (Genta, 2012)

### **2.2.2.1. Configuración mamífera**

Según Thomas Hunt Morgan (1925), en la configuración mamífera las patas están por debajo de su cuerpo y la unión que conforma la rodilla está dispuesta a favor o en contra de su movimiento. De acuerdo a Giancarlo Genta (2012), la locomoción está contenida, mayormente, en un plano vertical. El movimiento del pie se debe a los ángulos  $\vartheta_1$  y  $\vartheta_2$  (ver Figura 17).

### **2.2.2.2. Configuración reptiliana**

Según Tedeschi & Carbone (2014), en la configuración reptiliana las patas están dispuestas en un ángulo de cuarenta y cinco grados, sus rodillas y codos apuntan hacia adentro. De acuerdo a Giancarlo Genta (2012), la trayectoria de la pierna se debe a un movimiento ocurrido en el plano horizontal. El movimiento del pie se debe a los ángulos  $\vartheta_1$  y  $\vartheta_3$  (ver Figura 17).

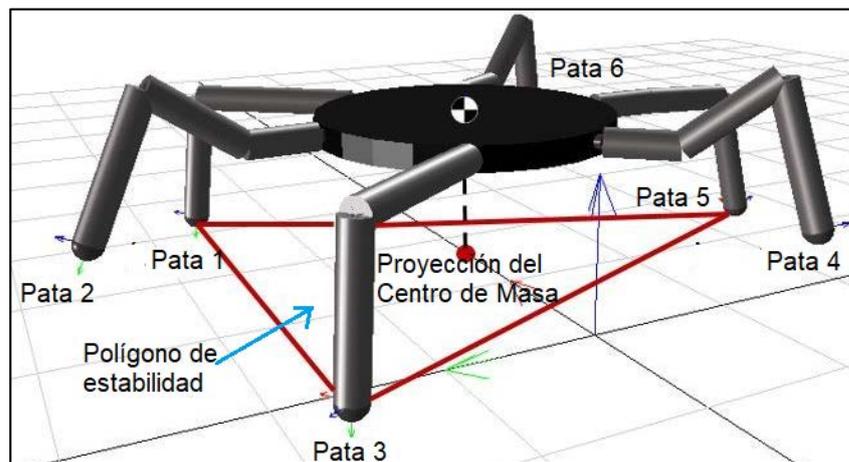
### **2.2.2.3. Configuración insectoide**

Según Cruse, Dean, Müller, & Schmitz (1991), en la configuración insectoide las patas están dispuestas a los lados del cuerpo con sus rodillas apuntando hacia arriba. De acuerdo a Giancarlo Genta (2012), al igual que la configuración reptiliana, la trayectoria de la pierna se debe a un movimiento ocurrido en el plano horizontal. El movimiento del pie se debe a los ángulos  $\vartheta_1$  y  $\vartheta_3$  (ver Figura 17).

## **2.2.3. De acuerdo a la estabilidad del movimiento**

Los robots caminantes pueden ser clasificados en base a la estabilidad durante su movimiento en dos tipos: estáticamente estables y dinámicamente estables. En la Figura 18, se puede observar un robot hexápodo

estáticamente estable, ya que la proyección de su centro de masa se encuentra dentro del polígono de estabilidad formado por las patas en contacto con el suelo. A continuación, se detallan los dos tipos de estabilidad de un robot caminante.



**Figura 18: Polígono de estabilidad para caminata trípode.**

Fuente: [hackaday.io/project/21904-hexapod-modelling-path-planning-and control/](https://hackaday.io/project/21904-hexapod-modelling-path-planning-and-control/)

### 2.2.3.1. Estáticamente estable

De acuerdo a Nonami, Kumar Barai, Irawan, & Razali Daud (2014), los robots caminantes estáticamente estables controlan su locomoción de tal manera que las patas en el soporte (fase de postura) se colocan en los puntos de apoyo, seguidas por su retracción, y las piernas en la oscilación (fase de transferencia) se levantan y se mueven para colocarlas en nuevos puntos de apoyo (protracción). Deben satisfacer una restricción tal que, la proyección vertical del centro de gravedad del robot caminante esté siempre contenida dentro de la sucesión de patrones de soporte (polígonos de soporte), determinados por los pies en contacto con el suelo. Los robots con más de dos extremidades utilizan la locomoción estáticamente estable.

### **2.2.3.2. Dinámicamente estable**

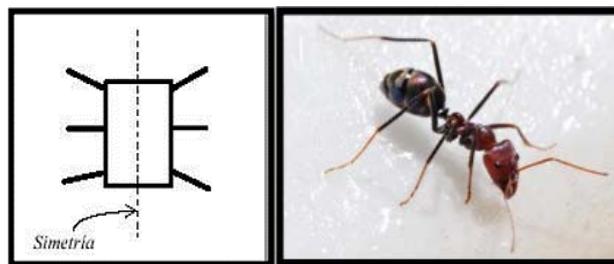
Según Nonami, Kumar Barai, Irawan, & Razali Daud (2014), en robots caminantes dinámicamente estables, no existe tal restricción como la estabilidad estática. Utilizan fuerzas dinámicas y retroalimentación para mantener el control y son estables en un ciclo límite que se repite una vez en cada paso. En tales sistemas, la velocidad, la energía cinética y la energía potencial del robot caminante desempeñan un papel crucial. El intercambio de energía en varias formas es importante en la locomoción dinámica de los robots caminantes. El cálculo cinemático, basado únicamente en la geometría de los mecanismos, no puede predecir con precisión el movimiento del sistema dinámicamente estable. La energía almacenada en diferentes partes del robot caminante también debe considerarse, además de la geometría del mecanismo para la predicción del movimiento de un sistema dinámicamente estable. Robot de salto monópodos, robot bípedo o humanoide y robots cuadrúpedos a alta velocidad emplean estabilidad dinámica durante su locomoción. La implicación de la dinámica para estabilizar el movimiento de los sistemas robóticos caminantes hace que sean capaces de equilibrarse activamente. Un sistema robótico con patas que puede equilibrarlo activamente puede tolerar la salida del equilibrio estático. Sin embargo, como los sistemas dinámicamente estables son más difíciles de diseñar y analizar que los sistemas estáticos, el desarrollo temprano de robots con patas se centró en máquinas estáticamente estables.

## **2.3. Configuración física de los robots hexápodos**

### **2.3.1. Configuración bilateral**

De acuerdo a la información recopilada por Escobar & Silva (2011), la configuración bilateral presenta una simetría a lo largo del eje longitudinal del

robot. Tiene la ventaja a la hora de la programación de los movimientos, ya que la configuración física del robot aporta para el avance con movimientos paralelos, pero presenta inconvenientes en otro tipo de movimientos, en especial en movimiento de giros. El giro del robot se puede solucionar implementando en la programación de control una parte exclusivamente para el giro pero presenta complicaciones en el desarrollo del software ya que se debe realizar estrategias de movimiento más robustas y con mayor número de estados.

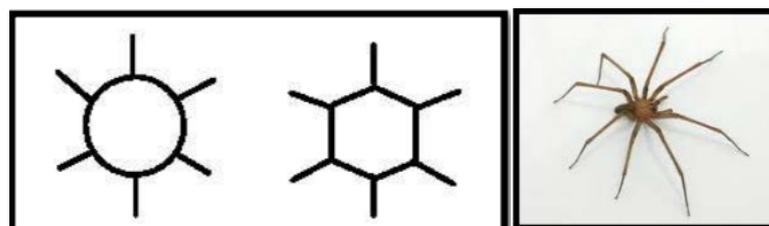


**Figura 19: Configuración Bilateral, tipo hormiga.**

*Fuente: (Escobar Olarte & Silva Ortega, 2011)*

### 2.3.2. Configuración radial

Escobar & Silva (2011), establecen que la configuración radial presenta una distribución de las extremidades en forma circular. Dicha configuración no genera problemas de desplazamiento, ya que su movimiento en cualquier dirección es igual. Es decir, estos tipos de robots son holonómicos.



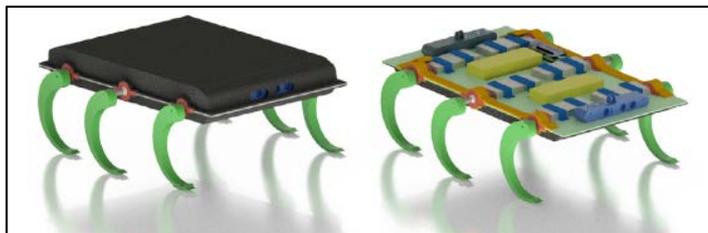
**Figura 20: Configuración Radial, tipo araña.**

*Fuente: (Escobar Olarte & Silva Ortega, 2011)*

### 2.3.3. Grados de libertad de las extremidades

#### 2.3.3.1. Un grado de libertad

Según Escobar & Silva (2011), la construcción de un hexápodo con solo un grado de libertad es la más sencilla de todas, ya que esto requiere pocos actuadores y sus extremidades serán completamente rígidas realizando solamente un tipo de movimiento efectuado por el actuador. Al hacer esto no requiere una programación de control tan compleja. La configuración habitual de estos tipos de robots es hacer que las patas centrales se encarguen de hacer subir o bajar al robot y las demás de la parte de avanzar o retroceder.



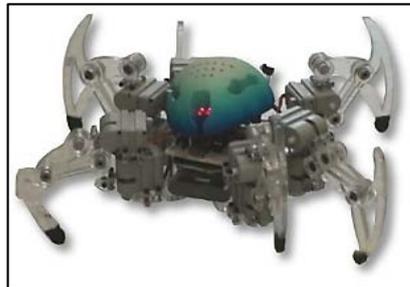
**Figura 21: Robot hexápodo de 6 GDL.**

Fuente: (Cantor Forero, 2015)

#### 2.3.3.2. Dos grados de libertad

Los hexápodos de dos grados de libertad son los más utilizados en aspectos lúdicos y de investigación, según menciona Escobar & Silva (2011). Al tener dos grados de libertad requieren mayor número de actuadores comparados con los anteriores y necesitan una programación de control más compleja, ya que es necesaria una sincronización de coordinación entre sus movimientos. Sin embargo, su consumo energético no es tan elevado como en el caso de hexápodos con mayor número de grados de libertad por

extremidad y se pueden alcanzar velocidades superiores a las que alcanzan los de un grado de libertad.



**Figura 22: Robot hexápodo de 12 GDL.**

*Fuente: (López Guerrero, Betancourt Esparza, Martínez Briones, Ancira González, & Ramírez Cruz, 2011)*

### **2.3.3.3. Tres o más grados de libertad**

Existen también hexápodos con estructuras más complejas, de acuerdo a Escobar & Silva (2011), esto conlleva a la implementación de mejores mecanismos de control con los cuales se obtienen un mayor número de grados de libertad. Pueden alcanzar velocidades mayores que los hexápodos de menos grados de libertad y presentan un movimiento fluido de sus extremidades al momento de desplazarse. Sin embargo, poseen un alto consumo energético que limita el tiempo de operación del que disponen los hexápodos con tres o más grados de libertad.



**Figura 23: Robot hexápodo de 18 GDL.**

*Fuente: [www.robotshop.com/en/](http://www.robotshop.com/en/)*

## 2.4. Métodos de desplazamiento de los robots hexápodos

Escobar & Silva (2011) manifiesta que la elección de una adecuada estrategia de movimiento para los robots móviles se encuentra inmersa en el análisis de su geometría, cinemática, estabilidad, velocidad, entre otros aspectos que afecten de manera directa o indirecta la plataforma.

Para robots hexápodos existen varios tipos de estrategias de movimiento, las cuales brindan distintas características en lo que refiere a estabilidad, velocidad de desplazamiento y consumo de energía (ver Tabla 1).

**Tabla 1**

### *Características principales de las diferentes estrategias de movimiento*

MONOPOD 1EM	BIPOD 2EM	TRIPOD 3EM
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Una extremidad por movimiento</li> <li>• Presenta beneficios de estabilidad de movimiento</li> <li>• Limitaciones de velocidad por el mayor cantidad de estados.</li> <li>• Adecuada para condiciones de baja energía de alimentación (batería)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dos extremidades por movimiento.</li> <li>• Presenta condiciones estables con respecto al movimiento.</li> <li>• Condiciones neutras de velocidad pero mayores que las de 1EM</li> <li>• Consumo moderado de energía eléctrica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tres extremidades por movimiento.</li> <li>• Es necesario diseñar una buena estrategia de movimiento ya que puede presentar problemas de estabilidad.</li> <li>• Adecuada en términos de desplazamiento y velocidad.</li> <li>• Propicio sobre el desarrollo de software.</li> <li>• Mayor consumo de energía.</li> </ul>

Fuente: (Escobar Olarte & Silva Ortega, 2011)

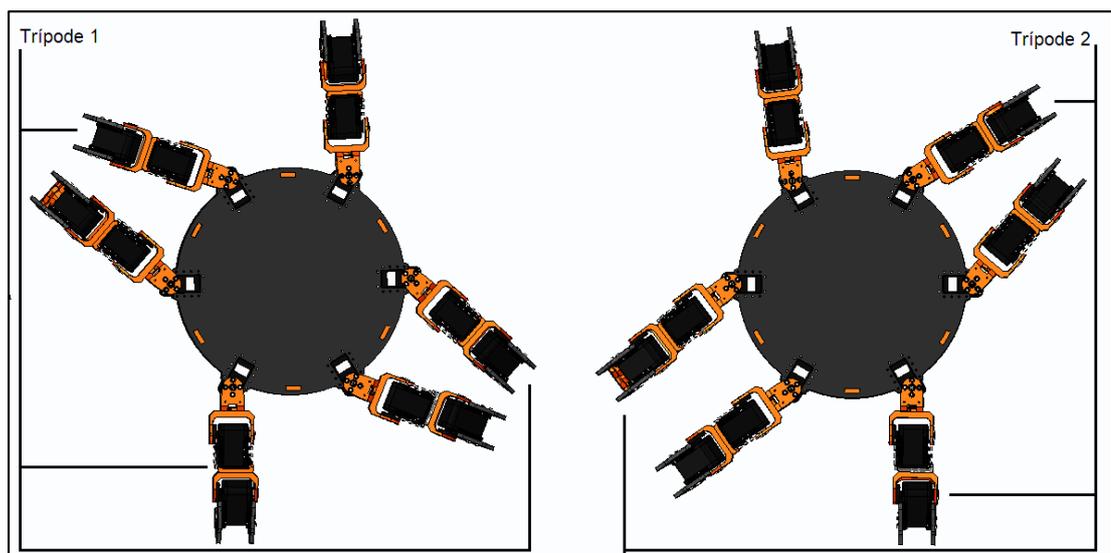
### 2.4.1. Tres extremidades por movimiento

Se dividen las extremidades en dos conjuntos de trípodos que se alternan, conformados por las patas, delantera y trasera de un lado, y por la pata

intermedia del otro. Con ello, se forma una base triangular sobre el terreno la cual le confiere estabilidad a la plataforma robótica.

Se pueden cumplir las siguientes secuencias con las extremidades del robot para que tengan sincronización:

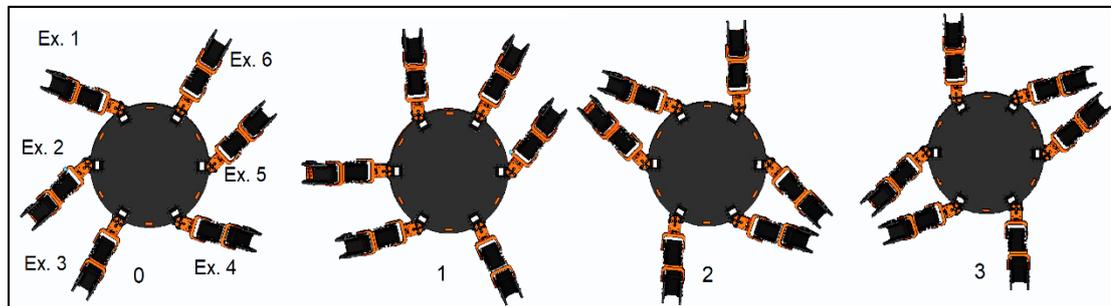
#### 2.4.1.1. Secuencia de trípodes simultáneos



**Figura 24: Secuencia de trípodes simultáneos.**

- **Etapa 1:** Se levanta el trípode 1.
- **Etapa 2:** Se mueven hacia adelante las patas de trípode 1 y las patas de trípode 2 hacia atrás al mismo tiempo.
- **Etapa 3:** Descienden las patas de trípode 1.
- **Etapa 4:** Se levanta el trípode 2.
- **Etapa 5:** Se mueven hacia adelante las patas de trípode 2 y las patas de trípode 1 hacia atrás al mismo tiempo.
- **Etapa 6:** Descienden las patas de trípode 2.
- Se repite el ciclo las veces que se requiera.

### 2.4.1.2. Secuencia de trípodes alternados



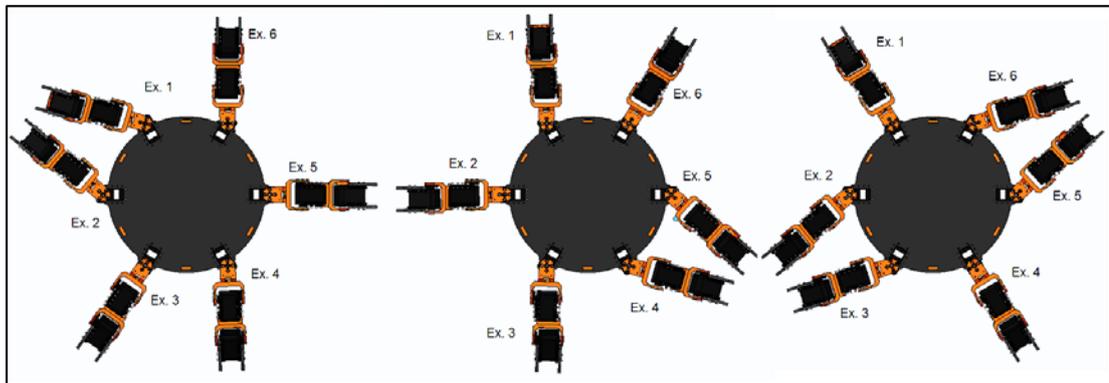
**Figura 25: Secuencia de trípodes alternados.**

- **Etapa 0:** La plataforma se encuentra en una posición aleatoria. La clasificación de los trípodes queda de la siguiente manera: Grupo 1: extremidad 1, 3 y 5, y Grupo 2: extremidad 2, 4 y 6.
- **Etapa 1:** Las extremidades del Grupo 1 se levantan, realizan movimiento rotacional hacia adelante y finalizan con un movimiento vertical hacia abajo permaneciendo en reposo hasta el siguiente estado. Las extremidades del Grupo 2 no se mueven.
- **Etapa 2:** Las extremidades del Grupo 2 realizan un movimiento hacia adelante mientras que las demás realizan el impulso hacia atrás permitiendo así lograr un desplazamiento a la plataforma.
- **Etapa 3:** Las extremidades del Grupo 1 se mueven hacia adelante y las del Grupo 2 se impulsan hacia atrás, es decir, se realiza los mismos movimientos del estado anterior, pero en sentido contrario.

### 2.4.2. Dos extremidades por movimiento

Para efectuar el movimiento robot hexápodo, se levantan siempre dos patas, las cuales se dirigen hacia delante mientras que las otras cuatro se

mantienen en el piso, al tener cuatro patas en contacto con la superficie se gana estabilidad.



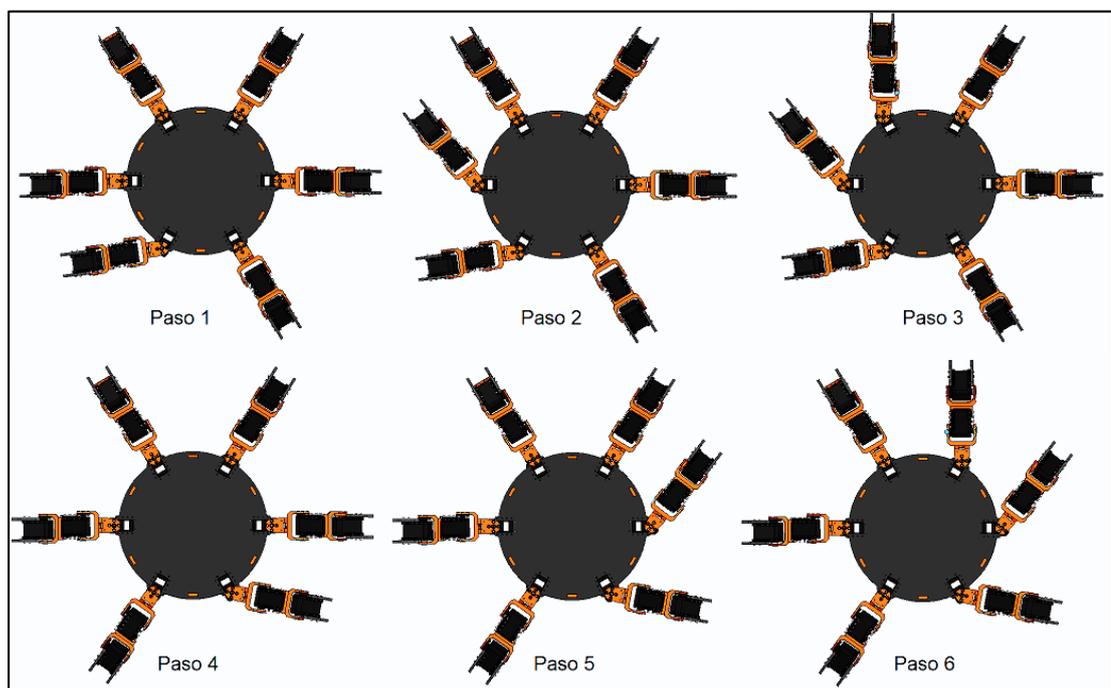
**Figura 26: Secuencia de dos extremidades simultáneas.**

- **Etapa 1:** Se alza las patas 1 y 6 que están hacia atrás; las patas 2 y 3 que están hacia delante se mantienen en el suelo al igual que las patas 4 y 5 que están en posición central.
- **Etapa 2:** Se mueven las patas 1 y 6 hacia delante (alzadas); las patas 2 y 3 se mueven en el piso hacia la posición media mientras que las patas 4 y 5 se ubican hacia atrás.
- **Etapa 3:** Descienden las patas 1 y 6 y las demás se mantienen en su posición anterior.
- **Etapa 4:** Se alzan las patas 4 y 5.
- **Etapa 5:** Se mueven las patas 4 y 5 hacia el frente; las patas 1 y 6 se arrastran hacia su posición central y las patas 2 y 3 se deslizan hacia atrás.
- **Etapa 6:** Bajan las patas 4 y 5.
- **Etapa 7:** Ascenden las patas 2 y 3.
- **Etapa 8:** Se dirigen hacia delante las patas 2 y 3; la patas 1 y 6 van hacia atrás tocando el suelo, y las patas 4 y 5 se sitúan en el centro también en contacto con la superficie.

- **Etapa 9:** Descienden las patas 2 y 3 manteniéndose las otras en su misma posición.

### 2.4.3. Una extremidad por movimiento

De acuerdo a Fuertes & Llumiquinga (2005), solo sería recomendable en condiciones de batería baja a las que en principio no debería de llegarse nunca, aunque esta presenta beneficios de estabilidad pero limitaciones de velocidad.



**Figura 27: Secuencia de una extremidad a la vez.**

Comenzando con una de las patas traseras, la cual se levanta y se mueve adelante, el resto de patas se quedan en contacto con la superficie de desplazamiento; la pata levantada entonces baja y el proceso se repite para la pata siguiente del mismo lado, una vez que se haya movido la pata delantera, el procedimiento se repite para el otro lado.

## 2.5. Resumen

- Los robots zoomórficos reproducen con cierto grado de realismo los sistemas de locomoción de distintos seres vivos.
- Los robots zoomórficos según su sistema de locomoción se clasifican en: Robots arrastrantes, caminantes, escaladores, nadadores, saltarines y voladores.
- La configuración de las extremidades en los robots zoomórficos puede ser: Mamífera, reptiliana e insectoide, lo cual involucra distintos movimientos articulares al momento de trasladarse.
- Los robots zoomórficos caminantes de acuerdo a su estabilidad de movimientos pueden ser: Estáticamente estables y Dinámicamente estables.
- La estabilidad estática se consigue al contener siempre la proyección vertical del centro de gravedad del robot dentro de un polígono de soporte formado por las extremidades sobre el suelo.
- La estabilidad dinámica refiere a la utilización de fuerzas dinámicas y retroalimentación para lograr el control y estabilidad dentro de un ciclo límite que se repite en cada paso.
- De acuerdo a la configuración física de los robots hexápodos estos pueden ser: Bilaterales o radiales.
- Cada una de las extremidades de un robot hexápodo puede contar con uno, dos, tres o más grados de libertad.
- Existen tres estrategias de desplazamiento para los robots hexápodo, los cuales difieren en características referentes a estabilidad, velocidad de desplazamiento y consumo de energía, y son: Tres extremidades por movimiento, dos extremidades por movimiento y una extremidad por movimiento.

## **CAPÍTULO III**

### **DISEÑO**

El tercer capítulo describe cada una de las etapas de diseño del proyecto, basadas en su mayoría en la metodología de despliegue de la función de calidad, hasta la obtención de un modelo final. El diseño total queda dividido en cuatro módulos como son: estructura, locomoción, monitoreo y teleoperación. El diseño de la estructura abarca desde la consecución de la cinemática y dinámica del robot hasta la selección de los materiales para cada una de las piezas, los actuadores y el suministro de energía. La locomoción trata de todos aquellos elementos que hacen posible la ejecución del algoritmo de control y una explicación de los tipos de caminatas a implementar. En el monitoreo se selecciona el tipo de cámara a utilizar, así como también se diseña una interfaz gráfica que cumpla con los principios de la teleoperación y visualización del entorno. La teleoperación describe el módulo inalámbrico a utilizar, como también los elementos constitutivos de un joystick para el robot. Como parte final del capítulo se obtiene un modelo de robot y las características técnicas definidas por cada uno de sus componentes.

#### **3.1. Metodología de diseño de despliegue de la función de calidad**

Se utilizó la metodología de diseño de despliegue de la función de calidad (QFD, siglas en inglés), de acuerdo al documento de trabajo elaborado por Yacuzzi & Martín (2003); con el fin de establecer el enfoque que se debería usar para la planificación y construcción del sistema robótico. Como resultado se obtendrá una matriz, llamada matriz de calidad, en la que se indican las características ingenieriles para el cumplimiento de los requerimientos objetivos del proyecto.

Tabla 2

*Matriz de la calidad del presente proyecto*

Características técnicas	P R I O R I D A D	Requerimientos										
		Configuración física y número de extremidades	Grados de libertad por extremidad	Geometría del elemento final de la extremidad	Metodología del movimiento	Material de estructura	Comunicación inalámbrica	Torque de servomotores	Transmisor de video robusto	Sistema de operación robusto	Estructura sellada e impermeable	Software de programación libre
Dimensiones	2	3	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0
Duración de batería	4	9	9	0	9	0	3	9	9	0	0	0
Peso	3	9	3	3	0	9	0	1	3	0	1	0
Movimiento natural	3	3	9	9	9	0	0	3	0	1	0	0
Maniobrabilidad intuitiva	4	0	0	0	0	0	3	0	3	9	0	3
Costo	3	9	9	9	1	9	9	9	9	3	3	9
Capacidades todoterreno	5	9	9	9	3	9	1	9	1	3	3	0
Debe subir al menos una pendiente de 30°	2	3	9	3	9	3	0	9	0	1	0	0
Velocidad de movimiento	3	3	3	3	9	1	3	9	0	3	0	0
Control remoto	5	0	1	0	3	0	9	3	3	9	0	9
Vídeo en tiempo real	4	0	0	0	0	0	9	1	9	1	0	9
No debe ingresar agua al robot	3	1	0	0	0	9	0	0	0	0	9	0
Utilización de software con licencia gratuita	4	0	1	0	0	0	9	0	9	9	0	9
Diseño estético	1	3	3	3	0	9	1	0	0	0	3	0
<b>Ponderación total de cada característica técnica</b>		171	185	128	143	144	183	184	176	159	59	156
<b>Orden de importancia</b>		5	1	10	9	8	3	2	4	6	11	7

La ponderación total de cada característica técnica de vela, de una manera ordenada, su importancia en la solución del problema final (ver Tabla 3).

Tabla 3

*Resultados de la matriz QFD*

HITOS	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	PORCENTAJE DE PONDERACIÓN
1	Grados de libertad por extremidad	11
2	Torque de servomotores	10,9
3	Comunicación inalámbrica	10,8
4	Transmisor de video robusto	10,4
5	Configuración física y número de extremidades	10,1
6	Sistema de operación robusto	9,42
7	Software de programación libre	9,24
8	Material de estructura	8,53
9	Metodología del movimiento	8,47
10	Geometría del elemento final de la extremidad	7,58
11	Estructura sellada e impermeable	3,5

Las dos características más importantes, resultantes de la matriz de la calidad, son los grados de libertad por extremidad y el torque de los servomotores. Estas características inciden en la capacidad del robot zoomórfico caminante de desplazarse por terrenos irregulares y tener una locomoción natural. La tercera característica de mayor relevancia, la comunicación inalámbrica, es la base fundamental del control tele-operado del robot. La cuarta característica, la transmisión de video robusto, ayuda al control tele-operado y es la función necesaria para la inspección o exploración de los entornos. Todas estas características cumplen con los dos requerimientos objetivos de mayor ponderación que son: La capacidad todo terreno del robot y su control remoto.

Los resultados obtenidos de la matriz de calidad se agrupan en módulos para formar una estructura funcional. A través de los módulos se puede distribuir las diversas operaciones funcionales para satisfacer los requerimientos objetivos del proyecto de una manera eficaz.

**Tabla 4**

***Módulos para el diseño***

<b>N°</b>	<b>MÓDULO</b>	<b>SUBSISTEMAS</b>	<b>FUNCIONES</b>	<b>HITOS A CUMPLIR</b>
<b>1</b>	Estructura	Extremidades	Grados de libertad para el movimiento y capacidades todo terreno	1,2,5,8,9,10
		Cubierta	Protección contra elementos externos al robot	8,11
<b>2</b>	Locomoción	Locomoción	Programación de movimiento del robot	1,2,9
<b>3</b>	Monitoreo	Cámara	Video en tiempo real	4,7
		Interfaz	Comunicación humano-máquina	
<b>4</b>	Tele-operación	Comunicación	Envío y recepción de señales	3,5,6,7
		Mando	Control tele-operado del robot	

### **3.2. Módulo 1. Estructura**

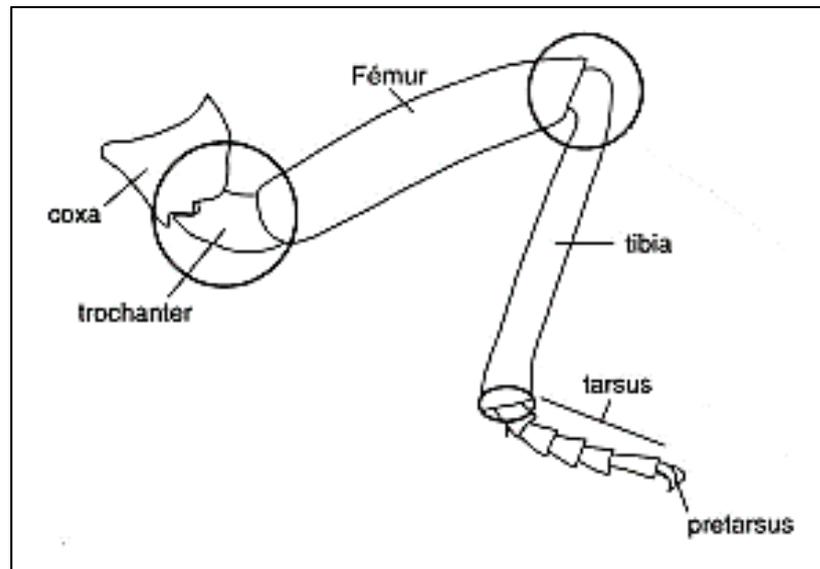
El robot zoomórfico por su configuración radial está diseñado respecto a la forma de una araña *Loxosceles Laeta* (ver Figura 20). Según Parra, Torres, Morillas, & Espinoza (2002), dicho arácnido en etapa adulta mide de 8 a 15 mm de longitud y sus patas entre 8 y 30 mm. Se utilizará una escala de adaptación sin perder las relaciones entre partes.

#### **3.2.1. Subsistema 1. Extremidades**

De acuerdo a Torres Zuñiga, Romero Vargas, & Olvera Villa (2006), en los insectos, cada pata está compuesta de seis segmentos. Cada uno de estos segmentos está acoplado con el anterior por articulaciones monocondílicas y dicondílicas. Los seis segmentos básicos son: coxa, trocánter, fémur, tibia, tarso y pretarso (ver Figura 28).

Para el diseño, la coxa está definida como la distancia entre los ejes de acción de los dos primeros servomotores, siendo el segundo servomotor el que representa al trocánter. El fémur y la tibia son dos eslabones rígidos cuya articulación de unión es un tercer servomotor. El tarso y pretarso se representan mediante el efector final de la pata.

El fémur es el eslabón más robusto, mientras la tibia es el más largo. Tienen una relación de longitud del doble aproximadamente, esta consideración se toma para evitar que el cuerpo del robot rapse en cualquier posición articular.

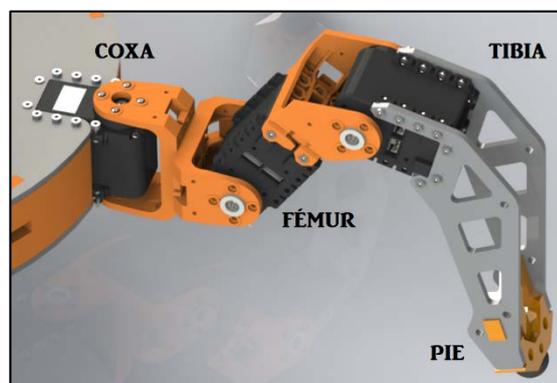


**Figura 28: Patas de insecto típica y articulaciones.**

Fuente: (Torres Zuñiga, Romero Vargas, & Olvera Villa, 2006)

### 3.2.1.1. Análisis cinemático de la extremidad

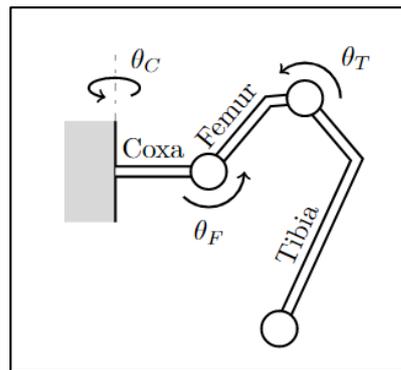
Cada una de las extremidades del robot caminante será considerada como una cadena cinemática formada por tres eslabones: Coxa, fémur y tibia (adjunto el pie), y tres servomotores que actúan como articulaciones.



**Figura 29: Extremidades del robot.**

### 3.2.1.1.1. Cinemática directa

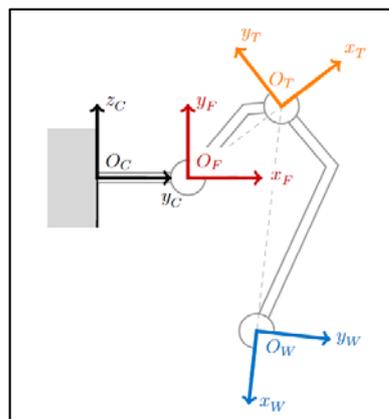
La locomoción insectoide del robot está constituida por una serie de rotaciones ejercidas por los elementos articulares dispuestos (ver Figura 30). Los ángulos generados y la geometría propia de sus extremidades son parámetros físicos que permitirán realizar el análisis cinemático directo.



**Figura 30: Representación esquemática de extremidad.**

Fuente: (Mrva, 2014)

Se usará el algoritmo de Denavit & Hartenberg con el fin de hallar una matriz de transformación que relacione la posición y orientación del extremo de la pata del robot respecto a un sistema de referencia.



**Figura 31: Parámetros de Denavit Hartenberg.**

Fuente: (Mrva, 2014)

Es suficiente el análisis de una sola extremidad (ver Figura 31) debido a que contará con la misma disposición articular, tipo de movimiento, dirección y sentido de desplazamiento que las demás. Los parámetros de Denavit Hartenberg definidos por el movimiento de toda la cadena, desde la coxa hasta el extremo de la tibia, se exponen a continuación (ver Tabla 5).

**Tabla 5**

***Parámetros de Denavit Hartenberg de la extremidad del robot hexápodo.***

Articulación	$\theta$	$\theta^{desf}$	$d$	$a$	$\alpha$
<b>Coxa – I</b>	$q_1$	$\pi/2$	0	$l_c$	$-\pi/2$
<b>Femur – II</b>	$q_2$	-0.22	0	$l_f$	0
<b>Tibia – III</b>	$q_3$	-0.59	0	$l_t$	0

Mediante los parámetros obtenidos se desarrollan las matrices de transformación homogénea, correspondiente al problema cinemático de la extremidad, de acuerdo a la Ec.1 planteada por Barrientos, Peñín, Balaguer, & Aracil (1997).

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 1}$$

Utilizando la Ec.1 se desarrollan las matrices pertinentes para cada articulación. Teniendo en cuenta que  $q'_i = q_i + q_i^{desf}$ .

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos(q'_1) & 0 & -\sin(q'_1) & l_c \cos(q'_1) \\ \sin(q'_1) & 0 & -\cos(q'_1) & l_c \sin(q'_1) \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} \cos(q'_2) & -\sin(q'_2) & 0 & l_f \cos(q'_2) \\ \sin(q'_2) & \cos(q'_2) & 0 & l_f \sin(q'_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} \cos(q'_3) & -\sin(q'_3) & 0 & l_t \sin(q'_3) \\ \sin(q'_3) & \cos(q'_3) & 0 & l_t \cos(q'_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matriz de localización  $T$  del extremo de la pata del robot con respecto a la coxa viene expresada por:

$$T = {}^0A_3 = {}^0A_1 \times {}^1A_2 \times {}^2A_3 \quad \text{Ec. 2}$$

Operando como está indicado en la Ec. 5, se obtiene:

$$T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 3}$$

$$T = \begin{bmatrix} \cos(q'_1) \cos(q'_2 + q'_3) & -\cos(q'_1) \sin(q'_2 + q'_3) & -\sin(q'_1) & p_x \\ \sin(q'_1) \cos(q'_2 + q'_3) & -\sin(q'_1) \sin(q'_2 + q'_3) & -\cos(q'_1) & p_y \\ -\sin(q'_2 + q'_3) & -\cos(q'_2 + q'_3) & 0 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

El desarrollo de la matriz de la Ec. 6, planteada por Barrientos et al. (1997), representa la resolución del problema cinemático. Los términos  $n$ ,  $o$  y  $a$  definen la orientación y el vector  $p$  la posición.

Las siguientes ecuaciones representan la posición del extremo de la tibia (pie) con respecto a la articulación de la coxa del robot, y corresponden al vector posición de la cuarta columna de la matriz de localización  $T$ .

$$p_x = \cos(q'_1) [l_c + l_t \cos(q'_2 + q'_3) + l_f \cos(q'_2)]$$

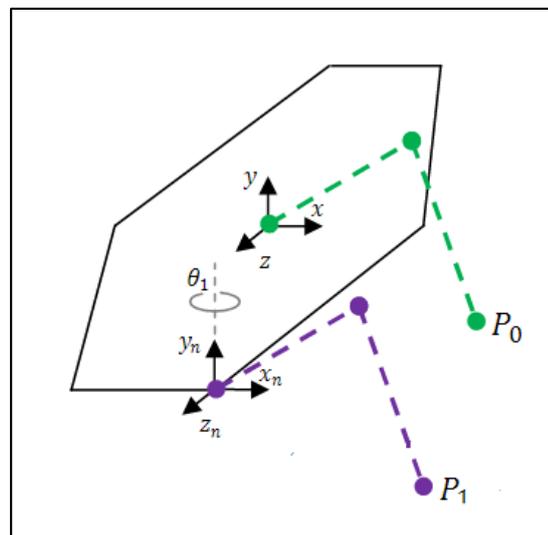
$$p_y = \sin(q'_1) [l_c + l_t \cos(q'_2 + q'_3) + l_f \cos(q'_2)]$$

$$p_z = -l_t \sin(q'_2 + q'_3) - l_f \sin(q'_2)$$

Se traslada el sistema de referencia de la matriz de localización  $T$  al centro del robot, mediante su multiplicación con una matriz de desplazamiento.

$$T' = {}^{0'}A_0 \times T = {}^{0'}A_3$$

**Ec. 4**



**Figura 32: Traslación del sistema de referencia.**

La matriz de desplazamiento al centro del cuerpo, queda definida por las coordenadas  $d_x$ ,  $d_y$  y  $d_z$  respecto a la articulación de la coxa del robot.

$${}^{0'}A_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Las Ec. 12, Ec. 13 y Ec. 14 representan la posición del pie con respecto al nuevo sistema de referencia en el centro del cuerpo del robot.

$$p_x = d_x + \cos(q'_1) [l_c + l_t \cos(q'_2 + q'_3) + l_f \cos(q'_2)] \quad \text{Ec. 5}$$

$$p_y = d_y + \sin(q'_1) [l_c + l_t \cos(q'_2 + q'_3) + l_f \cos(q'_2)] \quad \text{Ec. 6}$$

$$p_z = d_z - l_t \sin(q'_2 + q'_3) - l_f \sin(q'_2) \quad \text{Ec. 7}$$

### 3.2.1.1.2. Cinemática inversa (Método analítico)

La cinemática inversa permite hallar las coordenadas articulares del robot necesarias para localizar el pie del robot en una posición y orientación deseada.

Operando la Ec. 5 y Ec. 6, se obtiene la ecuación que define el movimiento articular de la coxa, como parte de la solución de la cinemática inversa.

$$q_1 = \arctan\left(\frac{p_y - d_y}{p_x - d_x}\right) - \frac{\pi}{2} \quad \text{Ec. 8}$$

En base a la Ec. 2 y Ec. 4 se obtiene la siguiente expresión:

$$({}^{0'}A_0)^{-1}({}^0A_1)^{-1} \times T' = {}^1A_2 \times {}^2A_3 \quad \text{Ec. 9}$$

Del desarrollo de la parte izquierda de la Ec. 9, se tiene la matriz:

$$({}^0A_0)^{-1}({}^0A_1)^{-1} \times T' = \begin{bmatrix} \cos(q'_2 + q'_3) & -\sin(q'_2 + q'_3) & 0 & p'_x \\ \sin(q'_2 + q'_3) & \cos(q'_2 + q'_3) & 0 & p'_y \\ 0 & 0 & 1 & p'_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Los términos correspondientes a la cuarta columna de la matriz quedan definidos como:

$$p'_x = \frac{p_x \cos(q'_1) - p_y \sin(q'_1) - (l_c + d_x)[2 \cos^2(q'_1) - 1]}{2 \cos^2(q'_1) - 1} \quad \text{Ec. 10}$$

$$p'_y = -p_z - d_y \quad \text{Ec. 11}$$

$$p'_z = \frac{p_x \sin(q'_1) - p_y \cos(q'_1) - d_z[2 \cos^2(q'_1) - 1]}{2 \cos^2(q'_1) - 1} \quad \text{Ec. 12}$$

Del desarrollo de la parte derecha de la Ec. 9, se tiene la matriz:

$${}^1A_2 * {}^2A_3 = \begin{bmatrix} \cos(q'_2 + q'_3) & -\sin(q'_2 + q'_3) & 0 & p''_x \\ \sin(q'_2 + q'_3) & \cos(q'_2 + q'_3) & 0 & p''_y \\ 0 & 0 & 1 & p''_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Los términos correspondientes a la cuarta columna de la matriz quedan definidos como:

$$p''_x = l_t \cos(q'_2 + q'_3) + l_f \cos(q'_2) \quad \text{Ec. 13}$$

$$p''_y = l_t \sin(q'_2 + q'_3) + l_f \sin(q'_2) \quad \text{Ec. 14}$$

$$p''_z = 0 \quad \text{Ec. 15}$$

Igualando las ecuaciones Ec. 10, Ec. 11 y Ec. 12 a sus correspondientes, las ecuaciones Ec. 13, Ec. 14 y Ec. 15, se obtienen las dos ecuaciones faltantes que definen el movimiento articular del fémur y tibia respectivamente. Para la Ec. 16 y Ec. 17 se establece que  $a = p'_x$  y  $b = p'_y$ .

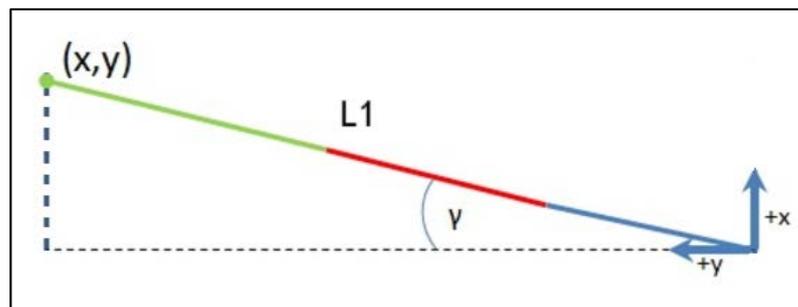
$$q_2 = 2 \arctan \left\{ \frac{2 b l_f \pm \sqrt{2(a^2 + b^2)(l_f^2 + l_t^2)(a^2 + b^2)^2 - (l_f^2 - l_t^2)^2}}{b^2 - l_t^2 + (a + l_f)^2} \right\} \quad \text{Ec. 16}$$

+ 0.22

$$q_3 = \pm 2 \arctan \left\{ \frac{\sqrt{[(l_f + l_t)^2 - (a^2 + b^2)]}}{\sqrt{[(a^2 + b^2) - (l_f - l_t)^2]}} \right\} + 0.59 \quad \text{Ec. 17}$$

### 3.2.1.1.3. Cinemática inversa (Método Geométrico)

Con el fin de encontrar los ángulos articulares de la coxa, fémur y tibia, dividimos el análisis de la extremidad en dos diagramas de dos dimensiones (ver Figura 33 y Figura 34).



**Figura 33: Vista superior de extremidad.**

Fuente: [oscarliang.com/inverse-kinematics-and-trigonometry-basics/](https://oscarliang.com/inverse-kinematics-and-trigonometry-basics/)

En el plano  $(x, y)$ , vista superior de la extremidad, se puede determinar la variable angular correspondiente a la articulación de la coxa.

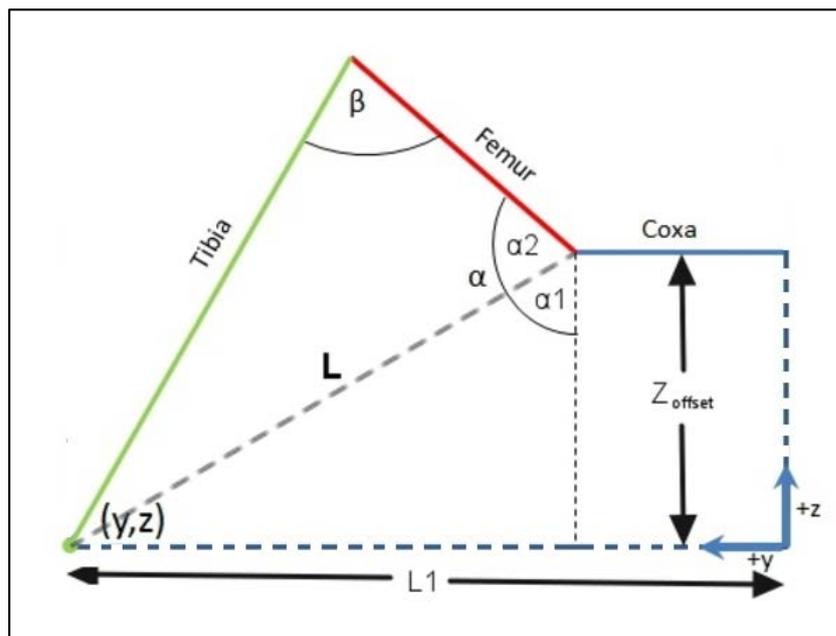
$$\tan(\gamma) = \frac{x}{y}$$

$$\gamma = \tan^{-1}\left(\frac{x}{y}\right)$$

**Ec. 18**

La distancia  $L_1$  corresponde a la hipotenusa del triángulo rectángulo formado por los valores de  $x$  e  $y$  que forman el punto  $P(x, y)$  mostrado en la Figura 33. Por lo tanto, el valor de  $L_1$  queda definido por:

$$L_1 = \sqrt{x^2 + y^2}$$



**Figura 34: Vista lateral de extremidad.**

Fuente: [oscarliang.com/inverse-kinematics-and-trigonometry-basics/](https://oscarliang.com/inverse-kinematics-and-trigonometry-basics/)

Para determinar alfa y beta se utiliza el diagrama del plano (y, z), vista lateral, de la extremidad. De manera que se facilite su análisis se utilizará una metodología de resolución por triángulos.

El ángulo alfa queda dividido en dos, teniendo como alfa 1:

$$L = \sqrt{z^2 + (L_1 - L_{Coxa})^2}$$

$$\tan(\alpha_1) = \frac{L_1 - L_{Coxa}}{z}$$

$$\alpha_1 = \arctan\left(\frac{L_1 - L_{Coxa}}{z}\right) \quad \text{Ec. 19}$$

Para alfa 2 se emplea la ley del coseno, por lo cual tenemos:

$$L_{Tibia}^2 = L_{Femur}^2 + L^2 - 2(L_{Femur})(L) \cos(\alpha_2)$$

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{L_{Femur}^2 + L^2 - L_{Tibia}^2}{2(L_{Femur})(L)}\right) \quad \text{Ec.20}$$

Sumando las ecuaciones 19 y 20 se obtiene alfa.

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{L_1 - L_{Coxa}}{z}\right) + \arccos\left(\frac{L_{Femur}^2 + L^2 - L_{Tibia}^2}{2(L_{Femur})(L)}\right) \quad \text{Ec. 21}$$

El ángulo beta se expresa como:

$$L^2 = L_{Tibia}^2 + L_{Femur}^2 - 2(L_{Tibia})(L_{Femur}) \cos^{-1}(\beta)$$

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{L_{Tibia}^2 + L_{Femur}^2 - L^2}{2(L_{Tibia})(L_{Femur})}\right) \quad \text{Ec.22}$$

En base a los movimientos articulares definidos en la Figura 30 y los desfases de cada variable articular indicados en la Tabla 5, los desplazamientos angulares de cada articulación se expresan como:

$$\text{Ángulo coxa} = \gamma \quad \text{Ec. 23}$$

$$\text{Ángulo Fémur} = \pi - 0.22 - \alpha \quad \text{Ec. 24}$$

$$\text{Ángulo Tibia} = \pi - 0.59 - \beta \quad \text{Ec. 25}$$

### 3.2.1.2. Análisis dinámico de la extremidad

El objetivo principal del análisis es hallar el torque necesario para el correcto movimiento de cada articulación, teniendo en cuenta la energía requerida en cada punto. Para aquello, se deberá determinar las relaciones existentes entre el movimiento de las patas del robot y las fuerzas aplicadas en las mismas.

Se realizará el modelo dinámico inverso mediante las ecuaciones de Lagrange-Euler. De acuerdo a Barrientos et al. (1997), las ecuaciones se basan en consideraciones energéticas y expresan las fuerzas y pares requeridos de acuerdo a la evolución de sus coordenadas articulares y sus correspondientes derivadas.

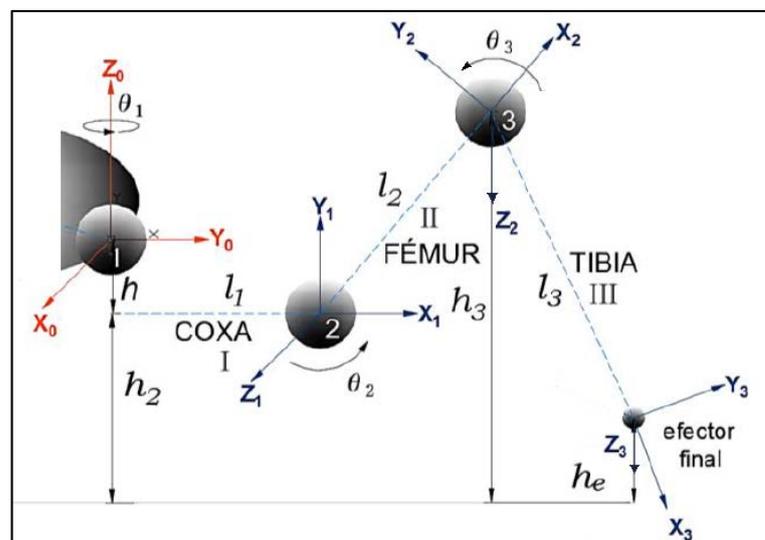
La formulación Lagrangiana establece la ecuación:

$$L(\theta, \dot{\theta}) = K(\theta, \dot{\theta}) - U(\theta) \quad \text{Ec. 26}$$

Los términos  $K(\theta, \dot{\theta})$  y  $U(\theta)$  corresponden a la energía cinética y a la energía potencial respectivamente. Mientras que  $\theta$  y  $\dot{\theta}$  definen la variable articular y su velocidad angular en cada articulación. Basado en la Ec. 26 y para modelar el movimiento de un robot rígido de  $n$  grados de libertad se formula:

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L(\theta, \dot{\theta})}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial L(\theta, \dot{\theta})}{\partial \theta_i} \quad \text{Ec. 27}$$

El modelado dinámico por energías de Euler-Lagrange, dependen de los parámetros físicos de los eslabones y articulaciones en la extremidad (ver Figura 35).



**Figura 35: Esquema para análisis de energías.**

Fuente: (Benalcázar Redrobán & Noboa Encalada, 2017)

Para el modelo dinámico de la extremidad se usará la notación  $S = \sin$  y  $C = \cos$ . Con lo cual se procede al estudio de energías en cada eslabón de la pata del robot de acuerdo a las ecuaciones de Euler-Lagrange.

### 3.2.1.2.1. Análisis del primer eslabón - Coxa

La energía cinética se encuentra expresada en la Ec. 28.

$$K_1 = \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 \quad \text{Ec. 28}$$

La energía potencial se encuentra expresada en la Ec. 29.

$$U_1 = m_1 g h_{CG1} \quad \text{Ec. 29}$$

### 3.2.1.2.2. Análisis del segundo eslabón - Fémur

La energía cinética se encuentra expresada en la Ec. 30.

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 + \frac{1}{2} I_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) \quad \text{Ec. 30}$$

Donde  $v_2$  se encuentra en función de las velocidades lineales con respecto al centro de gravedad en cada eje cartesiano. Por lo tanto, la velocidad lineal al cuadrado se obtendrá de:

$$v_2^2 = \dot{x}_{CG2}^2 + \dot{y}_{CG2}^2 + \dot{z}_{CG2}^2$$

Las coordenadas cartesianas del centro de gravedad del eslabón 2, correspondiente al fémur, con respecto al eje de referencia se definen como:

$$x_{CG2} = l_1 C(\theta_1) + \frac{1}{2} l_2 C(\theta_1) C(\theta_2)$$

$$y_{CG2} = l_1 S(\theta_1) + \frac{1}{2} l_2 S(\theta_1) C(\theta_2)$$

$$z_{CG2} = h_2 + \frac{1}{2} l_2 S(\theta_2)$$

Por lo tanto, la velocidad lineal correspondiente a cada eje coordenado será:

$$\dot{x}_{CG2} = -l_1 S(\theta_1) \dot{\theta}_1 + \frac{1}{2} l_2 [-C(\theta_2) S(\theta_1) \dot{\theta}_1 - S(\theta_2) C(\theta_1) \dot{\theta}_2]$$

$$\dot{y}_{CG2} = l_1 C(\theta_1) \dot{\theta}_1 + \frac{1}{2} l_2 [C(\theta_2) C(\theta_1) \dot{\theta}_1 - S(\theta_2) S(\theta_1) \dot{\theta}_2]$$

$$\dot{z}_{CG2} = \frac{1}{2} l_2 C(\theta_2) \dot{\theta}_2$$

La velocidad lineal al cuadrado correspondiente a la Ec. 30, está expresada en función de las velocidades angulares como:

$$v_2^2 = \left( l_1^2 + \frac{1}{4} l_2^2 C^2 \theta_2 + l_1 l_2 C \theta_2 \right) \dot{\theta}_1^2 + \left( \frac{1}{4} l_2^2 \right) \dot{\theta}_2^2$$

Entonces, la energía cinética queda definida de acuerdo a la Ec. 31.

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 \left[ \left( l_1^2 + \frac{1}{4} l_2^2 C^2 \theta_2 + l_1 l_2 C \theta_2 \right) \dot{\theta}_1^2 + \left( \frac{1}{4} l_2^2 \right) \dot{\theta}_2^2 \right] + \frac{1}{2} I_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) \quad \text{Ec. 31}$$

La energía potencial se encuentra expresada en la Ec. 32.

$$U_2 = m_2 g \left( h_2 + \frac{1}{2} l_2 S(\theta_2) \right) \quad \text{Ec. 32}$$

En los apartados 3.2.1.2.3 y 3.2.1.2.4, para la consecución de la energía cinética en función de las variables articulares y velocidades angulares pertinentes, se realizan las mismas operaciones detalladas en el apartado 3.2.1.2.2.

### 3.2.1.2.3. Análisis del tercer eslabón - Tibia

La energía cinética se encuentra expresada en la Ec. 33.

$$K_3 = \frac{1}{2} m_3 v_3^2 + \frac{1}{2} I_3 (\dot{\theta}_1^2 + (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2)^2) \quad \text{Ec. 33}$$

Las coordenadas cartesianas del centro de gravedad del eslabón 3, correspondiente a la tibia, con respecto al eje de referencia se definen como:

$$x_{CG3} = l_1 C(\theta_1) + l_2 C(\theta_1) C(\theta_2) + \frac{1}{2} l_3 C(\theta_1) C(\theta_3 - \theta_2)$$

$$y_{CG3} = l_1 S(\theta_1) + l_2 S(\theta_1) C(\theta_2) + \frac{1}{2} l_3 S(\theta_1) C(\theta_3 - \theta_2)$$

$$z_{CG3} = h_2 + l_2 S(\theta_2) - \frac{1}{2} l_3 S(\theta_3 - \theta_2)$$

Las velocidades angulares resultantes:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{CG3} = & -l_1 S(\theta_1) \dot{\theta}_1 + l_2 [-C(\theta_2) S(\theta_1) \dot{\theta}_1 - S(\theta_2) C(\theta_1) \dot{\theta}_2] \\ & + \frac{1}{2} l_3 [-S(\theta_1) C(\theta_3 - \theta_2) \dot{\theta}_1 - C(\theta_1) S(\theta_3 - \theta_2) (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{y}_{CG3} = & l_1 C(\theta_1) \dot{\theta}_1 + l_2 [C(\theta_2) C(\theta_1) \dot{\theta}_1 - S(\theta_2) S(\theta_1) \dot{\theta}_2] \\ & + \frac{1}{2} l_3 [C(\theta_1) C(\theta_3 - \theta_2) \dot{\theta}_1 - S(\theta_1) S(\theta_3 - \theta_2) (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2)] \end{aligned}$$

$$\dot{z}_{CG3} = l_2 C(\theta_2) \dot{\theta}_2 - \frac{1}{2} l_3 C(\theta_3 - \theta_2) (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2)$$

La energía cinética queda definida de acuerdo a la Ec. 34.

$$\begin{aligned}
 K_3 = \frac{1}{2} m_3 \left\{ \left[ l_1 + l_2 C \theta_2 + \frac{1}{2} l_3 C(\theta_3 - \theta_2) \right]^2 \dot{\theta}_1^2 \right. \\
 + \left[ l_2^2 + \frac{1}{4} l_3^2 - l_2 l_3 S \theta_2 S(\theta_3 - \theta_2) \right. \\
 + \left. l_2 l_3 C \theta_2 C(\theta_3 - \theta_2) \right] \dot{\theta}_2^2 \\
 + \left[ -\frac{1}{2} l_3^2 + l_2 l_3 S \theta_2 S(\theta_3 - \theta_2) \right. \\
 - \left. l_2 l_3 C \theta_2 C(\theta_3 - \theta_2) \right] \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \left. \left( \frac{1}{4} l_3^2 \right) \dot{\theta}_3^2 \right\} \\
 + \frac{1}{2} I_3 \left( \dot{\theta}_1^2 + (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2)^2 \right)
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 34}$$

La energía potencial se encuentra expresada en la Ec. 35.

$$U_3 = m_3 g \left( h_2 + l_2 S(\theta_2) - \frac{1}{2} l_3 S(\theta_3 - \theta_2) \right)
 \tag{Ec. 35}$$

#### 3.2.1.2.4. Análisis del cuarto eslabón – pie

La energía cinética se encuentra expresada en la Ec. 36.

$$K_4 = \frac{1}{2} m_4 v_4^2
 \tag{Ec. 36}$$

Las coordenadas cartesianas del centro de gravedad del eslabón 4, correspondiente al pie, con respecto al eje de referencia se definen como:

$$x_{CG4} = l_1 C(\theta_1) + l_2 C(\theta_1) C(\theta_2) + l_3 C(\theta_1) C(\theta_3 - \theta_2)$$

$$y_{CG4} = l_1 S(\theta_1) + l_2 S(\theta_1) C(\theta_2) + l_3 S(\theta_1) C(\theta_3 - \theta_2)$$

$$z_{CG4} = h_2 + l_2 S(\theta_2) - l_3 S(\theta_3 - \theta_2)$$

Las velocidades angulares resultantes:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{CG4} = & -l_1 S(\theta_1) \dot{\theta}_1 + l_2 [-C(\theta_2) S(\theta_1) \dot{\theta}_1 - S(\theta_2) C(\theta_1) \dot{\theta}_2] \\ & + l_3 [-S(\theta_1) C(\theta_3 - \theta_2) \dot{\theta}_1 - C(\theta_1) S(\theta_3 - \theta_2) (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{y}_{CG4} = & l_1 C(\theta_1) \dot{\theta}_1 + l_2 [C(\theta_2) C(\theta_1) \dot{\theta}_1 - S(\theta_2) S(\theta_1) \dot{\theta}_2] \\ & + l_3 [C(\theta_1) C(\theta_3 - \theta_2) \dot{\theta}_1 - S(\theta_1) S(\theta_3 - \theta_2) (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2)] \end{aligned}$$

$$\dot{z}_{CG4} = l_2 C(\theta_2) \dot{\theta}_2 - l_3 C(\theta_3 - \theta_2) (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2)$$

La energía cinética queda definida de acuerdo a la Ec. 37.

$$\begin{aligned} K_4 = \frac{1}{2} m_4 \{ & [l_1 + l_2 C \theta_2 + l_3 C(\theta_3 - \theta_2)]^2 \dot{\theta}_1^2 \\ & + [l_2^2 + l_3^2 - 2 l_2 l_3 S \theta_2 S(\theta_3 - \theta_2) \\ & + 2 l_2 l_3 C \theta_2 C(\theta_3 - \theta_2)] \dot{\theta}_2^2 \\ & + [-2 l_3^2 + 2 l_2 l_3 S \theta_2 S(\theta_3 - \theta_2) \\ & - 2 l_2 l_3 C \theta_2 C(\theta_3 - \theta_2)] \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + (l_3^2) \dot{\theta}_3^2 \} \end{aligned} \quad \text{Ec. 37}$$

La energía potencial se encuentra expresada en la Ec. 38.

$$U_4 = m_4 g (h_2 + l_2 S(\theta_2) - l_3 S(\theta_3 - \theta_2)) \quad \text{Ec. 38}$$

### 3.2.1.2.5. Análisis de energía total

Para poder trabajar con el Lagrangiano se necesita la energía cinética y potencial total del sistema, por lo cual, se procede a sumar las energías resultantes de cada eslabón. La Ec. 39 y Ec. 40 representan la energía cinética total y energía potencial total respectivamente.

$$\begin{aligned}
K_T = & \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \left[ \left( l_1^2 + \frac{1}{4} l_2^2 C^2 \theta_2 + l_1 l_2 C \theta_2 \right) \dot{\theta}_1^2 + \left( \frac{1}{4} l_2^2 \right) \dot{\theta}_2^2 \right] \\
& + \frac{1}{2} I_2 \left( \dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2 \right) \\
& + \frac{1}{2} m_3 \left\{ \left[ l_1 + l_2 C \theta_2 + \frac{1}{2} l_3 C(\theta_3 - \theta_2) \right]^2 \dot{\theta}_1^2 \right. \\
& + \left[ l_2^2 + \frac{1}{4} l_3^2 - l_2 l_3 S \theta_2 S(\theta_3 - \theta_2) \right. \\
& + \left. \left. + l_2 l_3 C \theta_2 C(\theta_3 - \theta_2) \right] \dot{\theta}_2^2 \right. \\
& + \left[ -\frac{1}{2} l_3^2 + l_2 l_3 S \theta_2 S(\theta_3 - \theta_2) \right. \\
& \left. \left. - l_2 l_3 C \theta_2 C(\theta_3 - \theta_2) \right] \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \left( \frac{1}{4} l_3^2 \right) \dot{\theta}_3^2 \right\} \\
& + \frac{1}{2} I_3 \left( \dot{\theta}_1^2 + (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2)^2 \right) \\
& + \frac{1}{2} m_4 \left\{ \left[ l_1 + l_2 C \theta_2 + l_3 C(\theta_3 - \theta_2) \right]^2 \dot{\theta}_1^2 \right. \\
& + \left[ l_2^2 + l_3^2 - 2 l_2 l_3 S \theta_2 S(\theta_3 - \theta_2) \right. \\
& + \left. \left. + 2 l_2 l_3 C \theta_2 C(\theta_3 - \theta_2) \right] \dot{\theta}_2^2 \right. \\
& + \left[ -2 l_3^2 + 2 l_2 l_3 S \theta_2 S(\theta_3 - \theta_2) \right. \\
& \left. \left. - 2 l_2 l_3 C \theta_2 C(\theta_3 - \theta_2) \right] \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \left( l_3^2 \right) \dot{\theta}_3^2 \right\}
\end{aligned}$$

Ec. 39

$$\begin{aligned}
U_T = & m_1 g h_{CG1} + m_2 g \left( h_2 + \frac{1}{2} l_2 S(\theta_2) \right) \\
& + m_3 g \left( h_2 + l_2 S(\theta_2) - \frac{1}{2} l_3 S(\theta_3 - \theta_2) \right) \\
& + m_4 g \left( h_2 + l_2 S(\theta_2) - l_3 S(\theta_3 - \theta_2) \right)
\end{aligned}$$

Ec. 40

### 3.2.1.2.6. Lagrangiano

Sustituyendo la Ec. 39 y Ec. 40 en la Ec. 26, obtenemos:

$$\begin{aligned}
L = & \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \left[ \left( l_1^2 + \frac{1}{4} l_2^2 C^2 \theta_2 + l_1 l_2 C \theta_2 \right) \dot{\theta}_1^2 + \left( \frac{1}{4} l_2^2 \right) \dot{\theta}_2^2 \right] \\
& + \frac{1}{2} I_2 \left( \dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2 \right) \\
& + \frac{1}{2} m_3 \left\{ \left[ l_1 + l_2 C \theta_2 + \frac{1}{2} l_3 C(\theta_3 - \theta_2) \right]^2 \dot{\theta}_1^2 \right. \\
& + \left[ l_2^2 + \frac{1}{4} l_3^2 + l_2 l_3 C \theta_2 \right] \dot{\theta}_2^2 + \left[ -\frac{1}{2} l_3^2 - l_2 l_3 C \theta_2 \right] \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \\
& \left. + \left( \frac{1}{4} l_3^2 \right) \dot{\theta}_3^2 \right\} + \frac{1}{2} I_3 \left( \dot{\theta}_1^2 + (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2)^2 \right)
\end{aligned}$$

Ec. 41

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{2} m_4 \left\{ [l_1 + l_2 C \theta_2 + l_3 C(\theta_3 - \theta_2)]^2 \dot{\theta}_1^2 + [l_2^2 + l_3^2 + 2 l_2 l_3 C \theta_3] \dot{\theta}_2^2 \right. \\
& \quad + [-2 l_3^2 - 2 l_2 l_3 C \theta_3] \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + (l_3^2) \dot{\theta}_3^2 \left. \right\} \\
& - \left\{ m_1 g h_{CG1} + m_2 g \left( h_2 + \frac{1}{2} l_2 S(\theta_2) \right) \right. \\
& \quad + m_3 g \left( h_2 + l_2 S(\theta_2) - \frac{1}{2} l_3 S(\theta_3 - \theta_2) \right) \\
& \quad \left. + m_4 g \left( h_2 + l_2 S(\theta_2) - l_3 S(\theta_3 - \theta_2) \right) \right\}
\end{aligned}$$

### 3.2.1.2.7. Modelo del torque del eslabón 1

Sustituyendo la Ec. 41 en la Ec. 27 y operando respecto a la variable articular y la velocidad angular de la articulación de la coxa, se obtiene:

$$\begin{aligned}
\tau_1 = & \left[ I_1 + I_2 + I_3 + l_1^2 (m_2 + m_3 + m_4) + l_2^2 C^2(\theta_2) \left( \frac{1}{4} m_2 + m_3 + m_4 \right) \right. \\
& + l_3^2 C^2(\theta_3 - \theta_2) \left( \frac{1}{4} m_3 + m_4 \right) \\
& + l_1 l_2 C(\theta_2) (m_2 + 2m_3 + 2m_4) \\
& \left. + l_3 C(\theta_3 - \theta_2) (l_1 + l_2 C(\theta_2)) (m_3 + 2m_4) \right] \ddot{\theta}_1 \\
& + \left[ l_2^2 S(\theta_2) C(\theta_2) \left( -\frac{1}{2} m_2 - 2m_3 - 2m_4 \right) \right. \\
& + l_3^2 S(\theta_3 - \theta_2) C(\theta_3 - \theta_2) \left( \frac{1}{2} m_3 + 2m_4 \right) \\
& + l_1 l_2 S(\theta_2) (-m_2 - 2m_3 - 2m_4) \\
& \left. + l_3 (l_1 S(\theta_3 - \theta_2) + l_2 S(\theta_3 - 2\theta_2)) (m_3 + 2m_4) \right] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\
& + \left[ l_3^2 S(\theta_3 - \theta_2) C(\theta_3 - \theta_2) \left( -\frac{1}{2} m_3 - 2m_4 \right) \right. \\
& \left. + l_3 S(\theta_3 - \theta_2) (l_1 + l_2 C(\theta_2)) (-m_3 - 2m_4) \right] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3
\end{aligned}$$

**Ec. 42**

### 3.2.1.2.8. Modelo del torque del eslabón 2

Sustituyendo la Ec. 41 en la Ec. 27 y operando respecto a la variable articular y la velocidad angular de la articulación del fémur, se obtiene:

$$\begin{aligned}
 \tau_2 = & \left[ I_2 + I_3 + l_2^2 \left( \frac{1}{4} m_2 + m_3 + m_4 \right) + l_3^2 \left( \frac{1}{4} m_3 + m_4 \right) \right. \\
 & + l_2 l_3 C(\theta_3)(m_3 + 2m_4) \left. \right] \ddot{\theta}_2 \\
 & + [l_2 l_3 S(\theta_3)(-m_3 - 2m_4)] \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \\
 & + \left[ l_3^2 \left( -\frac{1}{4} m_3 - m_4 \right) + l_2 l_3 C(\theta_3) \left( -\frac{1}{2} m_3 - m_4 \right) - I_3 \right] \ddot{\theta}_3 \\
 & + \left[ l_2 l_3 S(\theta_3) \left( \frac{1}{2} m_3 + m_4 \right) \right] \dot{\theta}_3^2 \\
 & + \left[ l_2^2 S(\theta_2) C(\theta_2) \left( \frac{1}{4} m_2 + m_3 + m_4 \right) \right. \\
 & + l_1 l_2 S(\theta_2) \left( \frac{1}{2} m_2 + m_3 + m_4 \right) \\
 & + l_3 (l_1 S(\theta_3 - \theta_2) + l_2 S(\theta_3 - 2\theta_2)) \left( -\frac{1}{2} m_3 - m_4 \right) \\
 & + l_3^2 S(\theta_3 - \theta_2) C(\theta_3 - \theta_2) \left( -\frac{1}{4} m_3 - m_4 \right) \left. \right] \dot{\theta}_1^2 \\
 & + \left[ g l_2 C(\theta_2) \left( \frac{1}{2} m_2 + m_3 + m_4 \right) \right. \\
 & + g l_3 C(\theta_3 - \theta_2) \left( \frac{1}{2} m_3 + m_4 \right) \left. \right]
 \end{aligned} \tag{Ec. 43}$$

### 3.2.1.2.9. Modelo del torque del eslabón 3

Sustituyendo la Ec. 41 en la Ec. 27 y operando respecto a la variable articular y la velocidad angular de la articulación de la tibia, se obtiene:

$$\begin{aligned}
\tau_3 = & \left[ l_3^2 \left( -\frac{1}{4} m_3 - m_4 \right) + l_2 l_3 C(\theta_3) \left( -\frac{1}{2} m_3 - m_4 \right) - I_3 \right] \ddot{\theta}_2 \\
& + \left[ l_3^2 \left( \frac{1}{4} m_3 + m_4 \right) + I_3 \right] \ddot{\theta}_3 \\
& + \left[ l_3^2 S(\theta_3 - \theta_2) C(\theta_3 - \theta_2) \left( \frac{1}{4} m_3 + m_4 \right) \right. \\
& \left. + l_3 S(\theta_3 - \theta_2) (l_1 + l_2 C(\theta_2)) \left( \frac{1}{2} m_3 + m_4 \right) \right] \dot{\theta}_1^2 \\
& + \left[ l_2 l_3 S(\theta_3) \left( \frac{1}{2} m_3 + m_4 \right) \right] \dot{\theta}_2^2 \\
& + \left[ g l_3 C(\theta_3 - \theta_2) \left( -\frac{1}{2} m_3 - m_4 \right) \right]
\end{aligned}$$

Ec. 44

### 3.2.1.3. Selección de material de la estructura

Tabla 6

#### Alternativas del material para la estructura

N°	SOLUCIÓN	CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES
<b>A</b>	<b>Aluminio</b>	COSTO MUY ALTO
		Densidad 2699 Kg/m <sup>3</sup>
		Resistencia a la tracción 205 MPa
		Módulo elástico 62-69 GPa
		Resistente a los rayos ultravioletas.
<b>B</b>	<b>Polimetilmetacrilato (PMMA)</b>	COSTO ALTO
		Densidad 1200 Kg/m <sup>3</sup>
		Resistencia a la tracción 75.15 MPa
		Módulo elástico 3530 MPa
		Resistente a los rayos ultravioletas.
<b>C</b>	<b>Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)</b>	COSTO MEDIO
		Densidad 1070 Kg/m <sup>3</sup> .
		Resistencia a la tracción 50.05 MPa
		Módulo elástico 2827 MPa
		Resistencia media a los rayos ultravioletas.

Fuente: (Ulprospector, 2017)

Se desarrolla una tabla de ponderación de acuerdo a la importancia de los criterios a tomar en cuenta para la construcción de las extremidades del robot.

**Tabla 7**

*Ponderación de criterios para selección del material de extremidades.*

<b>Criterio</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>	<b>e</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Costos (a)</b>	-	2,5	2,5	2,5	5	13,5	0,2455
<b>Propiedades mecánicas (b)</b>	2,5	-	5	0	2,5	11	0,2901
<b>Resistencia intemperie (c)</b>	2,5	0	-	0	2,5	6	0,1091
<b>Disponibilidad (d)</b>	2,5	5	5	-	5	18,5	0,2909
<b>Fácil manufactura (e)</b>	0	2,5	2,5	0	-	6	0,0636
<b>Total</b>						<b>55</b>	<b>1,0000</b>

**Tabla 8**

*Evaluación de las alternativas respecto al costo*

<b>Costos (a)</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	0	0	1	0,06
<b>Solución B</b>	5	-	2,5	8,5	0,47
<b>Solución C</b>	5	2,5	-	8,5	0,47
<b>Total</b>				<b>18</b>	<b>1,00</b>

**Tabla 9**

*Evaluación de las alternativas respecto a las propiedades mecánicas*

<b>Propiedades mecánicas (b)</b>	<b>Solución A</b>	<b>Solución B</b>	<b>Solución C</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución A</b>	-	5	5	11	0,61
<b>Solución B</b>	0	-	0	1	0,06
<b>Solución C</b>	0	5	-	6	0,33
<b>Total</b>				<b>18</b>	<b>1,00</b>

Tabla 10

*Evaluación de las alternativas respecto a la resistencia a la intemperie*

Resistencia intemperie (c)	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	2,5	5	8,5	0,47
Solución B	2,5	-	5	8,5	0,47
Solución C	0	0	-	1	0,06
<b>Total</b>				18	1,00

Tabla 11

*Evaluación de las alternativas respecto a la disponibilidad en el mercado*

Disponibilidad (d)	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0	0	1	0,06
Solución B	5	-	2,5	8,5	0,47
Solución C	5	2,5	-	8,5	0,47
<b>Total</b>				18	1,00

Tabla 12

*Evaluación de las alternativas respecto a su facilidad de manufactura*

Fácil manufact. (e)	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0	0	1	0,06
Solución B	5	-	5	11	0,61
Solución C	5	0	-	6	0,33
<b>Total</b>				18	1,00

Tabla 13

*Resultados de prioridad para selección del material de las extremidades*

	-a- (24,5%)	-b- (29,1%)	-c- (10,9%)	-d- (29,1%)	-e- (6,4%)	$\Sigma$	Prioridad
Solución A	0,0136	0,1778	0,0515	0,0162	0,0035	0,26	26,26
Solución B	0,1159	0,0162	0,0515	0,1374	0,1374	0,35	35,98
Solución C	0,1159	0,0970	0,0061	0,1374	0,1374	0,37	37,75
<b>Total</b>						1	100

La mejor alternativa de material para la construcción de las extremidades del robot es la Solución C correspondiente al acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). Debido a la utilización de este material se empleará como proceso de manufactura la impresión 3D.

Debido al bajo coeficiente de fricción propio del material ABS es necesario elaborar una punta de pie de material antideslizante, que ayude a la sujeción del robot al suelo. Para uniformizar, lo más posible, los procesos de fabricación de las piezas, se elige el material FILAFLEX (FFX) de alta elasticidad y coeficiente de fricción, y también puede ser trabajado en impresoras 3D.

#### 3.2.1.4. Selección de servomotores

Las dimensiones físicas de la extremidad del robot vienen definidas por lo estipulado en el apartado 3.2.1 y la masa de los elementos de acuerdo al material seleccionado para su fabricación en el apartado 3.2.1.3.

**Tabla 14**

#### *Parámetros físicos del robot*

Parámetros físicos	Valores
$l_c$	52 mm
$d_c$	20.66 mm
$l_f$	64.15 mm
$l_t$	121.76 mm
$l_{efector\ final}$	14 mm
$m_1$	73.98 g
$m_2$	69.2 g
$m_3$	83.22 g
$m_4$	0.23 g

Continúa →

$I_1$	35273.14 g mm <sup>2</sup>
$I_2$	939836.03 g mm <sup>2</sup>
$I_3$	145314.43 g mm <sup>2</sup>
$\theta_1$	0 rad
$\dot{\theta}_1$	10.1578 rad/s
$\ddot{\theta}_1$	0 rad/s <sup>2</sup>
$\theta_2$	$\pi/4$ rad
$\dot{\theta}_2$	10.1578 rad/s
$\ddot{\theta}_2$	0 rad/s <sup>2</sup>
$\theta_3$	$\pi/6$ rad
$\dot{\theta}_3$	10.1578 rad/s
$\ddot{\theta}_3$	0 rad/s <sup>2</sup>

Para hallar el torque requerido en cada motor mediante la Ec. 42, Ec. 43 y Ec. 44, se necesitan algunos parámetros físicos del robot (ver Tabla 14) como son las masas, longitudes y momentos de inercia de cada parte de la extremidad. También, es necesario conocer las variables articulares correspondientes a la ubicación de la pata en un punto crítico y las velocidades angulares requeridas para el movimiento.

Reemplazando los valores correspondientes a los parámetros físicos del robot en la Ec. 42, Ec. 43 y Ec. 44, y tomando en cuenta una masa estimada del cuerpo del robot que soporta cada extremidad al momento de caminar (3 puntos de apoyo), se obtienen los siguientes torques requeridos:

$$\tau_1 = 6.54 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$$

$$\tau_2 = 9.84 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$$

$$\tau_3 = 2.71 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$$

Debido a la estimación de la masa del cuerpo del robot que soporta la extremidad (426.74 g) y a otros factores que puedan suscitarse, los valores obtenidos corresponderán al 60% del torque real requerido, resultando:

$$\tau_1 = 10.46 \text{ Kg}f \cdot \text{cm}$$

$$\tau_2 = 15.75 \text{ Kg}f \cdot \text{cm}$$

$$\tau_3 = 4.34 \text{ Kg}f \cdot \text{cm}$$

**Tabla 15**

*Alternativas de servomotores*

	<b>SOLUCIÓN</b>	<b>CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES</b>
<b>A</b>	<b>HITEC HS-7955TG</b>	COSTO: \$112.36
		Peso: 69 g.
		Torque: 18 Kg cm (4.8 V)
		Tamaño: 40x20x37 mm
		Velocidad: 0.19-0.15 segundos @ 60°
		Sujeción compleja para diseño.
<b>B</b>	<b>HITEC HS-805BB+</b>	COSTO: \$49.99
		Peso: 152 g.
		Torque: 19.8 Kg cm (4.8 V)
		Tamaño: 66x30x57.6 mm
		Velocidad: 0.19-0.14 segundos @ 60°
		Sujeción compleja para diseño.
<b>C</b>	<b>DYNAMIXEL AX-18A</b>	COSTO: \$94.90
		Peso: 54.6 g.
		Torque: 18.3 Kg cm (12 V)
		Tamaño: 32x50x40 mm
		Velocidad: 0.103 segundos @ 60°
		Fácil sujeción para el diseño.

Tabla 16

*Ponderación de criterios para la selección de los servomotores*

Criterio	a	b	c	d	e	f	$\Sigma+1$	Ponderación
Costos (a)	-	2,5	2,5	5	2,5	2,5	16	0,1975
Torque (b)	2,5	-	2,5	2,5	5	5	18,5	0,2284
Velocidad (c)	2,5	2,5	-	0	5	5	16	0,1975
Peso (d)	0	2,5	5	-	5	2,5	16	0,1975
Fácil sujeción (e)	2,5	0	0	0	-	5	8,5	0,1049
Tamaño (f)	2,5	0	0	2,5	0	-	6	0,0741
<b>Total</b>							81	1,0000

Para la valoración de los criterios se toman en cuenta factores intrínsecos respecto al costo: una difícil sujeción conlleva a la fabricación de otra pieza de acople y un mayor tamaño involucra piezas más grandes. Estos factores involucran un gasto adicional.

Tabla 17

*Evaluación de las alternativas respecto al costo*

Costos (a)	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0	0	1	0,056
Solución B	5	-	5	11	0,611
Solución C	5	0	-	6	0,333
<b>Total</b>				18	1,00

Tabla 18

*Evaluación de las alternativas respecto al torque*

Torque (b)	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0	2,5	3,5	0,194
Solución B	5	-	5	11	0,611
Solución C	2,5	0	-	3,5	0,194
<b>Total</b>				18	1,000

Tabla 19

*Evaluación de las alternativas respecto a la velocidad*

Velocidad (c)	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	2,5	0	3,5	0,194
Solución B	2,5	-	0	3,5	0,194
Solución C	5	5	-	11	0,611
<b>Total</b>				18	1,000

Tabla 20

*Evaluación de las alternativas respecto al peso*

Peso (d)	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	5	0	6	0,333
Solución B	0	-	0	1	0,056
Solución C	5	5	-	11	0,611
<b>Total</b>				18	1,000

Tabla 21

*Evaluación de las alternativas respecto a la fácil sujeción*

Fácil sujeción (e)	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	2,5	0	3,5	0,194
Solución B	2,5	-	0	3,5	0,194
Solución C	5	5	-	11	0,611
<b>Total</b>				18	1,000

Tabla 22

*Evaluación de las alternativas respecto al tamaño*

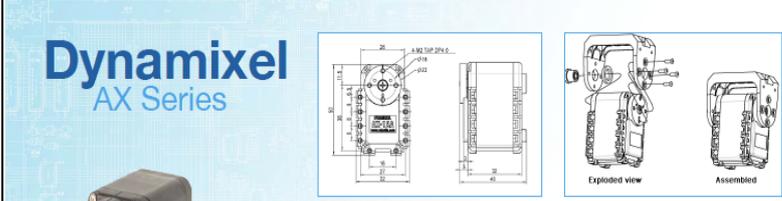
Tamaño (f)	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	5	2,5	8,5	0,472
Solución B	0	-	0	1	0,056
Solución C	2,5	5	-	8,5	0,472
<b>Total</b>				18	1,000

Tabla 23

**Resultados de prioridad para la selección de los servomotores**

	<b>-a-</b> <b>(19,8%)</b>	<b>-b-</b> <b>(22,8%)</b>	<b>-c-</b> <b>(19,8%)</b>	<b>-d-</b> <b>(19,8%)</b>	<b>-e-</b> <b>(10,4%)</b>	<b>-f-</b> <b>(7,4%)</b>	<b>Σ</b>	<b>Prioridad</b>
<b>Sol. A</b>	0,011	0,044	0,038	0,066	0,020	0,035	0,215	21,50
<b>Sol. B</b>	0,121	0,140	0,038	0,011	0,020	0,004	0,334	33,42
<b>Sol. C</b>	<b>0,066</b>	<b>0,044</b>	<b>0,121</b>	<b>0,121</b>	<b>0,064</b>	<b>0,035</b>	<b>0,451</b>	<b>45,08</b>
<b>Total</b>							1,000	100

La mejor alternativa de servomotor a utilizarse como actuador es la Solución C correspondiente al servo DYNAMIXEL AX-18A. Esta selección se basa en el mayor torque requerido correspondiente a la articulación coxa-fémur, sin embargo, las demás articulaciones requieren torques menores que pueden ser provistos por un servomotor con las mismas dimensiones, para no alterar el diseño de la estructura, y similares características técnicas como lo es el servo DYNAMIXEL AX-12A (ver Figura 36).



**Dynamixel**  
AX Series

AX Series Dynamixels & Brackets  
[\(Click to View Full Line\)](#)

Model	<a href="#">AX-12A</a> <small>(Visit Product Page)</small>	<a href="#">AX-12W</a> <small>(Visit Product Page)</small>	<a href="#">AX-18A</a> <small>(Visit Product Page)</small>
Stall Torque @ Max Voltage	1.5N.m (16.5 kg-cm)	0.2N.m (2.0 kg-cm)	1.8N.m (18 kg-cm)
Speed (RPM)	59	470	97
Nominal Operating Voltage	12v	12v	12v
Stall Current Draw	1.5A	1.4A	2.2A
Dimensions	32x50x40 mm	32x50x40 mm	32x50x40 mm
Weight	54.6g	52.9g	54.5g
Resolution	0.29°	0.29°	0.29°
Operating Angle	300	300	300
Gear Reduction	254 : 1	32 : 1	254 : 1
Geartrain Material	Eng. Plastic	Eng. Plastic	Eng. Plastic
Onboard CPU	ATMega8 (ATMEGA8-16AU@16MHZ, 8 Bit)	ATMega8 (ATMEGA8-16AU@16MHZ, 8 Bit)	ATMega8 (ATMEGA8-16AU@16MHZ, 8 Bit)
Position Sensor	Potentiometer	Potentiometer	Potentiometer
Com Protocol	TTL	TTL	TTL
Com Speed	1mbps	1mbps	1mbps
Compliance/PID	Compliance	Compliance	Compliance

Figura 36: Alternativa de servomotores escogidos.

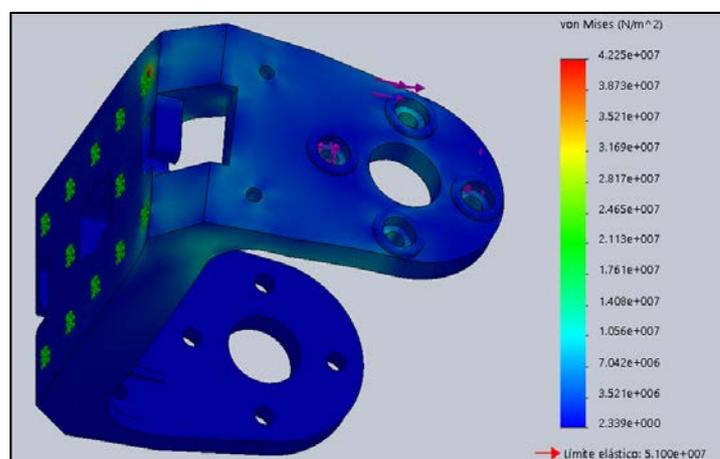
Fuente: [www.trossenrobotics.com](http://www.trossenrobotics.com)

El servomotor DYNAMIXEL AX-12A satisface el torque requerido en las articulaciones cuerpo-coxa y fémur-tibia. Además, reduce significativamente los costos correspondientes a la construcción del prototipo de robot hexápodo.

### 3.2.1.5. Análisis mecánico de las piezas.

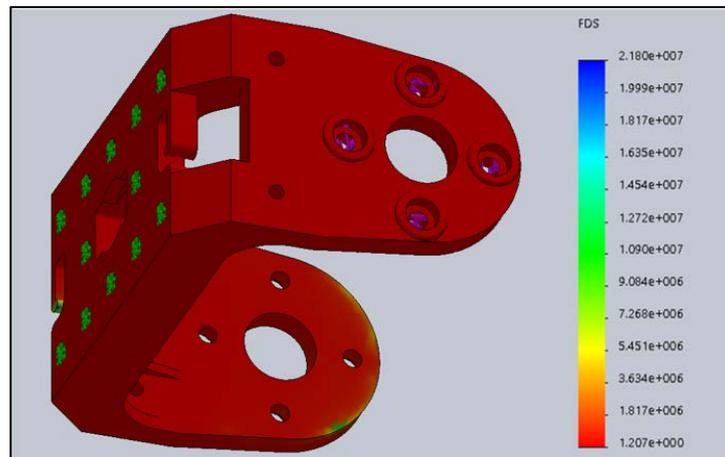
Se realiza un análisis mecánico asistido por computadora cuyo propósito es comprobar si las piezas que conforman las extremidades resisten la torsión pico ejercida por los servomotores seleccionados. El torque máximo (ver Figura 36) aplicado en los soportes de la coxa y la tibia es de 16,5 Kgf/cm<sup>2</sup>, mientras que en los soportes del fémur el torque es de 18 Kgf/cm<sup>2</sup>.

En la Figura 37, se puede observar que el soporte de la coxa resiste un esfuerzo máximo de 42.25 MPa, correspondiente al torque pico del servomotor Dynamixel AX-12A, debido a que el límite elástico corresponde a 51 MPa en el material seleccionado. El esfuerzo crítico se sitúa alrededor de los dos primeros tornillos que unen el soporte de la coxa con el del fémur, del lado donde se empata con el disco rotor.



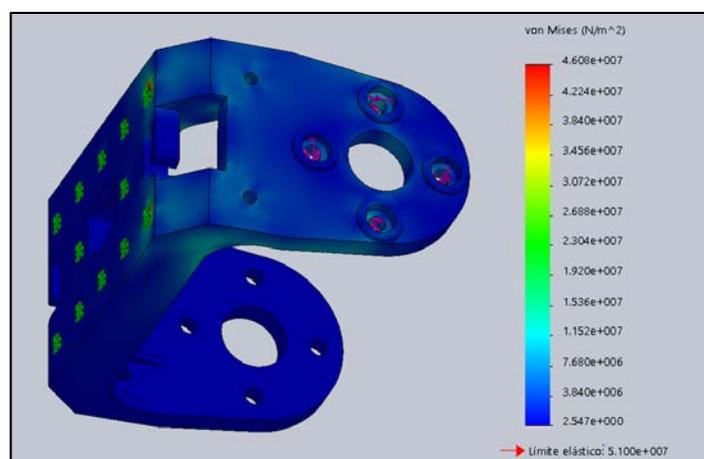
**Figura 37: Simulación de esfuerzos en el soporte a la coxa.**

El factor de seguridad del soporte (ver Figura 38) es de 1.21, por lo tanto, la selección del material para su fabricación es adecuada.



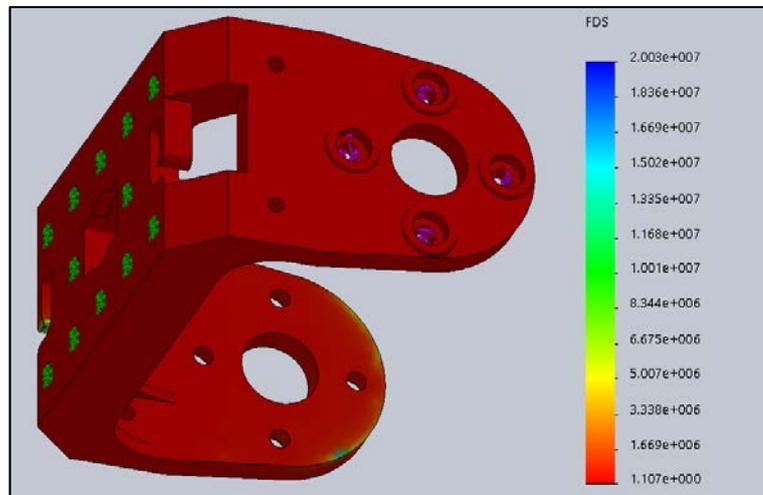
**Figura 38: Factor de seguridad del soporte de la coxa.**

De acuerdo a la Figura 39, el soporte del fémur resiste un esfuerzo máximo de 46.08 MPa, correspondiente al torque pico del servomotor Dynamixel AX-18A, debido a que el límite elástico corresponde a 51 MPa en el material seleccionado. El esfuerzo crítico se sitúa alrededor de los dos primeros tornillos que unen el soporte de la coxa con el del fémur, del lado donde se empaata con el disco rotor.



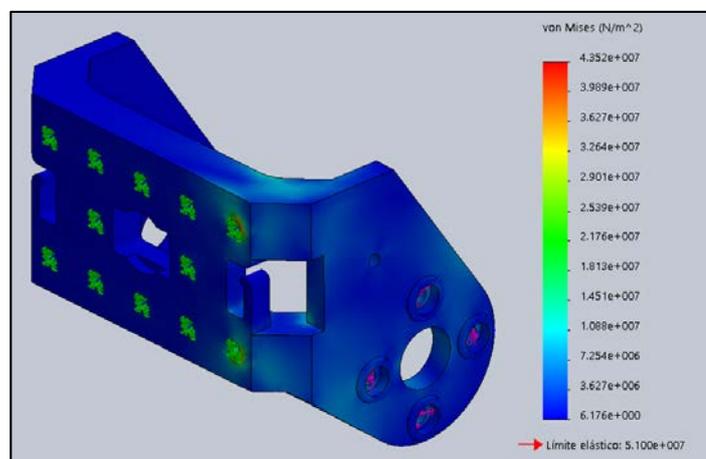
**Figura 39: Simulación de esfuerzos en el soporte del fémur.**

El factor de seguridad del soporte (ver Figura 40) es de 1.11, por lo tanto, la selección del material para su fabricación es adecuada.



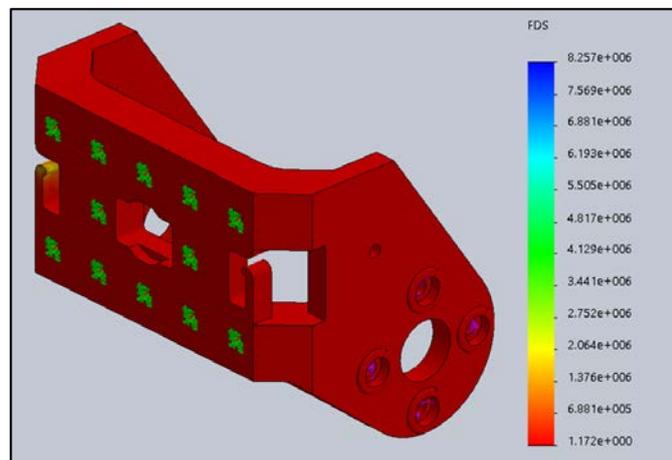
**Figura 40: Factor de seguridad del soporte del fémur.**

En la Figura 41, se puede observar que el soporte de la tibia resiste un esfuerzo máximo de 43.52 MPa, correspondiente al torque pico del servomotor Dynamixel AX-12A, debido a que el límite elástico corresponde a 51 MPa en el material seleccionado. El esfuerzo crítico se sitúa alrededor de los dos primeros tornillos que unen el soporte de la tibia con el del fémur, del lado donde se empata con el disco rotor.



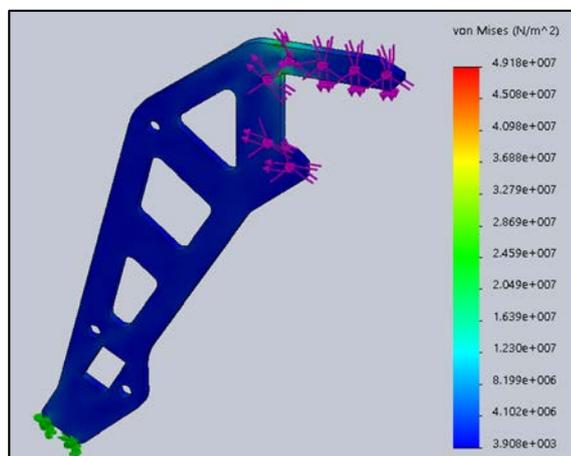
**Figura 41: Simulación de los esfuerzos en el soporte de la tibia.**

El factor de seguridad del soporte (ver Figura 42) es de 1.17, por lo tanto, la selección del material para su fabricación es adecuada.



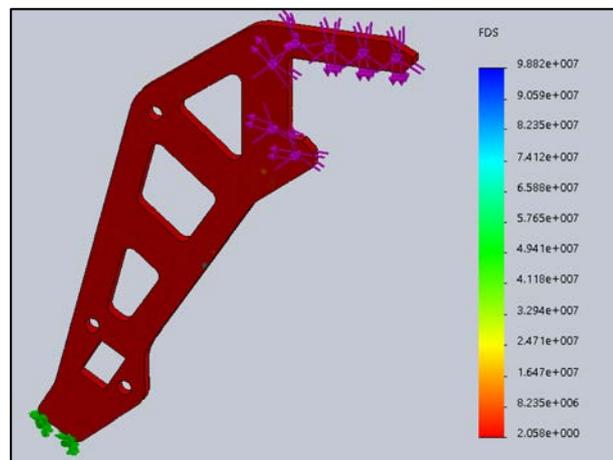
**Figura 42: Factor de seguridad del soporte de la tibia.**

De acuerdo a la Figura 43, la tibia resiste un esfuerzo máximo de 49,18 MPa, correspondiente al peso estimado del robot de 4 kg distribuido en cada una de sus extremidades, teniendo para el eslabón un límite elástico de 73,77 MPa en el material seleccionado. El esfuerzo crítico se sitúa alrededor de los tornillos superiores que unen la tibia con su correspondiente servomotor.



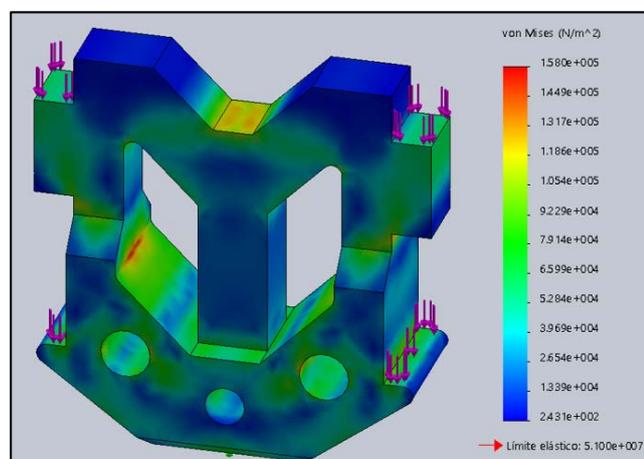
**Figura 43: Simulación de esfuerzos en la tibia.**

El factor de seguridad de la tibia (ver Figura 44) es de 2, por lo tanto, la selección del material para su fabricación es adecuada.



**Figura 44: Factor de seguridad de la tibia.**

De acuerdo a la Figura 45, la tibia resiste un esfuerzo máximo de 0,16 MPa, correspondiente al peso estimado del robot de 4 kg distribuido en cada una de sus extremidades, teniendo para el eslabón un límite elástico de 51 MPa en el material seleccionado. El esfuerzo crítico se sitúa en las aristas de las caras internas del pie.



**Figura 45: Simulación de esfuerzos en el pie.**

El factor de seguridad del pie (ver Figura 46) es de 323, por lo tanto, la selección del material para su fabricación es adecuada.

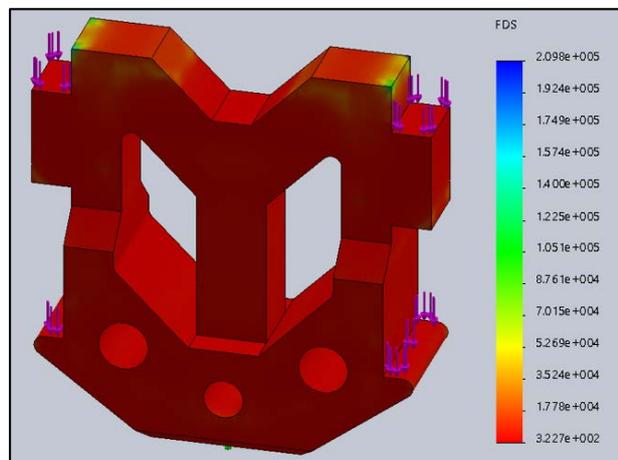


Figura 46: Factor de seguridad del pie.

### 3.2.1.6. Selección de batería.

De acuerdo a la selección de servomotores del apartado 3.2.1.4 es necesario disponer de un suministro de energía que satisfaga su voltaje y amperaje de alimentación.

Tabla 24

#### Alternativas de baterías

	SOLUCIÓN	CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES
A	Batería Polímero de Litio	COSTO: Alto
		Densidad de almacenamiento: Alta
		Auto-descarga: 0.2% diario.
		Vida útil: 500 ciclos
		Contaminante: no
B	Batería Níquel-Cadmio	COSTO: Bajo
		Densidad de almacenamiento: Baja
		Auto-descarga: 1% diario.

Continúa ➡

		Vida útil: 1000 ciclos
		Contaminante: si
<b>C</b>	<b>Batería Níquel-Hidruro metálico</b>	COSTO: Bajo
		Densidad de almacenamiento: Medio
		Auto-descarga: 1.5% diario.
		Vida útil: 1000 ciclos
		Contaminante: no

Tabla 25

*Ponderación de criterios para la selección de la batería*

Criterio	a	b	c	d	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Costos (a)</b>	-	0	2,5	2,5	6	0,1905
<b>Densidad almacenamiento (b)</b>	5	-	2,5	5	13,5	0,4286
<b>Auto-descarga (c)</b>	2,5	0	-	2,5	6	0,1905
<b>Vida útil (d)</b>	2,5	0	2,5	-	6	0,1905
<b>Total</b>					31,5	1,0000

Tabla 26

*Evaluación de las alternativas respecto al costo*

Costos (a)	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución A</b>	-	0	0	1	0,056
<b>Solución B</b>	5	-	2,5	8,5	0,472
<b>Solución C</b>	5	2,5	-	8,5	0,472
<b>Total</b>				18	1,00

Tabla 27

*Evaluación de las alternativas respecto a la densidad de almacenamiento*

Densidad almacenamiento (b)	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución A</b>	-	5	5	11	0,611
<b>Solución B</b>	0	-	0	1	0,056
<b>Solución C</b>	0	5	-	6	0,333
<b>Total</b>				18	1,000

Tabla 28

*Evaluación de las alternativas respecto a la auto-descarga*

Auto-descarga (c)	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	5	5	11	0,611
Solución B	0	-	5	6	0,333
Solución C	0	0	-	1	0,056
<b>Total</b>				18	1,000

Tabla 29

*Evaluación de las alternativas respecto a la vida útil*

Vida útil (d)	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0	0	1	0,056
Solución B	5	-	2,5	8,5	0,472
Solución C	5	2,5	-	8,5	0,472
<b>Total</b>				18	1,000

Tabla 30

*Resultados de prioridad para la selección de la batería*

	-a- (19,05%)	-b- (42,85%)	-c- (19,05%)	-d- (19,05%)	$\Sigma$	Prioridad
Solución A	0,011	0,262	0,116	0,011	0,399	39,95
Solución B	0,090	0,024	0,063	0,090	0,267	26,72
Solución C	0,090	0,143	0,011	0,090	0,333	33,33
<b>Total</b>					1,000	100

La mejor alternativa de batería para la alimentación de los distintos componentes es la Solución A correspondiente a la batería de Polímero de Litio (LiPo). Para determinar una capacidad de batería adecuada se debe calcular el amperaje utilizado por el sistema.

Tabla 31

*Voltajes y amperajes necesarios para los elementos del robot*

Elemento del robot	N° Elementos	Voltaje [V]	Amperaje [mA]	Amperaje parcial [mA]
Servo AX-12	12	11,1	1500	18000
Servo AX-18	6	11,1	2200	13200
ArbotiX-M	1	5	93	93
Cámara IP	1	5	2000	2000
Xbee	1	3,3	50	50
Amperaje total necesario [mA]				33343

Debido a los requerimientos del sistema y la disponibilidad en el mercado la batería tendrá una capacidad de 6000 mAh y 11,1 V de salida. Considerando que todos los elementos del robot están trabajando de forma simultánea de acuerdo a las especificaciones descritas en la Tabla 31, se tiene una duración mínima determinada en la Ec. 45.

$$t_{DBat} = \frac{C_{batería}[mAh]}{A_{total}[mA]} = \frac{6000 mAh}{33343 mA} = 0,18 h = 10,8 min \quad \text{Ec. 45}$$

### 3.2.2. Subsistema 2. Cubierta

#### 3.2.2.1. Selección de material para la estructura

De acuerdo a las alternativas de material (ver Tabla 6), se desarrolla una tabla de ponderación de acuerdo a la importancia de los criterios a tomar en cuenta para la construcción de la cubierta del robot.

Tabla 32

*Ponderación de criterios para la selección del material de la cubierta*

Criterio	a	b	c	d	e	$\Sigma+1$	Ponderación
Costos (a)	-	2,5	2,5	2,5	5	13,5	0,2455
Propiedades mecánicas (b)	2,5	-	0	2,5	2,5	8,5	0,1545
Resistencia intemperie (c)	2,5	5	-	5	2,5	16	0,2909
Disponibilidad (d)	2,5	2,5	0	-	2,5	8,5	0,1545
Fácil manufactura (e)	0	2,5	2,5	2,5	-	8,5	0,1545
<b>Total</b>						55	1,0000

De acuerdo a las matrices de evaluación de las alternativas respecto a cada uno de los criterios, desarrolladas en el apartado 3.2.1.3, se obtiene:

Tabla 33

*Resultados de prioridad para la selección del material de la cubierta*

	-a- (24,5%)	-b- (15,5%)	-c- (29%)	-d- (15,5%)	-e- (15,5%)	$\Sigma$	Prioridad
<b>Solución A</b>	0,0136	0,0944	0,1374	0,0086	0,0086	0,263	26,26
<b>Solución B</b>	<b>0,1159</b>	<b>0,0086</b>	<b>0,1374</b>	<b>0,0730</b>	<b>0,0944</b>	<b>0,429</b>	<b>42,93</b>
<b>Solución C</b>	0,1159	0,0515	0,0162	0,0730	0,0515	0,308	30,81
<b>Total</b>						1	100

La mejor alternativa de material para la construcción de la cubierta del robot es la Solución C correspondiente al Polimetilmetacrilato (PMMA). Debido a la utilización de este material se empleará como proceso de manufactura el corte por láser.

### 3.2.2.2. Análisis mecánico de las piezas

Se realiza un análisis mecánico asistido por computadora considerando un peso estimado del robot de 4 Kg, generando un esfuerzo máximo de 4,07 MPa (ver Figura 47) ubicado en torno a cada uno de los agujeros donde se sujetan los servomotores. El factor de seguridad de la base (ver Figura 48) es de 15, por lo tanto, la selección del material para su fabricación es adecuada.

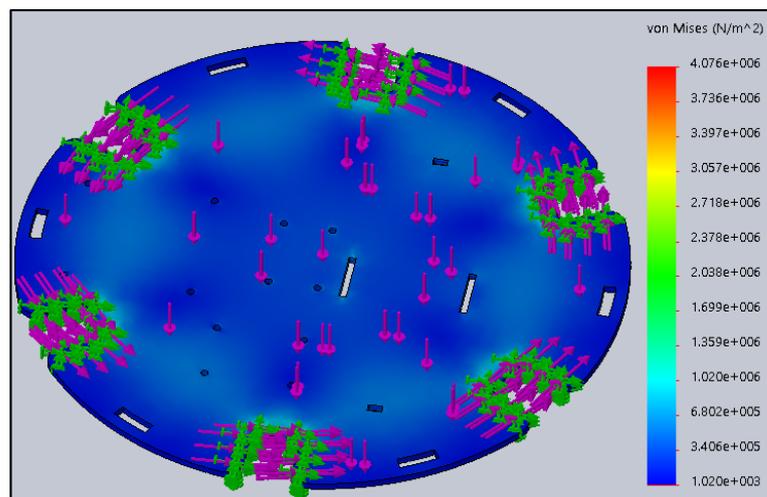


Figura 47: Simulación de los esfuerzos en la base del robot.

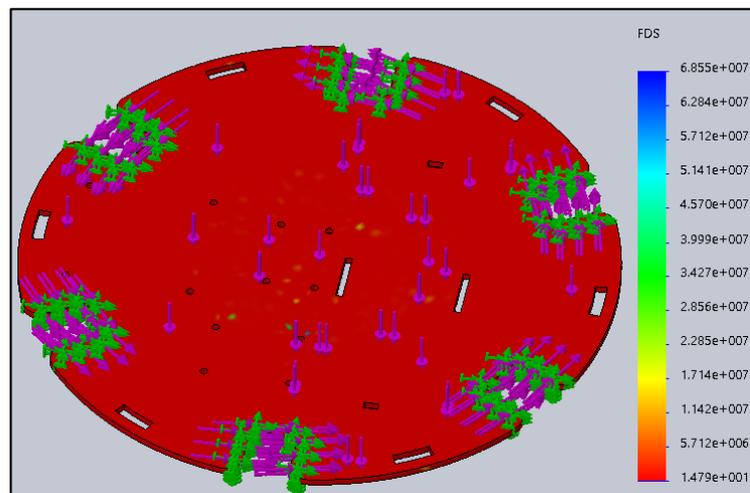


Figura 48: Factor de seguridad de la base del robot.

### 3.3. Módulo 2. Locomoción

#### 3.3.1. Arquitectura del sistema

El sistema mostrado a continuación (ver Figura 49) es el encargado de las órdenes ingresadas por el usuario, su procesamiento y ejecución de movimiento de la plataforma robótica.

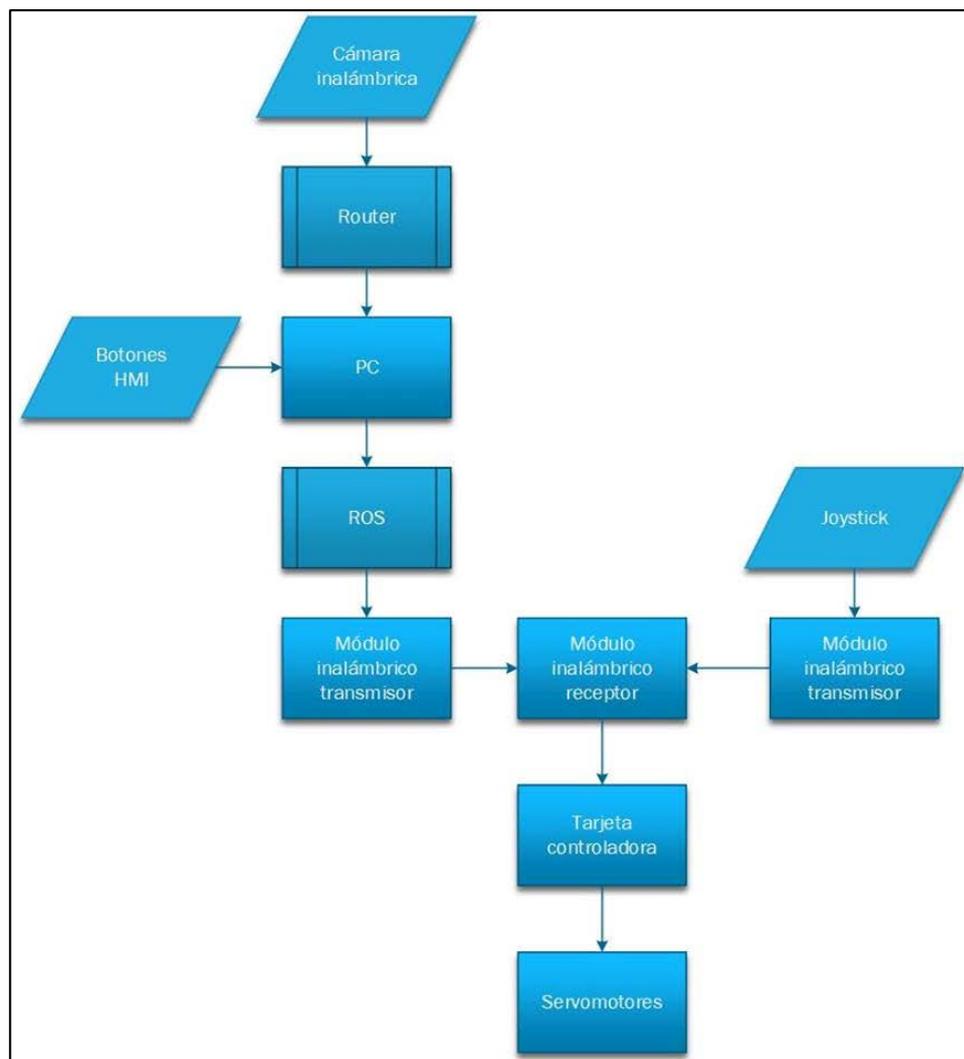


Figura 49: Arquitectura del sistema del robot hexápodo.

El robot hexápodo podrá ser operado mediante un joystick inalámbrico o la interacción en una interfaz gráfica compatible con Ubuntu. Además, consta de una cámara inalámbrica para la visualización del entorno donde va a ser operado.

La interfaz gráfica procesa las entradas ingresadas por el usuario y las envía como datos a un transmisor inalámbrico, que se comunicará con un módulo receptor conectado en la tarjeta de control. En cambio, el joystick envía los datos de sus comandos ejecutados directamente al módulo receptor de la tarjeta de control.

Los comandos de control recibidos se envían, mediante programación de la tarjeta de control, en forma de paquetes de datos para la ejecución del movimiento de los servomotores. Los motores Dynamixel seleccionados permiten éste tipo de comunicación característica.

La transmisión de video por medio de la cámara al PC se realizará mediante un router. Las imágenes transmitidas se podrán visualizar en la interfaz gráfica y otros dispositivos conectados en la misma red.

### **3.3.2. Tarjeta de control ArbotiX-M**

Para el presente proyecto se utilizará la tarjeta de control ArbotiX-M (ver Figura 50), la cual se especializa en el control de servomotores Dynamixel, seleccionados como la mejor alternativa para su implementación en el robot hexápodo de acuerdo al apartado 3.2.1.4. Dicho controlador puede utilizarse directamente con un entorno de programación como lo es Arduino IDE y tiene la capacidad de integrar módulos inalámbricos sin necesidad de algún adaptador. Las características técnicas de la arbotiX-M se resumen en la Tabla 34.

Tabla 34

*Características técnicas de la tarjeta de control arbotiX-M*

Características técnicas	Especificaciones
Microcontrolador	ATmega644p
Frecuencia de operación	16 Mhz
Voltaje de operación	5 V
Voltaje de entrada	7-12 V (11.1 V recomendado)
Límite de voltaje	6-16 V
Terminales digitales I/O	28 I/O
Terminales análogas de entrada	8 entradas con funciones análogas
Puertos seriales	2-UART, 3-SPI, 1-I2C
Memoria Flash	64 Kb
SRAM	4 Kb
EEPROM	2 Kb
Dimensiones	61 mm x 61 mm
Peso	58 g

Fuente: TrossenRobotics.com

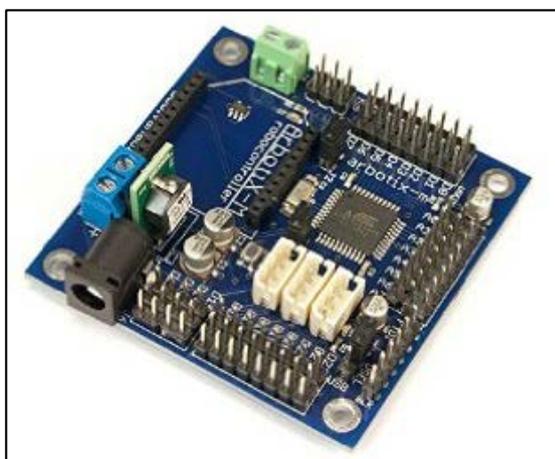
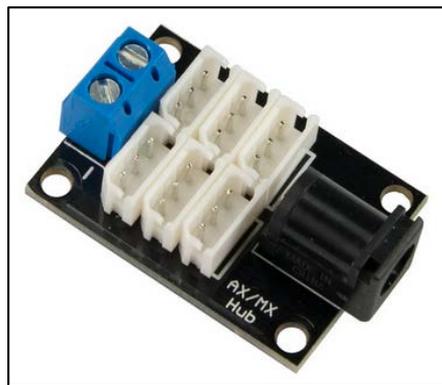


Figura 50: Tarjeta de control ArbotiX-M.

Fuente: (Trossen Robotics, s.f.)

Para evitar el excesivo cableado se utilizará un dispositivo concentrador, que permita centralizar las conexiones correspondientes a los servomotores y garantizar el suministro de energía a los mismos. Este dispositivo es necesario para la conexión de todos los servomotores a los puertos Bioid usando una sola tarjeta de control. Se utilizará el Power Hub de 6 puertos para motores Dynamixel AX/MX (ver Figura 51).



**Figura 51: Centralizador de conexiones.**

Fuente: [TrossenRobotics.com](http://TrossenRobotics.com)

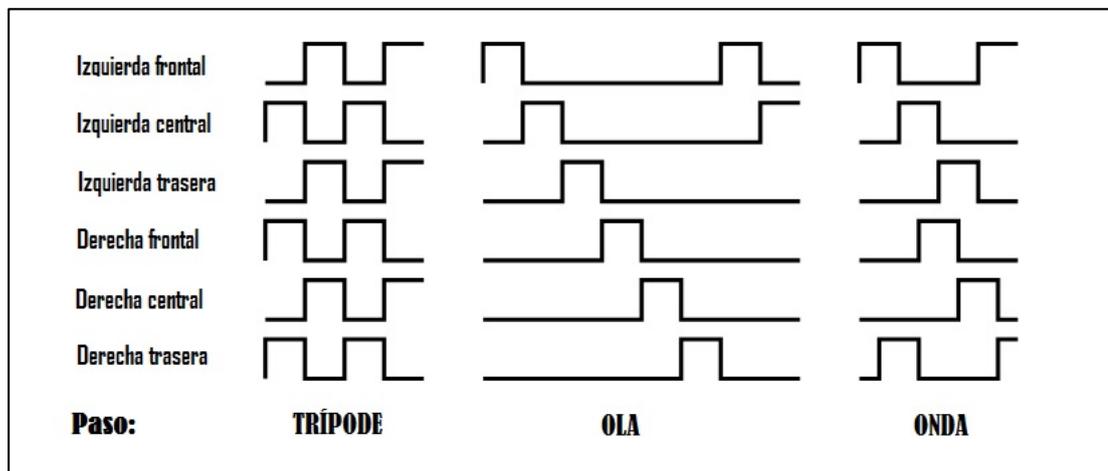
### 3.3.3. Secuencias de locomoción

El robot consta de seis secuencias de locomoción programadas en la tarjeta Arbotix-M las cuales pueden ser activadas desde los distintos mandos remotos (joystick y HMI). Las secuencias de locomoción son:

- Paso de onda
- Paso de trípode
- Paso de trípode de media velocidad
- Paso de trípode de baja velocidad
- Paso de ola
- Paso de trípode de alta velocidad

En las secuencias nombradas con anterioridad se encuentran variaciones del paso de trípode cuya diferencia radica en el número de pasos a realizar

en un periodo de tiempo. Los tres principales modelos de caminata utilizados son: Paso de trípode, paso de onda y paso de ola (ver Figura 52).



**Figura 52: Patrones de locomoción utilizados.**

Fuente: (Mrva, 2014)

### 3.3.3.1. Paso de Trípode

De acuerdo a De León Rivas (2015), se caracteriza por formar dos grupos de patas, dispuestas en forma triangular, que generan un movimiento desfasado  $\pi$  radianes. Este tipo de secuencia de caminata genera menor esfuerzo a los motores que actúan debido a que se raciona en tres unidades, pero también es aquel que mayor resistencia requiere de las extremidades por soportar el peso del robot en menor número de apoyos.

**Patrón:** Se elevan y se mueven, a la vez, las extremidades: Derecha frontal, derecha trasera e izquierda central durante un periodo de tiempo (para delante o para atrás); las extremidades: Izquierda frontal, izquierda trasera y derecha central se mantienen en el suelo con un movimiento contrario a las anteriores.

### 3.3.3.2. Paso de Onda

Según De León Rivas (2015), es una imitación de la caminata de los cuadrúpedos, por esta razón su patrón de desplazamiento se realiza alternando pares de patas opuestas. Se generará un ciclo recto, en el siguiente virará un poco hacia un lado, volverá avanzar y por último corregirá la desviación anterior.

**Patrón:** Se mueven por pares de extremidades opuestas con un desfase de tiempo de medio ciclo. Las patas, izquierda frontal y derecha trasera, se mueven (para delante o para atrás) en el aire, mientras las demás patas se mantienen en el suelo. Dentro del lapso que dura su ciclo reacciona la extremidad izquierda central. A continuación, también dentro del ciclo de trabajo, las extremidades derecha frontal e izquierda trasera ejecutan la misma acción que las anteriores. Finalmente, realiza el movimiento la extremidad derecha central.

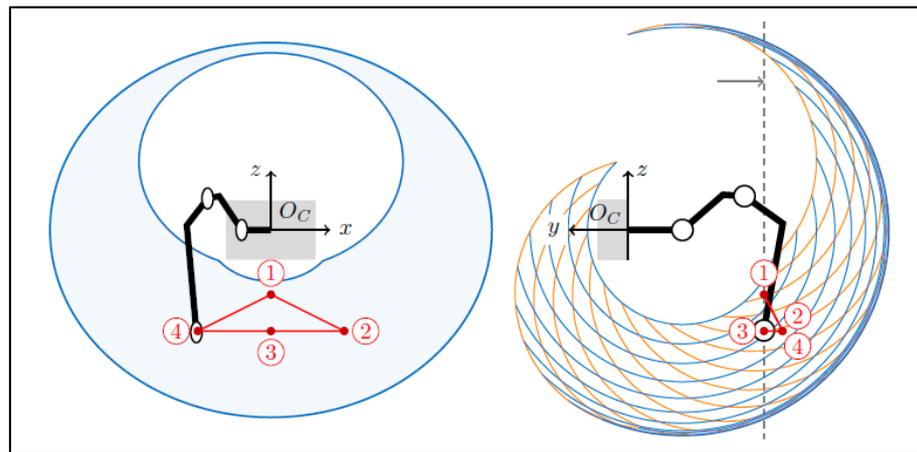
### 3.3.3.3. Paso de Ola

De León Rivas (2015) expone que este tipo de caminata se caracteriza por la alternancia de sus extremidades en la caminata (una de cada lado y posición) con el fin de que se muevan todas las articulaciones y genere una trayectoria lo más recta posible. Supone un gran esfuerzo al único motor que debe desplazar al robot en cada transición.

**Patrón:** En este modelo de caminata las extremidades del robot son independientes, cada una de ellas se mueve durante un ciclo de trabajo y la sigue la extremidad contigua.

### 3.3.4. Espacio de trabajo

El espacio de trabajo de una pierna es un mapeo del espacio para el movimiento articular delimitado por los límites angulares de cada una de las articulaciones (ver Figura 53).



**Figura 53: Espacio de trabajo de la extremidad.**

Fuente: (Mrva, 2014)

En la izquierda de la imagen se muestra el espacio de operación de la extremidad respecto a una vista lateral (dicho plano se dibuja en la imagen derecha como una línea gris discontinua). En la derecha de la imagen los arcos azul y naranja representan el movimiento de las articulaciones fémur y tibia formando un espacio de trabajo en un plano giratorio alrededor del eje de rotación de la coxa. La trayectoria roja representa el movimiento de pie del robot.

### 3.4. Módulo 3. Monitoreo

Para la operación de monitoreo se necesitan: Un medio que capture imágenes o video, como lo es una cámara, y la unidad de recepción remota, la cual va a ser una computadora por medio de una interfaz gráfica

programada en código libre. En este módulo se detalla las características de la cámara y funcionalidad de la interfaz.

### 3.4.1. Subsistema 1. Cámara

La cámara a utilizarse (ver Figura 54) fue seleccionada de acuerdo a sus atributos físicos como: dimensiones, de modo que la estructura sea uniforme, y el peso, el cual pueda ser soportado por los servomotores y no afecte en la locomoción del robot. También se tomaron en cuenta sus atributos funcionales como: Voltaje de alimentación, calidad de la imagen, tipo y protocolo de conexión y ciertos atributos adicionales que faciliten y garanticen una correcta operación de inspección o exploración de entornos, como son: Visión nocturna, motorización, funciones de audio, entre otras (ver Tabla 35).

**Tabla 35**

#### *Características de la cámara seleccionada*

DESCRIPCIÓN	VALOR
<b>Modelo</b>	WANSCAM HW0024 B
<b>Peso</b>	280 gramos
<b>Alimentación</b>	DC5V 2A
<b>Temperatura de trabajo</b>	-10~50 °C
<b>Humedad de trabajo</b>	95% RH
<b>Calidad</b>	720P-(1280x720), (640x352) VGA-(640x352), (320x176)
<b>Velocidad Imágenes</b>	50Hz:25fps/60Hz:30fps (1280x720)
<b>Motorizada</b>	SI, control remoto
<b>Angulo de giro</b>	355° horizontal, 90° vertical
<b>Velocidad de giro</b>	Horizontal 5-30°x seg. Vertical 5-50°x seg.
<b>P2P</b>	SI, configuración a través de código QR

Continúa ➡

<b>IRCUT</b>	Evita que determinadas fuentes de luz puedan llegar a bloquear la captura de imágenes.
<b>WiFi</b>	SI, estándar IEEE 802.11/B/G/N
<b>Modos IP</b>	IP Dinámica, IP Estática, PPPOE
<b>Visión Nocturna</b>	SI, 10 LED, distancia IR hasta 10M.
<b>Angulo visión</b>	75.7 grados

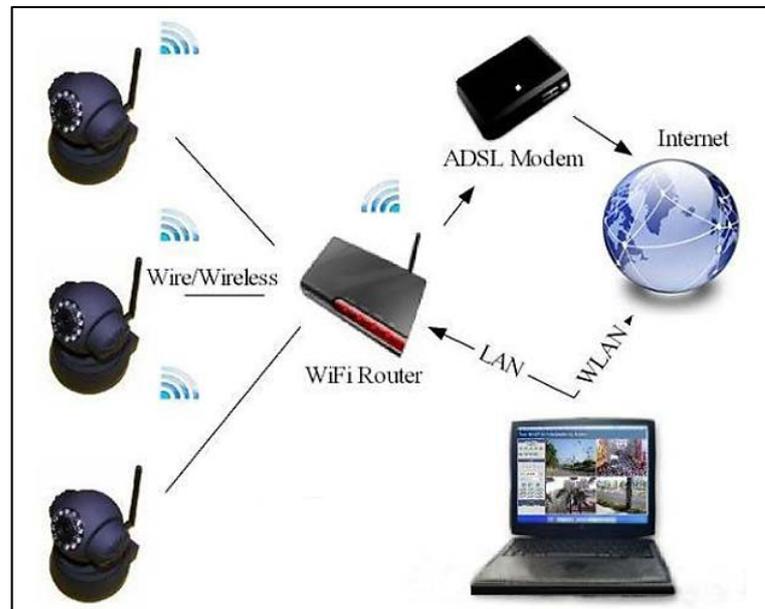
Fuente: [www.wanscam.es](http://www.wanscam.es)



**Figura 54: Cámara wanscam HW0024 B.**

Fuente: [www.wanscam.es](http://www.wanscam.es)

De acuerdo al diagrama mostrado en la Figura 49, la cámara necesita una conexión a un router para alcanzar mayores distancias de funcionamiento. La cámara Wanscam HW0024 B puede ser conectada de acuerdo a lo mostrado en la Figura 55.



**Figura 55: Diagrama de conexiones con la cámara.**

Fuente: [www.wanscam.es](http://www.wanscam.es)

Debido a que, la cámara seleccionada trabaja a un voltaje menor que el proporcionado por la batería, es necesario implementar un circuito regulador de voltaje de manera que se garantice el correcto funcionamiento de la cámara y mantener un único suministro de energía. De acuerdo al amperaje utilizado por la cámara se utilizó como regulador un convertor DC-DC MP2307 Mini-360 (ver Figura 56), cuyas especificaciones técnicas se detallan en la Tabla 36.



**Figura 56: Módulo convertor DC-DC.**

Fuente: *(dipmicro electronics, 2015)*

Tabla 36

*Características técnicas de módulo conversor DC-DC*

DESCRIPCIÓN	VALOR
Voltaje de entrada	4,75 – 23 VDC
Voltaje de salida seleccionable	1,0 – 17 VDC
Corriente de sobretensión	3 A
Corriente nominal continua	1,8 A
Rendimiento de conversión máximo	95 %
Frecuencia de conmutación	340 kHz
Ondulación de salida sin carga	30 mV
Regulación de carga	0,5 %
Regulación de voltaje	2,5 %
Rango de temperatura de funcionamiento	-40 a 85°C

Fuente: (*dipmicro electronics, 2015*)

### 3.4.2. Subsistema 2. Interfaz

El diseño de la interfaz gráfica fue realizado en QtDesigner el cual es un programa de licencia gratuita y compatible con Linux.

#### 3.4.2.1. Qt Designer

Es un entorno de desarrollo integrado para el diseño de interfaces gráficas de usuario mediante el conjunto de librerías multiplataforma Qt, escritas en C++. Este software pone a disposición cuatro modos de edición:

- **Modo de edición de widgets:** Se puede cambiar la apariencia del formulario, añadir diseños y editar las propiedades de cada widget.
- **Modo de edición de señales y ranuras:** Se pueden conectar widget juntos usando el mecanismo de señales y ranuras de Qt.

- **Modo de edición Buddy:** Se pueden asignar buddy widgets a widgets etiquetados para ayudar a manejar el enfoque del teclado correctamente.
- **Modo de edición de órdenes de tabulación:** Se puede configurar el orden en el que los widgets reciben el enfoque del teclado.

Las ventajas que Qt Designer ofrece son:

- Es de código abierto y tiene mucha contribución de la comunidad.
- Usa un editor visual.
- Es gratuito.
- Es multiplataforma.
- Tiene muy buena fiabilidad y facilidad de uso.
- Programación en lenguaje C++.
- Combina edición, depuración, gestión de proyectos, localización y herramientas de compilación.

#### **3.4.2.2. Diseño de la Interfaz Gráfica**

La ventana de inicio de la interfaz (ver Figura 57) corresponde a la verificación de usuario y contraseña, tesista y 12345 respectivamente, mediante la cual se accederá a la ventana de control del robot. Al ingresar el usuario y la contraseña, se mostrará una ventana emergente que indicará si los datos ubicados en estos dos campos son correctos o incorrectos (ver Figura 58).



Figura 57: Ventana de inicio de la interfaz.

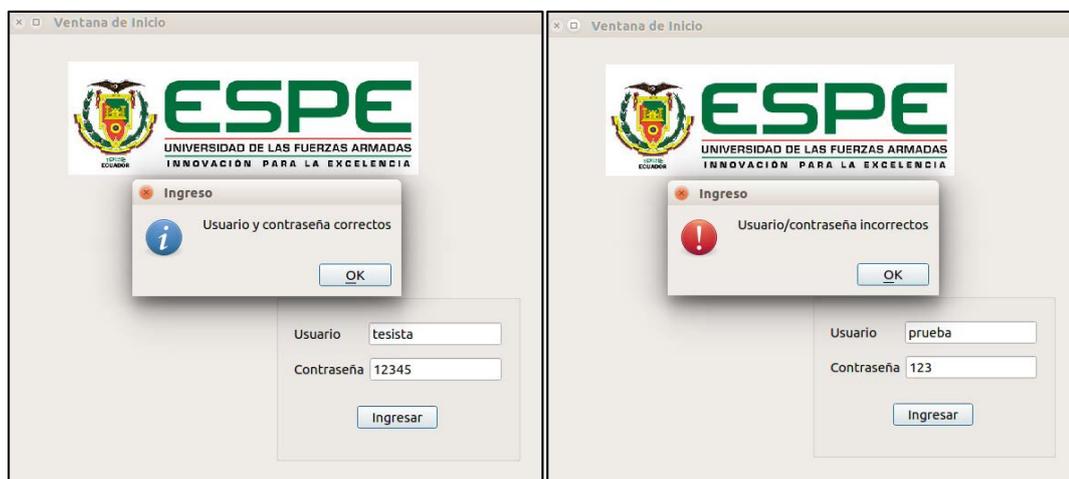
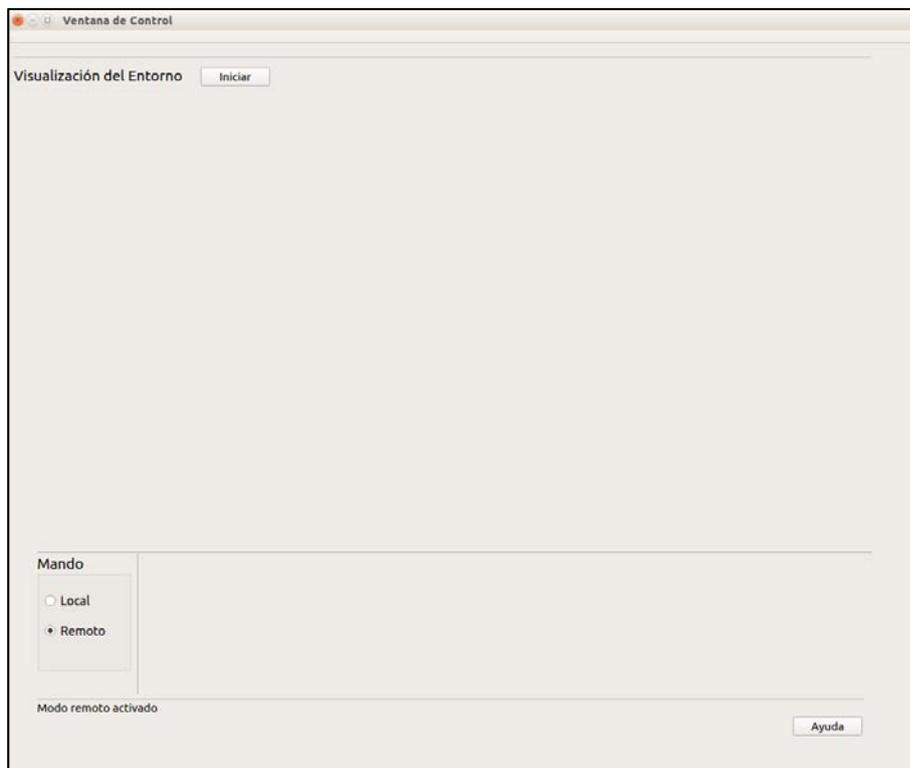


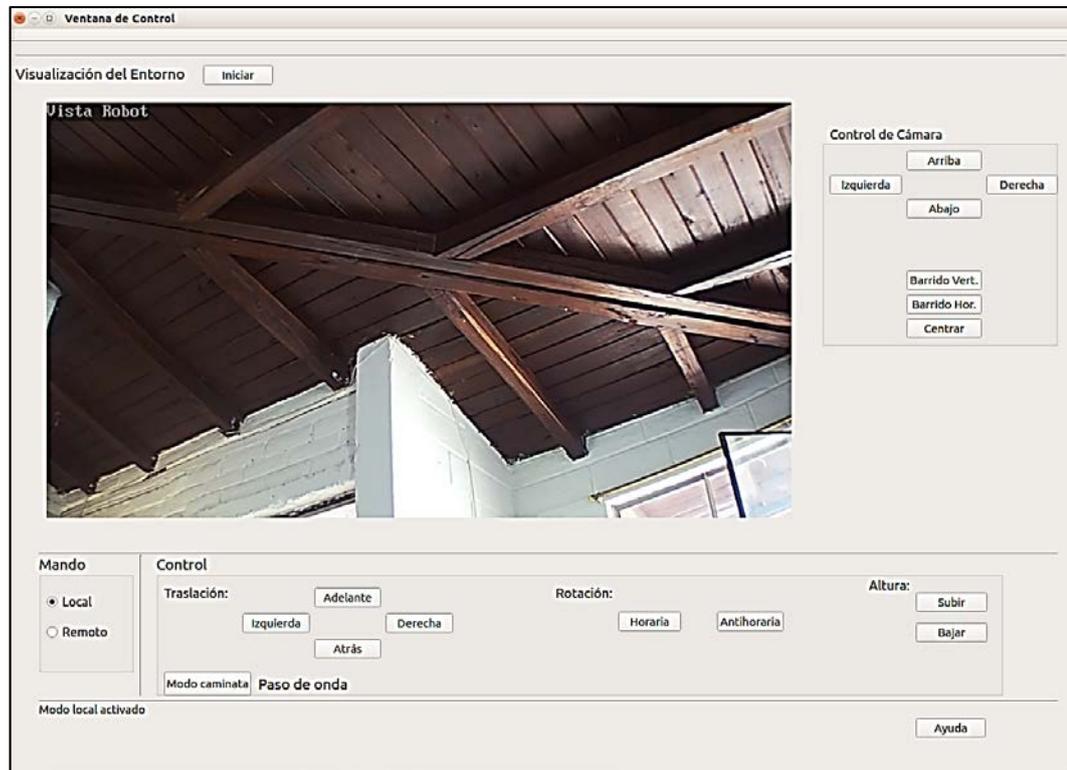
Figura 58: Verificación de usuario y contraseña.

En la ventana de control se puede seleccionar el modo de mando a realizar, en caso de mando local se utilizará la interfaz y en mando remoto se utilizará un joystick. En modo de mando remoto solo se tendrá acceso a la visualización del entorno, más no a los controles de la caminata del robot (ver Figura 59).



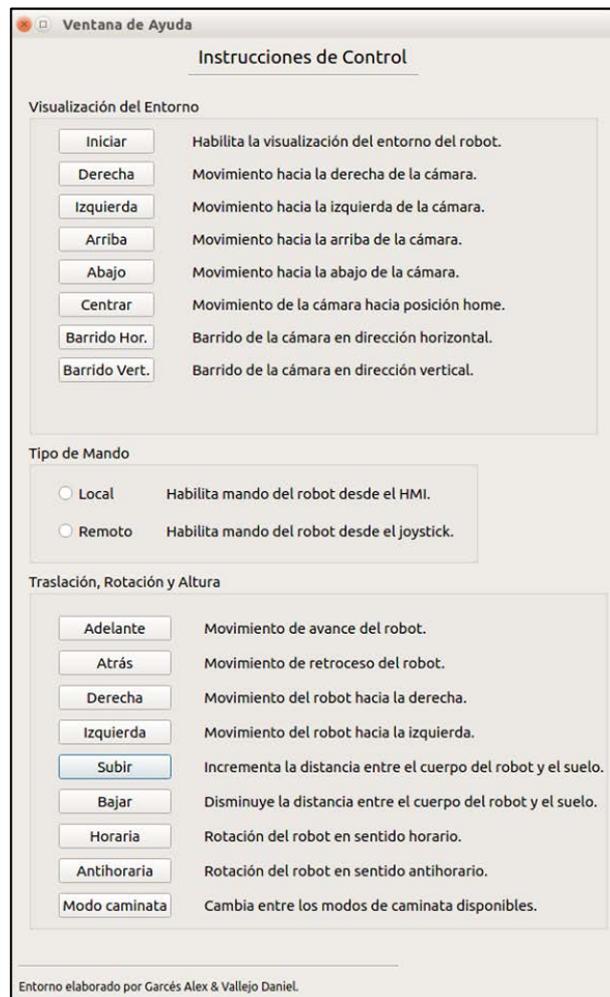
**Figura 59: Ventana de control, selección de mando remoto.**

El modo de mando local cuenta con los distintos botones para el control de robot y la visualización de su entorno (ver Figura 60). Para la visualización del entorno es necesario hacer clic en el botón iniciar, luego de esto, se recibirán las imágenes captadas en tiempo real, y también se podrá hacer uso de las funciones motorizadas de la cámara. Los botones para el control del robot están programados para poder ser usados mediante un solo clic o manteniéndolos pulsados, de manera que el robot continúe ejecutando la orden. Haciendo clics en el botón de “Modo de Caminata” se puede alternar entre las distintas secuencias de caminata programadas en el robot.



**Figura 60: Ventana de control, selección de mando local.**

Haciendo clic en el botón ayuda se accederá a una ventana de instrucciones de control, donde se encuentran el listado de las funciones de cada botón (ver Figura 61). En la ventana de ayuda, los botones usados están agrupados según la función que cumplen, teniendo así 3 grupos: Visualización del entorno, tipo de mando y botones para movimientos de traslación, rotación y variación de altura del robot.



**Figura 61: Ventana de ayuda, instrucciones de control.**

### 3.5. Módulo 4. Tele-operación

#### 3.5.1. Subsistema 1. Comunicación

Se requiere que la comunicación con el robot sea inalámbrica debido a que su control será ejecutado desde zonas remotas. Se seleccionó un módulo que sea compatible con la tarjeta de control utilizada para la programación del robot y con el ordenador donde se ejecutará la interfaz. También se tomó en

cuenta que existan otros módulos de mayor alcance por si así se lo requiera en un futuro.

#### **3.5.1.1. Módulo Xbee**

De acuerdo al sitio web [xbee.cl](http://xbee.cl), los módulos Xbee (ver Figura 62) ofrecen un medio inalámbrico para la interconexión y comunicación entre dispositivos, utilizando el protocolo de red llamado IEEE 802.15.4 para crear redes punto a multipunto o para redes punto a punto. Se pueden configurar mediante el microcontrolador o para mayor facilidad en la utilidad X-CTU.

Sus principales características son:

- Velocidad de datos de interfaz de hasta 115,2 kbps
- 2.4 GHz banda de frecuencia
- 3.3V @ 50mA
- 250kbps Velocidad máxima de datos
- Salida de 1mW (+ 0dBm)
- Alcance de 300 pies (100m)
- Antena traza incorporada
- Totalmente certificado por la FCC
- 6 clavijas de entrada ADC de 10 bits
- 8 pines digitales de E / S
- Encriptación de 128 bits
- Configuración local o aérea
- Conjunto de comandos AT o API



**Figura 62: Módulo Xbee.**

Fuente: xbee.cl

### 3.5.2. Subsistema 2. Mando

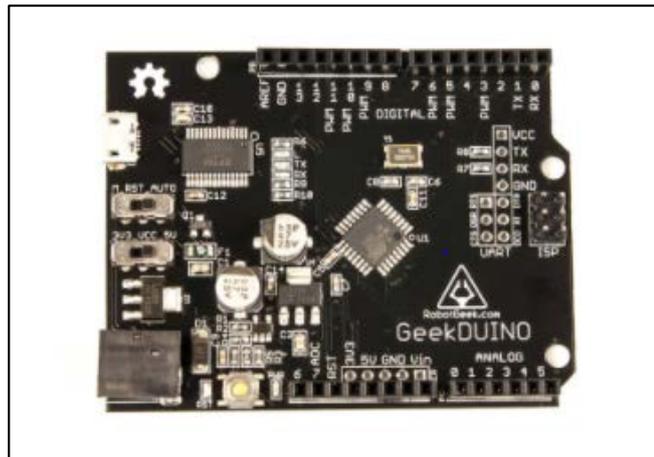
Adicional al mando del robot, ejecutado por la interfaz gráfica descrita en el apartado 3.4.2.2, se tiene un joystick inalámbrico (ver Figura 63). El joystick está conformado por: Una tarjeta de control GeekDUINO, un controlador Arbotix Commander y un módulo Xbee (detallado en el apartado 3.5.1.1). El sustento de energía del joystick la proveen cuatro pilas AA+.



**Figura 63: Joystick del robot hexápodo.**

### 3.5.2.1. GeekDUINO

GeekDUINO (ver Figura 64) es una tarjeta de control compatible con Arduino, posee un microcontrolador ATmega 328 cuya programación se realiza mediante un puerto Micro USB y para su alimentación (7-12 V) el mismo puerto o una toma de corriente DC plana de ultra bajo perfil. Posee una serie de interruptores que permiten cambiar su voltaje de funcionamiento y activar o desactivar el reset FTDI de la placa.



**Figura 64: Tarjeta GeekDUINO.**

Fuente: [trossenrobotics.com](http://trossenrobotics.com)

### 3.5.2.2. Arbotix Commander v2.0

Es un controlador de estilo gamepad inalámbrico, mediante el uso de un módulo Xbee (ver Figura 65). Fue construido específicamente para controlar robots caminantes que utilicen ArbotiX, sin embargo, se puede conectar a casi cualquier microcontrolador y computadora. Utiliza un protocolo serial simple para interactuar con otros dispositivos habilitados para Xbee.



**Figura 65: Controlador ArbotiX Commander 2.0.**

Fuente: [trossenrobotics.com](http://trossenrobotics.com)

### 3.6. Diseño Final

El modelo implementado en base a cada una de las etapas de diseño realizadas se observa en la Figura 66, el cuerpo del robot tiene un diámetro de 25 cm, cada una de las extremidades estiradas por completo tienen una longitud de 25,7 cm y la extensión del robot desde una extremidad a su opuesta, en posición de inicio, es de 52,59 cm. Sus características técnicas se detallan en la Tabla 37.



**Figura 66: Robot hexápodo zoomórfico.**

Tabla 37

*Detalles técnicos del robot hexápodo zoomórfico*

<b>ATRIBUTOS TÉCNICOS</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>Tarjeta de control</b>	ArbotiX-M
<b>Servomotores</b>	DYNAMIXEL
<b>Torques de juntas</b>	16,5 Kgf cm (coxa y tibia) 18 Kgf cm (fémur)
<b>Batería</b>	LiPo - 3 celdas
<b>Alimentación</b>	11.5 V – 6000 mAh
<b>Programación</b>	Software de código abierto
<b>Grados de libertad por pierna</b>	3 grados de libertad
<b>Caminata</b>	6 diferentes pasos de marcha
<b>Construcción de estructura</b>	Polímeros ABS, PMMA y FILAFLEX
<b>Cámara</b>	WANSCAM HW0024B
<b>Ángulo de visión</b>	75.7°
<b>Ángulo de giro</b>	355° horizontal, 90° vertical
<b>Velocidad de imágenes</b>	60Hz – 30 fps
<b>Visión nocturna</b>	Activado
<b>Conexión a cámara</b>	Vía router
<b>Comunicación</b>	Wireless XBee
<b>Alcance de comunicación</b>	100 metros máximo

**3.7. Resumen**

- Los distintos requerimientos de diseño están directamente influidos por características técnicas que debe poseer la plataforma robótica satisfaciendo de manera más óptima todas las funciones propuestas. Los principales requerimientos para el diseño son: Capacidades todo terreno, control remoto, video en tiempo real, maniobrabilidad intuitiva, entre otros.

Las características de mayor importancia en el desarrollo del prototipo de robot zoomórfico de seis extremidades son: Grados de libertad por extremidad, torques de servomotores, comunicación inalámbrica, entre otras.

- Se utiliza un diseño concurrente, por lo tanto, se crearon módulos y subsistemas en los cuales se puedan distribuir las diversas operaciones funcionales y satisfacer los objetivos del proyecto. La estructura funcional para el diseño del robot está conformada por: 1) Estructura: 1.1. Extremidades y 1.2. Cubierta. 2) Locomoción. 3) Monitoreo: 3.1. Cámara y 3.2. Interfaz. 4) Tele-operación: 4.1. Comunicación y 4.2. Mando.
- Se realiza el análisis cinemático de la extremidad del robot de manera que esta pueda ejecutar un movimiento tipo insectoide. Mediante el algoritmo de Denavit & Hartenberg se conforman y desarrollan las matrices de transformación homogénea para consecuentemente hallar la matriz de localización. Se resuelve la cinemática inversa del robot, de acuerdo al método analítico y al método gráfico, obteniendo las coordenadas articulares que podrá utilizar el robot para su correcta locomoción.
- Se formulan las ecuaciones del torque de los motores de cada articulación mediante el modelado dinámico de Euler-Lagrange, que involucra trabajar con las energías, cinemática y potencial, de cada eslabón de la extremidad.
- Por medio del método de criterios ponderados se generan soluciones para cada subsistema de los módulos mencionados con anterioridad. Resultando como soluciones más adecuadas las siguientes: 1) Estructura: 1.1. Extremidades – Material: ABS (a excepción de las tibias), pie de FFX – Servomotores: DYNAMIXEL AX-12A (para coxas y tibias) y AX-18A (para fémures) – Batería: Polímero de Litio 6000 mAh y 11,1 V. 1.2. Cubierta – Material: PMMA (base, cubierta y tibias). 2) Locomoción – Tarjeta de control: ArbotiX-M – Dispositivo concentrador: AX/MX 6 puertos. 3) Monitoreo: 3.1. Cámara: WANSCAM modelo HW0024 B – regulador de

voltaje para la cámara: MP2307 Mini-360. 3.2. Interfaz – Software: Qt Designer. 4) Tele-operación: 4.1. Comunicación: Módulo XBee 4.2. Mando – Tarjeta de control: GeekDUINO – Controlador: Arbotix Commander v2.0.

## **CAPÍTULO IV**

### **IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS**

El cuarto capítulo refiere a cada una de las etapas de implementación de todos los componentes del robot hexápodo zoomórfico. Abarca el ensamblaje entre componentes, la configuración de actuadores y módulos de comunicación y la funcionalidad de la interfaz gráfica. También, describe las distintas pruebas realizadas sobre el funcionamiento del robot y expone los resultados obtenidos. Las pruebas realizadas determinan el correcto funcionamiento de servomotores, la comunicación entre módulos inalámbricos, la ejecución de las secuencias de locomoción y cuál de los tipos de caminata es el más adecuado para trasladarse sobre distintos terrenos.

#### **4.1. Implementación**

##### **4.1.1. Implementación de la estructura**

Como proceso previo antes a la implementación de la estructura del robot (ver Figura 67) se realizó un diseño asistido por computadora de los componentes del robot, basándose en la morfología de la araña *loxoceles laeta*, la cual posee un cuerpo radial respecto a sus extremidades, características que se desean en el presente proyecto. Para el diseño de los soportes se utilizaron los modelos previstos de los motores seleccionados con el fin de obtener un acople adecuado entre piezas. De acuerdo a la complejidad del diseño, tiempos de fabricación y costos, las piezas se produjeron mediante impresión 3D (42 piezas) y corte láser (14 piezas).

Una de las características de los motores Dynamixel es la asignación de identificadores a cada uno, para su reconocimiento en la programación. Por facilidad de manejo de los motores es preferible realizar este proceso antes de ensamblar entre partes. Ya asignados identificadores diferentes a cada

motor se procede al ensamblaje de las extremidades y estas a su vez al cuerpo. Posteriormente, se deben hacer las conexiones respectivas entre los servomotores y los elementos electrónicos. La cámara se acopla a la cubierta del robot conectándose a su regulador de voltaje, se procede acoplando las cubiertas laterales a la base del robot y finalmente ensamblando la cubierta.

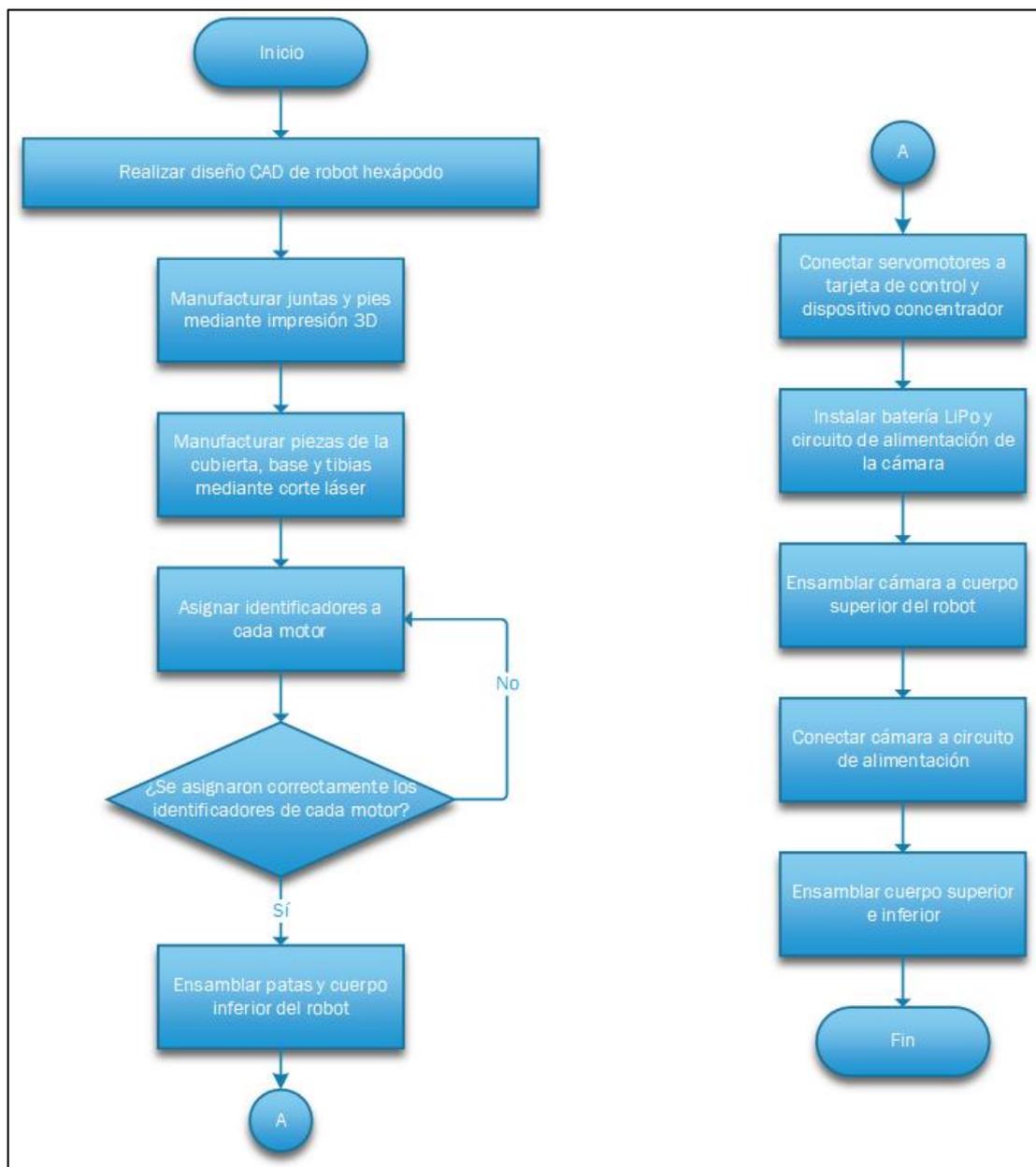


Figura 67: Diagrama de flujo para la implementación de la estructura.

Las piezas necesarias para armar la estructura del robot fueron elaboradas mediante los procesos y materiales detallados en la Tabla 38.

**Tabla 38**

*Descripción de piezas de la estructura del robot*

N° piezas	Pieza	Fabricación	Material
1	Cuerpo inferior	Corte láser	PMMA
1	Cuerpo superior	Corte láser	PMMA
6	Cubiertas laterales	Impresión 3D	ABS
12	Soporte coxa-fémur	Impresión 3D	ABS
6	Junta fémur	Impresión 3D	ABS
6	Soporte fémur-tibia	Impresión 3D	ABS
12	Tibia	Corte láser	PMMA
6	Pie	Impresión 3D	ABS
6	Punta de pie	Impresión 3D	FFX

Los tiempos de fabricación de las piezas de acuerdo al proceso de manufactura y material utilizado, descritos en la Tabla 38, se detallan en la Tabla 39, obteniéndose un tiempo de fabricación total de 51 horas con 10 minutos.

**Tabla 39**

*Tiempos de fabricación de piezas de la estructura del robot*

Cantidad	Descripción	Tiempos de fabricación
1	Plancha A2 de acrílico de 3 mm de espesor (Cuerpo y tibias)	30 minutos
6	Cubiertas laterales	16 horas con 41 minutos
12	Soporte coxa-fémur	15 horas con 19 minutos
6	Junta fémur	2 horas con 57 minutos
6	Soporte fémur-tibia	8 horas con 4 minutos

Continúa →

6	Pie	7 horas con 7 minutos
6	Punta de pie	32 minutos

En la Figura 68 y Figura 69 se observan las piezas resultantes de las impresiones 3D en ABS, un total de 36 piezas.



**Figura 68: Soportes para motores y pies.**



**Figura 69: Cubiertas laterales.**

En la Figura 70 se observan las piezas producto del corte láser de una plancha de PMMA de 3 mm de espesor. En total por este método se realizaron 14 piezas.



**Figura 70: Base, cubierta y tibias.**

En la Figura 71 se aprecia el producto de la impresión 3D en FFX, se hicieron en total 6 piezas que se usaron como puntas de pie antideslizantes.



**Figura 71: Puntas de pies.**

Inicialmente se ensamblaron las piezas libres de servomotores, debido a que sin ellos los soportes pueden ser ajustados con mayor facilidad. En la

Figura 72 se aprecian las piezas correspondientes a los soportes y los elementos necesarios para su ensamblaje.



**Figura 72: Elementos para el ensamblaje de soportes.**

El ensamblaje de los soportes se realiza de acuerdo a lo observado en la Figura 73 mediante el uso de tornillos y tuercas.



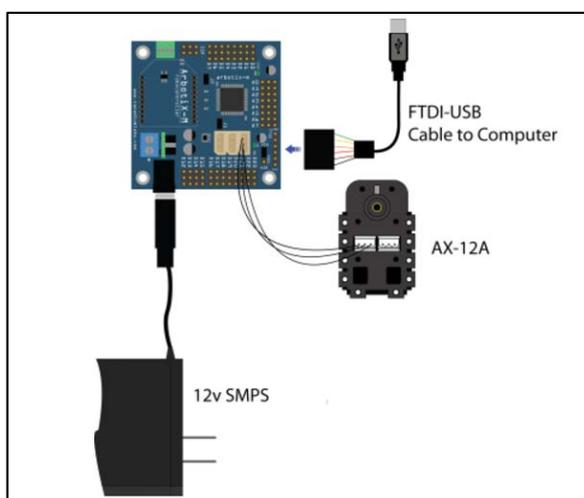
**Figura 73: Ensamblaje entre soportes.**

En la Figura 74 se observan las piezas correspondientes a las extremidades ensambladas libre de servomotores. Las tibias se insertan en el pie y se las asegura mediante un pasador metálico de 3 cm.



**Figura 74: Eslabones ensamblados.**

Antes de ensamblar los motores a las extremidades es necesario asignarles identificadores únicos a cada motor. Para aquello, se utiliza el software Dynamanager, la tarjeta de control ArbotiX-M, el módulo UartSBee, un cable de conexión FTDI y uno de conexión micro USB a USB. Los tres últimos elementos pueden ser reemplazados por un cable FTDI a USB. El diagrama de conexión del servomotor con la tarjeta de control se lo puede apreciar en la Figura 75.



**Figura 75: Diagrama de conexión para servomotores.**

**Fuente:** (Trossen Robotics, s.f.)

Para la asignación de los identificadores a los motores, se lo debe hacer conectando un sólo motor a la tarjeta de control, mediante un cable Dynamixel de tres pines (ver Figura 76). Dynamanager permite el reconocimiento del tipo de motor conectado y su identificación por defecto, además se puede configurar un nuevo identificador y variar la posición del disco del motor (ver Figura 77).



Figura 76: Conexión de servomotor.

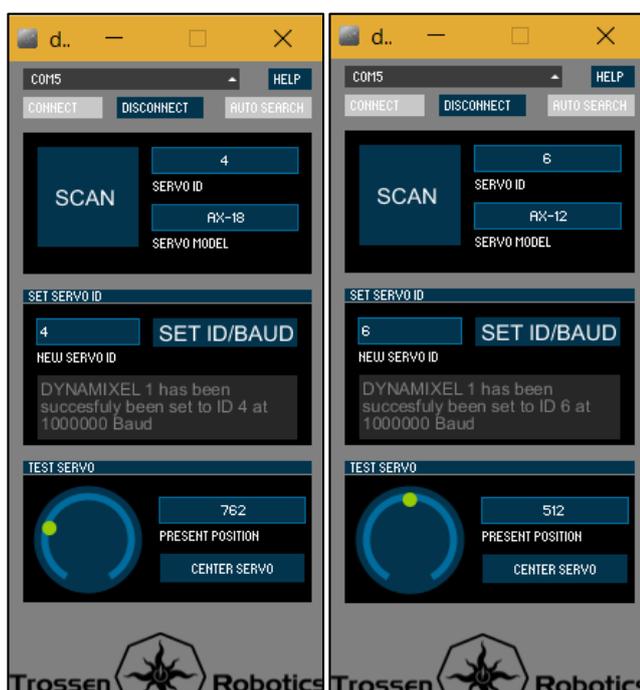


Figura 77: Asignación de identificadores - Dynamanager.

A continuación, se ensamblan los motores correspondientes a cada parte de la extremidad (ver Figura 78). Se debe tener en cuenta el centro del motor al momento de atornillar los soportes al disco del mismo y que los servomotores AX-18 se conecten a los soportes del fémur.



**Figura 78: Soportes ensamblados a servomotores.**

El ensamblaje por facilidad se lo realiza de la tibia a la coxa de acuerdo al orden mostrado en la Figura 79.



**Figura 79: Disposición de los eslabones en las extremidades.**

Ya acopladas entre sí cada una de las partes de las extremidades (ver Figura 80), se procede a ensamblarlas a la base del cuerpo (ver Figura 81).



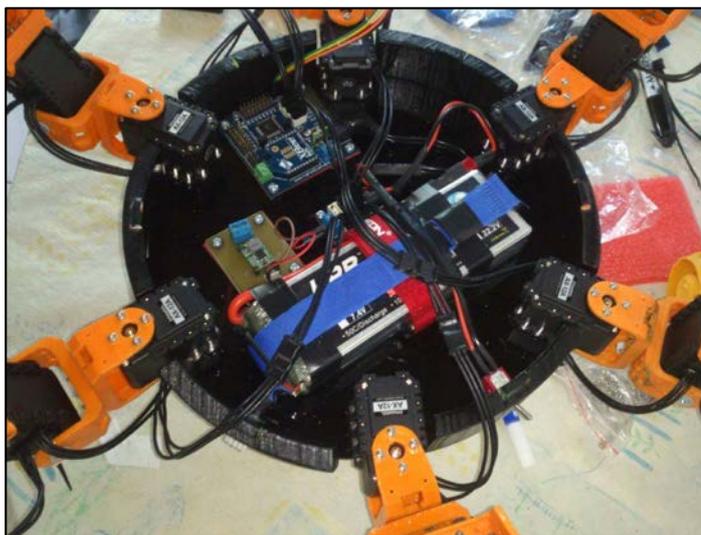
**Figura 80: Extremidades ensambladas.**



**Figura 81: Ensamblaje de las extremidades a la base del cuerpo.**

En la base del cuerpo también se ensamblan la tarjeta de control, la batería, un dispositivo concentrador y un regulador de voltaje para la cámara. Los servomotores son conectados en serie desde la tibia a la coxa y de ella a la tarjeta de control ArbotiX-M, en la cual también se conecta el dispositivo concentrador, que sirve en la conexión de los servos de las coxas del robot y

proporciona energía al circuito regulador de voltaje que alimenta a la cámara (ver Figura 82).



**Figura 82: Conexión de servomotores, batería y tarjeta de control.**

En la cubierta va ensamblada la cámara IP y su cable de alimentación conectado al regulador de voltaje dispuesto en la base. La estructura completamente ensamblada se la puede apreciar en la Figura 83.



**Figura 83: Robot hexápodo ensamblado.**

#### 4.1.2. Implementación del sistema de control

El tipo de control es de lazo abierto debido a que se busca que el sistema no sea autónomo sino tele-operado por un usuario el cual tendrá la capacidad de visualizar el entorno del robot mediante una cámara IP.

El sistema de control se basa en una tarjeta ArbotiX-M compatible con el entorno de programación de Arduino. La tarjeta de control recibe señales del joystick o de la interfaz y las procesa de acuerdo al diagrama de la Figura 84.

Los datos recibidos pueden ser de traslación en cuatro direcciones: Hacia adelante, atrás, derecha e izquierda; y de rotación en sentido horario y antihorario. También, recibe datos que permiten variar gradualmente la altura del robot y cambiar las secuencias de caminata nombradas en el apartado 3.3.3.

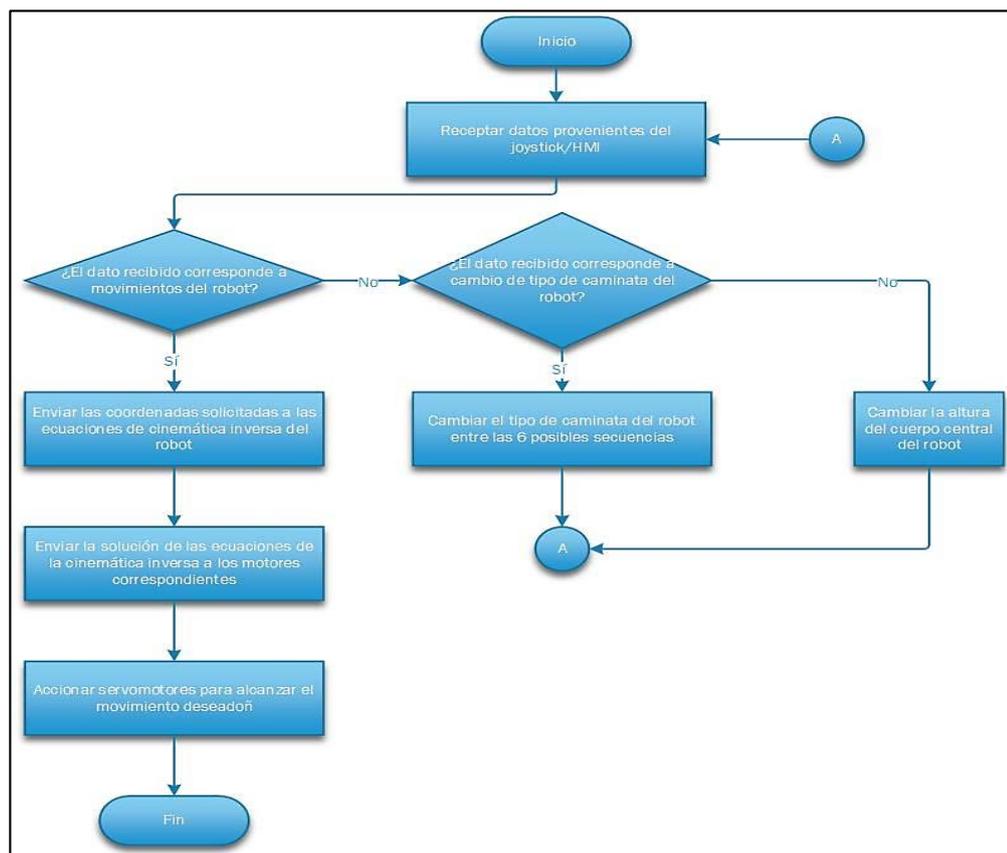


Figura 84: Diagrama de flujo del procesamiento de datos.

### 4.1.3. Implementación del sistema de comunicación

El sistema de comunicación está compuesto de tres módulos Xbee S2C, de los cuales uno actúa como receptor y está ubicado en el cuerpo del robot, mientras que, los dos módulos restantes actúan como emisores, conectados uno en el joystick y otro en el módulo Xbee Explorer USB que permite conectarse directamente al ordenador. En la Figura 85 se detalla el procedimiento de configuración de los módulos Xbee.

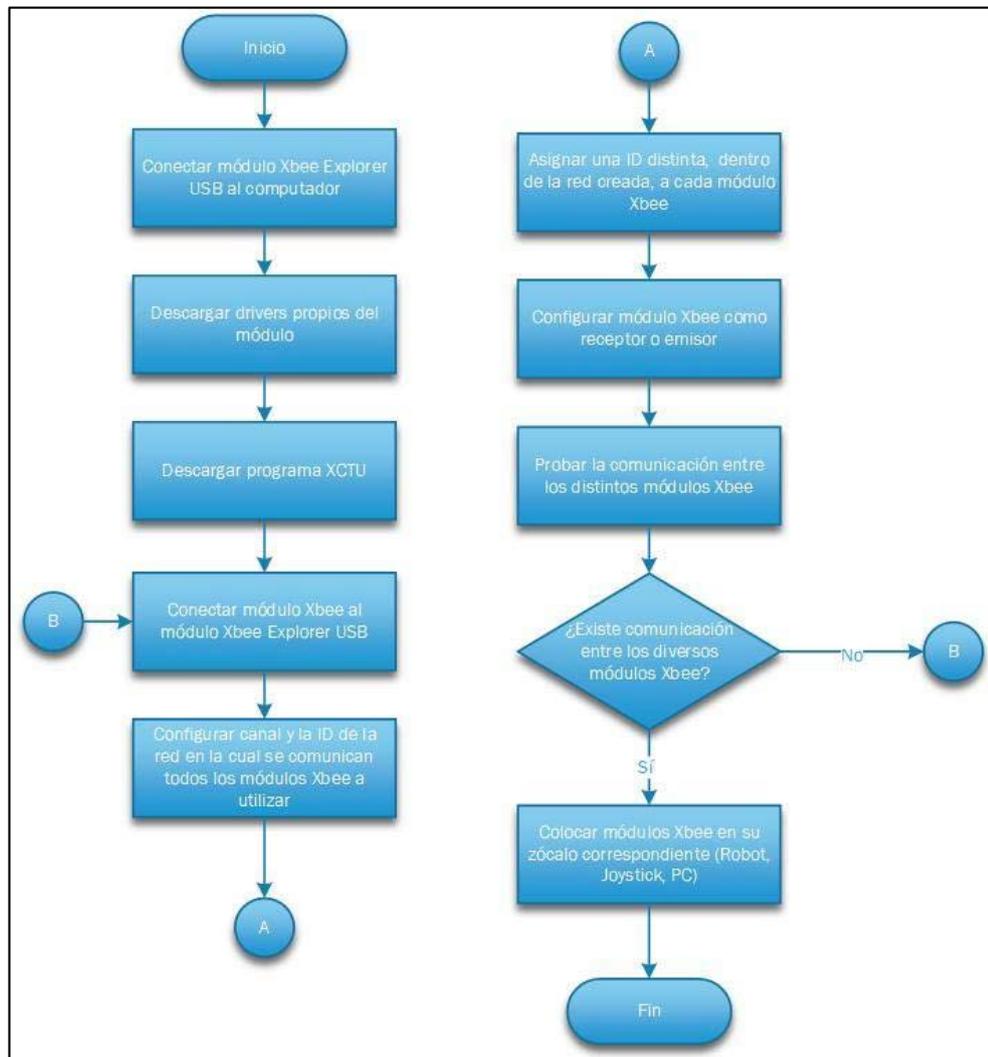


Figura 85: Diagrama de flujo para configuración de módulos XBee.

Para la configuración de los módulos Xbee se utilizó el software XCTU que permite crear una red en la cual se comunicaran los dispositivos inalámbricos Xbee, asignarles un identificador y definirlos como receptores o emisores. La velocidad de transmisión de los módulos es de 38400 baudios.

En la Figura 86 se muestran los parámetros que requirieron ser configurados para establecer la configuración entre módulos de los distintos dispositivos permitiendo el correcto funcionamiento del robot de manera teleoperada.

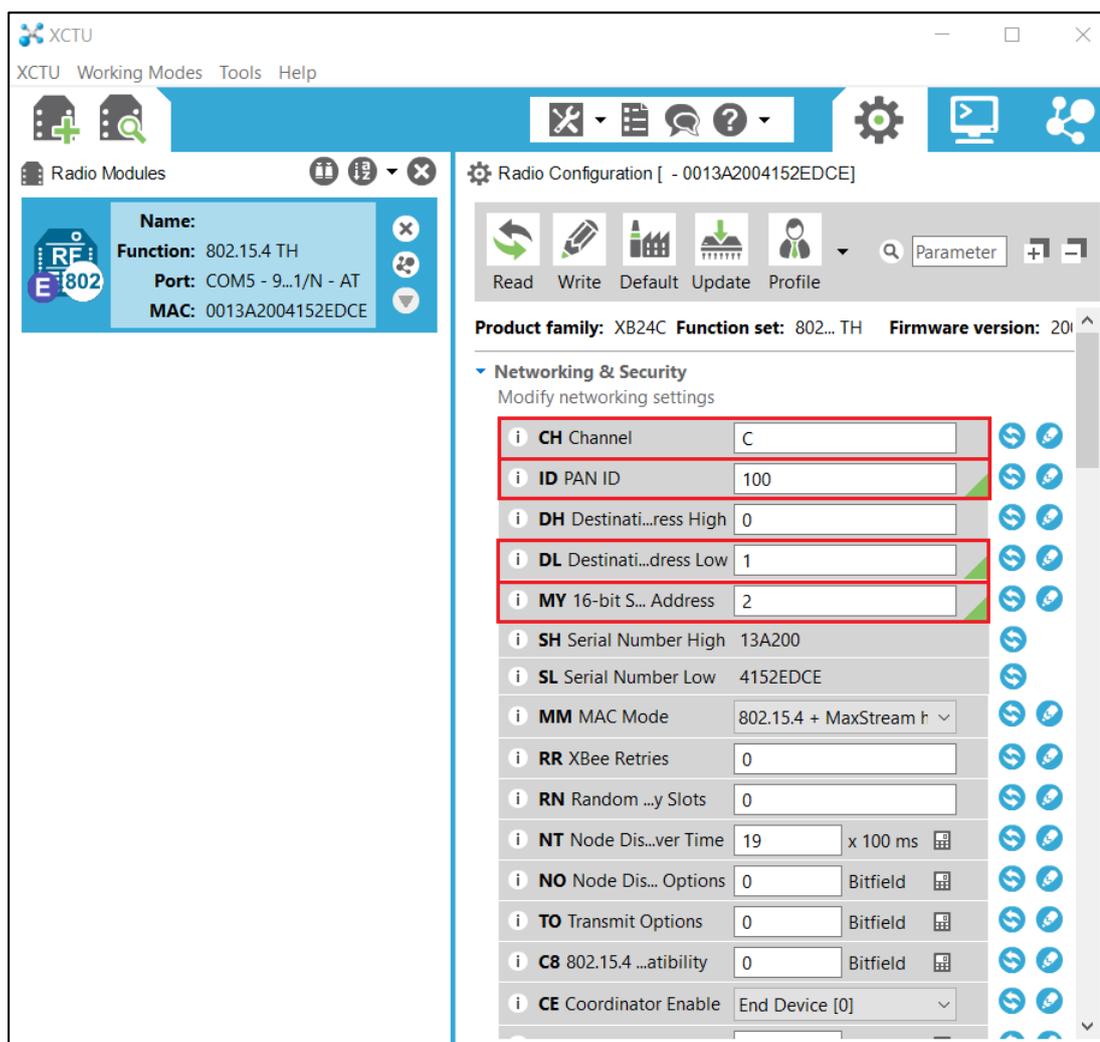


Figura 86: Software XCTU para configuración de módulo XBee.

#### 4.1.4. Implementación de la interfaz

La interfaz descrita en el apartado 3.4.2.2 se maneja de acuerdo al diagrama de flujo de la Figura 87.

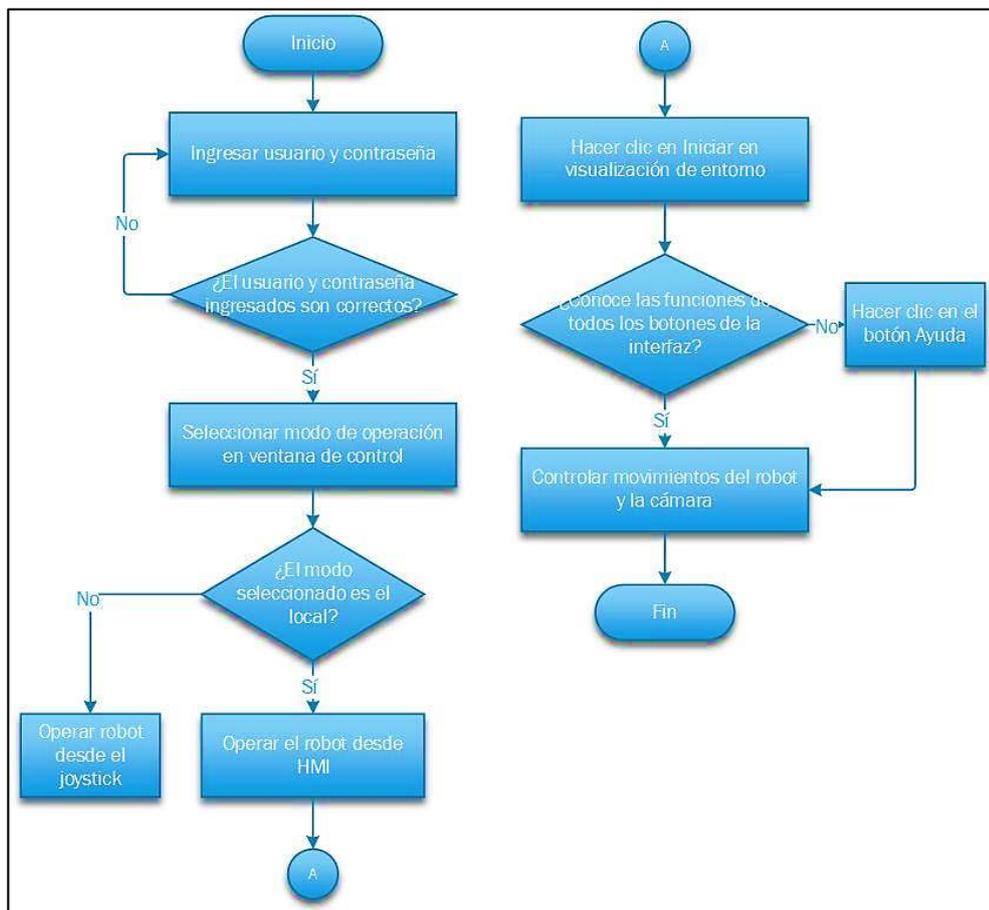


Figura 87: Diagrama de flujo para la utilización de la interfaz.

#### 4.1.5. Implementación del joystick

El joystick está compuesto de una tarjeta de control, un módulo de comandos y un módulo de conexión inalámbrica, este sistema es alimentado por 4 pilas AA+ y su armazón es de acrílico de 3 mm de espesor (ver Figura 88).



Figura 88: Componentes del joystick.

La implementación del joystick se describe de acuerdo al diagrama de flujo de la Figura 89.

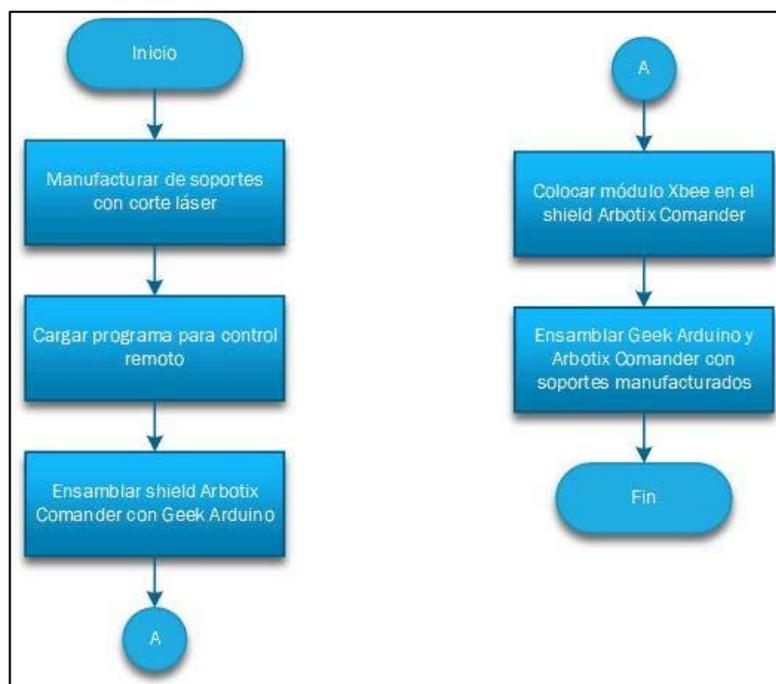


Figura 89: Diagrama de flujo para la implementación del joystick.

Los comandos para el control del robot se observan en la Figura 90.

- El análogo izquierdo se encarga del movimiento de translación, direccionándolo hacia arriba (adelante), abajo (atrás), izquierda y derecha.
- El análogo derecho se encarga del movimiento de rotación anti-horaria u horaria direccionándolo hacia la izquierda o derecha respectivamente.
- Manteniendo pulsado L1 mientras movemos el análogo derecho hacia arriba o hacia abajo el robot puede variar su altura.
- Pulsando R1 se puede variar el tipo de caminata entre las seis secuencias nombradas en el apartado 3.3.3. El tipo de caminata puede cambiar siempre y cuando el robot haya culminado la orden de movimiento anterior.

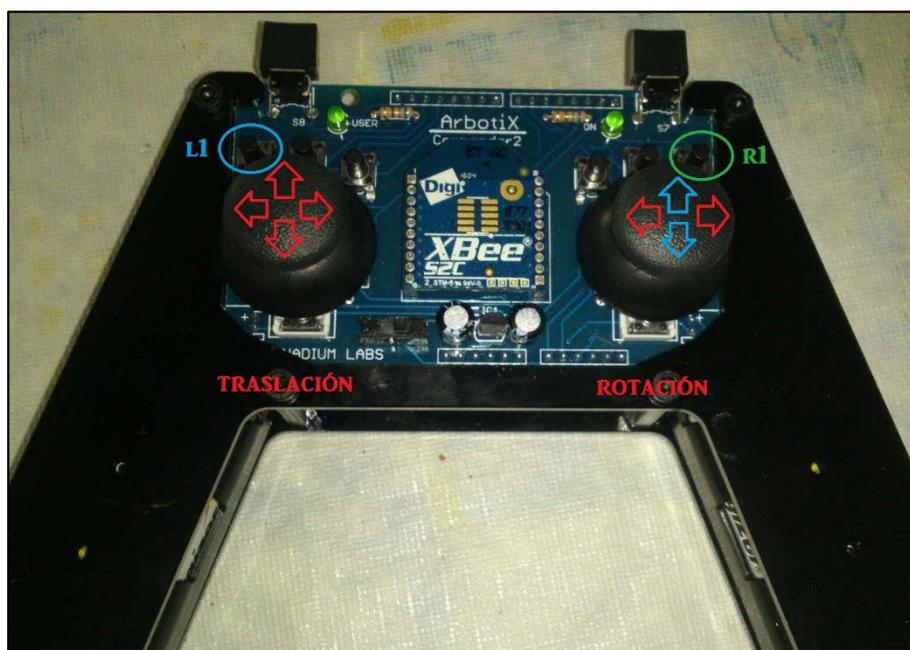


Figura 90: Comandos para el control del robot.

## 4.2. Pruebas y resultados

### 4.2.1. Pruebas de servomotores

Las pruebas de funcionamiento de los servomotores (ver Tabla 40) se las realizaron antes de su implementación en las extremidades del robot, al momento de la asignación de identificadores como lo describe el apartado 4.1.1. El software Dynamanger tiene también una función de prueba que permite mover el disco rotor del servomotor a distintas posiciones y realizar su correspondiente centrado (ver Figura 77).

**Tabla 40**

#### *Parámetros y resultados de pruebas de servomotores*

<b>Parámetros</b>	<b>Resultados</b>
<b>Encendido de servomotores</b>	Correcto, sin demora
<b>Reconocimiento de servomotores</b>	Correcto, identificadores y tipo de motor
<b>Movimiento hacia la derecha</b>	Correcto sin espasmos
<b>Movimiento hacia la izquierda</b>	Correcto sin espasmos
<b>Correcto centrado</b>	Si, coincidente con referencia física
<b>Sobrecalentamiento</b>	Ninguno

### 4.2.2. Pruebas de comunicación

Mediante estas pruebas se busca comprobar que la comunicación entre cualquiera de los mandos de control, joystick o interfaz, y el robot se realicen de forma efectiva, rápida y cumplan los parámetros de tele-operación. Las normales recepciones de las órdenes de control del robot se limitan a una distancia de 100 metros respecto al operador.

Debido a que la programación del algoritmo de locomoción del robot se encuentra almacenado en su tarjeta de control, las pruebas se basan en la correcta recepción y cumplimiento de las órdenes enviadas desde la interfaz gráfica (ver Tabla 41) y el joystick (ver Tabla 42).

**Tabla 41**

***Resultados de las pruebas de comunicación del robot con la HMI***

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado</b>
<b>Conexión Qt - ArbotiX-M</b>	Correcto
<b>Envío de paquete de datos</b>	Correcto
<b>Recepción de paquete de datos</b>	Correcto

**Tabla 42**

***Resultados de las pruebas de comunicación del robot con el joystick***

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado</b>
<b>Conexión joystick - ArbotiX-M</b>	Correcto
<b>Envío de paquete de datos</b>	Correcto
<b>Recepción de paquete de datos</b>	Correcto

#### **4.2.3. Duración de batería**

En la Ec. 45 del apartado 3.2.1.6 se determina el tiempo de duración máxima de la batería, considerando que todos los elementos se encuentran funcionando al mismo tiempo. Dependiendo del tipo de caminata seleccionada para el robot, se encuentran en movimiento distinto número de servomotores, para lo cual, también hay que considerar que estando en reposo consumen 50 mA cada uno. En la Tabla 43 se describe el número de motores utilizados para cada tipo de caminata y la duración de la batería.

Tabla 43

*Duración de la batería según el tipo de caminata*

Tipo de caminata	Motores en movimiento	Duración batería [min]
Paso de onda	AX-12: 4	27,39
	AX-18: 2	
Paso de trípode	AX-12: 6	19,79
	AX-18: 3	
Paso de ola	AX-12: 2	44,48
	AX-18: 1	

**4.2.4. Distancia cubierta en un paso**

La prueba consta en colocar las extremidades frontales del robot en una referencia, mediante el joystick o interfaz ejecutar un paso y por último medir, con un flexómetro o cinta métrica, la distancia que existe entre la nueva posición de las extremidades frontales y la referencia inicial. Los resultados para cada una de las secuencias programadas se detallan en la Tabla 44.

Tabla 44

*Distancia cubierta en un paso por cada tipo de caminata*

Secuencia	Descripción	Paso [cm]
1era	Paso de onda	5
2da	Paso de trípode	5
3era	Paso de trípode media velocidad	4
4ta	Paso de trípode baja velocidad	3
5ta	Paso de ola	4
6ta	Paso de trípode alta velocidad	3

La altura de la base del robot con respecto al suelo puede variar de 0 cm, cuando el robot está sentado, a 15 cm, cuando sus extremidades se encuentran completamente estiradas.

#### 4.2.5. Pruebas de velocidades de cada caminata

Estas pruebas se realizaron sobre una superficie de concreto con el fin de determinar qué secuencia de caminata es la más veloz en la traslación del robot. El recorrido propuesto para la prueba fue de 100 centímetros y los resultados fueron medidos mediante un cronómetro (ver Tabla 45).

**Tabla 45**

*Tiempo en recorrer 100 cm por cada tipo de caminata*

Secuencia	Descripción	Tiempo [s]
1era	Paso de onda	12,8
2da	Paso de trípode	8,1
3era	Paso de trípode media velocidad	9,8
4ta	Paso de trípode baja velocidad	10,4
5ta	Paso de ola	30,8
6ta	Paso de trípode alta velocidad	7,7

#### 4.2.6. Pruebas de caminatas sobre distintos terrenos

El robot posee en su programación seis secuencias de caminata que pueden variarse desde cualquiera de los controles, joystick o interfaz gráfica. Se programaron estas secuencias con carácter investigativo para determinar los tipos de caminata más factibles en los distintos terrenos seleccionados, como fueron: Concreto, orgánico y árido rocoso.

En las pruebas realizadas sobre la superficie de concreto (ver Figura 91) se pudo observar que, las cinco primeras secuencias de locomoción tuvieron un desempeño óptimo permitiendo un movimiento fluido del robot, mientras que, la sexta secuencia genera mucho esfuerzo en los soportes de las extremidades por lo que podrían presentar defectos de rotura por esfuerzo cortante.



**Figura 91: Caminata sobre concreto.**

En las pruebas realizadas sobre un terreno orgánico (ver Figura 92), sólo la cuarta secuencia de locomoción permite al robot trasladarse fluidamente, mientras que, las demás secuencias no generan ninguna traslación. El tiempo medido en que el robot recorre una distancia de 100 centímetros en el terreno orgánico tomado para la prueba fue de 18,9 segundos.



**Figura 92: Caminata en terreno orgánico.**

En las pruebas realizadas sobre un terreno árido rocoso (ver Figura 93) se pudo apreciar que, la cuarta secuencia fue la más apta para la traslación del robot, mientras que, las demás secuencias fuerzan a los soportes de las extremidades. El tiempo medido en que el robot recorre una distancia de 100 centímetros en el terreno árido rocoso tomado para la prueba fue de 12,8 segundos.



**Figura 93: Caminata en terreno árido rocoso.**

Por último, se realizaron pruebas de caminata sobre superficies inclinadas (ver Figura 94). Se constató que, el robot podía trasladarse con facilidad en pendientes de hasta 20 grados. La inclinación máxima en la que se hicieron pruebas fue de 27 grados en la cual el robot avanzaba pequeñas distancias con dificultad y a baja velocidad.



**Figura 94: Caminata sobre una superficie inclinada.**

### 4.3. Resumen

- La implementación de la plataforma robótica es ejecutada por distintas etapas de manera que sea lo más fácil posible. Primero, se fabrican las distintas piezas de la estructura. Segundo, se ensamblan entre piezas que corresponden a los soportes de los motores y la tibia al pie. Tercero, se asignan los identificadores a cada motor y se los articula a los soportes correspondientes. Cuarto, se acopla toda la extremidad (coxa, fémur y tibia). Quinto, en la base se ensambla la tarjeta de control (con Xbee), el dispositivo concentrador, el regulador de voltaje para la cámara y la batería. Sexto, se acoplan las extremidades a la base del robot y se realiza las conexiones por cable entre elementos. Séptimo, se ajusta la cámara a la cubierta del robot y se procede a ajustarlo incluyendo las piezas correspondientes a los cobertores laterales.
- El joystick se conforma por el acople de la tarjeta GeekDUINO con el controlador Arbotix Commander y su ensamblaje con los soportes de la carcasa.
- Las pruebas realizadas se las hicieron en elementos separados y también como un sistema integrado. En el primer caso, se probó el correcto movimiento de los servomotores y también la comunicación entre módulos XBee con la ayuda de softwares especializados. Las pruebas del robot totalmente armado consistieron en: Duración de la batería de acuerdo a los tipos de caminata utilizados, distancia cubierta en un paso para cada secuencia, velocidad del robot en recorrer un metro sobre una superficie de concreto con cada una de sus secuencias de caminata, pruebas de caminata sobre distintos terrenos como son el árido rocoso, el orgánico y liso de concreto, y sobre superficies inclinadas.

## CONCLUSIONES

- Se construyó un prototipo de robot hexápodo con dieciocho grados de libertad, basado en la morfología de la araña "*loxoceles laeta*", de cuerpo radial y extremidades de tres segmentos (coxa, fémur y tibia), cuya interacción ejecuta correctamente los algoritmos de control programados y su estructura robusta le permite trasladarse en distintos tipos de terrenos, y con respuestas inmediatas a los mandos de control.
- Se elaboraron un total de 36 piezas correspondientes a los soportes de las extremidades y los pies mediante impresión 3D; el material seleccionado fue el ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno) debido a su costo y buena resistencia a la tracción, necesaria debido a que los soportes de las extremidades están sometidos a mayores cargas en relación al resto del robot.
- Para solucionar el problema de posible deslizamiento de las patas del robot en su caminata sobre superficies lisas e inclinadas, se elaboraron 6 piezas como puntas de pie en FILAFLEX (FFX) mediante impresión 3D, con un revestimiento de 1,2 mm y una densidad  $1,5 \text{ g/cm}^3$  al 30%.
- Se elaboró el cuerpo del robot, compuesto de base y cubierta, y también las tibias mediante corte láser de una lámina tamaño A2 de 3 mm de espesor de PMMA debido a su facilidad de manufactura y bajo tiempo de fabricación, obteniéndose por este proceso un total de 14 piezas.
- Se seleccionaron los servomotores AX-12A y AX-18A en base a que, a pesar de tener un reducido peso y tamaño, cumplían los requisitos de torque calculados en la dinámica del robot, los cuales son:  $10,46 \text{ Kgf} \cdot \text{cm}$  para la articulación de la coxa,  $15,75 \text{ Kgf} \cdot \text{cm}$  para la articulación del fémur y  $4,34 \text{ Kgf} \cdot \text{cm}$  para la articulación de la tibia, estos valores resultantes tienen un factor de seguridad de 1,6. Se seleccionó la tarjeta ArbotiX-M por su capacidad de acoplarse directamente a los servomotores Dynamixel, sirviéndoles como un circuito distribuidor de energía, soportando una

alimentación superior a su voltaje de operación; además, la tarjeta puede ser programada desde Arduino IDE, el cual es un software gratuito, permitiendo acoplar, si es necesario, la gran variedad de librerías existentes. Debido a la existencia de un mayor número de actuadores que puertos en la tarjeta de control, se implementó un concentrador de energía que actúa como puente entre cuatro de las extremidades del robot y la tarjeta ArbotiX-M.

- Se diseñó un circuito regulador de voltaje DC-DC para la alimentación de la cámara a 5 voltios y 2 amperios, el cual va conectado al módulo concentrador de manera que el suministro de energía sea único.
- Se implementó una batería de polímero de litio debido a su alta densidad de almacenamiento de energía, su bajo porcentaje de auto-descarga diaria y sus propiedades no contaminantes; la capacidad de la batería seleccionada es de 6000 mAh a 11,1 V adecuado para la alimentación de los motores, los cuales trabajan al mismo voltaje. La duración de la batería calculada considerando que todos los elementos están trabajando de forma simultánea a su máxima capacidad es de 10,8 minutos, sin embargo, si se escoge una caminata de tipo trípode la duración de la batería se incrementa a 19,8 minutos, en caso de una caminata tipo onda la duración de la batería es de 27,4 minutos y por último si se escoge la caminata tipo ola la duración de la batería es de 44,5 minutos, estas variaciones se deben al diferente número de actuadores que entran en acción dependientes de la secuencia de locomoción.
- Se implementó un mando inalámbrico o joystick para pruebas de locomoción del robot correspondientes a traslación, rotación, cambios de marcha y variación de altura, mediante el uso de dos mandos analógicos y dos botones. La distancia de comunicación joystick-robot es de 100 metros sirviéndose de un módulo XBee.
- Se diseñó una interfaz gráfica que permite el control tele-operado del robot mediante el uso de botones con la misma funcionalidad que los del joystick;

sirviéndose de un módulo XBee y un USB Xbee Explorer para la transmisión de órdenes de control entre el ordenador y el robot con una distancia máxima de comunicación de 100 metros.

- La interfaz posee una ventana para la visualización en tiempo real del entorno, mediante una cámara ensamblada a la cubierta de la plataforma robótica, de manera que el operador pueda identificar el terreno y sus elementos para una correcta maniobrabilidad a distancia. La cámara posee características adicionales como visión infrarroja automática y movimientos motorizados accesibles desde la interfaz gráfica.
- En la locomoción del robot la coxa se encuentra limitada a movimientos angulares entre -75 y 75 grados, el fémur entre -100 y 100 grados y la tibia entre -102 y 67 grados correspondientes a los límites físicos de cada parte de la extremidad.
- Se comprobó la factibilidad de los distintos tipos de caminata en una superficie de concreto, terrenos orgánicos y áridos rocosos, obteniendo como resultados que para la superficie de concreto que las cinco primeras secuencias descritas en la Tabla 45 fueron factibles en este terreno, mientras que, la sexta secuencia a pesar de ser muy rápida genera mayor esfuerzo en los soportes de las extremidades, lo cual puede conducir a la rotura de los mismos.
- En los terrenos orgánicos y áridos rocosos se comprobó que solo la cuarta secuencia de locomoción indicada en el apartado 3.3.3, correspondiente al paso de trípode de baja velocidad, permite la traslación del robot, logrando un recorrido de 1 metro en 18,9 segundos y 12,8 segundos respectivamente en los distintos terrenos.
- Se realizaron pruebas en superficies de hasta 27 grados de inclinación, donde el robot se desplazaba sin dificultad hasta los 20 grados, en la inclinación máxima de prueba el robot se desplazaba lentamente y con mucho esfuerzo.

## RECOMENDACIONES

- Para trabajos futuros se puede diseñar y construir una plataforma robótica semejante a la araña "*Ixoceles laeta*", cuyo fin sea estudiar el movimiento de las extremidades de este insecto al momento de caminar, y determinar las ventajas que presentaría un robot zoomórfico octópodo respecto al robot hexápodo de configuración radial.
- Analizar la factibilidad de reemplazar los elementos de las extremidades fabricados en ABS por un material metálico como el aluminio, que brinde mayor resistencia a los esfuerzos mecánicos involucrados en la caminata sobre terrenos irregulares y alcanzar mayores velocidades al desplazarse.
- Diseñar y fabricar piezas con distintas formas para las puntas de las extremidades, con el fin de brindar mayor facilidad al robot al momento de caminar en distintos terrenos, y analizar las ventajas que presentan respecto a las propuestas en el presente trabajo.
- Definir un nuevo suministro de energía a 11.1 V, que no sea muy pesado, con el cual se pueda alimentar todo el sistema del robot y tenga una duración mínima (tipo de caminata de trípode) de 30 minutos.
- Adaptar al joystick un sistema de visión para la transmisión de las imágenes captadas por la cámara del robot. Dicho sistema y el joystick deben energizarse del mismo suministro de energía.
- Implementar ROS a la presente plataforma robótica zoomórfica, para hacer uso de la variedad de librerías existentes en dicho entorno. Además, se recomienda implementar un algoritmo para planificación de trayectorias, que permitan desplazar al robot, desde la interfaz gráfica, hacia un punto ingresado por el usuario, haciendo uso de nodos y herramientas de ROS.
- Desarrollar un nuevo tipo de caminata que le permita al robot escalar objetos, tales como gradas u obstáculos que se presenten durante la locomoción de la plataforma robótica y que facilite la caminata a lo largo de pendientes de más de 20°.

- Implementar un algoritmo de visión artificial, que otorgue al robot hexápodo la capacidad de reconocer, de forma autónoma, el tipo de terreno y adaptar la caminata que esté usando el robot a dicha superficie, haciendo uso de la cámara IP provista.
- Implementar un software de estabilización de imagen con el fin de reducir las vibraciones captadas por la cámara IP producto de ciertos movimientos bruscos en la caminata sobre terrenos irregulares.
- Integrar a la programación un algoritmo que permita el balanceo del centro de masa del robot para que, se facilite la locomoción y mejore el equilibrio al momento de desplazarse sobre superficies inclinadas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Barrientos, A., Peñín, L. F., Balaguer, C., & Aracil, R. (1997). *Fundamentos de Robótica*. Madrid: McGraw Hill.
- Benalcázar Redrobán, P., & Noboa Encalada, R. (2017). *Diseño y construcción de una plataforma robótica zoomórfica de cuatro extremidades con 12 grados de libertad*. Sangolquí.
- Boston Dynamic, BigDog Team. (2011). *BigDog, The rough terrain quadruped robot*. Boston.
- Cantor Forero, J. S. (2015). *Diseño y simulación de un robot hexápodo de una sola junta por pierna*. Bogotá.
- Cárdenas Verdugo, M. Á. (2011). *Diseño, construcción y control de un robot hexápodo*. Tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Cruse, H., Dean, J., Müller, U., & Schmitz, J. (1991). The stick insect as a walking robot. *Advanced Robotics, 1991. 'Robots in Unstructured Environments', 91 ICAR., Fifth International Conference on* (págs. 936-940). Bielefeld: IEEE.
- De León Rivas, J. (2015). *Definición y análisis de los modos de marcha de un robot hexápodo para tareas de búsqueda y rescate*. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Madrid.
- Delgado, D. (2015). *Hexapod Robot Stability Research*. Vilnius Gediminas Technical University, Electronics Faculty, Department of Automation, Vilna.
- dipmicro electronics. (2015). *dipmicro electronics*. Obtenido de <https://www.dipmicro.com/store/DCDC-MINI360>
- Escobar Olarte, J., & Silva Ortega, J. (2011). *Diseño de sistema electrónico jerárquico mediante comandos para robot hexápodo*. Bogota D.C.
- Festo AG & Co. KG. (2014). *BionicKangaroo*. Esslingen: Festo.
- Fuertes Rosero, C., & Llumiquinga Llumiquinga, R. (Mayo de 2005). *Diseño e Implementación de un Robot Móvil Tipo Hexápodo Teledirigido*. Sangolquí.
- Genta, G. (2012). *Introduction to the Mechanics of Space Robots*. Torino: Springer.
- Honda. (s.f.). *Honda*. Obtenido de <https://www.honda.mx/asimo/>
- King, R. S. (2013). *BiLBIQ: A Biologically Inspired Robot with Walking and Rolling Locomotion*. Berlin: Springer.
- López Guerrero, E., Betancourt Esparza, J., Martínez Briones, H., Ancira González, D., & Ramírez Cruz, F. (2011). *Diseño y Construcción de un robot hexápodo*. San Luis Potosí.

- Marine Science Center. (20 de September de 2010). *Northeastern*. Obtenido de <http://www.neurotechnology.neu.edu/>
- Morgan, T. H. (1925). *Evolution and genetics*. Princeton: Princeton University Press.
- Mrva, J. (2014). *Design of Motion Primitives for a Hexapod Walking Robot Operating in a Rough Environment*. Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering, Department of Cybernetics.
- Nonami, K., Kumar Barai, R., Irawan, A., & Razali Daud, M. (2014). *Hidraulically Actuated Hexapod Robots*. Tokio: Springer.
- Parra, D., Torres, M., Morillas, J., & Espinoza, P. (2002). *Loxosceles laeta, identificación y una mirada bajo microscopía de barrido*. Santiago de Chile.
- Ruiz de Garibay Pascual, J. (2006). *Robótica: Estado del Arte*. Bilbao.
- Salazar Guilcamaigua, M., & Viteri Gaibor, M. (2015). *Diseño y construcción de un prototipo de robot electroneumático escalador para exploración de superficies verticales lisas*. Sangolquí.
- Siciliano, B., & Khatib, O. (2008). *Handbook of Robotics*. Berlin: Springer.
- Stanford University. (24 de May de 2011). *Biomimetics & Dexterous Manipulation Laboratory*. Obtenido de <http://bdml.stanford.edu/twiki/bin/view/Rise/StickyBotIII>
- Tedeschi, F., & Carbone, G. (2014). Design Issues for Hexapod Walking Robots. *Robotics*, 181-206.
- The Tech. (17 de October de 1995). *The Tech online edition*. Obtenido de <http://tech.mit.edu/V115/N49/robotuna.49n.html>
- Torres Zuñiga, A., Romero Vargas, A., & Olvera Villa, G. (2006). *Diseño, construcción y control de un insecto robot*. Pachuca: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Trossen Robotics. (s.f.). *Trossen Robotics*. Obtenido de <http://learn.trossenrobotics.com/arbotix/1-using-the-tr-dynamixel-servo-tool#&panel1-1>
- TrossenRobotics. (s.f.). *Learn.TrossenRobotics.com*. Obtenido de <http://learn.trossenrobotics.com/arbotix/arbotix-getting-started/38-arbotix-m-hardware-overview#&panel1-1>
- Ulprospector. (2017). *Prospector*. Obtenido de [www.ulprospector.com](http://www.ulprospector.com)
- Universidad de Bremen. (Agosto de 2013). *Robotic Innovation Center (RIC)*. Obtenido de <http://robotik.dfki-bremen.de/en/research/projects/istruct.html>
- Vanadium Labs. (2013). *arbotiX robocontroller V 0.9 for Rev A Boards - User Manual*. New York.

Yacuzzi, E., & Martín, F. (2003). *QFD: Conceptos, aplicaciones y nuevos desarrollos*. Documentos de trabajo, Universidad del CEMA, Negocios, Buenos Aires.