



**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, CONSTRUCCIÓN Y CONTROL DE UN ROBOT  
PROTOTIPO BÍPEDO ZOOMÓRFICO DE DESPLAZAMIENTO  
DINÁMICO Y ESTABILIDAD CUASI-ESTÁTICA CON MANDO  
MEDIANTE RADIOFRECUENCIA**

**AUTÓRES: CHILUISA HIDALGO, MELANIE LISSETTE**

**HIDALGO QUEZADA, JOSÉ LUIS**

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

**SANGOLQUÍ**

**2018**



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CONTROL DE UN ROBOT PROTOTIPO BÍPEDO ZOOMÓRFICO DE DESPLAZAMIENTO DINÁMICO Y ESTABILIDAD CUASI-ESTÁTICA CON MANDO MEDIANTE RADIOFRECUENCIA**” fue realizado por los señores **CHILUISA HIDALGO, MELANIE LISSETTE** e **HIDALGO QUEZADA, JOSÉ LUIS**, el mismo ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se sustente públicamente.

Firma manuscrita en tinta azul de David César Loza Matovelle.

**MSc. DAVID CÉSAR LOZA MATOVELLE**

Sangolquí, 03 de Septiembre de 2018



**C.C.: 170866154-9**



# 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, **CHILUISA HIDALGO, MELANIE LISSETTE** con cédula de identidad N° 172312798-9 e **HIDALGO QUEZADA, JOSÉ LUIS**, con cédula de identidad N° 171816030-0, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: “**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CONTROL DE UN ROBOT PROTOTIPO BÍPEDO ZOOMÓRFICO DE DESPLAZAMIENTO DINÁMICO Y ESTABILIDAD CUASI-ESTÁTICA CON MANDO MEDIANTE RADIOFRECUENCIA**” es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 03 de Septiembre de 2018

MELANIE L. CHILUISA HIDALGO

C.C.: 172312798-9

JOSÉ L. HIDALGO QUEZADA

C.C.: 171816030-0



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

## AUTORIZACIÓN

Nosotros, **CHILUISA HIDALGO, MELANIE LISSETTE e HIDALGO QUEZADA, JOSÉ LUIS**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE publicar el trabajo de titulación “**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CONTROL DE UN ROBOT PROTOTIPO BÍPEDO ZOOMÓRFICO DE DESPLAZAMIENTO DINÁMICO Y ESTABILIDAD CUASI-ESTÁTICA CON MANDO MEDIANTE RADIOFRECUENCIA**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 03 de Septiembre de 2018

A handwritten signature in blue ink, reading 'Melanie Chiluisa', written over a dotted line.

MELANIE L. CHILUISA HIDALGO

C.C.: 172312798-9

A handwritten signature in blue ink, reading 'José L. Hidalgo', written over a dotted line.

JOSÉ L. HIDALGO QUEZADA

C.C.: 171816030-0

## DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mi hermana Ivana, que desde su nacimiento ha sido mi razón de vivir y mi fuerza para seguir adelante.

A mis padres Fausto y Gloria, porque han sido los pilares fundamentales de mi vida y a pesar de mis caídas siempre me dieron ánimos y fuerzas para conseguir este logro.

A mi novio José Luis, porque gracias a él cumplo esta meta y me impulso a soñar más allá. Esperando un futuro juntos una vida llena de bendiciones y éxitos.

Melanie Chiluisa

Los dos días más importantes en tu vida son: el día que naces y el día que descubres el porqué.

Ésta tesis la dedico a mis padres, a Melanie y a mí mismo. Pues es la culminación de un proceso que tomo un tiempo, pero se cumplió. Y ahora a seguir, a dar lo mejor de mí y lograr las metas que me he propuesto a lo largo de mi vida.

José Luis Hidalgo

## AGRADECIMIENTO

A Dios por darme la fuerza y la sabiduría para lograr este trabajo.

A mi mami Gloria Hidalgo por su amor, apoyo incondicional e inmensa fe. Porque a pesar de las madrugadas y desveladas, siempre me brindaba una sonrisa y me daba fuerzas para seguir. A mi papi Fausto Chiluisa por su apoyo y comprensión. Porque siempre me brindo unas palabras de aliento y me enseñó a ser una mujer fuerte e independiente. A mi hermana Ivana Chiluisa por su amor y sus risas. Porque aún en el mayor estrés me sacaba una sonrisa y me daba ánimos de seguir. A mi amor José Luis Hidalgo, por su amor, su paciencia y su confianza. Porque ha sido el mejor maestro que he tenido y mi mejor amigo. Gracias a él cumplo este sueño.

A mi abuelita Esperancita por su ejemplo de siempre luchar y cumplir metas. A mis angelitos Antonio (+), Pablo (+) y Fanny (+) porque siempre escucharon mis oraciones y me envían milagros. A mis tíos Edwin, Martha, Ruth, Vicky, Consu y Lore, y a mis primos Willy, Jacky, Amy, Samy, Sebas y Gary; porque a pesar de que no entendían lo que hacía de trabajos siempre estuvieron apoyándome y pendientes de mí. A la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, a sus maestros, en especial al Msc. David Loza, por brindarnos todos sus conocimientos y guiarnos en el proyecto final. A Don Carsito por ser ese apoyo externo que siempre nos aconsejó. A mis amigos Bryan y Sergio por su apoyo, consejos, críticas y todas sus payasadas que siempre evitaban que me estrese más y más.

A mis mascotas Lacey y Tiana porque siempre estuvieron de madrugada despertándome, lamiéndome y observándome mientras trabajaba en mi tesis.

Melanie Chiluisa

## AGRADECIMIENTO

A mis padres, quienes con su sacrificio, largas horas de paciencia y dedicación me han dado todas las oportunidades para salir adelante. A mi madre Yolanda, quien me ha dado todo su amor y ha hecho de mí una persona buena que siempre hace el bien. A mi padre José Luis, quien me ha enseñado los valores del ser humano, la rectitud y la ética que se debe tener en todo momento y así lograr ser siempre un hombre correcto.

A Melanie, mi amor, que por su gran fortaleza, su bondad y su amor, ha hecho de mí una mejor persona día a día. Gracias a ella este sueño se cumple y se busca seguir adelante, lograr día a día ser mejores y alcanzar una meta en común. Ella es alguien con quien planeo estar hasta el último de mis alientos.

A mi familia, que por mucho que no entienden para que mismo es esta carrera, siempre están pendientes, preocupados y orgullosos de mis logros.

A la universidad y mis profesores, quienes con su guía y sabiduría he llegado hasta este punto. A nuestro tutor de Tesis y amigo, el Ingeniero David Loza, que gracias a su constante guía, ha hecho de nosotros mejores estudiantes y personas que siempre busquen dar lo mejor de nosotros mismos. A mis amigos y personas que han estado en mi vida, los cuales han dejado algo en mi vida, alguna enseñanza, crítica o broma, que han hecho de mí, la persona que soy hoy.

José Luis Hidalgo

## TABLA DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN-----	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD -----	ii
AUTORIZACIÓN-----	iii
DEDICATORIA -----	iv
AGRADECIMIENTO -----	v
AGRADECIMIENTO -----	vi
TABLA DE CONTENIDOS-----	vii
Índice de Figuras-----	xvi
Índice de Tablas-----	xiii
SIMBOLOGÍA-----	xxiii
RESUMEN -----	xxvi
ABSTRACT-----	xxvii
1. CAPÍTULO 1 – GENERALIDADES -----	1
1.1. Presentación-----	1
1.2. Planteamiento del problema -----	1
1.3. Justificación e importancia-----	2
1.4. Antecedentes -----	3
1.5. Área de influencia-----	9

1.6. Alcance del proyecto -----	9
1.7. Objetivos -----	10
1.7.1. Objetivo General-----	10
1.7.2. Objetivos específicos -----	10
1.8. Estructura del documento -----	10
2. CAPÍTULO 2 – ESTADO DEL ARTE -----	13
2.1. Robots zoomórficos-----	13
2.2. Locomoción con piernas -----	14
2.3. Robots caminadores-----	17
2.3.1. Disposición general de los robots caminadores -----	18
2.3.2. Generación de trayectorias del pie -----	20
2.3.3. Configuraciones no Zoomórficas -----	23
2.3.4. Disposición rígida del bastidor -----	25
2.3.5. Máquinas caminadoras de movimiento planar -----	26
2.4. Bípedos robóticos humanoides-----	27
2.4.1. Centro de gravedad y centro de masa del cuerpo humano-----	28
2.4.2. Área de soporte -----	28
2.4.3. Equilibrio estático y equilibrio dinámico -----	28
2.4.4. Ciclo de marcha-----	29

2.4.5. Punto de momento cero-----	29
2.4.6. Técnicas y algoritmos de control para bípedos robóticos humanoides -----	30
2.5. Marcha y coordinación de piernas -----	40
2.6. Equilibrio -----	42
2.7. Resumen -----	43
3. CAPÍTULO 3 – DISEÑO MECATRÓNICO-----	46
3.1. Elaboración de lista de métricas-----	46
3.1.1. Matriz QFD-----	46
3.1.2. Análisis de resultados de la matriz QFD -----	48
3.1.3. Diseño-----	50
3.2. Conceptos a implementar -----	51
3.2.1. Módulo 1: Equilibrio-----	52
3.2.2. Módulo 2: Mecanismo-----	52
3.2.3. Módulo 3: Caminata -----	59
3.2.4. Módulo 4: Estructura-----	63
3.2.5. Módulo 5: Alimentación -----	65
3.2.6. Módulo 6: Comunicación -----	66
3.2.7. Módulo 7: HMI -----	67
3.3. Conclusiones del listado de métricas -----	68

3.3.1. Visualización del primer concepto desarrollado. -----	69
3.4. Subsistema estructural -----	70
3.4.1. Análisis de transmisores de movimiento para cada eslabón-----	71
3.4.2. Análisis y dimensionamiento de la extremidad -----	79
3.4.3. Análisis y simulación CAE -----	109
3.5. Subsistema de potencia y locomoción -----	117
3.5.1. Selección de actuadores -----	117
3.5.2. Especificación de sistema de alimentación -----	117
3.6. Subsistema de control -----	121
3.6.1. Análisis cinemático -----	121
3.6.2. Análisis dinámico -----	145
3.6.3. Cambio de fase-----	148
3.6.4. Diseño de HMI-----	148
3.7. Subsistema de radiofrecuencia -----	149
3.7.1. Diseño de control remoto-----	149
3.7.2. Diseño de comandos de orden -----	150
3.8. Resumen -----	151
4. CAPÍTULO 4 – IMPLEMENTACIÓN, PRUEBA Y RESULTADOS-----	156
4.1. Implementación de los actuadores y mecanismos de movimiento-----	156

4.1.1. Mecanizado de ejes y engranes -----	156
4.1.2. Implementación de servomotores lineales y componentes extras -----	158
4.1.3. Acople de engranes al eslabón fémur-----	158
4.1.4. Adecuación de acoples y actuadores a eslabones -----	159
4.2. Implementación de los componentes eléctricos y/o electrónicos -----	160
4.3. Implementación de la estructura -----	162
4.3.1. Construcción del Torso y Cola -----	162
4.3.2. Construcción extremidades inferiores -----	163
4.3.3. Resultado final de la estructura-----	165
4.4. Implementación del sistema de apoyo -----	167
4.5. Implementación del control remoto -----	168
4.6. Implementación de interfaz de usuario-----	168
4.7. Pruebas y Resultados -----	171
4.7.1. Subsistema Mecánico -----	171
Componentes sometidos a Prueba-----	171
4.7.2. Subsistema Eléctrico -----	173
4.7.3. Subsistema de Software -----	173
4.7.4. Subsistema Mecatrónico-----	175
4.8. Resumen -----	178

5. CAPÍTULO 5 – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES -----	180
5.1. Conclusiones -----	180
5.2. Recomendaciones -----	182
5.3. Trabajos futuros -----	183
BIBLIOGRAFÍA -----	185

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Características técnicas de los bípedos desarrollados</i> .....	37
<b>Tabla 2</b> <i>Características técnicas de los requerimientos</i> .....	46
<b>Tabla 3</b> <i>Valoración y simbología de la matriz QFD</i> .....	47
<b>Tabla 4</b> <i>Matriz QFD</i> .....	48
<b>Tabla 5</b> <i>Resultados de la matriz QFD</i> .....	48
<b>Tabla 6</b> <i>Orden jerárquico de las características técnicas</i> .....	49
<b>Tabla 7</b> <i>Definición de módulos</i> .....	50
<b>Tabla 8</b> <i>Módulos para el diseño</i> .....	50
<b>Tabla 9</b> <i>Módulo 1 (Cálculo de centro de masa)</i> .....	52
<b>Tabla 10</b> <i>Módulo 2 (Mecanismo para cambio de posición del centro de gravedad)</i> .....	52
<b>Tabla 11</b> <i>Módulo 2 (Mecanismo para el control de equilibrio en la marcha bípeda)</i> .....	53
<b>Tabla 12</b> <i>Módulo 2 (Mecanismo para transmisión de movimiento en las rodillas)</i> .....	53
<b>Tabla 13</b> <i>Módulo 2 (Mecanismo para transmisión de movimiento en el fémur)</i> .....	53
<b>Tabla 14</b> <i>Módulo 2 (Mecanismo para transmisión de movimiento en el tobillo)</i> .....	53
<b>Tabla 15</b> <i>Módulo 2 (Actuadores a utilizar)</i> .....	53
<b>Tabla 16</b> <i>Módulo 3 (Elección del sistema sensorial de inclinación de la superficie)</i> .....	59
<b>Tabla 17</b> <i>Módulo 3 (Elección del sistema sensorial para colisiones)</i> .....	60
<b>Tabla 18</b> <i>Módulo 3 (Elección de tipo de movimiento para la marcha bípeda)</i> .....	60
<b>Tabla 19</b> <i>Módulo 4 (Elección del material a usar en la estructura)</i> .....	63
<b>Tabla 20</b> <i>Módulo 4 (Elección de material para engranajes)</i> .....	63
<b>Tabla 21</b> <i>Módulo 4 (Elección de material para ejes)</i> .....	63
<b>Tabla 22</b> <i>Propiedades físicas y mecánicas del ABS</i> .....	64

<b>Tabla 23</b> <i>Propiedades físicas y mecánicas del aluminio</i> .....	64
<b>Tabla 24</b> <i>Módulo 5 (Elección de sistema de alimentación para el prototipo)</i> .....	65
<b>Tabla 25</b> <i>Módulo 5 (Elección del sistema de alimentación del control remoto)</i> .....	65
<b>Tabla 26</b> <i>Módulo 6 (Elección de sistema de comunicación)</i> .....	66
<b>Tabla 27</b> <i>Programas para HMI</i> .....	67
<b>Tabla 28</b> <i>Listado de métricas</i> .....	68
<b>Tabla 29</b> <i>Componentes del Eslabón Pata Derecha</i> .....	81
<b>Tabla 30</b> <i>Cálculos del centro de masa para el eslabón Pata Derecha</i> .....	83
<b>Tabla 31</b> <i>Componentes del Eslabón Pata Izquierda</i> .....	85
<b>Tabla 32</b> <i>Cálculos del centro de masa para el eslabón Pata Izquierda</i> .....	86
<b>Tabla 33</b> <i>Componentes del Eslabón Pantorrilla Derecha</i> .....	87
<b>Tabla 34</b> <i>Cálculos del centro de masa para el eslabón Pantorrilla Derecha</i> .....	88
<b>Tabla 35</b> <i>Componentes del Eslabón Pantorrilla Izquierda</i> .....	90
<b>Tabla 36</b> <i>Cálculos del centro de masa para el eslabón Pantorrilla Izquierda</i> .....	91
<b>Tabla 37</b> <i>Componentes del Eslabón Pierna Derecha</i> .....	93
<b>Tabla 38</b> <i>Cálculos del centro de masa para el eslabón Pierna Derecha</i> .....	95
<b>Tabla 39</b> <i>Componentes del Eslabón Pierna Izquierda</i> .....	97
<b>Tabla 40</b> <i>Cálculos del centro de masa para el eslabón Pierna Izquierda</i> .....	99
<b>Tabla 41</b> <i>Componentes del Eslabón Torso</i> .....	101
<b>Tabla 42</b> <i>Cálculos del centro de masa para el eslabón Torso</i> .....	103
<b>Tabla 43</b> <i>Componentes del Eslabón Cola</i> .....	106
<b>Tabla 44</b> <i>Cálculos del centro de masa para el eslabón Cola</i> .....	107
<b>Tabla 45</b> <i>Resumen de los centros de masa y longitudes de cada eslabón</i> .....	108

<b>Tabla 46</b> <i>Mallado de partes del prototipo robótico de un bípedo zoomórfico</i> .....	110
<b>Tabla 47</b> <i>Tensión de partes del prototipo robótico de un bípedo zoomórfico</i> .....	112
<b>Tabla 48</b> <i>Deformación de partes del prototipo robótico de un bípedo zoomórfico</i> .....	114
<b>Tabla 49</b> <i>Desplazamiento de partes del prototipo robótico de un bípedo zoomórfico</i> .....	115
<b>Tabla 50</b> <i>Datos y Variables a usar en el sistema mecánico</i> .....	121
<b>Tabla 51</b> <i>Análisis energético de los eslabones</i> .....	145
<b>Tabla 52</b> <i>Valores de trabajo en la Fase 2</i> .....	147
<b>Tabla 53</b> <i>Mecanizado de ejes y engranes</i> .....	156
<b>Tabla 54</b> <i>Fabricación de placas PCB</i> .....	160
<b>Tabla 55</b> <i>Pruebas Mecánicas</i> .....	171
<b>Tabla 56</b> <i>Resultados de las Pruebas Mecánicas</i> .....	172
<b>Tabla 57</b> <i>Pruebas Eléctricas</i> .....	173
<b>Tabla 58</b> <i>Resultados de las Pruebas Eléctricas</i> .....	173
<b>Tabla 59</b> <i>Pruebas de Software</i> .....	174
<b>Tabla 60</b> <i>Resultado de las Pruebas de Software</i> .....	174
<b>Tabla 61</b> <i>Pruebas Mecnónicas</i> .....	175
<b>Tabla 62</b> <i>Resultado de las Pruebas Mecnónicas</i> .....	176
<b>Tabla 63</b> <i>Resultados gráficos de la Pruebas Mecnónicas</i> .....	176

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1</i> Spring Flamingo desarrollado en MIT Leg Laboratory. -----	4
<i>Figura 2</i> Spring Turkey desarrollado en el MIT Leg Laboratory -----	5
<i>Figura 3</i> Troody the Robotic Dinosaur desarrollado en el MIT Leg Laboratory -----	5
<i>Figura 4</i> Robot zoomórfico desarrollado en le Escuela Superior de Chimborazo-----	6
<i>Figura 5</i> Plataforma Robótica Zoomórfica de cuatro extremidades con doce grados -----	8
<i>Figura 6</i> Prototipo didáctico de péndulo invertido con 4 diferentes controladores -----	8
<i>Figura 7</i> Torso robótico colaborativo de dos brazos para la unión de una junta empernada-----	8
<i>Figura 8</i> Mecanismo estabilizador para la cámara de un dron -----	8
<i>Figura 9</i> Plataforma robótica para exteriores tele operada, para el laboratorio de manufactura --	8
<i>Figura 10</i> Prototipo robot escalador para exploración de superficies verticales-----	8
<i>Figura 11</i> Número de patas en animales-----	15
<i>Figura 12</i> Ventajas y desventajas de la locomoción con piernas -----	17
<i>Figura 13</i> Dispositivos caminantes-----	18
<i>Figura 14</i> Configuraciones básicas de las piernas para máquinas caminadoras -----	20
<i>Figura 15</i> Configuración de mamífero-----	21
<i>Figura 16</i> Distribución del peso en las configuraciones zoomórficas -----	23
<i>Figura 17</i> Bosquejo de las patas de pantógrafo del vehículo de suspensión adaptativa -----	24
<i>Figura 18</i> a) esquema de una máquina caminadora de dos bastidores rígidos -----	26
<i>Figura 19</i> Theo Jansen Robot, ejemplo de máquina caminadora de movimiento planar-----	27
<i>Figura 20</i> Ubicación del centro de gravedad del cuerpo humano-----	28
<i>Figura 21</i> Ciclo de marcha bípeda-----	29
<i>Figura 22</i> Área de soporte y spunto de momento cero (P)-----	30

<b>Figura 23</b> Tres estrategias básicas de balanceo-----	32
<b>Figura 24</b> Diagrama de bloques del estabilizador orbital -----	34
<b>Figura 25</b> Sistema de control para el robot ASIMO -----	36
<b>Figura 26</b> Control para el ángulo del torso y tobillo en el torso-----	37
<b>Figura 27</b> a) Numeración de patas para un cuadrúpedo y b) diagrama de marcha -----	40
<b>Figura 28</b> Diagrama de marcha de un cuadrúpedo-----	42
<b>Figura 29</b> The BigDog -----	43
<b>Figura 30</b> Ubicación de módulos -----	51
<b>Figura 31</b> Movimiento de la cola-----	54
<b>Figura 32</b> Movimiento del torso -----	55
<b>Figura 33</b> Tren de engranes en la rodilla -----	55
<b>Figura 34</b> Movimiento de la pantorrilla -----	56
<b>Figura 35</b> Acople directo del fémur -----	56
<b>Figura 36</b> Movimiento de la pierna -----	57
<b>Figura 37</b> Movimiento de la pata -----	58
<b>Figura 38</b> Mecanismo manivela corredera -----	58
<b>Figura 39</b> Ubicación de los actuadores -----	59
<b>Figura 40</b> Servomotor sugerido-----	59
<b>Figura 41</b> Ubicación de los sensores -----	60
<b>Figura 42</b> Sensor de inclinación sugerido -----	61
<b>Figura 43</b> Sensor ultrasónico sugerido-----	61
<b>Figura 44</b> Diagrama de flujo de la fase de caminata-----	62
<b>Figura 45</b> Eje que forma parte de los eslabones -----	65

<b>Figura 46</b> Engranaje que transmite los movimientos -----	65
<b>Figura 47</b> Batería recargable sugerida -----	66
<b>Figura 48</b> Módulos de radiofrecuencia sugeridos -----	67
<b>Figura 49</b> HMI en Qt Designer -----	68
<b>Figura 50</b> Primer concepto desarrollado-----	70
<b>Figura 51</b> Distribución de los eslabones-----	70
<b>Figura 52</b> Mecanismo manivela corredera -----	75
<b>Figura 53</b> Disposición del mecanismo de transmisión de movimiento -----	75
<b>Figura 54</b> Análisis cinemático del mecanismo manivela corredera inverso-----	77
<b>Figura 55</b> Gráfica del desplazamiento angular del eslabón Pata -----	79
<b>Figura 56</b> Esquema eslabón Pata Derecha -----	81
<b>Figura 57</b> Representación simplificada del eslabón Pata Derecha-----	84
<b>Figura 58</b> Esquema eslabón Pata Izquierda -----	85
<b>Figura 59</b> Representación simplificada del eslabón Pata Izquierda -----	87
<b>Figura 60</b> Esquema eslabón Pantorrilla Derecha-----	88
<b>Figura 61</b> Representación simplificada del eslabón Pantorrilla Derecha -----	90
<b>Figura 62</b> Esquema eslabón Pantorrilla Izquierda -----	91
<b>Figura 63</b> Representación simplificada del eslabón Pantorrilla Izquierda-----	93
<b>Figura 64</b> Esquema 1 eslabón Pierna Derecha-----	94
<b>Figura 65</b> Esquema 2 eslabón Pierna Derecha-----	95
<b>Figura 66</b> Representación simplificada del eslabón Pierna Derecha -----	96
<b>Figura 67</b> Esquema 1 eslabón Pierna Izquierda -----	98
<b>Figura 68</b> Esquema 2 eslabón Pierna Izquierda -----	98

<b>Figura 69</b> Representación simplificada del eslabón Pierna Izquierda-----	100
<b>Figura 70</b> Esquema 1 eslabón Torso -----	102
<b>Figura 71</b> Esquema 2 eslabón Torso -----	103
<b>Figura 72</b> Esquema 3 eslabón Torso -----	103
<b>Figura 73</b> Representación simplificada del eslabón Torso-----	105
<b>Figura 74</b> Esquema eslabón Cola-----	106
<b>Figura 75</b> Representación simplificada del eslabón Cola -----	108
<b>Figura 76</b> Conjunto de eslabones en el prototipo bípedo robótico-----	109
<b>Figura 77</b> Diagrama del ciclo de marcha en superficie plana -----	130
<b>Figura 78</b> Fase 0 -----	131
<b>Figura 79</b> Fase 1 -----	132
<b>Figura 80</b> Fase 2 -----	133
<b>Figura 81</b> Fase 3 -----	134
<b>Figura 82</b> Fase 4 -----	134
<b>Figura 83</b> Fase 5 -----	135
<b>Figura 84</b> Fase 6 -----	136
<b>Figura 85</b> Fase 7 -----	137
<b>Figura 86</b> Fase 8 -----	138
<b>Figura 87</b> Fase 9 -----	138
<b>Figura 88</b> Fase 10-----	139
<b>Figura 89</b> Fase 11 -----	140
<b>Figura 90</b> Fase 12-----	141
<b>Figura 91</b> Fase 13-----	142

<b>Figura 92</b> Fase 144 -----	142
<b>Figura 93</b> Fase 15 -----	143
<b>Figura 94</b> Fase 16 -----	144
<b>Figura 95</b> Fase 17 -----	145
<b>Figura 96</b> Distribución de HMI -----	148
<b>Figura 97</b> HMI final -----	148
<b>Figura 98</b> Control remoto- Parte 1 -----	149
<b>Figura 99</b> Control remoto- Parte 2 -----	149
<b>Figura 100</b> Control Remoto -----	150
<b>Figura 101</b> Diagrama de flujo de comandos -----	150
<b>Figura 102</b> Monitor serial de lectura recibida -----	151
<b>Figura 103</b> Posición pie cerrado -----	158
<b>Figura 104</b> Posición pie abierto -----	158
<b>Figura 105</b> Unión engrane –servomotor -----	159
<b>Figura 106</b> Tren de engranes fémur -----	159
<b>Figura 107</b> Ubicación acople-eslabón -----	159
<b>Figura 108</b> Ubicación servo-eslabón -----	160
<b>Figura 109</b> Montaje de placa -----	162
<b>Figura 110</b> Implementación de los elementos electrónicos a la estructura -----	162
<b>Figura 111</b> Vista interna eslabón Torso -----	163
<b>Figura 112</b> Vista lateral del torso ensamblado -----	163
<b>Figura 113</b> Ensamble del eslabón Cola -----	163
<b>Figura 114</b> Unión pies y pantorrillas -----	164

<b>Figura 115</b> Ensamble pantorrillas-muslos-----	164
<b>Figura 116</b> Vista frontal del ensamble pantorrilla-muslo -----	164
<b>Figura 117</b> Elementos de la cadera-----	165
<b>Figura 118</b> Ensamble extremidades inferiores-----	165
<b>Figura 119</b> Cuerpo ensamblado vista lateral y frontal-----	166
<b>Figura 120</b> Cuerpo ensamblado vista isométrica-----	166
<b>Figura 121</b> Robot pintado-----	166
<b>Figura 122</b> Empate de base y eje de apoyo -----	167
<b>Figura 123</b> Unión al robot -----	167
<b>Figura 124</b> Robot con sistema de apoyo-----	167
<b>Figura 125</b> Vista interna del control remoto -----	168
<b>Figura 126</b> Control en funcionamiento -----	168
<b>Figura 127</b> Corrida de HMI -----	169
<b>Figura 128</b> HMI-----	169
<b>Figura 129</b> Caminata hacia adelante -----	169
<b>Figura 130</b> Caminata hacia atrás-----	169
<b>Figura 131</b> Giro cola hacia derecha -----	169
<b>Figura 132</b> Giro cola hacia izquierda -----	169
<b>Figura 133</b> Agacharse -----	170
<b>Figura 134</b> Incorporarse -----	170
<b>Figura 135</b> Joystick-----	170
<b>Figura 136</b> Circuito de comunicación HMI – robot -----	170
<b>Figura 137</b> Resultados Mecánicos-----	172

<b>Figura 138</b> Robot y sistema de apoyo -----	172
<b>Figura 139</b> Señal recibida de joystick-----	175
<b>Figura 140</b> Comunicación joystick con HMI-----	175

## SIMBOLOGÍA

$r_{cm}$ : Representa al vector de posición del centro de masa.

$m_i$ : La masa de la partícula  $i$ -ésima del sistema de partículas.

$r_i$ : El vector posición del centro de masa de la partícula  $i$ -ésima, con respecto al sistema de referencia propuesto.

$\theta_{e_i}(t)$ : es el ángulo desplazado por el eslabón “ $i$ ” en función del tiempo.

$\theta_{m_i}(t)$ : es el ángulo desplazado por el actuador “ $i$ ” en función del tiempo.

$a$ : Ecuación del Adendo

$b$ : Ecuación del Dedendo

$c$ : Ecuación del Claro (Dedendo – Adendo)

$hk$ : Ecuación de la profundidad de trabajo (Doble del Adendo)

$ht$ : Ecuación de la profundidad total (Adendo + Dedendo)

$rf$ : Ecuación del radio del filete de la cremallera básica

$t$ : Ecuación del espesor del diente

$\alpha_k$ : Es el ángulo formado por el eslabón “ $k$ ” con respecto al eje X positivo.

$\theta_k$ : Es el ángulo que ha rotado el eslabón “ $k$ ” con respecto al eje Z desde su posición original.

$\varphi_k$ : Es el ángulo que ha rotado el eslabón “ $k$ ” con respecto al eje Y desde su posición original.

$l_k$ : Es la longitud total del eslabón “ $k$ ”.

$x_{kd}$ : Es la posición del centro de masa en el eje x del eslabón “ $k$ ” con respecto al origen de coordenadas visto desde la pata derecha del sistema completo.

$y_{kd}$ : Es la posición del centro de masa en el eje y del eslabón “ $k$ ” con respecto al origen de coordenadas visto desde la pata derecha del sistema completo.

$z_{kd}$ : Es la posición del centro de masa en el eje z del eslabón “k” con respecto al origen de coordenadas visto desde la pata derecha del sistema completo.

$lmz_7$ : Es la longitud de la cadera en el eje Z.

$x_{bcd}$ : Es la componente en el eje X de la ubicación del centro de masa del eslabón Cola, debido a la rotación en el eje Y.

$y_{bcd}$ : Es la componente en el eje Y de la ubicación del centro de masa del eslabón Cola, debido a la rotación en el eje Y.

$z_{bcd}$ : Es la componente en el eje Z de la ubicación del centro de masa del eslabón Cola, debido a la rotación en el eje Y.

$x_{ki}$ : Es la posición del centro de masa en el eje x del eslabón “k” con respecto al origen de coordenadas visto desde la pata izquierda del sistema completo.

$y_{ki}$ : Es la posición del centro de masa en el eje y del eslabón “k” con respecto al origen de coordenadas visto desde la pata izquierda del sistema completo.

$z_{ki}$ : Es la posición del centro de masa en el eje z del eslabón “k” con respecto al origen de coordenadas visto desde la pata izquierda del sistema completo.

$lmz_7$ : Es la longitud de la cadera en el eje Z.

$x_{bci}$ : Es la componente en el eje X de la ubicación del centro de masa del eslabón Cola, debido a la rotación en el eje Y.

$y_{bci}$ : Es la componente en el eje Y de la ubicación del centro de masa del eslabón Cola, debido a la rotación en el eje Y.

$z_{bci}$ : Es la componente en el eje Z de la ubicación del centro de masa del eslabón Cola, debido a la rotación en el eje Y.

$T_m$ : Es el valor necesario de Torque para ejecutar el movimiento.

$r_s$ : Es el radio de brazo de palanca perteneciente al servomotor.

$T_n$ : Es el valor de torque nominal.

$f_s$ : Es el factor de seguridad.

$T_{ti}$ : Es el valor intermedio de ángulo de torso entre cada fase según un intervalo de tiempo previamente establecido.

$T_i$ : Es el valor del ángulo en fase inicial.

$T_{i+1}$ : Es el valor del ángulo en fase final.

$t$ : Es el valor de tiempo.

## RESUMEN

El proyecto a continuación presenta el diseño, construcción y control de un prototipo Bípedo Robótico, que tiene morfología del tipo robot zoomórfico. Este prototipo es inalámbrico en su alimentación y control, es decir que presenta un batería la cual le brindará la potencia necesaria para moverse y por otro lado el mando del mismo es usando dispositivos de radiofrecuencia, los cuales brindan la característica al robot de ser Teleoperado. Primero se ha establecido la importancia que tiene la generación del presente proyecto en el ámbito de innovación tecnológica para el país. Posteriormente, se investigó acerca de la importancia, uso y trabajos acerca de la robótica bípeda, como se han desarrollado al pasar de los años y de cómo se debe proceder para la generación de prototipos caminantes zoomórficos. El prototipo es un robot que camina en dos patas, de forma que el equilibrio se consigue gracias a cálculos realizados usando el desplazamiento del centro de masa como variable fundamental, la cual con el movimiento de las diferentes partes que conforman al bípedo, se logra que el robot mantenga su centro de gravedad siempre sobre una de las extremidades que se apoyan en la superficie. Posteriormente, la implementación del prototipo se la realizó utilizando para su estructura plástico ABS. Para asegurar una mejor estabilidad se acopló a la estructura del prototipo una base guía, que elimina las fuerzas axiales, la cuales pueden voltear al bípedo debido al torque producido por la caminata. Se diseñó una interfaz HMI y el control remoto.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **BÍPEDO ROBÓTICO**
- **TELEOPERADO**
- **ROBOT ZOOMÓRFICO**
- **EQUILIBRIO**

## **ABSTRACT**

The project below presents the design, construction and control of a Robotic Bipedal prototype. It has morphology of the zoomorphic robot type. This prototype is wireless in its power and control, that is to say it has a battery which will provide the necessary power to move and on the other hand the control of it is using radiofrequency devices, which provide the feature to the robot to be Teleoperated. First, the importance of the generation of the present project in the field of technological innovation for the country. Subsequently, it was investigated about the importance, use and works about bipedal robotics, how they have developed over the years and how to proceed to the generation of zoomorphic walking prototypes. The prototype to present is a robot that walks on two legs, so that the balance is achieved through calculations made using the displacement of the center of mass as a fundamental variable, which with the movement of the different parts that make up the biped, is It manages that the robot keeps its center of gravity always on one of the limbs that rest on the surface. Subsequently, the prototype was implemented using its ABS plastic structure. To ensure a better stability, a guide base was attached to the prototype structure, which eliminates the axial forces, which can turn the biped due to the torque produced by the walk. We designed an HMI interface and the remote control.

### **KEYWORDS:**

- **ROBOTIC BIPEDAL**
- **TELEOPERATED**
- **ZOOMORPHIC ROBOT**
- **BALANCE**

# 1. CAPÍTULO 1 – GENERALIDADES

## 1.1. Presentación

Los robots móviles se han desarrollado en muchas aplicaciones para ayudar al hombre y han utilizado nuevas tecnologías para adaptarse a su entorno. Estas aplicaciones van desde ayudar en exploraciones espaciales hasta compañía y entretenimiento. El presente trabajo no enfocaremos en un caso particular que es la robótica bípeda zoomórfica.

Los robots bípedos se caracterizan por poseer su sistema de locomoción apoyado en dos extremidades inferiores y son capaces de caminar sin interrupción. Los robots bípedos tienen un gran adelanto en modelos humanoides más no en robótica zoomórfica. Mientras que los robots zoomórficos llevan un gran adelanto en cuanto a cuadrúpedos y se caracterizan por su imitación en la locomoción de ciertos animales. El proyecto permitirá enlazar estas dos ramas de la robótica.

Se desarrollará el análisis de la cinemática y dinámica de estos dos tipos de robots y su sinergia. Una vez enlazados estos modelos se diseñará un control que permita generar el movimiento adecuado para el robot y lograr su estabilidad cuasi-estática. Tendrá un sistema de manipulación e interfaz de usuario para operar al robot en su locomoción.

## 1.2. Planteamiento del problema

El país posee diversos tipos de terreno los cuales son montañosos, inclinados, con escombros o peligrosos para el acceso humano, evitando así su exploración. Los equipos que operan con ruedas poseen un rápido control, soportan grandes cargas y son robustos. La desventaja de este tipo de robot es su falta de flexibilidad, por lo tanto no pueden atravesar áreas irregulares o lugares de difícil acceso en industrias.

Algunas de las características de estas áreas son:

- Espacios pequeños de movilización para ejecución de procesos o exploración.
- Zonas de riesgo por emanaciones de gases tóxicos para el hombre o inflamables en el ambiente.
- Lugares sin atmósfera como exploraciones en el espacio o áreas de trabajo en vacío.

En nuestro País no ha sido desarrollada la robótica bípeda y mucho menos la robótica bípeda zoomórfica. La exploración de áreas no accesibles a robots móviles se la ha realizado por medios humanos, puesto que el uso de plataformas bípedas no ha sido avanzado a nivel nacional (Mora, 2016).

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

El presente proyecto plantea la posibilidad de colaborar a la investigación, y en la implementación de otro tipo de robótica como es la zoomórfica bípeda. El uso de robots zoomórficos caminadores facilita el estudio de terrenos, dado que son capaces de evolucionar en cuanto a su movilidad en superficies accidentadas. A continuación, se realizará un análisis comparativo de los mecanismos bípedos frente a otros mecanismos de locomoción.

La caminata bípeda tiene como objetivo mejorar la adaptabilidad en terrenos irregulares frente a la locomoción con ruedas. Posee una mejor movilidad en las patas en contraposición a sistemas cuadrúpedos o de mayor número de patas, dado que se evitan colisiones entre las mismas extremidades o con el cuerpo y la superficie. Presenta menor riesgo de impacto y abolladuras frente a la locomoción realizada por robots reptadores. La robótica bípeda nos facilita la realización de trabajos, que muchas veces el ser humano no puede hacerlos por diferentes razones.

Las aplicaciones de los robots podrían ser en el campo de la exploración espacial y en el estudio de los volcanes. Para el caso del proyecto planteado, el uso de robots facilitará la exploración de volcanes y cráteres del país. En dichos lugares el terreno es accidentado y peligroso para la exploración hecha por una persona, por lo tanto el uso de un robot bípedo, favorecerá las tareas detalladas.

El proyecto al ser una nueva tecnología a implementar en el país, será de gran importancia para la investigación y desarrollo de la misma. El área que abarca es de carácter investigativo y de desarrollo, motivará a más investigadores y profesionales a desarrollar más esta tecnología y lograr que el país sea un fabricante internacional de robótica bípeda zoomórfica, para aplicaciones de exploración. También permitirá abrir nuevos campos de investigación y con ello será un desarrollo nuevo en el país e influenciará el conocimiento de plataformas bípedas y en robótica zoomórfica.

#### **1.4. Antecedentes**

A nivel internacional uno de los más importantes y de mayor aporte en la robótica bípeda es el MIT Leg Laboratory que desde el año 1980 ha desarrollado robots bípedos caminantes, corredores y saltadores. Los robots caminantes más importantes desarrollados por el MIT Leg Laboratory se encuentran:

##### **Spring Flamingo** (Ver Figura 1) (1996-2000)

Spring Flamingo es un robot bípedo de caminado planar. El robot fue desarrollado como una plataforma experimental para implementar:

- Varios algoritmos de marcha.

- Técnicas de descripción y control de movimiento, particularmente Virtual Model Control.
- Las técnicas de actuación de control de fuerza, particularmente el accionamiento elástico de serie. (MIT)

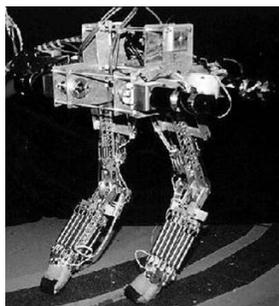


*Figura 1* Spring Flamingo desarrollado en MIT Leg Laboratory.  
Fuente: MIT

### **Spring Turkey** (Ver Figura 2) (1994-1996)

Spring Turkey es un robot bípedo planar. El robot fue desarrollado como una plataforma experimental para implementar:

- Las técnicas de actuación de control de fuerza, particularmente el accionamiento elástico de serie.
- Técnicas de descripción y control de movimiento, particularmente Virtual Model Control.
- Varios algoritmos de marcha. (MIT)



**Figura 2** Spring Turkey desarrollado en el MIT Leg Laboratory

Fuente: MIT

### **Troody the Robotic Dinosaur** (Ver Figura 3)

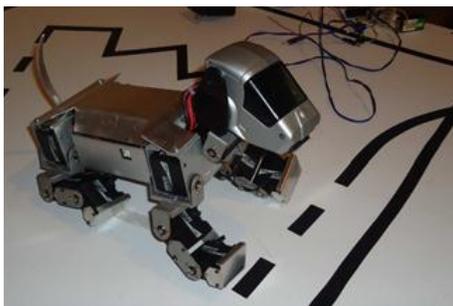
Basado en Troodon Formosus, un dinosaurio carnívoro de 2 patas de la Era Cretácea, el robot apodado TROODY es capaz de pararse, caminar y hacer ajustes para el terreno. El robot es la creación de Peter Dilworth, un investigador en el MIT Leg Lab, parte del Laboratorio de Inteligencia Artificial. (MIT)



**Figura 3** Troody the Robotic Dinosaur desarrollado en el MIT Leg Laboratory

Fuente: MIT

Un desarrollo muy importante a nivel nacional y con una característica especial para la implementación en el proyecto se desarrolló en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo el cual es un Robot zoomórfico tipo mascota interactiva controlado por comandos de voz (Ver Figura 4). Es un robot cuadrúpedo capaz de realizar movimientos básicos de una mascota doméstica como son: caminar, sentarse, responder a caricias y detectar obstáculos, los cuales los realiza de acuerdo a órdenes emitidas por un administrador a través de comandos de voz. (Llanos & Lliguin Silva, 2010)



**Figura 4** Robot zoomórfico tipo mascota interactiva controlado por comandos de voz desarrollado en le Escuela Superior de Chimborazo  
Fuente: Llanos, F. 2010

En el Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica “DECEM” de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” se ha desarrollado varios proyectos de investigación de aplicaciones robóticas (Mecatrónica, 2014), de los cuales sus características se asemejan al proyecto propuesto son:

- “Diseño y construcción de una plataforma Robótica Zoomórfica de cuatro extremidades con doce grados de libertad (Ver Figura 5).” (Benalcazar & Noboa, 2017)
- “Diseño y construcción de un prototipo didáctico de péndulo invertido con 4 diferentes tipos de controladores (Ver Figura 6).” (Calderón, 2017)
- “Diseño y construcción de un torso robótico colaborativo de dos brazos para la unión de una junta empernada en una celda de trabajo (Ver Figura 7).” (Carvajal & Martínez, 2016)
- “Diseño y construcción de un mecanismo estabilizador para la cámara de un dron (Ver Figura 8).” (Jironza & Arellano, 2015)

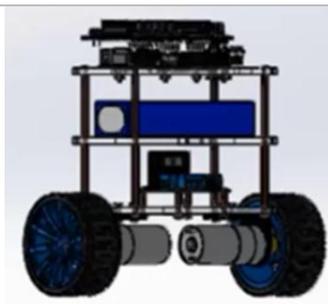
- “Diseño y construcción de una plataforma robótica para exteriores tele operada, para el laboratorio de manufactura (Ver Figura 9).” (Garzón & Obando, 2016)
- “Diseño y construcción de un prototipo robot electro neumático escalador para exploración de superficies verticales lisas (Ver Figura 10).” (Salazar & Viteri, 2016)

Con el fin de fomentar la robótica y los avances en la ciencia y tecnología en el país se ha propuesto el tema “Diseño, construcción y control de un bípedo zoomórfico de desplazamiento dinámico y estabilidad cuasi-estática con mando mediante radiofrecuencia”. En el cual se aplicarán las diferentes tecnologías desarrolladas en los proyectos mencionados.



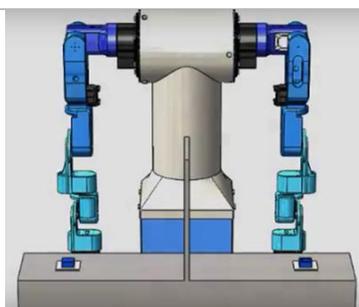
**Figura 5** Plataforma Robótica Zoomórfica de cuatro extremidades con doce grados de libertad desarrollada en la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”

Fuente: Mecatrónica, C. 2014



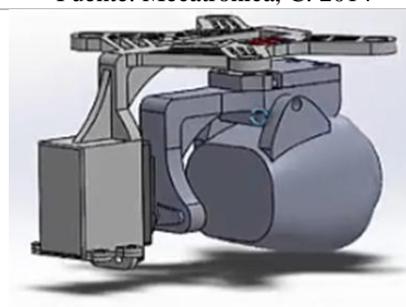
**Figura 6** Prototipo didáctico de péndulo invertido con 4 diferentes tipos de controladores desarrollado en la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”

Fuente: Mecatrónica, C. 2014



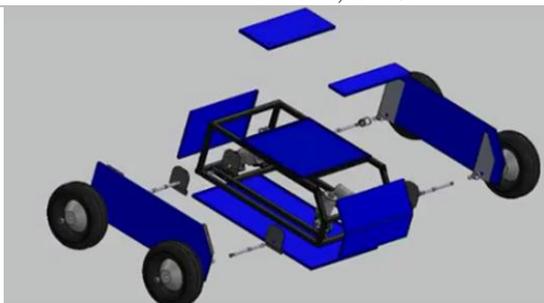
**Figura 7** Torso robótico colaborativo de dos brazos para la unión de una junta empernada en una celda de trabajo desarrollada en la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”

Fuente: Mecatrónica, C. 2014



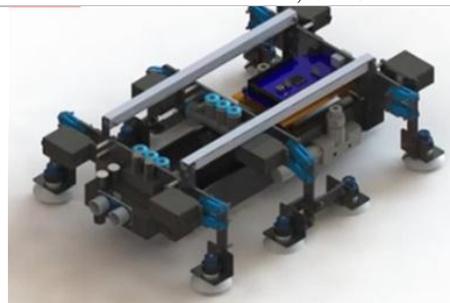
**Figura 8** Mecanismo estabilizador para la cámara de un dron desarrollado en la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”

Fuente: Mecatrónica, C. 2014



**Figura 9** Plataforma robótica para exteriores teleoperada, para el laboratorio de manufactura desarrollada en la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”

Fuente: Mecatrónica, C. 2014



**Figura 10** Prototipo robot electro neumático escalador para exploración de superficies verticales lisas desarrollado en la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”

Fuente: Mecatrónica, C. 2014

### **1.5. Área de influencia**

El proyecto planteado se enfoca en presentar a futuras generaciones un tema de la rama de robótica, como es la zoomórfica bípeda. Su principal propósito será el de promover una iniciativa de investigación y poder generar un nuevo avance tecnológico en nuestro País. El enfoque a priori del proyecto será en el Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica (DECEM) de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, siendo tentativa a un inicio en la investigación y desarrollo de la robótica bípeda y la robótica zoomórfica.

Después el prototipo a realizar también será un medio a posteriori que permitirá ampliar los conocimientos de robótica zoomórfica y abrirá pasos a nuevo campo, como es la robótica bípeda que no ha sido desarrollada en el país. El diseño e implementación de robótica zoomórfica bípeda a futuro permitirá la exploración en terrenos irregulares, se podrá acceder a lugares en donde exista la presencia de riesgo y brindará seguridad a las personas encargadas de realizar el análisis de estos entornos.

### **1.6. Alcance del proyecto**

Se plantea la realización de un prototipo de un robot bípedo zoomórfico capaz de caminar en superficies. El robot cambiará de posición y se equilibrará en la superficie que se lo coloque usando un sistema de sensores y actuadores. Tendrá un desplazamiento de tipo dinámico, es decir que es un robot cuyo sistema de locomoción está basado en dos piernas y es capaz de andar sin necesidad de interrumpir su avance.

El robot tendrá además estabilidad cuasi-estática la cual se define cuando “la proyección de su centro de masa se mantiene siempre en su polígono de soporte” (Hardt & Von Stryk, 2002). Por

lo tanto, el robot será programado para tener un avance continuo mientras se encuentre en caminata.

Su activación será mediante la manipulación de un control remoto de autoría propia o un control joystick. El control remoto se comunicará mediante radiofrecuencia usando una banda RF de 433MHz, mientras que el control joystick se comunicará usando una banda de 2,4GHz. Cualquiera de las dos comunicaciones transmitirá los datos correspondientes hacia el robot, una vez activado el ciclo de marcha el robot comenzará a caminar hasta ser ordenado a detenerse.

## **1.7. Objetivos**

### *1.7.1. Objetivo General*

Diseñar, construir y controlar un bípedo zoomórfico de desplazamiento dinámico y estabilidad cuasi-estática con mando mediante radiofrecuencia.

### *1.7.2. Objetivos específicos*

- Realizar una investigación acerca del comportamiento, desplazamiento de un animal bípedo y robótica zoomórfica.
- Diseñar e implementar la estructura mecánica del robot Zoomórfico que será de tipo bípedo.
- Diseñar e implementar el sistema electrónico que se encargue de controlar el robot mediante el mando de radiofrecuencia.

## **1.8. Estructura del documento**

El presente documento consta de cuatro capítulos, en el primer capítulo se muestra la descripción general del proyecto. Se presenta el planteamiento del problema con su justificación,

área de influencia, alcance, objetivos del proyecto. A continuación, describirá los temas a tratar en cada capítulo.

En el Capítulo 2 - Estado del Arte, se estudiará sobre locomoción bípeda y máquinas caminadoras. En la investigación de máquinas caminadoras se describirá su disposición general y su generación de trayectoria. Entre las máquinas caminadoras se detallará configuraciones no zoomórficas, bípedo humanoides, disposiciones rígidas de bastidor y caminadoras de movimiento planar. En este capítulo también explicaremos el sistema de locomoción y equilibrio de robots.

En el Capítulo 3 – Diseño Mecatrónico, expondrá los subsistemas eléctrico, sensorial, analítico y mecánico del robot. En el subsistema eléctrico se detallará la selección de generación, almacenamiento y regulación de energía. En el subsistema sensorial se describirá la adquisición y análisis de señales. El subsistema analítico explicará el análisis cinemático, dinámico y de control del robot que se ha aplicado. Y por último el subsistema mecánico presentará el análisis dimensional y simulación del modelo CAD del robot.

En el Capítulo 4 – Implementación y Resultados, se detallará la adaptación de conceptos seleccionados en el capítulo anterior. Se mostrará cómo fue implementada la estructura seleccionada, especificar los actuadores y mecanismos utilizados. Se especificará los componentes y circuitos eléctricos utilizados, su implementación y funcionamiento. Al final se describirá la implementación del sistema de control e interfaces de usuario aplicados en el robot. Y por otro lado desarrollaremos el protocolo de pruebas de cada uno de los sistemas implementados en el capítulo anterior. Presentaremos las pruebas, fallas y correcciones de los sistemas eléctricos y mecánicos aplicados. Expondremos las pruebas del sistema de control, sus

posibles fallas y correcciones de análisis. Para finalizar se detallará pruebas de todos los sistemas incorporados con sus correcciones.

## **2. CAPÍTULO 2 – ESTADO DEL ARTE**

El capítulo trata de la importancia, uso e investigaciones realizadas en cuanto a la locomoción bípeda. El estudio de locomoción bípeda aún no está completo debido a que los robots de la actualidad están basados únicamente en modelos humanoides, los cuales no son los únicos bípedos de la naturaleza. El estudio comienza con la revisión de la locomoción con piernas la cual es la forma más común de moverse sobre cualquier superficie, utilizada por animales de todo tipo. A mayor número de patas y una posición baja del centro de masa permite al animal permanecer en equilibrio durante cada fase de la caminata. Después, se habla acerca de las máquinas caminadoras donde se ha sugerido que para vehículos que se desplazan en terrenos irregulares es recomendable usar máquinas con patas y no con ruedas; desde el punto de vista energético el uso de patas es más eficiente que las ruedas en un terreno rugoso. Se trata acerca de las configuraciones de robots caminadores zoomórficos y no zoomórficos, los cuales pueden ser bípedos humanoides, caminadores de bastidor rígido y máquinas de movimiento planar. Por último, se habla acerca de la marcha y equilibrio de los robots caminadores; el ciclo de marcha de cada pata se lo puede dividir en dos fases: la fase de apoyo y la fase de retorno.

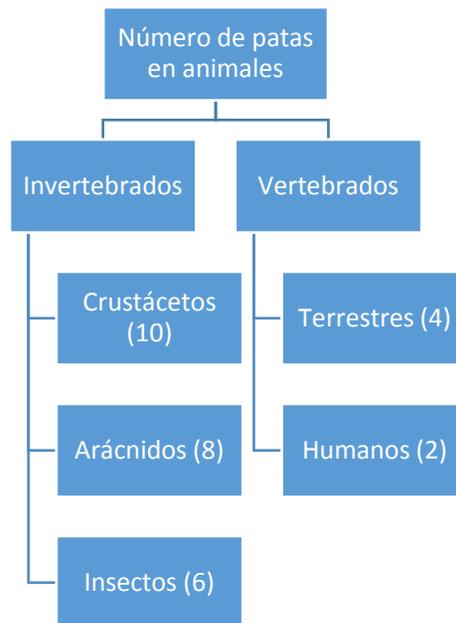
### **2.1. Robots zoomórficos**

Los robots zoomórficos se caracterizan principalmente por sus sistemas de locomoción que imitan a los diversos seres vivos. Sus aplicaciones son muy simples, como un método científico o exploración de terrenos. Los robots zoomórficos se adaptan de mejor forma al terreno debido a que no necesita mantener el equilibrio. A pesar de las diferentes morfologías que pueden llegar a tener sus sistemas de locomoción, es conveniente agrupar a los robots zoomórficos en dos categorías principales: caminadores y no caminadores.

Los robots zoomórficos caminadores son muy numerosos, son objeto de experimentos en diversos laboratorios para el desarrollo de vehículos. Son capaces de desenvolverse en superficies muy accidentadas, por lo que sus aplicaciones son de exploración espacial y en el estudio de volcanes. El grupo de los robots zoomórficos no caminadores son muy poco evolucionados, no se conoce aplicaciones útiles por ello solo se han efectuado como investigación. Se ha encontrado experimentos en Japón basados en un movimiento relativo de rotación mediante segmentos cilíndricos acoplados axialmente entre sí.

## **2.2. Locomoción con piernas**

La locomoción robótica con piernas es la forma más común de movimiento en superficies irregulares usada por animales de todo tipo. El movimiento rotatorio continuo similar al movimiento de motores, es desconocido en la naturaleza, con excepción de algunos microorganismos que son propulsados por la rotación de cilios o flagelos (Azuma, 1992), y peor aún el movimiento de ruedas. El número de patas en las cuales los animales caminadores se apoyan se ha reducido a lo largo de la evolución, mientras que su disposición se ha configurado como una cadena de segmentos rígidos conectados con articulaciones cilíndricas o esféricas, tal como se observa en los artrópodos. Para invertebrados el número se ha reducido siendo, diez para los crustáceos, ocho para los arácnidos y seis para los insectos. En cuanto a los vertebrados terrestres el número se ha reducido a cuatro (Ver Figura 11).



**Figura 11** Número de patas en animales

Con un elevado número de patas, conjunto con una disposición baja del centro de masa, permite al animal permanecer en condiciones de equilibrio durante la totalidad de las fases de ciclo de marcha. Cuanto más grande sea el animal y menor sea el valor de la gravedad donde se encuentre, es más viable permanecer en equilibrio con menos cantidad de piernas sin embargo, existe un valor de velocidad de marcha máxima para cualquier animal. Para poder trasladarse a mayor velocidad el animal debe cambiar su marcha y realizar una transición de caminar a correr o saltar. Dicha velocidad depende del tamaño del animal y del valor de la gravedad donde se encuentra. La relación puede ser expresada por el número de Froude (Ver Ecuación Número de Froude ( 1.)) (Genta, 2012), (Asada & Slotine, 1986):

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

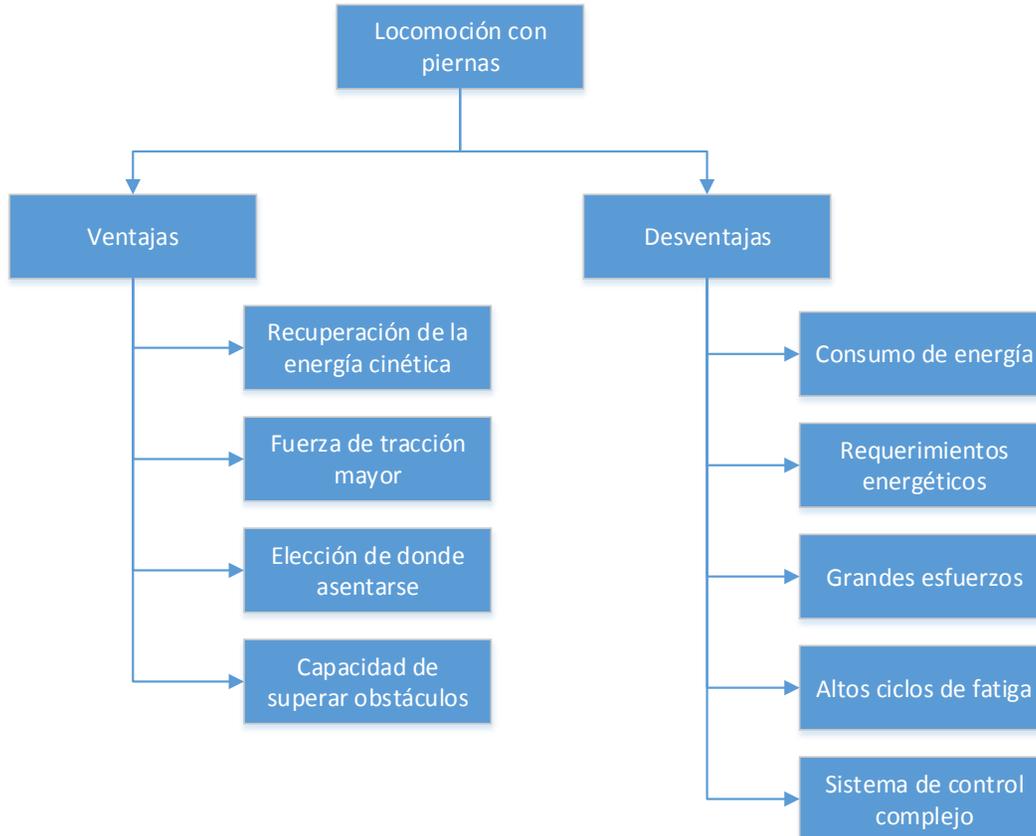
(1.)

Donde  $V$ ,  $g$  y  $L$  son velocidad, aceleración gravitacional y una longitud característica, para el caso de un robot caminante esta longitud característica es la longitud de las piernas (Cavagna, Willems, & Heglund, 1998). Cuando el número de Froude alcanza el valor de 0,7 el animal comienza a correr, lo cual indica que es más eficiente correr que caminar. Otro valor que suele tomar el número de Froude es 1, lo que indica que caminar ya no es posible. Los valores vienen de modelar piernas como si fueran péndulos y péndulos invertidos.

La energía requerida para el movimiento es un parámetro importante, puesto que para la locomoción bípeda en una superficie sólida se requiere de mayor energía que el nadar en agua o volar. La energía requerida para moverse sobre una superficie plana debe compensar la resistencia aerodinámica y la pérdida de energía debido a la fricción de contacto entre el pie y la tierra. La mayor porción de energía perdida es por fricción interna y la influencia de acelerar y desacelerar continuamente.

Las principales ventajas de la locomoción con piernas es la recuperación de la energía cinética que se logra a través del movimiento pendular de las mismas. La fuerza de tracción ejercida por los pies es otra ventaja ya que es mayor a la ejercida por ruedas en terrenos blandos y resbaladizos. Otra ventaja es la posibilidad que se tiene de elegir correctamente donde se colocan los pies, así mismo la capacidad de superar obstáculos es mucho mejor. Un punto débil de la locomoción con piernas es el requerimiento de que los actuadores suministren la suficiente fuerza para soportar el peso de la máquina, sea en movimiento o en estado de reposo. Los vehículos con patas suelen cargar con demasiados esfuerzos, altos ciclos de fatiga, requieren sistemas de control muy complejos y requieren de mayor consumo de energía en trabajo real (Ver

Figura 12).



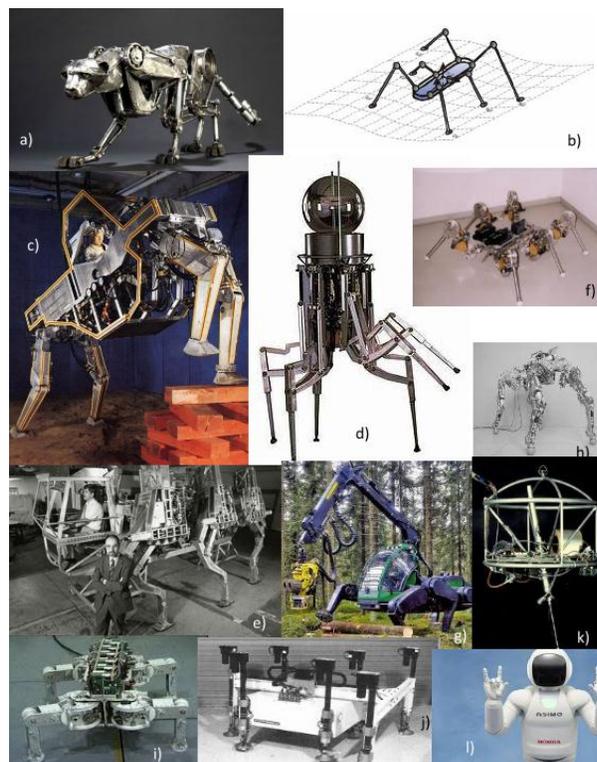
**Figura 12** Ventajas y desventajas de la locomoción con piernas

### 2.3. Robots caminadores

Existe una gran variedad de configuraciones para vehículos y robots móviles no basados en la locomoción con ruedas; los cuales han sido sugeridos para la exploración de planetas con una superficie sólida. Las máquinas caminadoras más comunes son basadas en la locomoción con alguna forma de pierna donde se trata principalmente de los bípedos. A parte de los vehículos bípedos se hallan los vehículos de disposición rígida de bastidor y las máquinas caminadoras de movimiento planar.

### 2.3.1. Disposición general de los robots caminadores

La locomoción en patas es sugerida para vehículos que se mueven en terrenos irregulares, debido a que vehículos con ruedas pueden tener dificultades para manejar obstáculos y mantener una buena movilidad. También, desde un punto de vista energético, las patas son teóricamente más eficientes que las ruedas en terrenos rugosos. La Figura 13 muestra las configuraciones de los dispositivos caminantes más comunes a lo largo de la historia. La mayoría de las configuraciones de los robots caminadores imitan ciertas características de los sistemas caminadores naturales, lo cual implica considerar un alto número de grados de libertad internos y a un sistema de control complejo.



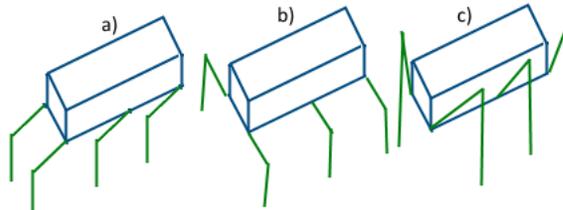
**Figura 13** Dispositivos caminantes  
Fuente: (Abourachid & Hugel, 2016)

Sin considerar el número de patas la Figura 4 define a los robots caminadores como: mamíferos (Ver Figura 14.a), reptiles (Ver Figura 14.b) e insectos (Ver Figura 14.c). La recuperación pendular de la energía cinética de las patas solo se da cuando se elige una configuración de mamífero y sólo para dicha configuración se aplica las consideraciones enfocadas en el número de Froude. Un vehículo caminante se puede mover de manera cinemática correcta en una trayectoria arbitraria en terreno irregular cuando cada pie tiene un mínimo de tres grados de libertad (Ver Figura 14). En la mayoría de diseños en robots caminantes el primer segmento de la pata o pierna (muslo) tiene dos grados de libertad, mientras que el segundo segmento (pantorrilla) tiene un solo grado de libertad. La rodilla es una articulación cilíndrica y la cadera una articulación esférica. Los animales con patas en la mayoría de casos tienen un mayor número de grados de libertad puesto que las piernas tienen más de dos segmentos, lo cual incrementa la complejidad mecánica y de control.

Un número menor de grados de libertad suele llevar a inexactitudes cinemáticas, causando deslizamiento de los pies en el suelo, generación de fuerzas y limitaciones en la trayectoria para caminar sobre terreno difícil. Otra característica de las máquinas con patas es la simetría bilateral con un número par de patas, aunque la cola puede ofrecer un soporte adicional dando lugar a un número impar de soportes. La simetría bilateral es más adecuada que la simetría radial para desplazarse a lo largo de una línea recta.

La estrategia de duplicar los movimientos de las piernas de un operador que anima la máquina. Aseguró el realizar movimientos complejos y demostró que la máquina puede funcionar satisfactoriamente sin grandes esfuerzos del controlador humano. Los vehículos con ruedas son

una tecnología bien consolidada, debido a que no es necesario recurrir a simulaciones, pruebas experimentales y otros estudios, ralentizando el proceso de diseño y aumentando costos.



**Figura 14** Configuraciones básicas de las piernas para máquinas caminadoras  
 a) Mamífero; b) Reptil; c) Insecto  
 Fuente: creación propia

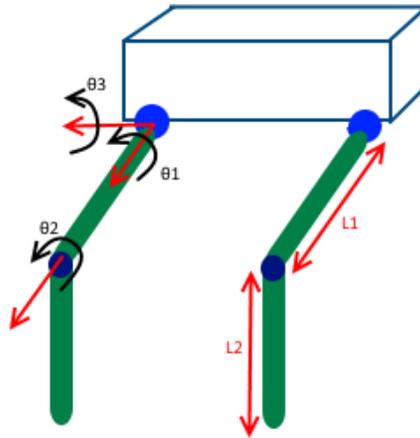
### 2.3.2. Generación de trayectorias del pie

Una vez finalizada la selección de la configuración cinemática, se procede a definir un espacio de trabajo y obtener la cinemática directa o inversa del robot. Se debe tomar en cuenta que las necesidades de precisión para el movimiento con piernas son más bajas que las de los brazos. Por otra parte, la trayectoria del pie, con respecto al robot en movimiento, debe ser lo suficientemente precisa para evitar un gran deslizamiento; pero es aceptable un pequeño deslizamiento.

Según la Ecuación de Trayectorias del pie con respecto a la cadera (Ver ( 2.)) (Genta, 2012) la mayoría de máquinas caminadoras poseen un mecanismo articulado para mover los pies a lo largo de líneas rectas durante la fase de soporte, sin necesidad de que el controlador y los actuadores estén implicados en la generación de trayectorias. Las configuraciones de patas mostradas en la Figura 15 pueden ser usadas como relación entre los ángulos  $\theta_i$  y las coordenadas del pie con respecto a la cadera para una configuración de mamíferos.

$$\begin{cases} x \\ y \\ z \end{cases} = \begin{cases} l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin \theta_2 \\ [l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2] \sin \theta_3 \\ [l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2] \cos \theta_3 \end{cases}$$

(2.)



**Figura 15** Configuración de mamífero

Donde  $l_1$  y  $l_2$  son las longitudes de los dos segmentos de la pierna. Las relaciones de la Ecuación ( 2.) pueden ser invertidas mediante el uso de la denominada cinemática inversa. Dando como resultado los valores angulares que permiten colocar el pie en la posición requerida (Ver Ecuación de Cinemática inversa para la configuración de mamíferos ( 3.)), (Genta, 2012).

$$\begin{aligned}\theta_3 &= \text{atan}\left(\frac{y}{z}\right) \\ \theta_1 &= \text{asin}\left[\frac{\alpha\delta + \gamma\sqrt{4\alpha^2 + 4\gamma^2 - \delta^2}}{2(\alpha^2 + \gamma^2)}\right] \\ \theta_2 &= \text{asin}\left[\frac{\sin(\theta_1) - \alpha}{\epsilon}\right]\end{aligned}$$

(3.)

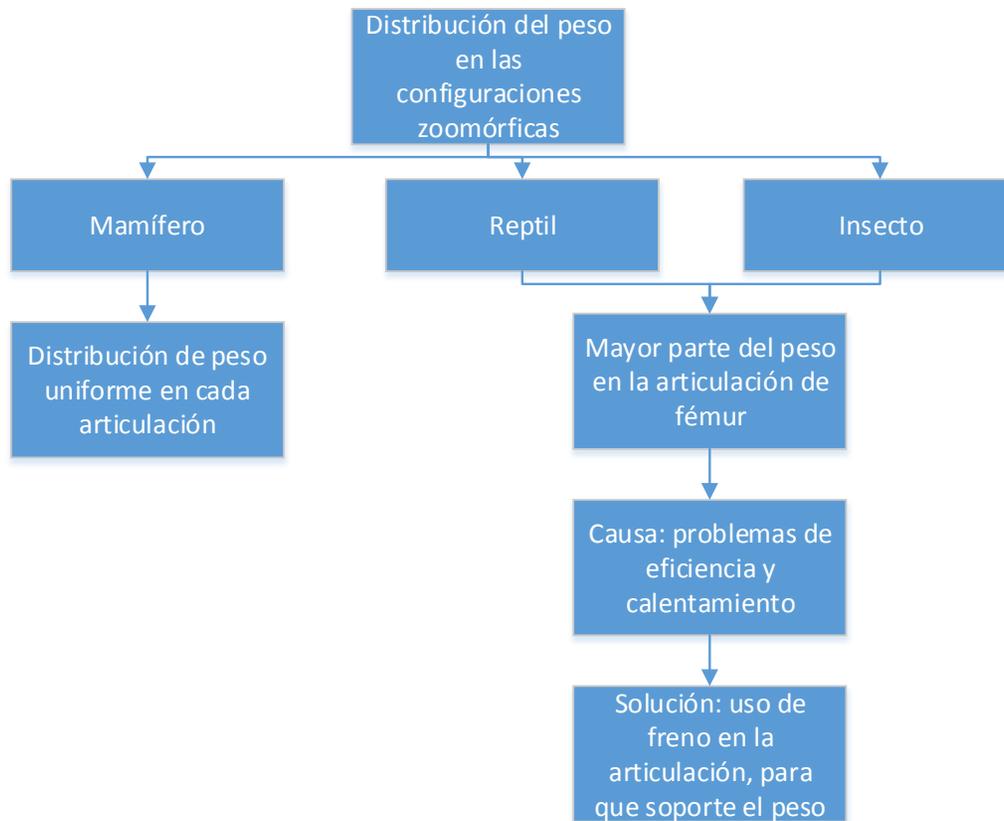
Donde:

$$\alpha = \frac{x}{l_1}, \quad \epsilon = \frac{l_1}{l_2}, \quad \gamma = \frac{z}{l_1 \cos \theta_3}, \quad \delta = 1 + \alpha^2 + \gamma^2 - \epsilon^2.$$

Para el caso de configuraciones de insecto o de reptil las ecuaciones varían en su formulación, pero en el caso del prototipo a realizar se considerará solo la configuración mamífero, la cual es la más conveniente debido a que la distribución de peso es uniforme a cada articulación, caso contrario con las configuraciones de reptil o insecto, donde el actuador de  $\theta_1$  soporta la mayor parte del peso del vehículo. Hay que tomar en cuenta que para una pierna de configuración de mamífero los actuadores deben soportar el peso del vehículo durante la fase de soporte mientras se mueve la articulación. El comportamiento en la fase de balanceo es diferente, ya que no existe una restricción en la trayectoria de las patas que se levantan desde el suelo, siempre y cuando no toquen el suelo u otros obstáculos.

En las configuraciones de reptiles o insectos los motores y la electrónica de potencia deben trabajar con altas corrientes, en grandes ciclos de trabajo, lo que implica problemas de eficiencia y calentamiento. Se sugiere como solución una modificación en la trayectoria de los pies, tan pronto el pie toca el suelo el actuador  $\theta_1$  es bloqueado por un freno, y los otros dos ángulos son

modificados para compensar. Sin embargo la compensación no es completa y no se logra una cinemática correcta. El peso del robot es soportado por el freno durante toda la fase de apoyo y esto genera una reducción considerable del consumo de energía (Ver Figura 16).

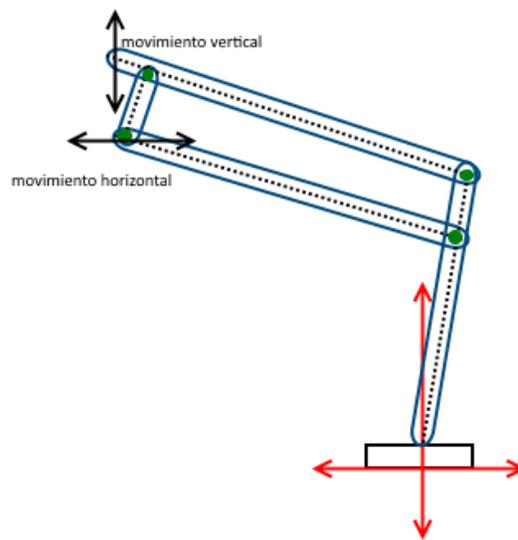


**Figura 16** Distribución del peso en las configuraciones zoomórficas

### 2.3.3. Configuraciones no Zoomórficas

El cálculo las trayectorias de los pies con el fin de conseguir un movimiento cinemático correcto, permite que el cuerpo se mueva a una velocidad constante. Sin embargo, esto requiere un control y rendimiento mecánico más allá de lo que es posible para las configuraciones zoomórficas. La indisponibilidad de actuadores electromecánicos capaces de suministrar el par de torsión necesario para el movimiento suave como es el caso de los músculos es la mayor limitante.

Las configuraciones de reptil o de insectos permiten evitar usar los actuadores para llevar la carga durante toda la fase de apoyo, caso contrario para las configuraciones de mamífero no se puede usar este tipo de solución. En este caso es posible usar un acoplamiento mecánico capaz de desacoplar el movimiento vertical y horizontal del pie, de tal manera que el actuador para la zona de la cadera pueda ser bloqueado en la fase de apoyo. El acoplamiento mecánico más común a usar es el denominado “pantógrafo”, como se muestra en la Figura 17, esta solución constituye la primera desviación de las configuraciones zoomórficas, dando lugar a configuraciones no zoomórficas.



**Figura 17** Bosquejo de las patas de pantógrafo del vehículo de suspensión adaptativa de la Universidad de Ohio

Otra desviación de una configuración zoomórfica es el uso de juntas de movimiento lineal en lugar de juntas de revolución. Por ejemplo, una pierna de configuración cartesiana puede trabajar de manera cinemática correcta si tiene tres grados de libertad. La mayoría de las configuraciones zoomórficas están relacionadas con la capacidad de alcanzar velocidades superiores, pero en la práctica se han producido pocas máquinas capaces de acercarse a la velocidad de transición entre

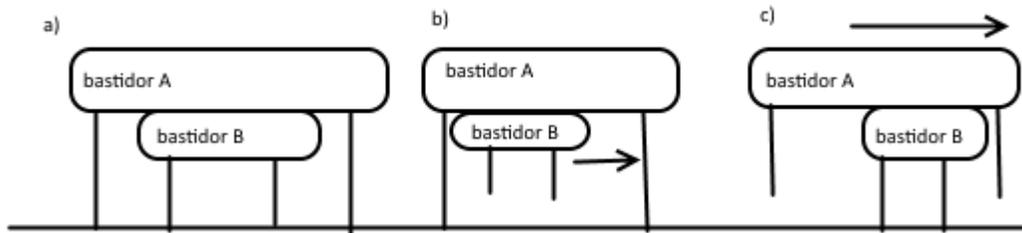
caminar y correr. Otra alternativa explorada es la de saltar en lugar de correr, tal como es la Carnegie Mellon Hopper (Ver Figura 13.k).

#### 2.3.4. *Disposición rígida del bastidor*

De las configuraciones no zoomórficas con más impacto es la basada en dos bastidores rígidos (Ver Figura 18.a). Los bastidores A y B pueden moverse uno con respecto al otro en una sola dirección, girar alrededor de un eje vertical común, y poseer un “n” número de patas (con un mínimo de tres). Cada pata tiene un solo grado de libertad y es llamado traslación vertical. Por lo tanto, si los bastidores se mantienen horizontales, el movimiento de los pies con respecto al robot, genera una cinemática correcta y los movimientos tanto vertical u horizontal están desacoplados completamente.

Para cada paso hacia adelante o hacia atrás se realiza en seis fases:

- Subir los pies de las patas del bastidor B.
- Mover el bastidor B hacia adelante (Ver Figura 18.b).
- Bajar los pies de las patas del bastidor B hasta que cada uno toque el suelo.
- Subir los pies de las patas del bastidor A.
- Mover el bastidor A hacia adelante (Ver Figura 18.c).
- Bajar los pies de las patas del bastidor A.

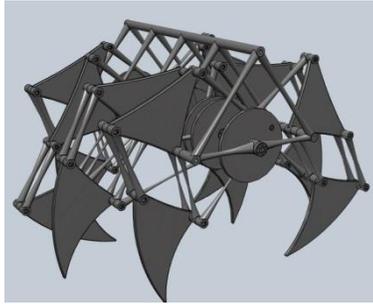


**Figura 18** a) esquema de una máquina caminadora de dos bastidores rígidos  
b) fase 2 de movimiento del bastidor B; c) fase 5 de movimiento del bastidor A.

Para la dirección de la máquina se efectúa una etapa en la que los bastidores giran uno con respecto del otro en vez de desplazarse en dirección longitudinal durante las fases 2 y 5. Los actuadores no requieren de ser controlados en velocidad, o ser sincronizados con precisión, usando un simple control ON-OFF basta. Cada pata solo necesita un sensor táctil, para asegurar que el pie toco la superficie, y un sensor de posición para que el controlador sepa en cada instante en que orientación se encuentra el robot (Peabody & Gurocak, 1998).

### 2.3.5. Máquinas caminadoras de movimiento planar

Otro tipo de configuraciones no zoomórficas son las máquinas caminadoras de movimiento planar, sus patas son similares a las de las máquinas de bastidor rígidos. Éstas se pueden mover en dirección longitudinal mediante la utilización de enlaces cinemáticos en vez de uniones rígidas. La obtención del movimiento longitudinal por parte de las patas consiste en usar pantógrafos en cada una de ellas, con un grado de libertad y en el plano horizontal (Ver Figura 19).



**Figura 19** Theo Jansen Robot, ejemplo de máquina caminadora de movimiento planar

Los movimientos verticales y horizontales de cada una de las patas se encuentran desacoplados entre sí, por lo tanto, el cuerpo siempre se encuentra en posición horizontal aun cuando se desplaza sobre un pendiente. La dirección de los actuadores siempre es vertical, mientras que el movimiento de los pantógrafos siempre ocurrirá en el plano horizontal; por ello el nombre de máquinas de movimiento planar.

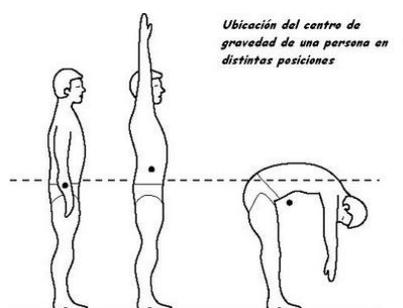
La aplicación de esta configuración en un hexápodo admitirá el uso de un único actuador, ejecutando un tipo de movimiento y un paso similar al del bastidor rígido. También es posible el uso de seis actuadores independientes que permitirá caminar con varios tipos de marchas. Es decir, que puede acceder a una caminata más compleja y con velocidad constante en el cuerpo. La desventaja de este arreglo es su falta de equilibrio estático, pues no requiere de ningún control de velocidad en los actuadores.

#### **2.4. Bipedos robóticos humanoides**

El análisis de la dinámica en los robots bípedos está basado en tener una adecuada técnica de control y generación de patrones de marcha en la caminata bípeda. Para ello se debe tomar en cuenta lo siguiente: la posición del centro de gravedad y el centro de masa del cuerpo humano, área de soporte, el equilibrio estático y equilibrio dinámico, el ciclo de marcha, y las técnicas de control. En la siguiente sección se detallan los puntos a tomar en cuenta.

### 2.4.1. Centro de gravedad y centro de masa del cuerpo humano

Observando desde una visión anatómica en la cual el pie es tomado como punto de soporte, el centro de gravedad del cuerpo humano está ubicado aproximadamente en la segunda vertebra de la zona lumbar. La posición exacta del vector del centro de gravedad para cada persona varía según sus dimensiones corporales, en la cual el valor de la magnitud de dicho vector es igual a la masa del individuo. “La posición del centro de masa en el cuerpo humano es el lugar donde existe mayor concentración de masa”.(Ver Figura 20), (Zermeño Sobrino, 2006).



**Figura 20** Ubicación del centro de gravedad del cuerpo humano

### 2.4.2. Área de soporte

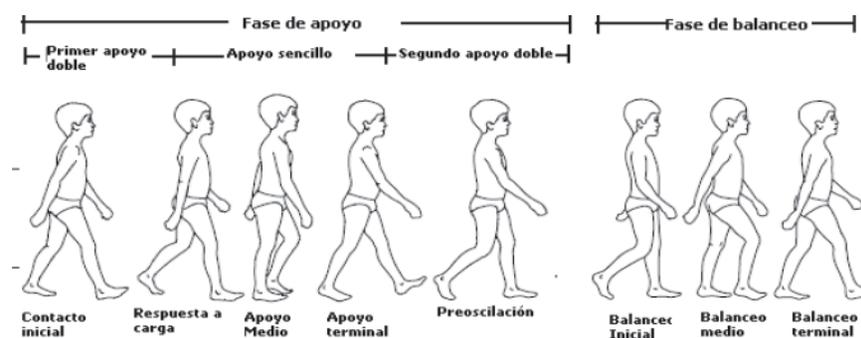
El Área de soporte o de apoyo es el polígono generado por el pie o los pies que se encuentran en contacto con la superficie de asentamiento (Ver Figura 22), (Santana Hernández, 2006).

### 2.4.3. Equilibrio estático y equilibrio dinámico

En la locomoción bípeda existen dos tipos básicos de equilibrio: el “equilibrio estático” y el “equilibrio dinámico”. El equilibrio estático es cuando los movimientos a realizarse por cada “paso” son lentos y artificiales. En cambio, el equilibrio dinámico lo movimientos tienen más eficiencia, velocidad y naturalidad. Estos dos tipos de equilibrio requieren la implementación de leyes de control que se basan en ubicar el centro de gravedad en el Área de soporte (Pardos Gotor, 2005).

#### 2.4.4. Ciclo de marcha

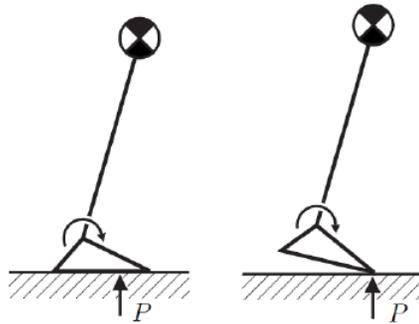
Al hablar de ciclo de marcha se hace referencia cuando el pie inicia contacto con la superficie y termina cuando el mismo pie realiza contacto nuevamente. La marcha bípeda es un tipo de movimiento periódico, el cual se divide en dos fases principales que permutan con cada miembro: la fase de apoyo o soporte y la fase de balanceo. La fase de apoyo es cuando una pierna está en contacto con la superficie y la fase de balanceo es cuando la pierna no tiene contacto con la superficie (Ver Figura 21), (Guzmán Valdivia, 2010).



**Figura 21** Ciclo de marcha bípeda

#### 2.4.5. Punto de momento cero

El punto de momento cero es el punto sobre el área de soporte del bípedo donde se anulan los momentos resultantes de las fuerzas externas, como: la fuerza de gravedad y las fuerzas inerciales. Cuando este punto se encuentra dentro del área de soporte, el contacto entre la superficie y los pies es estable. Mientras más cerca esté del centro del área de soporte, esto conseguirá mayor robustez; y cuando este fuera del área tiende a inclinarse (Santana Hernández, 2006) (Ver Figura 22).



**Figura 22** Área de soporte y punto de momento cero (P)

#### 2.4.6. Técnicas y algoritmos de control para bípedos robóticos humanoides

La locomoción bípeda para robots humanoides es factible aplicarla a cualquier tipo de terreno, debido a esto se realiza la investigación del uso de bípedos humanoides solo en ambientes de trabajo humano, así como la generación de algoritmos y técnicas de control para el balanceo y el ciclo de marcha que realicen este tipo de robots. Cada diseño de bípedos robóticos humanoides difiere uno de otro en aspectos como: tipo, tamaño, restricciones, sensores, estructura mecánica y tiempo de respuesta de sus actuadores. Estos aspectos son esenciales para el análisis y descripción de la posible dinámica del ciclo de marcha del bípedo, las técnicas de control para el equilibrio y métodos de generación de trayectorias para conseguir el balance en estado dinámico. En la actualidad la retroalimentación a las técnicas de control se usa como medida la inclinación de la postura y la posición del centro de masa.

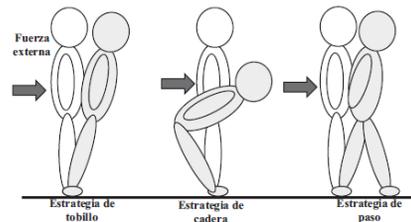
Dichas técnicas usan diferentes tipos de sensores y algoritmos para procesar los datos recibidos, y tomar la decisión óptima según la técnica de control utilizada. En lo siguiente se detalla investigaciones y trabajos que se enfocan en el diseño de algoritmos de control para el equilibrio estático y dinámico, y los métodos para la generación de patrones en el ciclo de marcha

aplicados a bípedos robóticos. Las investigaciones se realizaron en universidades y laboratorios de investigación, los resultados han sido publicados en artículos de diferentes revistas y eventos.

Citando al trabajo de Abdallah y Goswami (2005) “La mayoría de los robots bípedos cuentan con actuadores en los tobillos, consiguiendo facilidad en el diseño del control de marcha”. El trabajo presenta una estrategia de control dividida en dos fases para lograr el equilibrio bajo una fuerza de perturbación. La primera fase, es la fase de reflejo, se diseñó con el objetivo de que el robot resista el efecto inmediato de una perturbación, en la cual la técnica de control se basa en el momento angular. La segunda fase es la fase de recuperación, se diseñó con el objetivo de llevar al sistema a una posición estáticamente estable, llamada “home”.

De acuerdo con el trabajo de Corpuz, Lafoteza, Broas y Ramos (2009), la meta de un bípedo robótico es recuperar y mantener el equilibrio usando la detección de perturbaciones externas ejecutando los llamados reflejos. Como se muestra en el estudio los instrumentos utilizados son un acelerómetro y un giroscopio que facilitan estimar la postura del sistema robótico, al mismo tiempo utilizan el llamado filtro Kalman para obtener una medida de orientación. La técnica para lograr el equilibrio es con el uso de técnicas de control para un péndulo invertido de doble soporte.

En el estudio de Ono, Sato y Ohnishi (2011) se explica el método de recuperación de equilibrio y el cambio de estrategia a implementar, basados en los valores de aceleración para el centro de gravedad. Los bípedos robóticos humanoides al ser perturbados por una fuerza externa determinan el valor de la aceleración de su centro de gravedad, lo que conlleva a determinar una correcta estrategia para cambiar la posición de la articulación de rodilla o cadera para recuperar el equilibrio del mismo (Ver Figura 23).



**Figura 23** Tres estrategias básicas de balanceo  
Fuente: Ono et ál. (2011)

El trabajo realizado por Kim et ál. (2012) llamado Roboray, que consta de seis grados de libertad (GDL) y presenta el control de equilibrio basado en control de par, mediante la utilización de sensores de par en todas las articulaciones de las piernas, y un módulo en la unidad de articulación de cabeceo (zona de la cadera). Estas características permiten un algoritmo para el control de balanceo. El algoritmo combina compensadores de gravedad, controles virtuales de gravedad, controles de amortiguamiento, y adicional a esto una técnica de compensación de fricción para suprimir la no-linealidad del amortiguamiento y optimizar el rendimiento del seguidor de par. El sistema descrito es similar a un sistema de péndulo invertido simple.

El robot bípido de Roa y Ott (2013), enfoca el equilibrio y control de postura mediante la regulación de la posición del centro de masa y la orientación del tronco. Al aplicar una perturbación externa en el robot, este cambia de su posición deseada, por lo cual el controlador calcula una fuerza-par necesaria para recuperar la posición y la orientación deseadas. La fuerza-par calculada por el controlador es distribuida a los puntos de apoyo en los pies del robot.

Conforme a la investigación de Liu, Li, Guo y Cai (2012), postulan un sistema de control dividido en tres problemas independientes; el primero trata la postura corporal, manteniendo el cuerpo en posición vertical, utilizando el par de la cadera de la pierna de apoyo; la segunda trata la velocidad de avance, donde el control la estabiliza mediante la regulación de la longitud de la

pierna de apoyo; por último, la tercera trata del giro de la pierna de balanceo, donde se controla su ángulo.

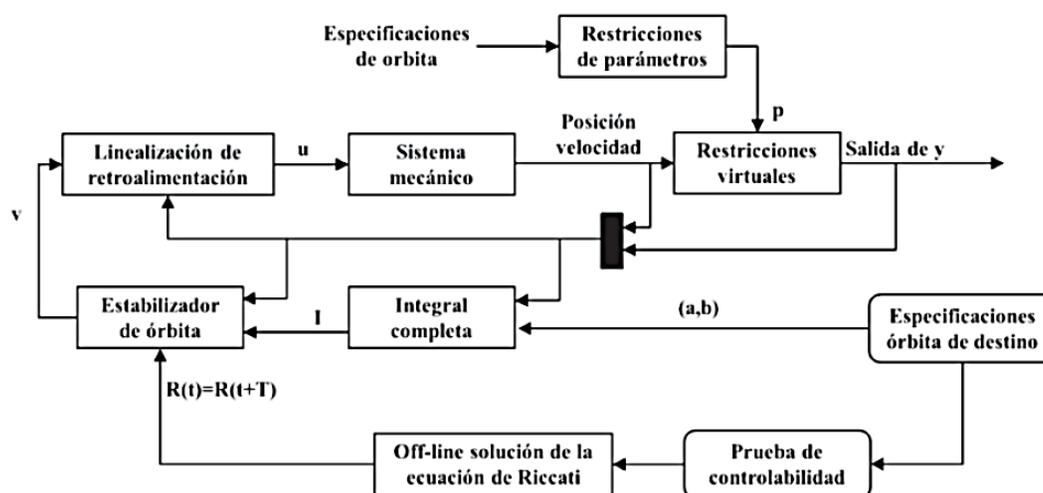
De acuerdo al modelo de Li, Su y Liu (2012) la trayectoria del punto de momento cero se module en los planos sagital y lateral, y se vuelva más flexible. El control incorpora para lograr equilibrio dinámico: un filtro de Kalman, y un controlador de movimiento diseñado para mantener el equilibrio del cuerpo y lograr que el robot camine siguiendo la referencia del punto de momento cero deseada. Concorde al trabajo de Lim, Setiawan y Takanishi (2001) los robots bípedos constan de un control de impedancia y un control de equilibrio, con la finalidad de que la marcha sea estable en condiciones similares a las del ser humano. El equilibrio está basado en el movimiento del tronco y de la cintura, el cual mantiene una postura adecuada, en cuanto a las extremidades inferiores su movimiento se controla de acuerdo al tipo de superficie. El control de impedancia se aplica para reducir la fuerza/torque al realizar el contacto entre el pie y el suelo.

El trabajo de Rehbinder y Hu (2001) muestra la técnica de estimación de estados, donde las variables de estado son posición, velocidad y orientación. Los sensores que realizan esta estimación son un giróscopo y un acelerómetro de tres ejes, con el fin de estimar posiciones estables para la postura del robot. Utilizan una descripción global de rotación de cuerpo rígido para conseguir un problema lineal y poder usar un filtro Kalman lineal modificado.

El robot bípedo llamado Rabbit fue construido en la Universidad de Grenoble en Francia (Grizzle, 2002). Sus piernas terminan como zancos de manera que oscila sobre un punto cuando avanza, por lo que carece de pies. Posee un control de marcha y estabilidad mediante fórmulas matemáticas que generan un algoritmo induciendo a un movimiento deseado. Utiliza la conmutación de leyes de control y un control integral permitiendo variar la velocidad del mismo.

La investigación realizada por Chevallereau et ál. (2003) expone las restricciones virtuales para la fase de balanceo del robot Rabbit. El diseño del control considera al robot en la fase de único soporte y las restricciones se realizan mediante la regulación de las cuatro salidas independientes (actuadores); la selección de los actuadores permite la regulación del ángulo del torso, la altura de las caderas y la posición final de la pierna en balanceo.

El trabajo de Canudas-de-Wit (2004) se basa en restricciones virtuales que fuerzan a la realimentación como se observa en la Figura 24. Las restricciones nombradas son las relaciones entre los eslabones del mecanismo, su función es coordinar el movimiento de los distintos eslabones al momento de dar un paso; es decir, reduce grados de libertad con el objetivo de conseguir un sistema a lazo cerrado que permita el movimiento periódico deseado. El problema de equilibrio del robot es analizado como un péndulo invertido multienlace.



**Figura 24** Diagrama de bloques del estabilizador orbital

Fuente: Canudas-de-Wit (2004)

La investigación realizada de Santana Hernández (2006) presenta un bípedo robótico con sensores de fuerza, giroscopios y acelerómetros. El ciclo de marcha descrito por este robot se encuentra dinámicamente estable durante su movimiento, los parámetros como el punto de

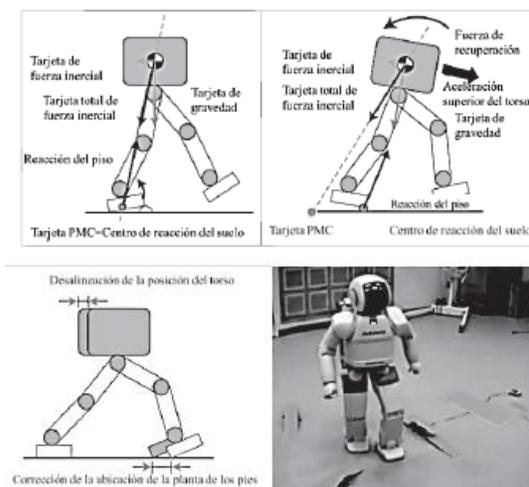
momento cero o el centro de masa se encuentran dentro del rango de estabilidad. En el instante que salgan del rango de estabilidad se realizan las acciones correctivas en los parámetros para que el robot no se desplome.

Manrique (García, 2007) muestra técnicas de control en línea que provoca un movimiento dinámicamente equilibrado, por ello es necesario el análisis del entorno y la posición del punto de momento cero. Para asegurar un equilibrio completo debe seguir dos pasos: el primero el control de secuencia de movimientos que acomoda la posición del robot generando un paso, su longitud y dirección modifica el área de soporte del robot. El segundo consiste en el control de par, que genera un torque alrededor del centro de masa para hacer mover el punto de momento cero.

El trabajo de Shih, Grizzle y Chevallereau (2007) logra una marcha asintótica estable, periódica y rápida mediante un controlador por retroalimentación, para un robot bípedo en 3D que consta de tres enlaces y pies puntuales pasivos. Cada enlace es simulado por una masa puntual en su centro y no dispone de un movimiento de giro en el apoyo final de la pierna. Asumen un contacto puntual y buscan un controlador por realimentación invariante en el tiempo que crea un movimiento exponencialmente estable y periódico.

El robot ASIMO creado por la empresa Honda Motors (2007), es un prototipo de tamaño casi humano que funciona en la sociedad y en un entorno de vida humana. Cuando el robot ASIMO pierde el equilibrio, tiende a inclinarse, para evitar esto se usan los siguientes sistemas de control (Ver Figura 25). Estos sistemas funcionan para evitar la caída y permitir una caminata constante. El primer sistema es un control de reacción del piso que acomoda las articulaciones según las irregularidades del suelo y evita una caída inminente; el segundo sistema es un control que

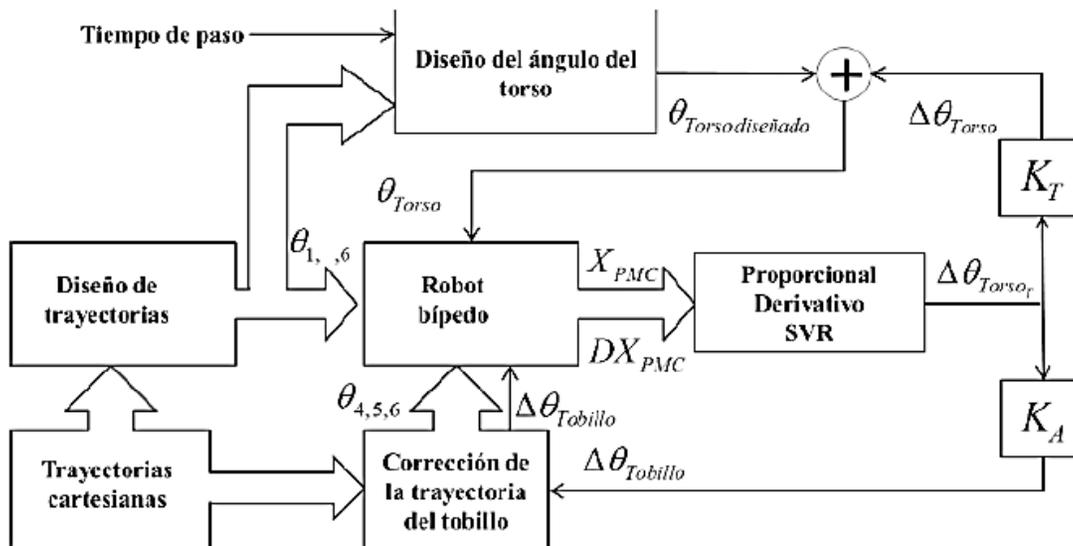
referencia el punto de momento cero, y tercer sistema es un control de orientación de la planta del pie.



**Figura 25** Sistema de control para el robot ASIMO  
Fuente: Honda Motor (2007)

La Universidad de Michigan desarrollo al robot bípedo llamado Mabel (Grizzle, 2008), cuyas características son: posee un tronco pesado, piernas ligeras y flexibles, una serie de resortes que actúan como tendones, capaz de alcanzar cerca de 11 kilómetros por hora y por cada paso se encuentra en el aire un 40% del tiempo empleado; todo esto le permite correr en círculos por medio de una barra que lo sostiene (Matt, Shane, Allison y Philip, 2010).

El trabajo de Ferreira, Crisóstomo y Coimbra (2010) propone el control de un robot bípedo autónomo, combinando el uso de articulaciones de torso y de tobillo para lograr equilibrio en el plano sagital con el fin de corregir el punto de momento cero (Ver Figura 26). Utilizando técnicas de inteligencia artificial y regresión de vectores de soporte.



**Figura 26** Control para el ángulo del torso y tobillo en el torso  
Fuente: Ferreira et ál (2010)

En la investigación de Suwanratchatamane, Matsumoto y Hashimoto (2010) emplean una técnica que consiste en utilizar una retroalimentación basada en los sensores montados en las plantas de los pies del robot. El robot está programado para mantener igual los tres valores de detección cuando el pie está apoyado, en el momento que estos valores son similares, el centro de masa estará en el centro del área de soporte sea en la fase de apoyo simple o doble. El ciclo de marcha y el sistema de control de equilibrio son independientes el uno del otro; puesto que el ciclo de marcha solo iniciará si se encuentra en equilibrio. En la Tabla 1 se muestra un resumen de las características técnicas de los bípedos robóticos más trascendentes desde el año 1990 hasta la actualidad:

**Tabla 1**

*Características técnicas de los bípedos desarrollados*

Referencia	Tamaño	Superficie	Sensor	Tipo de Control	Actuador
(Corpuz, Lafoteza, Broas, y Ramos, 2009)	0,74	Plano	Acelerómetro, giroscopio	Control de posición	Motor DC

<b>(Xin y Xiao, 2009)</b>	-	-	-	Control de posición	-
<b>(Kim et ál., 2012)</b>	1,55	Plano	Sensor de fuerza/torque	Control de par	Motor DC sin escobillas
<b>(Roa y Ott, 2013)</b>	1,43	Plano Inclinado	Sensor de fuerza/torque	Control de balance	Motor DC elástico
<b>(Zheng y Shen,1990)</b>	-	Plano Inclinado	Sensor de Posición, Sensor de fuerza	Esquema de control	Motor DC
<b>(Kajita, Yamura y Kobayashi,1992)</b>	0,37	Plano	Potenciómetro	PD	Motor DC
<b>(Kajita y Tani, 1996)</b>	0,45	Plano	Potenciómetros , Encoder de pulso	Feedback local, robot con piernas ligeras	Motor DC
<b>(C. Shih, 1996)</b>	0.8	Plano	-	Jerárquico	Servo DC
<b>(Goswami, 1999)</b>	-	Plano	-	Control del FRI	-
<b>(Pratt, Chew, Torres, Dilworth y Pratt, 2001)</b>	0,6/0,9	Plano Inclinado	Potenciómetros lineales	Modelo Virtual	Motor DC, Motor DC elástico
<b>(Rehbinder y Hu, 2001)</b>	-	Plano Inclinado	-	Arquitectura conmutación	-
<b>(Grizzle, 2002)</b>	1,43	Plano	Encoder absoluto e incremental	Feedback	Motor DC
<b>(Chevallereau et ál., 2003)</b>	1,43	Plano	Encoder absoluto e incremental	Limitaciones virtuales, dinámica híbrida cero	Motor DC
<b>(Canudas-de-Wit, 2004)</b>	1,43	Plano	Encoder absoluto e incremental	Limitaciones virtuales	Motor DC
<b>(García, 2007)</b>	0,3	Plano	Sensor de presión, acelerómetros	Control de secuencia, control de par	Servo DC
<b>(Lin, Chen y Chen, 2007)</b>	-	Plano	-	Control híbrido	-
<b>(C. L. Shih, Grizzle, y Chevallereau, 2007)</b>	-	Plano	-	Control Feedback, Control basado en eventos	-

(Anybots, 2007)	-	Plano	-	Control del CM	-
(Jessy W. Grizzle, 2008)	2,25	Plano, escalera	Sensor de contacto, sensor de ángulo	Control híbrido cero	Motor DC sin escobillas
(Matt, Shane, Allison y Philip, 2010)	2,25	Plano, escalera	Sensor de contacto, sensor de ángulo	Control híbrido cero	Motor DC sin escobillas
(Ferreira, Crisóstomo y Coimbra, 2010)	0,5	Escaleras, plano, inclinado	Sensor de fuerza	Control de inteligencia artificial	Servo DC
(Parsa y Farrokhi, 2010)	1,32	Plano	-	Modelo de control predictivo no lineal	-
(Aghabalaie, Hosseinzadeh, Talebi y Shafiee, 2010)	1,12	Plano	-	Control robusto no lineal	-
(G. Li et ál., 2010)	0,27	Plano	Sensor de fuerza	Control de estabilidad	Servo DC
(Rokbani, Benbousaada, Ammar y Alimi, 2010)	-	-	Sensor infrarrojo, micrófono	Control de CM	Servo DC
(Chevallereau, Grizzle y Shih, 2009)	1,43	Plano	Encoder absoluto e incremental	Control de Feedback invariante en el tiempo	Motor DC
(Van Heerden y Kawamura, 2010)	1,216	Plano	Sensor de fuerza, giroscopio, acelerómetro	Control basado en la observación del disturbio	Servo DC
(Yazdekhesti, Sheikholeslam y Ghayour, 2010)	1,685	-	-	Control de PMC	-
(Ge, Li y Yang, 2012)	1,1228	Plano	-	Control adaptativo predictivo	-
(Ames, Galloway y Grizzle, 2012)	-	Plano	-	Control de función de Lyapunov	-

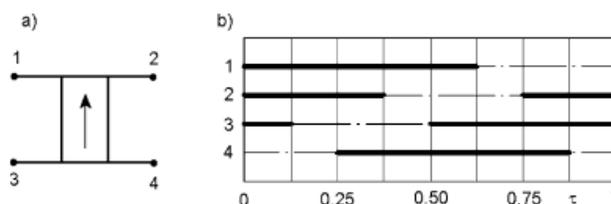

 Continúa

(Ames y Galloway, 2013)	2,25	Plano, escalera	Sensor de contacto, sensor de ángulo	Control de función de Lyapunov	Motor DC sin escobillas
-------------------------	------	-----------------	--------------------------------------	--------------------------------	-------------------------

Fuente: González, Ramírez, Avella (2014)

## 2.5. Marcha y coordinación de piernas

El movimiento de las patas puede dividirse en dos fases: la fase de soporte y la fase de transferencia, oscilación o retorno. La fase de soporte se refiere cuando la pierna asiste al soporte del peso del cuerpo. Mientras que la fase de transferencia trata cuando la pierna se levanta del suelo para regresar y se prepara para iniciar el siguiente ciclo. El ciclo de una pierna es el tiempo que toma la pierna en realizar su apoyo y su retorno. Para los diagramas de numeración de las patas se debe realizar de adelante hacia atrás, y con las patas izquierdas nombradas con los números impares (Ver Figura 27.a).



**Figura 27** a) Numeración de patas para un cuadrúpedo y b) diagrama de marcha

Fuente: Giancarlo Genta (2012)

El factor de servicio  $\beta$  de cada pierna, es un parámetro muy importante. Se define como la duración de la fase de soporte de la pata ( $t_{si}$ ) por el tiempo de ciclo de la pierna ( $t_{ci}$ ). El factor de servicio es un número menor que 1, y cuanto mayor es este factor mayor es el tiempo que pasa la pierna en el suelo (Ver Ecuación del Factor de servicio ( 4.)), (Genta, 2012).

$$\beta_i = \frac{t_{si}}{t_{ci}} \quad (4.)$$

La marcha regular entonces será en valor del factor de servicio de todas las piernas. La relación entre las velocidades relativas será (Ver Ecuación de la relación entre velocidades relativas ( 5.)), (Genta, 2012):

$$\frac{V_{ri}}{V_{si}} = \frac{\beta_i}{1 - \beta_i} \quad (5.)$$

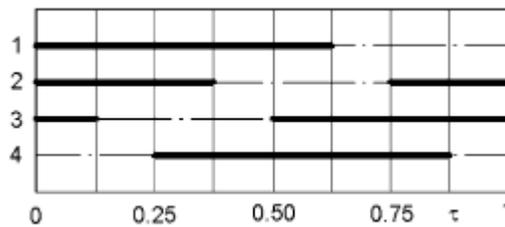
En el tiempo no dimensional se utilizará la hora estándar, dado que la pata 1 toca el suelo a los  $\tau = 0$ . Su fase de soporte se caracteriza por:

$$0 < \tau < \beta$$

y su fase de retorno es:

$$\beta < \tau < 1$$

Una representación del diagrama de marcha de un cuadrúpedo se lo encuentra en la Figura 28. Cada pierna está representada con una línea, remarcada cuando la pierna está en su fase de soporte y sin remarque en fase de transferencia. Este diagrama representa una marcha regular con factor de servicio de  $\beta=5/8=0,625$ . Esto quiere decir que la pierna se encuentra el 62,5% de su tiempo en el suelo.



**Figura 28** Diagrama de marcha de un cuadrúpedo  
Fuente: Giancarlo Genta (2012)

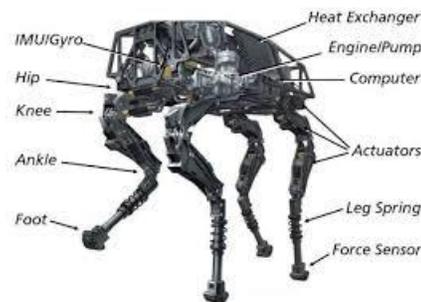
## 2.6. Equilibrio

El movimiento de las máquinas caminadoras puede realizarse en dos posibles condiciones de equilibrio: equilibrio estático o equilibrio dinámico. El equilibrio estático es cuando el movimiento es una secuencia de posiciones de equilibrio estáticas, donde las fuerzas de inercia desempeñan un pequeño papel en el movimiento (Genta, 2012). Teóricamente el movimiento puede detenerse en cualquier instante de tiempo.

Para lograr la estabilidad en condiciones de equilibrio estático, el mínimo número de patas que deben estar en fase de apoyo es de tres. En el caso de los animales la mayoría son capaces de moverse en condiciones dominadas por fuerzas inerciales: en la mayor parte de los instantes en condición de equilibrio estático no hay tres patas apoyadas y el movimiento no puede ser detenido en ningún instante. En este caso no existe un número mínimo de patas que deben estar en fase de soporte, puesto que cuando se ejecuta el movimiento hay instantes en que todas las patas no se apoyan en el suelo. Las fuerzas inerciales en baja gravedad llegan a ser un factor dominante en las velocidades bajas, por lo tanto la importancia que se da en condiciones de equilibrio dinámico es mayor en la exploración planetaria que en la Tierra.

Una de las pocas máquinas caminadoras capaz de lograr una verdadera estabilidad dinámica es el BigDog, es un robot cuadrúpedo construido por Boston Dynamics (Ver Figura 29). Es un tipo

de mula artificial diseñada para aplicaciones militares, con las siguientes características: 910 mm de largo, 760 mm de altura, 110 kg de masa, capaz de soportar una carga de 150 kg, 16 actuadores en las piernas y es capaz de manejar terrenos difíciles a una velocidad de 8 km/h (Genta, 2012).



**Figura 29** The BigDog, una de las pocas máquinas caminadoras en lograr una verdadera estabilidad dinámica

Fuente: Giancarlo Genta (2012)

## 2.7. Resumen

En robótica móvil existen tres tipos de configuraciones robóticas, las cuales son: máquinas con ruedas, máquinas caminadoras y máquinas híbridas. El trabajo a tratar se basará únicamente en las máquinas caminadoras, las cuales en su mayoría son sugeridas para la exploración de planetas con una superficie sólida. Las máquinas caminadoras más comunes son las que utilizan la denominada locomoción con piernas.

La locomoción con piernas es la más usada en la robótica para el movimiento en superficies irregulares. Con un número elevado de patas y una disposición baja del centro de masa, permite al animal permanecer en condiciones de equilibrio durante todo su ciclo de marcha. El ciclo de marcha se genera desde que el pie inicia contacto con la superficie hasta que el pie realiza contacto nuevamente con la superficie.

Para que el animal pueda moverse a mayor velocidad debe cambiar su marcha y alcanzar la velocidad de transición entre caminar y correr. Para que esto se lleve a cabo la velocidad depende del tamaño del animal y su velocidad; a esta relación se la conoce como número de Froude (Genta, 2012). La marcha bípeda es un tipo de movimiento periódico, el cual se subdivide en dos fases: la fase de soporte o apoyo y la fase de balanceo. La fase de apoyo es cuando una pierna está en contacto con la superficie y la fase de balanceo es cuando la pierna no tiene contacto con la superficie.

Las máquinas caminadoras a su vez, se subdividen en tres configuraciones las cuales son denominadas: configuración de mamífero, configuración de reptil y configuración de insecto. La configuración de mamífero posee una recuperación pendular de la energía cinética y en esta configuración se aplica las consideraciones del número de Froude. Las configuraciones de reptil o de insecto pueden tener grandes pérdidas de energía, debido a las aceleraciones y frenado de los actuadores. Para dichas configuraciones el actuador en la zona de la cadera soporta la mayor cantidad de peso de la máquina, mientras que en el caso de la configuración mamífero el peso se distribuye en los actuadores cuando la pierna está en la fase de soporte.

Las máquinas caminadoras realizan su movimiento en dos posibles condiciones de equilibrio, las cuales se denominan: equilibrio estático y equilibrio dinámico. El equilibrio estático se trata cuando el movimiento se da por una secuencia de posiciones en equilibrio, donde las fuerzas inerciales desempeñan un pequeño papel en el movimiento. Para el caso del equilibrio dinámico el robot debe evitar caídas cuando se presenten perturbaciones a lo largo de su ciclo de marcha. Para conseguir equilibrio estático el número de patas que deben estar en fase de apoyo es de tres. Cuando las fuerzas inerciales en baja gravedad llegan a ser un factor dominante en las

velocidades bajas, se considera la condición de equilibrio dinámico, la cual es sugerida para la exploración planetaria.

### 3. CAPÍTULO 3 – DISEÑO MECATRÓNICO

El capítulo se enfoca en la creación, selección y diseño mecatrónico de los componentes para la implementación en el prototipo de un bípedo robótico zoomórfico. En primera instancia se presenta la identificación de los requerimientos del prototipo y las características técnicas que lo satisfacen. Mediante la utilización de la matriz denominada QFD se obtiene resultados acerca de la correlación e importancia que tienen las características técnicas con los requerimientos del prototipo. Se abarca la selección del concepto que soluciona la problemática planteada, dividiendo al prototipo en 5 subsistemas para su implementación por separado. Dichos subsistemas son: mecánico, eléctrico y/o electrónico, sensorial, analítico y computacional.

#### 3.1. Elaboración de lista de métricas

##### 3.1.1. Matriz QFD

Para la elaboración de métricas se implementó la denominada matriz QFD o casa de la calidad, la cual enlaza los requerimientos del cliente hacia el prototipo con las características técnicas del mismo. La Tabla 2 convierte los requerimientos del prototipo en soluciones planteando características técnicas. (Ver Tabla 2)

**Tabla 2**

*Características técnicas de los requerimientos*

Requerimiento	Característica Técnica
Fácil de mantener	Piezas desmontables
Bípedo zoomórfico	Mecanismo para un robot bípedo
Tener buenos materiales y resistencia	Material duradero
Movimiento continuo y natural	Control establecido para marcha continua
Teleoperado	Uso de módulos de radiofrecuencia
Robusto	Uso de software orientado a la solución del problema
Interfaz gráfica	HMI normalizada
Manejo con palanca	Uso de dispositivos de mando

Continúa 

Ser estable	Cálculo de centro de masa
Eficiente	Potencia de los motores adecuada al requerimiento
La cola debe girar	Motores ubicados convenientemente

A continuación, se detalla la valoración y la simbología que se asignará a la relación entre los requerimientos del cliente con las características técnicas del prototipo, y la correlación que existe entre las características técnicas respectivamente (Ver Tabla 3).

**Tabla 3**

*Valoración y simbología de la matriz QFD*

<b>Leyenda</b>			
<b>Relación</b>		<b>Interacción</b>	
Muy correlacionado	9	Alta interacción	++
Correlacionado	3	Baja Interacción	+
Poco Relacionado	1	Ninguna	
Ninguno	0		

A continuación, se muestra la implementación de la matriz QFD, la cual se compone de los “Que” (requerimientos del cliente) y de los “Como” (características técnicas del prototipo). Se muestra también la importancia de las características técnicas frente a los requerimientos y la importancia de los requerimientos frente a las características técnicas. (Ver Tabla 4)

**Tabla 4**  
*Matriz QFD*

Matriz QFD  
 Proyecto de Tesis Bípido zoomórfico  
 Alumnos: Chiluisa Melanie - Hidalgo José

		No	Cómo												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
			Piezas desmontables	Mecanismo para un robot bípido	Material duradero	Control establecido para marcha continua	Uso de módulos de radiofrecuencia	Uso de software orientado a la solución del problema	HMI normalizada	Uso de dispositivos de mando	Cálculo de centro de masa	Potencia de los motores adecuada al requerimiento	Motores ubicados convenientemente	RC vs CT	Importancia relativa de los requerimientos
No	Importancia	Qué													
1	3	Fácil de mantener	9	3	1	0	0	0	0	0	3	0	1	51	4,7%
2	5	Bípido zoomórfico	3	9	3	9	0	0	0	1	9	3	3	200	18,5%
3	3	Tener buenos materiales y resistencia	3	0	9	0	0	0	0	0	1	3	0	48	4,4%
4	4	Movimiento continuo y natural	3	9	1	9	1	0	0	0	9	3	3	152	14,0%
5	3	Teleoperado	0	0	0	1	9	1	0	3	0	0	0	42	3,9%
6	5	Robusto	9	3	9	3	0	3	0	0	9	1	1	190	17,5%
7	3	Interfaz grafica	0	0	0	1	1	9	9	1	0	0	0	63	5,8%
8	1	Manejo con Joystick	0	0	0	0	1	9	1	9	0	0	0	20	1,8%
9	5	Ser estable	1	9	1	9	0	0	0	0	9	1	9	195	18,0%
10	2	Eficiente	1	0	1	0	0	0	0	0	0	9	1	24	2,2%
11	3	Debe Girar	3	9	0	1	0	0	0	1	9	1	9	99	9,1%
Importancia (CT vs RC)			124	177	101	150	35	54	28	29	210	67	109		
Importancia Relativa			11,4%	16,3%	9,3%	13,8%	3,2%	5,0%	2,6%	2,7%	19,4%	6,2%	10,1%		
Dificultad (0 a 10)			7	5	5	9	6	5	5	4	10	8	7		

### 3.1.2. Análisis de resultados de la matriz QFD

Realizado el análisis de resultados de todos los requerimientos del cliente hacia el prototipo, se procede a determinar el nivel de importancia que tienen las características técnicas del diseño, por medio de la importancia relativa hallada en la matriz QFD, como se muestra en la Tabla 5 a continuación.

**Tabla 5**  
*Resultados de la matriz QFD*

Ítem	Característica técnica	Importancia
1	Piezas desmontables	11,4%
2	Mecanismo para un robot bípido	16,3%
3	Material duradero	9,3%
4	Control establecido para marcha continua	13,8%

Continúa

5	Uso de módulos de radiofrecuencia	3,2%
6	Uso de software orientado a la solución del problema	5%
7	HMI normalizada	2,6%
8	Uso de dispositivos de mando	2,7%
9	Cálculo de centro de masa	19,4%
10	Potencia de los motores adecuada al requerimiento	6,2%
11	Motores ubicados convenientemente	10,1%

Como se observa en la tabla anterior el cálculo de centro de masa tiene la mayor ponderación en el nivel de importancia, por lo cual esta característica técnica recibirá mayor análisis y prioridad para el diseño de prototipo. Seguido de esta característica técnica están: el realizar un mecanismo para robot bípedo y un control establecido para marcha continua, los cuales son parte fundamental del diseño. En la Tabla 6 se muestra las características técnicas ordenadas jerárquicamente.

**Tabla 6**  
*Orden jerárquico de las características técnicas*

Prioridad	Característica Técnica
1	Cálculo de centro de masa
2	Mecanismo para un robot bípedo
3	Control establecido para marcha continua
4	Piezas desmontables
5	Motores ubicados convenientemente
6	Material duradero
7	Potencia de los motores adecuada al requerimiento
8	Uso de software orientado a la solución del problema
9	Uso de módulos de radiofrecuencia
10	Uso de dispositivos de mando
11	HMI normalizada

### 3.1.3. Diseño

Las características técnicas con mayor prioridad e importancia en solucionarlas se las observa en la Tabla 6, la cual muestra el orden jerárquico que éstas reciben. En la Tabla 7 se observa los módulos definidos de dichas características y poder ser analizados posteriormente.

**Tabla 7**

*Definición de módulos*

N°	Módulo	Técnicas	Característica
1	Equilibrio	1	Cálculo de centro de masa
2	Mecanismo	2	Mecanismo para un robot bípedo
3	Caminata	3	Control establecido para una marcha continua
4	Estructura	4,6	Estructura duradera y desmontable
5	Alimentación	5,7	Potencia de los motores adecuada al requerimiento
6	Comunicación	9,10	Uso de módulos de radiofrecuencia y dispositivo de mando
7	HMI	8,11	HMI normalizada y didáctica

La implementación de los llamados módulos ayudará en la determinación de posibles soluciones de las características técnicas a implementar en el diseño. En la Tabla 8 se consideran los siguientes módulos para el diseño del prototipo:

**Tabla 8**

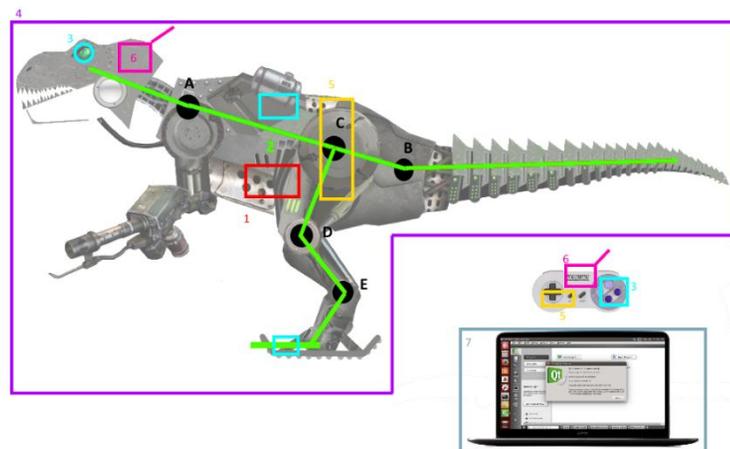
*Módulos para el diseño*

Módulo	Nombre	Función
1	Equilibrio	Establecer las diferentes posiciones del prototipo para lograr un perfecto equilibrio.
2	Mecanismo	Determinan que tipo de mecanismo a utilizar para conseguir una caminata bípeda y actuadores.
3	Caminata	Determina como se ejecutarán las órdenes para establecer una marcha continua y sistema sensorial.
4	Estructura	Determina el tipo de material a utilizar
5	Alimentación	Establece que tipo de alimentación usara el prototipo
6	Comunicación	Determina qué elementos de comunicación usará el prototipo
7	HMI	Estable la correcta interfaz de usuario

### 3.2. Conceptos a implementar

El robot dispondrá de una plataforma dispuesta de dos extremidades dotadas de sistemas complejos de control, será capaz de caminar semejante a un animal bípedo respondiendo a órdenes de un control de su administrador. El robot también reaccionará a eventos inesperados que puedan ocurrir como reposar sobre planos inclinados de hasta  $5^\circ$  en descenso y  $5^\circ$  en ascenso, con rugosidad baja, para conseguir un movimiento libre de fricción. Dada la pulsación de un botón ubicado en un control remoto por un operador, la caminata del robot iniciará. Y esta terminará cuando el operador suelte el botón anteriormente nombrado.

El robot cambiará de posición y se equilibrará en la superficie que se lo coloque usando un sistema de sensores y actuadores. El robot tendrá un sistema de locomoción basado en dos piernas y será capaz de andar sin necesidad de interrumpir su avance, además sus movimientos serán restringidos de forma que la proyección de su centro de masa se mantendrá siempre en su polígono de soporte. Los conceptos seleccionados para brindar la solución a las características técnicas de mayor importancia y que darán espacio a la generación de un concepto inicial son los siguientes. (Ver Figura 30)



**Figura 30** Ubicación de módulos

### 3.2.1. Módulo 1: Equilibrio

**Tabla 9**

*Módulo 1 (Cálculo de centro de masa)*

Opciones	Complejidad	Orden de selección
Teorema de Pappus-Guldin.	Alta	2
Teorema de distribución discreta de la materia	Media	1
Teorema de distribución de masa no homogénea.	Muy alta	3

#### *Teorema de distribución discreta de la materia*

La aplicación de la ecuación del teorema de distribución discreta de la materia, permite el cálculo del centro de masa de un sistema de partículas, de distintas masas, densidades y dimensiones. Es decir que el centro de masa del prototipo se encuentre dentro del polígono de soporte, en cualquier fase del ciclo de marcha bípeda. El cálculo de centro de masa se lo realizará con la fórmula del teorema de distribución discreta de materia, la cual está dada por la Ecuación (Ver ( 6.)).

$$r_{cm} = r_G = \frac{\sum m_i \times r_i}{\sum m_i} = \frac{m_1 \times r_1 + m_2 \times r_2 + \dots + m_n \times r_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}$$

(6.)

### 3.2.2. Módulo 2: Mecanismo

**Tabla 10**

*Módulo 2 (Mecanismo para cambio de posición del centro de gravedad hacia un costado)*

Opciones	Complejidad	Orden de selección
Motor ubicado en la cola.	Media	1
Uso de motores en la cadera.	Muy alta	3
Uso de motores en los tobillos	Muy alta	2

**Tabla 11***Módulo 2 (Mecanismo para el control de equilibrio en la marcha bípeda)*

Opciones	Complejidad	Orden de selección
Uso de extremidades cortas y pies grandes.	Muy baja	3
Inclinación del tronco	Alta	1
Uso de un arnés para evitar que se caiga el prototipo.	Baja	2

**Tabla 12***Módulo 2 (Mecanismo para transmisión de movimiento en las rodillas)*

Opciones	Eficiencia	Complejidad	Orden de selección
Acople directo	Alta	Baja	3
Tren de engranes	Alta	Media	1
Transmisión por engranajes cónicos	Media	Media	2

**Tabla 13***Módulo 2 (Mecanismo para transmisión de movimiento en el fémur)*

Opciones	Eficiencia	Espacio	Complejidad	Orden
Tren de engranajes	Media	Mucho	Media	2
Acople directo	Alta	Muy poco	Baja	1
Engranajes cónicos	Media	Poco	Alta	3

**Tabla 14***Módulo 2 (Mecanismo para transmisión de movimiento en el tobillo)*

Opciones	Eficiencia	Espacio utilizado	Complejidad	Orden de selección
Tren de engranajes	Media	Excesivo	Media	3
Acople directo	Alta	Mucho	Baja	2
Engranajes cónicos	Media	Poco	Alta	4
Manivela corredera	Muy alta	Muy poco	Muy alta	1

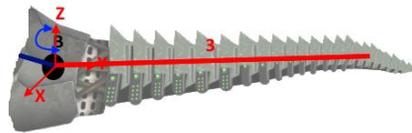
**Tabla 15***Módulo 2 (Actuadores a utilizar)*

Opciones	Eficiencia	Costo	Orden de
----------	------------	-------	----------

			selección
Motor a pasos	Media	Bajo	3
Servomotores	Alta	Medio	1
Motor DC	Media	Alto	2

*Mecanismo para cambio de posición del centro de gravedad hacia un costado: Motor ubicado en la cola*

La cola proporcionará cambios en el centro de gravedad hacia los costados del robot. Esto se realiza cuando el robot se encuentre posicionado sobre una sola extremidad no contará con dos apoyos para equilibrarse, por lo que se generará un momento hacia la pierna en acción y tenderá a inclinarse hasta caerse. El cambio de posición del centro de gravedad hacia los costados eliminará dicho momento, pues el robot solo necesitará de un apoyo para equilibrarse. El movimiento de la cola será alrededor del eje z (Ver Figura 31).

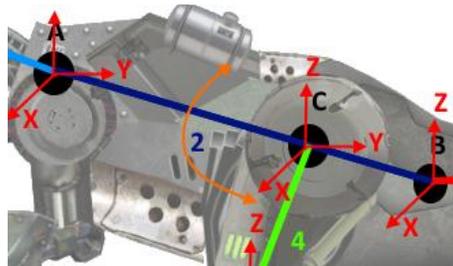


**Figura 31** Movimiento de la cola

*Mecanismo para el control de equilibrio en la marcha bípeda: Inclinación del tronco o torso*

El torso será el eslabón principal pues es la parte del bípedo donde se concentra casi la totalidad del peso, y por otro lado donde se ubica el centro de gravedad del robot. El eslabón contendrá todos los dispositivos de cálculo y control. En el torso estarán ubicados dos servomotores ubicados en el punto C los cuales permitirán la inclinación del mismo con respecto a la superficie y el movimiento de la pierna en acción. El movimiento de este eslabón con respecto de la superficie permitirá el cambio del centro de gravedad hasta llegar a un equilibrio. El ángulo que describa este eslabón será calculado por cada posición que tomen las extremidades,

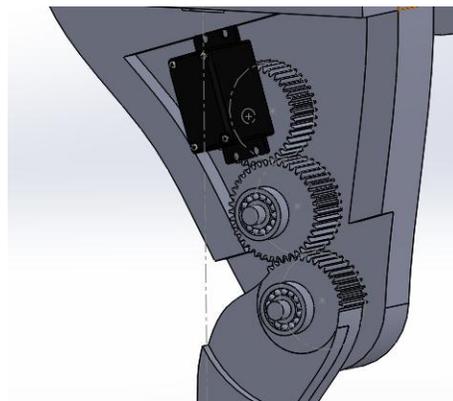
la cola y la cabeza. El movimiento de este eslabón será de igual manera hacia arriba o abajo con respecto del eje X (Ver Figura 3).



**Figura 32** Movimiento del torso

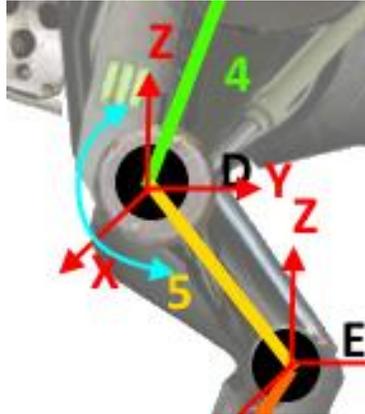
*Mecanismo para transmisión de movimiento en las rodillas: Tren de engranes*

Para la transmisión de movimiento del actuador hacia las rodillas se utilizará un tren de engranes que consta de 3 engranes de 41 dientes de módulo 1 (Ver Figura 33), el cual transmitirá el movimiento del servomotor colocado en la pierna hacia la pantorrilla engranada.



**Figura 33** Tren de engranes en la rodilla

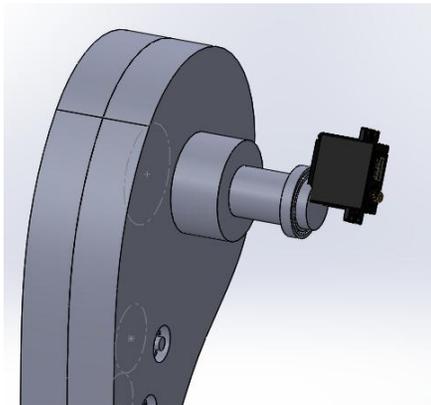
La pantorrilla al igual que la pierna facilitará la caminata del bípedo y funcionará similar que la pierna en cuanto a ser un eje de apoyo. Los movimientos del eslabón cambiarán el centro de gravedad hacia adelante o atrás de su posición original, dependiendo de la posición en donde se encuentre dicho eslabón. El movimiento se lo realizará por los servomotores ubicados en el punto D de cada extremidad y realizaran su acción alrededor del eje x (Ver Figura 34).



**Figura 34** Movimiento de la pantorrilla

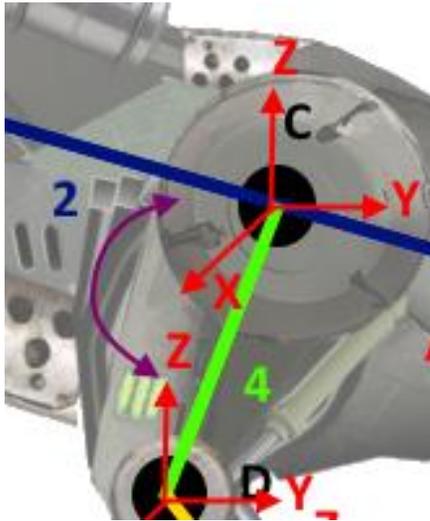
*Mecanismo para transmisión de movimiento en el fémur: Acople directo*

La transmisión de movimiento para la generación de pasos en el fémur se acoplará directamente el servomotor con la parte superior del fémur (Ver Figura 35). El servomotor se encontrará situado en el torso, a un plano sagital.



**Figura 35** Acople directo del fémur

La pierna facilitará la caminata del bípedo, también será parte de su eje de apoyo cuando el bípedo se encuentre una posición mono-podal o bípeda. Los movimientos del eslabón cambiarán el centro de gravedad hacia adelante o atrás de su posición original, dependiendo de la posición en donde se encuentre dicho eslabón. El movimiento se lo realizará alrededor del eje x (Ver Figura 7), por medio de los servomotores ubicados en el punto C dependiendo de cada pata.



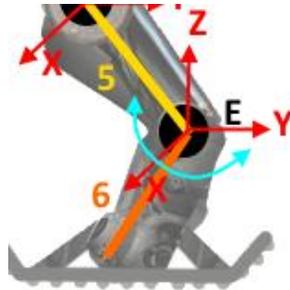
**Figura 36** Movimiento de la pierna

*Mecanismo para transmisión de movimiento en el tobillo: Manivela corredera*

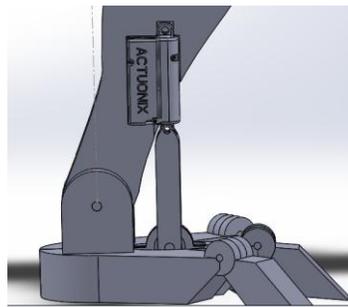
La posición de la pata dependerá si el bípedo se encuentra en un plano horizontal, inclinado o si se encuentra en movimiento el mecanismo que contiene la pata. Las posiciones que optará la pata son las siguientes:

- Posición horizontal: Cuando el bípedo se encuentre posicionado sobre dos extremidades o solo una.
- Con Inclinación: Cuando el robot se encuentre en una superficie inclinada.
- Con inclinación de  $45^\circ$ : Cuando la pata se encuentre en el aire, debido a que el mecanismo esté dando un paso. O cuando finaliza el ciclo de marcha, es decir, cuando el robot ha finalizado de dar un paso y nuevamente se posiciona sobre sus dos extremidades por un corto periodo de tiempo.

El movimiento se realizará mediante un sistema de manivela corredera, el cual consta de un micro-servomotor lineal que debido a su acción rectilínea provocará una rotación en el eslabón. Este movimiento será alrededor del eje x (Ver Figura 37 y Figura 38).



**Figura 37** Movimiento de la pata

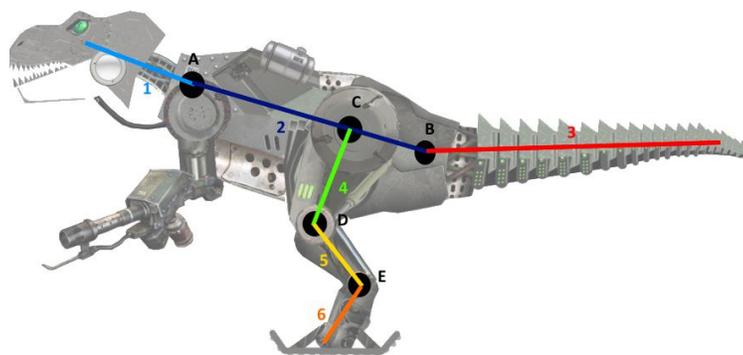


**Figura 38** Mecanismo manivela corredera

#### *Actuadores: Servomotores*

Para la acción motriz del bípedo se utilizarán dos tipos de actuadores controlados mediante PWM, el cual proporcionará el ángulo calculado a donde debe posicionarse cada extremidad.

Estos actuadores serán dos microservos lineales y cinco servos rotatorios. Los microservos lineales serán para el movimiento de las patas, cada uno ubicado en el punto E; y los servos rotatorios para el movimiento del resto de eslabones (torso, cola, piernas y pantorrillas), ubicados en los puntos A, B, C y D (Ver Figura 39).



**Figura 39** Ubicación de los actuadores

Estos servomotores se definen como: motores de corriente continua capaces de girar hacia un ángulo especificado mediante la aplicación de pulsos PWM. El servomotor sugerido a implementar se lo puede ver en la Figura 40.



**Figura 40** Servomotor sugerido

### 3.2.3. Módulo 3: Caminata

**Tabla 16**

*Módulo 3 (Elección del sistema sensorial de inclinación de la superficie)*

Opciones	Eficiencia	Costo	Orden de selección
Acelerómetro ubicado en el pie.	Alta	Bajo	1
Sensor IMU.	Muy alta	Muy alto	3
Acelerómetro ubicado en la superficie.	Alta	Bajo	2

**Tabla 17***Módulo 3 (Elección del sistema sensorial para colisiones)*

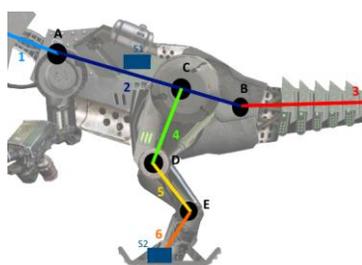
Opciones	Eficiencia	Costo	Selección
Sensor Sharp en patas.	Muy alta	Muy alto	3
Sensor ultrasónico en los ojos.	Media	Medio	1
Sensor capacitivo en los ojos.	Baja	Bajo	2

**Tabla 18***Módulo 3 (Elección de tipo de movimiento para la marcha bípeda)*

Opciones	Eficiencia	Complejidad	Orden de selección
Realizar caminata paso a paso mediante un elemento de acción mecánica.	Baja	Muy baja	3
Realizar caminata mientras un elemento de acción mecánica este pulsado.	Muy alta	Media	1
Copiar las posiciones establecidas en un ordenador.	Muy alta	Bajo	2

*Elección del sistema sensorial: Acelerómetro*

El sensor que se utilizará será un acelerómetro de 3 ejes en una de las patas. Dicho sensor dará la inclinación de la superficie donde se encuentra posicionado, esto se logrará mediante la adquisición del ángulo que tiene la pata del robot (Ver Figura 41).

**Figura 41** Ubicación de los sensores

El acelerómetro es un sensor capaz de detectar los cambios en fuerzas G producidos en sí mismo, con el cual es posible determinar la inclinación en la que se encuentra dicho sensor. El acelerómetro sugerido a utilizar se lo puede observar en la Figura 42.



**Figura 42** Sensor de inclinación sugerido

*Elección del sistema sensorial para colisiones: Sensor ultrasónico en el torso*

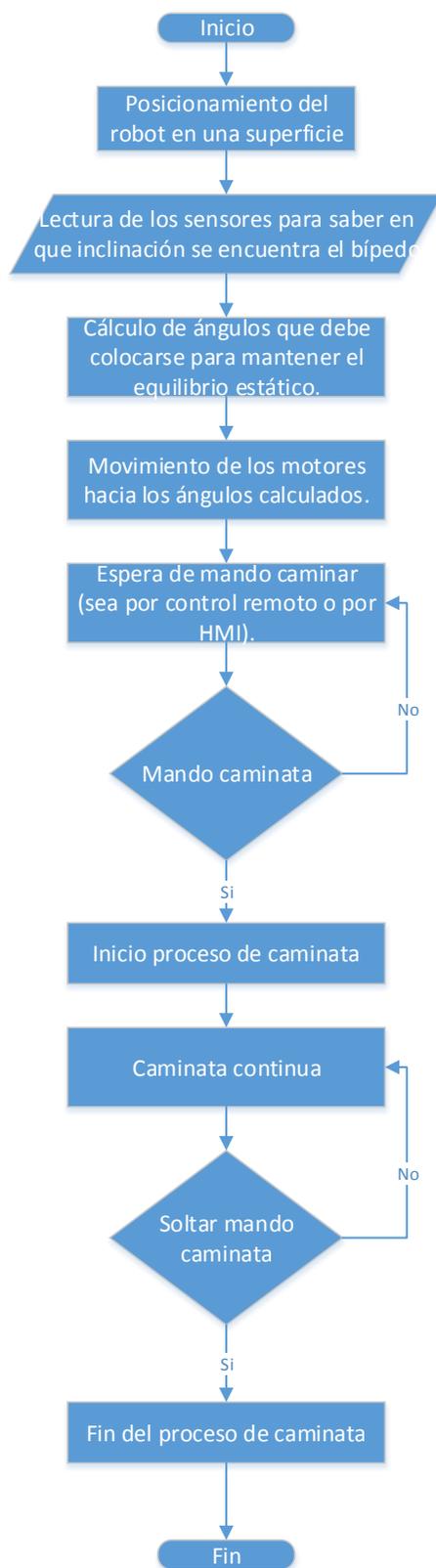
Para evitar colisiones inesperadas durante el ciclo de marcha bípeda se decidió implementar un sistema de percepción de obstáculos a corta distancia. Dicho sistema medirá la distancia que se encuentra el bípedo cualquier objeto que pueda interrumpir su movimiento rectilíneo, que se encuentre a menos de 20 cm de distancia. El sensor a implementar es un sensor ultrasónico posicionado en el torso del prototipo, el cual servirá de “ojos” y en caso de haber un elemento a una distancia contraproducente el prototipo no avanzará, hasta que el objeto sea retirado. El sensor sugerido se lo puede ver en la Figura 43.



**Figura 43** Sensor ultrasónico sugerido

*Elección de tipo de movimiento para la marcha bípeda: Realizar caminata mientras un elemento de acción mecánica este pulsado*

La ejecución de la marcha bípeda será dada por el subsistema de obtención de señal que es el encargado de recibir el comando de caminata dado por el operador y enviarlo como orden hacia el robot. El tipo de movimiento que se plantea para la marcha bípeda es realizar caminata mientras un elemento de acción mecánica este pulsado, en la cual se seguirá las siguientes fases (Ver Figura 44):



**Figura 44** Diagrama de flujo de la fase de caminata.

### 3.2.4. Módulo 4: Estructura

**Tabla 19**

*Módulo 4 (Elección del material a usar en la estructura)*

Opciones	Resistencia	Costo	Orden de selección
Corte en acrílico.	Alta	Alto	2
Impresión 3D en ABS.	Media	Medio	1
Corte en MDF.	Baja	Medio	3
Fundición de aluminio.	Muy alta	Muy alto	4

**Tabla 20**

*Módulo 4 (Elección de material para engranajes)*

Opciones	Resistencia	Costo	Orden de selección
Aluminio.	Muy alta	Alto	1
Duralón.	Alta	Medio	2
<b>Corte acrílico.</b>	Media	Medio	3
Impresión 3D ABS.	Media	Alto	4

**Tabla 21**

*Módulo 4 (Elección de material para ejes)*

Opciones	Resistencia	Costo	Orden de selección
Ejes de acero.	Alta	Alto	2
Impresión 3D en ABS.	Media	Alto	4
Ejes de aluminio.	Alta	Alto	1
Varilla de acero.	Alta	Medio	3

*Elección del material a usar en la estructura: Impresión 3D en ABS*

Para la estructura y soporte se usará piezas diseñadas por autoría propia. Fabricadas mediante la tecnología de impresión en 3D, utilizando material ABS, el cual es un material liviano y de fácil uso para aplicaciones en prototipado.

Las propiedades del plástico ABS a utilizar son las siguientes (Ver Tabla 22):

**Tabla 22***Propiedades físicas y mecánicas del ABS*

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Densidad	1.25 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad	3.5 GPa
Módulo de flexión	4 GPa
Resistencia a la flexión	80 MPa
Temperatura de transición vítrea	60°C
Temperatura de deflexión del calor	65°C
Comienzo de fusión	160°C
Módulo de corte	2.4 GPa
Resistencia a la tracción	50 MPa

*Elección del material a usar en los engranajes y ejes: Aluminio*

Los ejes (Ver Figura 45) y engranajes (Ver Figura 46) que son los responsables de transmitir el movimiento de los actuadores hacia los eslabones del prototipo deben tener mayor resistencia a movimientos cíclicos y deben ser de un material duro y resistente a fuerzas de flexión. Debido a esto el material seleccionado para la fabricación de ejes y engranajes es Aluminio, ya que posee una buena resistencia para la aplicación y tiene un costo moderado.

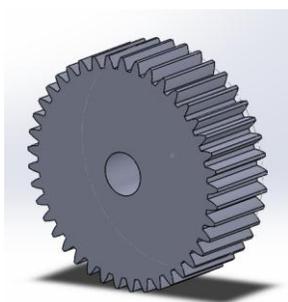
Las propiedades del aluminio son las siguientes (Ver Tabla 23):

**Tabla 23***Propiedades físicas y mecánicas del aluminio*

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Densidad	2.7 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad	70 MPa
Elongación a la rotura	5.65 %
Conductividad eléctrica	38 m/Ω mm <sup>2</sup>
Comienzo de fusión	660°C
Módulo de corte	26 MPa
Resistencia a la tracción	160 – 200 MPa
Conductividad térmica	80 a 230 W/m-K



**Figura 45** Eje que forma parte de los eslabones



**Figura 46** Engranaje que transmite los movimientos

### 3.2.5. Módulo 5: Alimentación

**Tabla 24**

*Módulo 5 (Elección de sistema de alimentación para el prototipo)*

Opciones	Eficiencia	Costo	Orden de selección
Conexión a fuente de poder.	Muy alta	Alto	2
Batería recargable.	Alta	Alto	1
Conexión a computador.	Media	Bajo	3

**Tabla 25**

*Módulo 5 (Elección del sistema de alimentación del control remoto)*

Opciones	Eficiencia	Costo	Orden de selección	de
Batería recargable.	Muy alta	Medio	1	
Pilas AA.	Baja	Bajo	2	
Batería 9V.	Alta	Medio	3	
Conexión a Computador.	Media	Bajo	4	

### *Elección del sistema de alimentación para el prototipo: Batería recargable*

El sistema de alimentación a utilizar tanto en el prototipo y en el control remoto es mediante una batería recargable respectivamente. El uso de este tipo de batería facilitará el transporte, control y mantenimiento de prototipo. Por otra parte, al ser un sistema recargable no es necesario la implementación de una fuente de poder o un sistema de remplazo de baterías constante.

El tipo de batería a implementar es denominado de Polímero de Litio (LiPo), la cual es una batería recargable que es utilizada en sistemas electrónicos y robóticos. LA batería sugerida se la puede observar en la Figura 47.



**Figura 47** Batería recargable sugerida

### *3.2.6. Módulo 6: Comunicación*

**Tabla 26**

*Módulo 6 (Elección de sistema de comunicación)*

Opciones	Eficiencia	Costo	Orden de selección
Módulo bluetooth.	Media	Alto	2
Módulos radiofrecuencia emisor y receptor.	Alta	Medio	1
Conexión directa.	Muy alta	Bajo	3
Conexión a Computador.	Alta	Bajo	4

### *Elección de sistema de comunicación: Módulos radiofrecuencia emisor y receptor*

El sistema de comunicación seleccionado será de control mediante radiofrecuencia, el cual se realizará con un módulo TX, que transmitirá los datos correspondientes del robot desde un control remoto fabricado por autoría propia. Éste constará de botones de mando de los cuales con su acción mecánica (pulsación), el robot recibirá una señal por medio de un módulo RX y comenzará su ciclo de caminata; hasta que el botón sea soltado y por consiguiente el robot finalice el ciclo de marcha (Ver Figura 48).



**Figura 48** Módulos de radiofrecuencia sugeridos

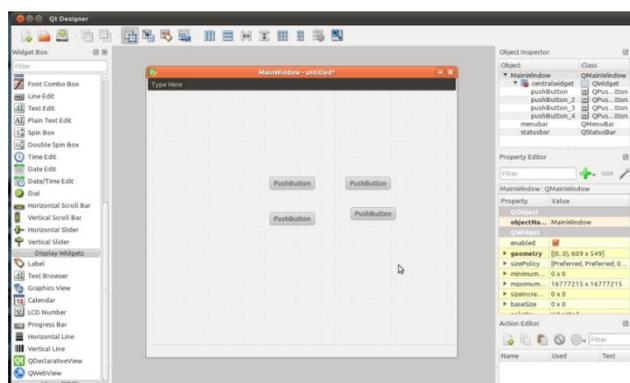
### *3.2.7. Módulo 7: HMI*

**Tabla 27**  
*Programas para HMI*

Opciones	Eficiencia	Complejidad	Orden de selección
Labview	Alta	Bajo	2
Mathlab	Media	Medio	3
Qt Designer	Muy alta	Bajo	1

### *Elección de programa para HMI: Qt Designer*

El programa para HMI seleccionado será Qt Designer, el cual desarrollará en el sistema operativo Ubuntu. El HMI constará de botones de mando de los cuales accionarán al robot y comenzará su ciclo de caminata; hasta que el botón seleccionado sea soltado y por consiguiente el robot finalice el ciclo de marcha (Ver Figura 49).



**Figura 49** HMI en Qt Designer

### 3.3. Conclusiones del listado de métricas

En la se muestra el listado de métricas seleccionadas y a considerar en el desarrollo e implementación del prototipo.

**Tabla 28**

*Listado de métricas*

Característica	Métrica
<b>Equilibrio</b>	- Cálculo de centro de masa: Teorema de distribución discreta de la materia.
<b>Mecanismo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mecanismo para cambio de posición del centro de gravedad hacia un costado: Motor ubicado en la cola.</li> <li>- Mecanismo para el control de equilibrio en la marcha bípeda: Inclinación del tronco.</li> <li>- Mecanismo para transmisión de movimiento en las rodillas: Tren de engranes.</li> <li>- Mecanismo para transmisión de movimiento en el fémur: Acople directo.</li> <li>- Mecanismo para transmisión de movimiento en el tobillo: Manivela corredera.</li> <li>- Actuadores: Servomotores.</li> </ul>
<b>Caminata</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elección del sistema sensorial de inclinación de la superficie: Acelerómetro ubicado en el pie.</li> <li>- Elección del sistema sensorial para colisiones: Sensor ultrasónico en los ojos.</li> <li>- Elección de tipo de movimiento para la marcha bípeda: Realizar caminata mientras un elemento de acción mecánica este pulsado.</li> </ul>

Continúa

<b>Estructura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elección del material a usar en la estructura: Impresión 3D en ABS.</li> <li>- Elección del material a usar en los engranajes: Aluminio.</li> <li>- Elección del material a usar en los ejes: Aluminio.</li> </ul>
<b>Alimentación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elección del sistema de alimentación para el prototipo: Batería recargable.</li> <li>- Elección del sistema de alimentación para el control remoto: Batería recargable.</li> </ul>
<b>Comunicación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elección de sistema de comunicación: Módulos radiofrecuencia emisor y receptor.</li> </ul>
<b>HMI</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La presentación del HMI será mediante el programa Qt Designer</li> </ul>

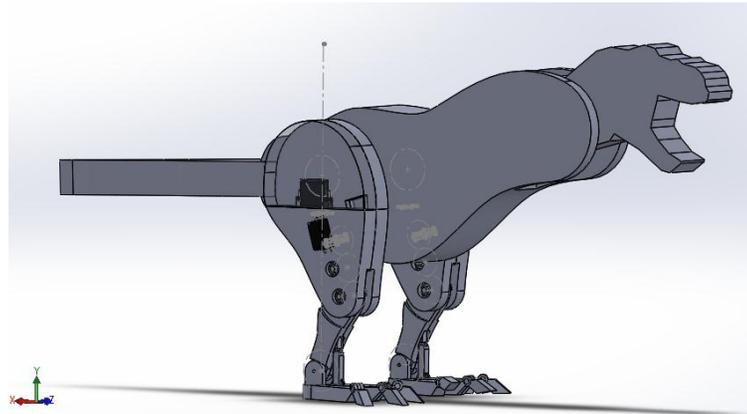
### 3.3.1. Visualización del primer concepto desarrollado.

El prototipo desarrollado tendrá movilidad en las articulaciones de las patas, las pantorrillas y la zona femoral, donde por medio de cálculos matemáticos el torso se inclinará a una posición favorable. Esta posición favorable significa que el centro de gravedad de todo el prototipo se encontrará dentro de la zona de apoyo que corresponde a la zona donde la proyección de dicho punto se halle dentro de la zona conformada con la planta del pie.

Para lograr un equilibrio óptimo debido al posible momento generado en el prototipo al estar apoyado solo en una extremidad se consideró el uso de un sistema de cambio de posición del centro de gravedad hacia un costado, utilizando el movimiento lateral de la cola.

El sistema sensorial permitirá al prototipo saber en todo instante la inclinación de la superficie donde se encuentre apoyado y a su vez la inclinación del tronco para un mejor control del mismo. Por otro lado, el sistema de “visión” permite al prototipo no colisionar con objetos que se encuentren en cercanía, los cuales interrumpan su caminata rectilínea.

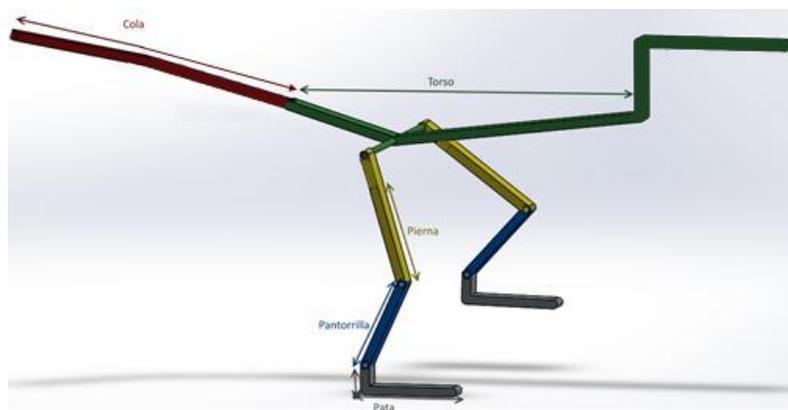
El primer concepto desarrollado es el siguiente (Ver Figura 50):



**Figura 50** Primer concepto desarrollado

### 3.4. Subsistema estructural

El análisis y definición del subsistema estructural está basado en el movimiento de eslabones los cuales componen las partes móviles de la estructura, los transmisores de movimiento y los elementos de estabilización. Las partes móviles o llamados eslabones son un total de 8 partes, en los cuales constan los siguientes: Pata derecha e izquierda, Pierna derecha e izquierda, Pantorrilla derecha e izquierda, Torso y Cola. En la Figura 51 se puede observar la distribución de los eslabones nombrados.



**Figura 51** Distribución de los eslabones

### 3.4.1. Análisis de transmisores de movimiento para cada eslabón

La transmisión de movimiento entre eslabones se la ha definido en tres tipos, los cuales son: transmisión directa, transmisión por medio de engranes, transmisión por medio de mecanismo.

#### *Transmisión directa*

La transmisión directa se define cuando el eslabón es movido directamente por el movimiento del actuador, por medio de un acople que sujeta al eslabón en un punto definido. Este tipo de transmisión no representa mayor problema en cálculos matemáticos puesto que en el caso de motores rotacionales el ángulo desplazado por el actuador es igual al ángulo desplazado por el eslabón. La ubicación del centro motriz del actuador está ubicada en el centro motriz de la articulación, correspondiente al eslabón definido.

Las articulaciones que están sujetas a una transmisión directa son:

- Movimiento de los fémures con respecto al torso.
- Movimiento de la cola con respecto al torso.

La ecuación que caracteriza la relación de giro del actuador con el movimiento del eslabón (Ver Ecuación Relación de giro de transmisión directa ( 7.)), está dada por:

$$\theta e_i(t) = \theta m_i(t) \tag{7.}$$

#### *Transmisión por medio de engranes*

La articulación que está sujeta a este tipo de transmisión, es el movimiento entre la pierna y la pantorrilla, en la cual se determinó utilizar un tren de engranajes que consta de tres engranes rectos de módulo 1, ángulo de presión de 20° y engranes de 41 dientes. Esta selección se debe a

que al utilizar un número impar de engranes en un tren permite utilizar la misma dirección de movimiento del engrane motriz en la dirección de movimiento del engrane conducido (es decir del eslabón a mover), por otro lado, el valor de ángulo de presión de  $20^\circ$  es el ángulo más usado en la construcción de trenes de potencia. La selección del número de dientes se debe a los requisitos preestablecidos del tamaño del prototipo donde su altura debía ser no menos de 50 cm, por lo cual para conservar proporciones el largo de sus piernas debía ser  $\frac{1}{2}$  de su altura total y el ancho de las mismas debía ser de  $\frac{1}{10}$  es decir 5 cm y a la precisión buscada.

Dados los datos de diseño de los engranes los cuales son:

- Número de dientes:  $Z = 41$
- Ángulo de presión:  $\alpha = 20^\circ$
- Módulo:  $m = 1$
- Cantidad de engranes: 3

El diámetro de paso o diámetro primitivo (el diámetro del engrane donde los dientes hacen contacto) está dado por la Ecuación de diámetro de paso ( 8.).

$$d = Z \times m = 1 \times 41 = 41 \text{ mm}$$

( 8.)

El paso diametral (representa al número de dientes por unidad de longitud de diámetro del engrane) está dado por la Ecuación de paso diametral ( 9.):

$$Pd = \frac{Z}{d} = \frac{41}{41} = 1$$

( 9.)

Según las tablas del AGMA para engranes de paso grueso las fórmulas de proporciones de los dientes en engranajes rectos de involuta de la norma americana son las siguientes:

$$a = \frac{1,000}{Pd} = \frac{1,000}{1} = 1 \text{ mm} \quad (10.)$$

$$b = \frac{1,250}{Pd} = \frac{1,250}{1} = 1,250 \text{ mm} \quad (11.)$$

$$c = \frac{0,250}{Pd} = \frac{0,250}{1} = 0,250 \text{ mm} \quad (12.)$$

$$hk = \frac{2,000}{Pd} = \frac{2,000}{1} = 2,000 \text{ mm} \quad (13.)$$

$$ht = \frac{2,250}{Pd} = \frac{2,250}{1} = 2,250 \text{ mm} \quad (14.)$$

$$rf = \frac{0,300}{Pd} = \frac{0,300}{1} = 0,300 \text{ mm} \quad (15.)$$

$$t = \frac{1,5708}{Pd} = \frac{1,5708}{1} = 1,5708 \text{ mm} \quad (16.)$$

La relación de transmisión de los engranes en contacto está dada por las ecuaciones ( 17.) y ( 18.):

$$r_1 = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{41}{41} = 1$$

(17.)

$$r_2 = \frac{Z_3}{Z_2} = \frac{41}{41} = 1$$

(18.)

La relación de transmisión del tren de engranes está dada por:

$$\omega_f = \frac{\omega_i}{r_1 \times r_2 \times \dots \times r_i}$$

$$\omega_e(t) = \frac{\omega_m(t)}{r_1 \times r_2} = \omega_m(t)$$

(19.)

En el resultado de la Ecuación ( 19.). Se indica que la velocidad con la que se moverá el eslabón pierna será igual a la velocidad angular con la que se mueva el motor del actuador que gestiona el movimiento.

La distancia entre centros se define como: la distancia que deben estar separados los engranes para que todos los dientes engranen y está dada por la ecuación ( 20.):

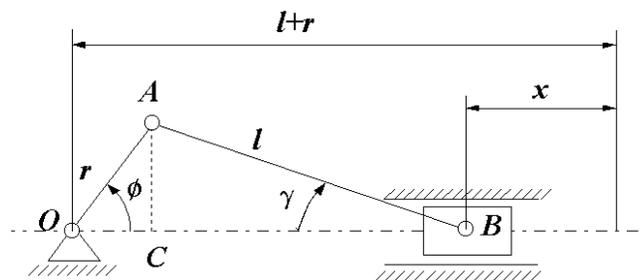
$$dc = \frac{d_1 + d_2}{2} = 41 \text{ mm}$$

(20.)

El resultado de la ecuación anterior indica que los engranes deben estar separados a una distancia de 41 mm para poder engranar correctamente.

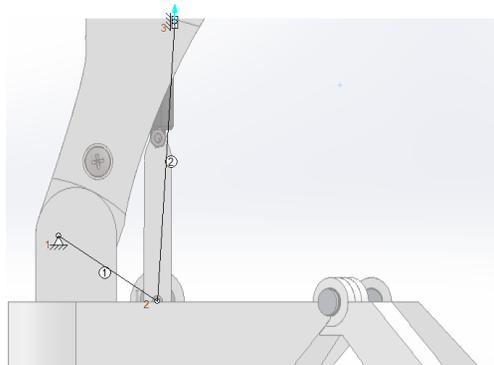
### *Transmisión por medio de mecanismo*

La transmisión por medio de mecanismo es definida como: el tipo de movimiento ejercido por un actuador se transforma en otro tipo de movimiento, hasta llegar al eslabón. La articulación que requiere este tipo de transmisión es la que provoca el movimiento entre la Pata y la Pantorrilla, debido al poco espacio disponible que se tiene en esta zona, se ha optado por seleccionar el mecanismo manivela corredera inverso, el cual transforma un movimiento lineal en un movimiento rotacional (Ver Figura 52).



**Figura 52** Mecanismo manivela corredera

En el caso de la transmisión de movimiento de la pata con respecto a la pantorrilla se ha dispuesto a usar un mecanismo manivela corredera orientado verticalmente, esto se debe a que se utilizará un micro-servomotor lineal de 20 mm de carrera. La disposición se puede observar representada por la Figura 53.



**Figura 53** Disposición del mecanismo de transmisión de movimiento

Como se observa en la figura el nodo representado con el número 1 es centro de rotación entre la Pata y la Pantorrilla, el nodo número 2 es la articulación que une la llamada manivela (eslabón 1), con la biela (eslabón 2) y el nodo número 3 es la articulación donde interseca el pistón de movimiento que se traslada linealmente, perteneciente al micro-servomotor lineal y la biela (eslabón 2).

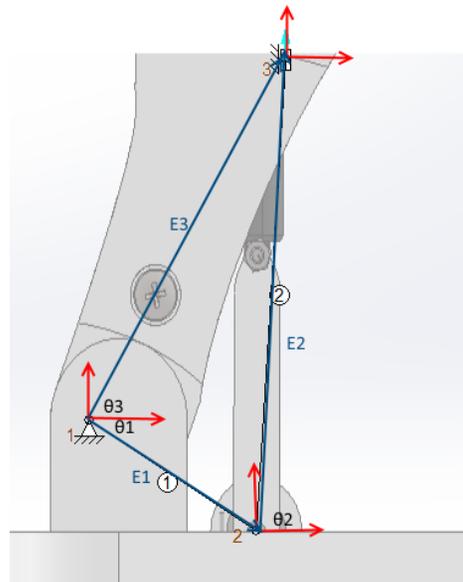
Los datos de los eslabones y nodos, pertenecientes al mecanismo son los siguientes:

- Nodo 1 (articulación pantorrilla - pata):
  - Ubicación en x:0 mm
  - Ubicación en y:0 mm
- Nodo 2 (unión pata – eslabón transmisor de movimiento del pistón):
  - Ubicación en x:30 mm
  - Ubicación en y: -20 mm
- Nodo 3 (unión eslabón transmisor de movimiento del pistón – pistón del micro-servomotor):
  - Ubicación en x:35,25 mm
  - Ubicación en y:64,835 mm
- Eslabón 1 (Manivela):
  - Longitud  $l_1 = 36,05551$  mm
- Eslabón 2 (Biela):
  - Longitud  $l_2 = 84,99729$  mm
- Eslabón 3 (distancia entre articulación pata – pantorrilla y nodo 3):
  - Longitud variable.

La resolución del mecanismo se llevará a cabo por el método de análisis cinemático de mecanismos, el cual consiste en sumar las posiciones de cada nodo como que fuese vectores y hallar las ecuaciones que determinan el movimiento. La ecuación (15.) determina el resultado del análisis cinemático de este mecanismo. Donde  $\overrightarrow{(E_i)}$ , representa al vector del eslabón “i” (Ver Figura 54).

$$\overrightarrow{E_1} + \overrightarrow{E_2} = \overrightarrow{E_3}$$

(21.)



**Figura 54** Análisis cinemático del mecanismo manivela corredera inverso

Separando la ecuación en términos de las coordenadas “x” queda lo siguiente:

$$\overrightarrow{E_{1x}} + \overrightarrow{E_{2x}} = \overrightarrow{E_{3x}}$$

$$l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_2) = 35,25$$

(22.)

Separando la ecuación en términos de las coordenadas “y” queda lo siguiente:

$$\overrightarrow{E_{1y}} + \overrightarrow{E_{2y}} = \overrightarrow{E_{3y}}$$

$$l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_2) = h_3$$

(23.)

Despejando las ecuaciones ( 22.) y ( 23.) queda:

$$(l_2)^2 = (x_3)^2 + (l_1)^2 + (h_3)^2 - 2l_1(x_3 \cos(\theta_1) + h_3 \sin(\theta_1))$$

(24.)

Con las Ecuaciones ( 22.) y ( 23.), se puede hallar la posición inicial y final del eslabón pata con respecto al eslabón pantorrilla. Cuando la carrera del pistón está a 0 mm de distancia con respecto al actuador lineal del micro-servomotor lineal, se dice que el eslabón se encuentra en la posición inicial; mientras que cuando la carrera del pistón se encuentra a 20 mm de distancia, se dice que el eslabón se encuentra en la posición final.

Para la posición inicial los valores de:

$$\theta_1 = \text{atan}\left(-\frac{20}{30}\right) = -33,69^\circ$$

$$\theta_2 = \text{atan}\left(-\frac{84,835}{5,25}\right) = 86,4588^\circ$$

$$h_3 = 64,835 \text{ mm}$$

Al reemplazar los valores en las ecuaciones ( 22.) y ( 23.) se cumplen las igualdades, lo que comprueba que las ecuaciones definen el estado cinemático de los eslabones.

Para la posición final donde la carrera del pistón del micro-servomotor lineal se ha extendido 20 mm hacia abajo, el valor de:

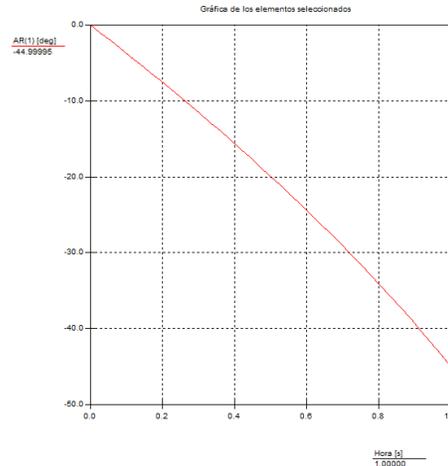
$$h_3 = 44,835 \text{ mm}$$

Al reemplazar los valores de  $x_3$ ,  $l_1$ ,  $l_2$  y  $h_3$  en la ecuación ( 24.) se obtiene:

$$(l_2)^2 = (x_3)^2 + (l_1)^2 + (h_3)^2 - 2l_1(x_3 \cos(\theta_1) + h_3 \sin(\theta_1))$$

$$\theta_1 = -78,69^\circ$$

El valor de  $\theta_1$  para la posición final indica que el eslabón pata se ha desplazado desde la posición  $-33,69^\circ$  hasta la posición  $-78,69$ , es decir ha recorrido un ángulo de  $45^\circ$  en sentido horario, por lo tanto, el eslabón pata será diseñado para soportar esta inclinación. La gráfica del desplazamiento angular del eslabón pata se muestra en la Figura 55.



**Figura 55** Gráfica del desplazamiento angular del eslabón Pata

### 3.4.2. Análisis y dimensionamiento de la extremidad

El prototipo robótico a implementar está compuesto por 8 partes llamadas eslabones, quienes brindan la movilidad y equilibrio del mismo. El robot es un bípedo caminador con forma zoomórfica, compuesto por eslabones de dos tipos: eslabones para movilidad o traslación y los eslabones para equilibrio o soporte.

El análisis y dimensionamiento especifica por separado cada eslabón y sus componentes, simplificarlos a una línea recta que expresa la longitud máxima que posee el eslabón entre

articulaciones y una las articulaciones pertenecientes al eslabón. Los eslabones presentan además la característica de tener la ubicación del centro de masa y del valor numérico de masa total por eslabón.

### *Eslabones para movilidad o traslación*

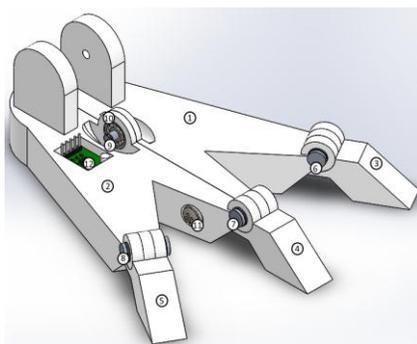
Los eslabones conforman las extremidades inferiores y son encargados de brindar movilidad y traslación al prototipo; la combinación de rotación de los eslabones pertenecientes a las extremidades inferiores alrededor de los ejes de centro de giro de cada articulación, facilita la caminata bípeda. Los eslabones que permiten una correcta coordinación y desempeño en las fases de caminata, tanto en la fase de apoyo y la fase de balanceo son: las piernas, las pantorrillas y las patas. A continuación se detallará los componentes de cada eslabón para movilidad, con lo cual se especificará el peso y la ubicación del centro de masa de cada uno.

### *Pata Derecha*

El primer eslabón de movimiento es el eslabón llamado Pata Derecha, cuyas funciones son: soportar todo el peso del prototipo robótico, generar un área de soporte que rodee el centro de masa del prototipo (cuando este es movido hacia la derecha, con el fin de lograr el equilibrio, en el momento donde el bípedo se encuentre sobre una sola extremidad), posicionar el siguiente paso en el movimiento y contener el sensor de inclinación de la superficie. Se resume en la Tabla 29 y en la Figura 56 los componentes del eslabón Pata Derecha, con sus respectivas masas y centros de masa.

**Tabla 29**  
*Componentes del Eslabón Pata Derecha*

Ítem	Componente	Masa (g)	Centro de masa (mm)		
			Eje X	Eje Y	Eje Z
1	pie derecho parte 1	76,7728	39,76	-27,53	-20,8
2	pie derecho parte 2	75,6704	40,8	-27,62	20,08
3	uña_1	4,6384	112,05	-30,07	-60,98
4	uña_2	4,6384	125,51	-30,07	0
5	uña_3	4,6384	112,05	-30,07	60,98
6	eje uña_1	2,65	97,72	-20	-52,71
7	eje uña_2	2,65	108,96	-20	0
8	eje uña_3	2,65	97,72	-20	52,71
9	eje inferior eslabón pie derecho	0,48	30	-20	0
10	Rodamiento d4	4	30	-20	0
11	Perno M5x20	0,59	84,81	-30	4,15
12	Sensor acelerómetro	2	27,55	-23,9	21,78
<b>Totales</b>		<b>181,3784</b>			



**Figura 56** Esquema eslabón Pata Derecha

El cálculo de centro de masa del eslabón Pata Derecha se realizará usando el Teorema de distribución discreta de la materia, el cual consiste en reducir el modelo a un sistema de partículas con masa puntual, donde la ubicación de cada partícula es el centro de masa de cada componente. En la siguiente ecuación ( 25.) indica cómo usar el teorema de manera correcta para un sistema de partículas, donde  $r_i$  es el radio vector de la posición del centro de masa con respecto al origen de coordenadas y  $m_i$  es la masa de cada componente del eslabón.

$$r_{cm} = r_G = \frac{\sum m_i \times r_i}{\sum m_i} = \frac{m_1 \times r_1 + m_2 \times r_2 + \dots + m_n \times r_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \quad (25.)$$

La Ecuación ( 25.) es una ecuación vectorial, por lo tanto se la descompone en sus componentes en los tres ejes coordenados (x, y, z), obteniendo las ecuaciones ( 26.), ( 27.) y ( 28.).

$$X_{cm} = X_G = \frac{\sum m_i \times x_i}{\sum m_i} = \frac{m_1 \times x_1 + m_2 \times x_2 + \dots + m_n \times x_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \quad (26.)$$

$$Y_{cm} = Y_G = \frac{\sum m_i \times y_i}{\sum m_i} = \frac{m_1 \times y_1 + m_2 \times y_2 + \dots + m_n \times y_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \quad (27.)$$

$$Z_{cm} = Z_G = \frac{\sum m_i \times z_i}{\sum m_i} = \frac{m_1 \times z_1 + m_2 \times z_2 + \dots + m_n \times z_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n} \quad (28.)$$

Para aplicar estas ecuaciones es necesario hallar el valor de la multiplicación del radio vector por la masa correspondiente al componente calculado y se lo realiza de la siguiente manera (como ejemplo en el componente 1 del eslabón Pata Derecha llamado pie derecho parte 1 ver Ecuación ( 29.)):

$$m_1 x_1 = m_{\text{piederechoparte1}} \times x_{\text{centrodemasapiederechoparte1}} = 76,7728 [g] \times 39,76 [mm]$$

$$= 3052,486528 [g - mm]$$

(29.)

En la Tabla 29 se observa los resultados del cálculo realizado para cada componente del eslabón Pata Derecha, con respecto a cada eje coordinado.

**Tabla 30***Cálculos del centro de masa para el eslabón Pata Derecha*

Cálculo del centro de masa (g-mm)				
Ítem	Componente	Masa x Eje X	Masa x Eje Y	Masa x Eje Z
1	pie derecho parte 1	3052,486528	-2113,555184	-1596,87424
2	pie derecho parte 2	3087,35232	-2090,016448	1519,461632
3	uña_1	519,73272	-139,476688	-282,849632
4	uña_2	582,165584	-139,476688	0
5	uña_3	519,73272	-139,476688	282,849632
6	eje uña_1	258,958	-53	-139,6815
7	eje uña_2	288,744	-53	0
8	eje uña_3	258,958	-53	139,6815
9	eje inferior eslabón pie derecho	14,4	-9,6	0
10	Rodamiento d4	120	-80	0
11	Perno M5x20	50,0379	-17,7	2,4485
12	Sensor acelerómetro	55,1	-47,8	43,56
<b>Totales</b>		<b>8807,667772</b>	<b>-4936,101696</b>	<b>-31,404108</b>

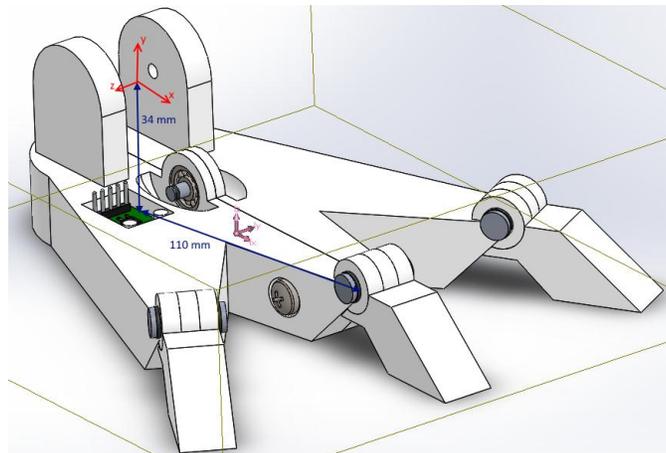
La posición del centro de masa para el eslabón Pata Derecha es el resultado de aplicar las ecuaciones ( 26.), ( 27.) y ( 28.), en los datos obtenidos de la Tabla 30, obteniendo los siguientes valores:

$$X_{\text{pataderecha}} = \frac{\sum m_i \times x_i}{\sum m_i} = \frac{8807,667772}{181,378} = 48,560 [mm]$$

$$Y_{pataderecha} = \frac{\sum m_i \times y_i}{\sum m_i} = \frac{-4936,101696}{181,378} = -27,214 \text{ [mm]}$$

$$Z_{pataderecha} = \frac{\sum m_i \times z_i}{\sum m_i} = \frac{-31,404108}{181,378} = -0,173 \text{ [mm]}$$

En la Figura 57 se observa el eslabón 1 nombrado Pata Derecha. Se encuentra representado la ubicación del origen de coordenadas, el centro de masa y las dimensiones considerables. El posterior tratamiento del eslabón como una línea recta simplificada, será usado como un vector de posición (para el análisis de posición de equilibrio en fase de caminata y de soporte) tanto para el centro de masa, como para la longitud total que se une con el siguiente eslabón. Las dimensiones de éste eslabón son 34 mm de altura y 110 mm de largo.



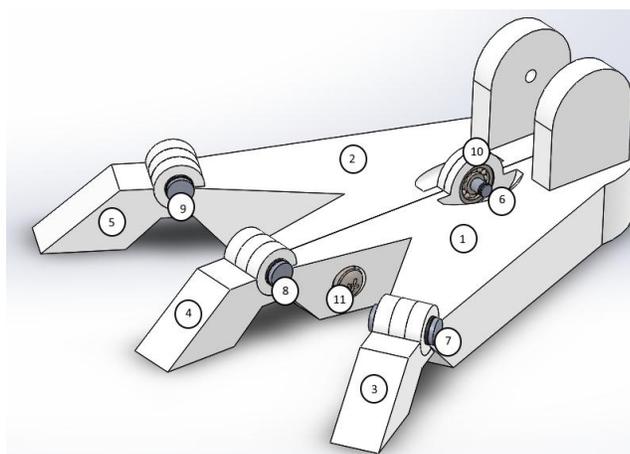
**Figura 57** Representación simplificada del eslabón Pata Derecha

### *Pata Izquierda*

El segundo eslabón de movimiento es el eslabón llamado Pata Izquierda, cuyas funciones son las mismas que el eslabón Pata Derecha, considerando que el centro de masa para el caso del eslabón Pata Izquierda se moverá hacia el lado izquierdo, y con la excepción de que el eslabón no contiene un sensor de inclinación. Se resume en la Tabla 31 y en la Figura 58 los componentes del eslabón Pata Izquierda, con sus respectivas masas y centros de masa.

**Tabla 31**  
*Componentes del Eslabón Pata Izquierda*

Ítem	Componente	Masa (g)	Centro de masa (mm)		
			Eje X	Eje Y	Eje Z
1	pie izquierdo parte 1	76,6792	40,61	-27,53	-20,09
2	pie izquierdo parte 2	76,7104	39,68	-27,54	20,09
3	uña_1	4,6384	112,05	-30,07	-60,98
4	uña_2	4,6384	125,51	-30,07	0
5	uña_3	4,6384	112,05	-30,07	60,98
6	eje inferior eslabón pie izquierdo	0,48	30	-20	0
7	eje uña_1	2,65	97,72	-20	0
8	eje uña_2	2,65	108,96	-20	0
9	eje uña_3	2,65	97,72	-20	52,71
10	Rodamiento d4	4	30	-20	0
11	Perno M5x20	0,59	84,81	-30	-4,15
<b>Totales</b>		<b>180,3248</b>			



**Figura 58** Esquema eslabón Pata Izquierda

El cálculo de centro de masa del eslabón Pata Izquierda al igual que todos los eslabones restantes se realizará de igual manera que el eslabón Pata derecha es decir usando el Teorema de distribución discreta de la materia. Al igual que el eslabón Pata Derecha para aplicar estas ecuaciones es necesario hallar el valor de la multiplicación del radio vector por la masa

correspondiente al componente calculado. En la Tabla 32 se observa los resultados del cálculo realizado para cada componente del eslabón Pata Izquierda, con respecto a cada eje coordenado.

**Tabla 32**  
*Cálculos del centro de masa para el eslabón Pata Izquierda*

Cálculo del centro de masa (g-mm)				
Ítem	Componente	Masa x Eje X	Masa x Eje Y	Masa x Eje Z
1	pie izquierdo parte 1	3113,942312	-2110,978376	-1540,485128
2	pie izquierdo parte 2	3043,868672	-2112,604416	1541,111936
3	uña_1	519,73272	-139,476688	-282,849632
4	uña_2	582,165584	-139,476688	0
5	uña_3	519,73272	-139,476688	282,849632
6	eje inferior eslabón pie izquierdo	14,4	-9,6	0
7	eje uña_1	258,958	-53	-139,6815
8	eje uña_2	288,744	-53	0
9	eje uña_3	258,958	-53	139,6815
10	Rodamiento d4	120	-80	0
11	Perno M5x20	50,0379	-17,7	-2,4485
<b>Totales</b>		<b>8770,539908</b>	<b>-4908,312856</b>	<b>-1,821692</b>

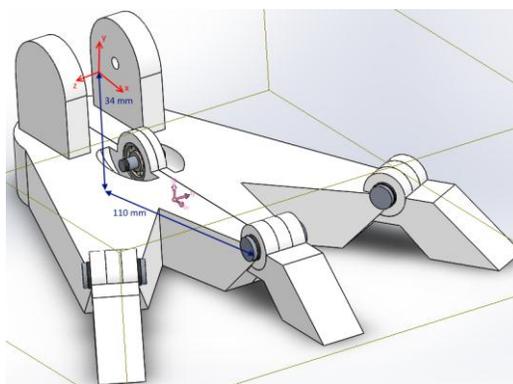
La posición del centro de masa para el eslabón Pata Derecha es el resultado de aplicar las ecuaciones ( 26.), ( 27.) y ( 28.), en los datos obtenidos de la Tabla 32, obteniendo los siguientes valores:

$$X_{pataizquierda} = \frac{\sum m_i \times x_i}{\sum m_i} = \frac{8770,539908}{180,3248} = 48,637 [mm]$$

$$Y_{pataizquierda} = \frac{\sum m_i \times y_i}{\sum m_i} = \frac{-4908,312856}{180,3248} = -27,219 [mm]$$

$$Z_{pataizquierda} = \frac{\sum m_i \times z_i}{\sum m_i} = \frac{-1,821692}{180,3248} = -0,010 [mm]$$

En la Figura 30 se observa el eslabón 2 nombrado Pata Izquierda. Se encuentra representado la ubicación del origen de coordenadas, el centro de masa y las dimensiones considerables. El posterior tratamiento del eslabón como una línea recta simplificada, será usado como un vector de posición tanto para el centro de masa, como para la longitud total que se une con el siguiente eslabón. Las dimensiones del eslabón son 34 mm de altura y 110 mm de largo.



**Figura 59** Representación simplificada del eslabón Pata Izquierda

### *Pantorrilla Derecha*

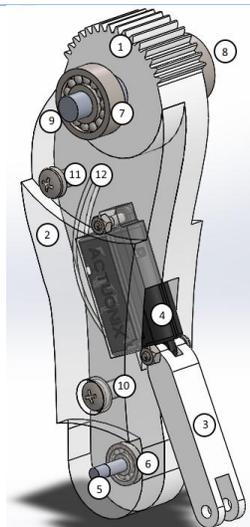
El tercer eslabón de movimiento es el eslabón llamado Pantorrilla Derecha, cuyas funciones son: soportar el peso del prototipo robótico y posicionar el siguiente paso en el movimiento. Se resume en la Tabla 33 y en la Figura 60 los componentes del eslabón Pantorrilla Derecha, con sus respectivas masas y centros de masa.

**Tabla 33**

#### *Componentes del Eslabón Pantorrilla Derecha*

Ítem	Componente	Masa (g)	Centro de masa (mm)		
			Eje X	Eje Y	Eje Z
1	parte pierna derecha engrane	60,8504	-3,61	75,67	-4,59
2	parte pierna derecha sin	41,6104	-5,41	53,34	6,86
3	eslabón movimiento pie derecho	5,3768	26,08	17,85	0
4	Micro Servomotor lineal	15	3,18	55,74	0,39
5	eje pierna pie derecha	1,02	0	0	0

6	Rodamiento d4	4	0	0	0
7	Rodamiento d8_1	11	-0,13	120,08	20
8	Rodamiento d8_2	11	-0,13	120,08	-20
9	eje pierna pospierna derecha	13,74	-0,13	120,08	0
10	Perno M5x20	0,59	-2,28	24,05	5,14
11	Perno M5x25	0,69	-22,7	86,3	1,51
12	Tuerca M5	0,11	-22,7	86,3	-11,35
<b>Totales</b>		<b>164,9876</b>			



**Figura 60** Esquema eslabón Pantorrilla Derecha

Del cálculo de centro de masa del eslabón Pantorrilla Derecha se obtiene la Tabla 34 donde se observa los resultados del cálculo realizado para cada componente del eslabón Pantorrilla Derecha, con respecto a cada eje coordenado.

**Tabla 34**

*Cálculos del centro de masa para el eslabón Pantorrilla Derecha*

Cálculo del centro de masa (g-mm)					
Ítem	Componente	Masa x Eje X	Masa x Eje Y	Masa x Eje Z	
1	parte pierna derecha engrane	-219,669944	4604,549768	-279,303336	
2	parte pierna derecha sin	-225,112264	2219,498736	285,447344	
3	eslabón movimiento pie derecho	140,226944	95,97588	0	
4	Micro Servomotor lineal	47,7	836,1	5,85	
5	eje pierna pie derecha	0	0	0	

<b>6</b>	Rodamiento d4	0	0	0
<b>7</b>	Rodamiento d8_1	-1,43	1320,88	220
<b>8</b>	Rodamiento d8_2	-1,43	1320,88	-220
<b>9</b>	eje pierna pospierna derecha	-1,7862	1649,8992	0
<b>10</b>	Perno M5x20	-1,3452	14,1895	3,0326
<b>11</b>	Perno M5x25	-15,663	59,547	1,0419
<b>12</b>	Tuerca M5	-2,497	9,493	-1,2485
<b>Totales</b>		<b>-281,006664</b>	<b>12131,01308</b>	<b>14,820008</b>

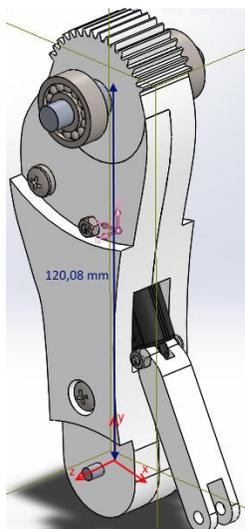
La posición del centro de masa para el eslabón Pantorrilla Derecha es el resultado de aplicar las ecuaciones ( 26.), ( 27.) y ( 28.), en los datos obtenidos de la Tabla 34, obteniendo los siguientes valores:

$$X_{pantorrilladerecha} = \frac{\sum m_i \times x_i}{\sum m_i} = \frac{-281,006664}{164,9876} = -1,703 [mm]$$

$$Y_{pantorrilladerecha} = \frac{\sum m_i \times y_i}{\sum m_i} = \frac{12131,01308}{164,9876} = 73,527 [mm]$$

$$Z_{pantorrilladerecha} = \frac{\sum m_i \times z_i}{\sum m_i} = \frac{14,820008}{164,9876} = 0,090 [mm]$$

En la Figura 61 se observa el eslabón 3 nombrado Pantorrilla Derecha. Se encuentra representado la ubicación del origen de coordenadas, el centro de masa y las dimensiones considerables. El posterior tratamiento del eslabón como una línea recta simplificada, será usado como un vector de posición tanto para el centro de masa, como para la longitud total que se une con el siguiente eslabón. Las dimensiones del eslabón son 120,08 mm de longitud total.



**Figura 61** Representación simplificada del eslabón Pantorrilla Derecha

### *Pantorrilla Izquierda*

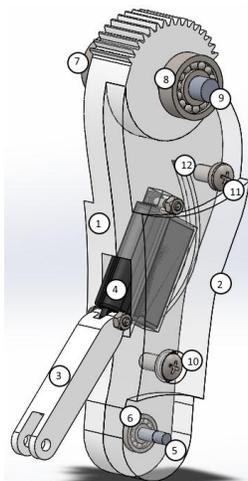
El cuarto eslabón de movimiento es el eslabón llamado Pantorrilla Izquierda, cuyas funciones son las mismas que el eslabón Pantorrilla Derecha. Se resume en la Tabla 35 y en la Figura 62 los componentes del eslabón Pantorrilla Izquierda, con sus respectivas masas y centros de masa.

**Tabla 35**

*Componentes del Eslabón Pantorrilla Izquierda*

Ítem	Componente	Masa (g)	Centro de masa (mm)		
			Eje X	Eje Y	Eje Z
1	parte pierna izquierda engrane	60,84	-3,61	75,67	4,59
2	parte pierna izquierda sin	35,3496	-5,41	53,34	-6,86
3	eslabón movimiento pie izquierdo	5,3768	26,08	17,85	0
4	Micro Servomotor lineal	15	3,18	55,74	0,39
5	eje pierna pie izquierda	1,02	0	0	0
6	Rodamiento d4	4	0	0	0
7	Rodamiento d8_1	11	-0,13	120,08	20
8	Rodamiento d8_2	11	-0,13	120,08	-20
9	eje pierna pospierna izquierda	13,74	-0,13	120,08	0
10	Perno M5x20	0,59	-2,28	24,05	-5,14
11	Perno M5x25	0,69	-22,7	86,3	-1,51

<b>12</b>	Tuerca M5	0,11	-22,7	86,3	11,35
<b>Totales</b>		<b>158,72</b>			



**Figura 62** Esquema eslabón Pantorrilla Izquierda

Del cálculo de centro de masa del eslabón Pantorrilla Izquierda se obtiene la Tabla 36 donde se observa los resultados del cálculo realizado para cada componente del eslabón Pantorrilla Izquierda, con respecto a cada eje coordenado.

**Tabla 36**

*Cálculos del centro de masa para el eslabón Pantorrilla Izquierda*

Cálculo del centro de masa (g-mm)				
Ítem	Componente	Masa x Eje X	Masa x Eje Y	Masa x Eje Z
1	parte pierna izquierda engrane	-219,6324	4603,7628	279,2556
2	parte pierna izquierda sin	-191,241336	1885,547664	-242,498256
3	eslabón movimiento pie izquierdo	140,226944	95,97588	0
4	Micro Servomotor lineal	47,7	836,1	5,85
5	eje pierna pie izquierda	0	0	0
6	Rodamiento d4	0	0	0
7	Rodamiento d8_1	-1,43	1320,88	220
8	Rodamiento d8_2	-1,43	1320,88	-220
9	eje pierna pospierna izquierda	-1,7862	1649,8992	0
10	Perno M5x20	-1,3452	14,1895	-3,0326

<b>11</b>	Perno M5x25	-15,663	59,547	-1,0419
<b>12</b>	Tuerca M5	-2,497	9,493	1,2485
	<b>Totales</b>	<b>-247,098192</b>	<b>11796,27504</b>	<b>39,781344</b>

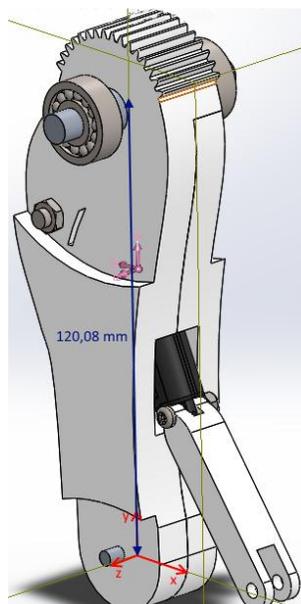
La posición del centro de masa para el eslabón Pantorrilla Izquierda es el resultado de aplicar las ecuaciones ( 26.), ( 27.) y ( 28.), en los datos obtenidos de la Tabla 36, obteniendo los siguientes valores:

$$X_{pantorrillaizquierda} = \frac{\sum m_i \times x_i}{\sum m_i} = \frac{-247,098192}{158,716} = -1,557 [mm]$$

$$Y_{pantorrillaizquierda} = \frac{\sum m_i \times y_i}{\sum m_i} = \frac{11796,27504}{158,716} = 74,323 [mm]$$

$$Z_{pantorrillaizquierda} = \frac{\sum m_i \times z_i}{\sum m_i} = \frac{39,781344}{158,716} = 0,251 [mm]$$

En la Figura 63 se observa el eslabón 4 nombrado Pantorrilla Izquierda. Se encuentra representado la ubicación del origen de coordenadas, el centro de masa y las dimensiones considerables. El posterior tratamiento del eslabón como una línea recta simplificada, será usado como un vector de posición tanto para el centro de masa, como para la longitud total que se une con el siguiente eslabón. Las dimensiones del eslabón son 120,08 mm de longitud total.



**Figura 63** Representación simplificada del eslabón Pantorrilla Izquierda

### *Pierna Derecha*

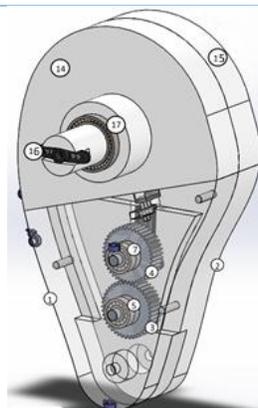
El quinto eslabón de movimiento es el eslabón llamado Pierna Derecha, cuyas funciones son: soportar el peso del prototipo robótico y posicionar el siguiente paso en el movimiento. Se resume en la Tabla 37, en la Figura 64 y en la Figura 65 los componentes del eslabón Pierna Derecha, con sus respectivas masas y centros de masa.

**Tabla 37**

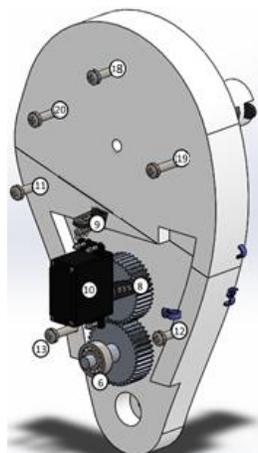
*Componentes del Eslabón Pierna Derecha*

Ítem	Componente	Masa (g)	Centro de masa (mm)		
			Eje X	Eje Y	Eje Z
1	parte pospierna derecha 1	290,784	-4,53	73,04	-18,15
2	parte pospierna derecha 2	275,4752	-4,69	71,72	17,97
3	engrane pierna derecha	58,56	0	41	-2,3
4	engrane pierna derecha para servo	52,4	0	82	-4,12
5	Rodamiento d8_1	11	0	41	20
6	Rodamiento d8_2	11	0	41	-20
7	Rodamiento d8_3	11	0	82	-20
8	Acople de servomotor_1	1,68	0	82	6,51

<b>9</b>	Acople de servomotor_2	1,68	-14,41	128,45	0
<b>10</b>	Servomotor 20kg_1	58,32	0	91,71	31,88
<b>11</b>	Perno M5x40_1	0,98	-65	136,08	4,32
<b>12</b>	Perno M5x40_2	0,98	55	68,08	4,32
<b>13</b>	Perno M5x40_3	0,98	-36	48,08	4,32
<b>14</b>	parte pospierna derecha 1 sup	172,0368	4,85	185,54	-22,69
<b>15</b>	parte pospierna derecha 2 sup	137,9872	5,95	187,34	15,42
<b>16</b>	Acople de servomotor_3	1,68	0	177,41	-103,91
<b>17</b>	Rodamiento d30	31,82	0	177,41	-63,5
<b>18</b>	Perno M5x40_4	0,98	0	228,08	4,32
<b>19</b>	Perno M5x40_5	0,98	50	178,08	4,32
<b>20</b>	Perno M5x40_6	0,98	-50	188,08	4,32
<b>Totales</b>		<b>1179,6232</b>			



**Figura 64** Esquema 1 eslabón Pierna Derecha



**Figura 65** Esquema 2 eslabón Pierna Derecha

Del cálculo de centro de masa del eslabón Pierna Derecha se obtiene la Tabla 38 donde se observa los resultados del cálculo realizado para cada componente del eslabón Pierna Derecha, con respecto a cada eje coordenado.

**Tabla 38**

*Cálculos del centro de masa para el eslabón Pierna Derecha*

Ítem	Componente	Cálculo del centro de masa (g-mm)		
		Masa x Eje X	Masa x Eje Y	Masa x Eje Z
1	parte pospierna derecha 1	-1317,25152	21238,86336	-5277,7296
2	parte pospierna derecha 2	-1291,978688	19757,08134	4950,289344
3	engrane pierna derecha	0	2400,96	-134,688
4	engrane pierna derecha para servo	0	4296,8	-215,888
5	Rodamiento d8_1	0	451	220
6	Rodamiento d8_2	0	451	-220
7	Rodamiento d8_3	0	902	-220
8	Acople de servomotor_1	0	137,76	10,9368
9	Acople de servomotor_2	-24,2088	215,796	0
10	Servomotor 20kg_1	0	5348,5272	1859,2416
11	Perno M5x40_1	-63,7	133,3584	4,2336
12	Perno M5x40_2	53,9	66,7184	4,2336
13	Perno M5x40_3	-35,28	47,1184	4,2336
14	parte pospierna derecha 1 sup	834,37848	31919,70787	-3903,514992
15	parte pospierna derecha 2 sup	821,02384	25850,52205	2127,762624

Continúa

<b>16</b>	Acople de servomotor_3	0	298,0488	-174,5688
<b>17</b>	Rodamiento d30	0	5645,1862	-2020,57
<b>18</b>	Perno M5x40_4	0	223,5184	4,2336
<b>29</b>	Perno M5x40_5	49	174,5184	4,2336
<b>20</b>	Perno M5x40_6	-49	184,3184	4,2336
<b>Totales</b>		<b>-1988,895888</b>	<b>128812,7296</b>	<b>-2973,327424</b>

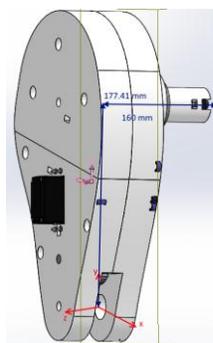
La posición del centro de masa para el eslabón Pierna Derecha es el resultado de aplicar las ecuaciones ( 26.), ( 27.) y ( 28.), en los datos obtenidos de la Tabla 38, obteniendo los siguientes valores:

$$X_{piernaderecha} = \frac{\sum m_i \times x_i}{\sum m_i} = \frac{-1988,895888}{1179,623} = -1,686 [mm]$$

$$Y_{piernaderecha} = \frac{\sum m_i \times y_i}{\sum m_i} = \frac{128812,7296}{1179,623} = 109,198 [mm]$$

$$Z_{piernaderecha} = \frac{\sum m_i \times z_i}{\sum m_i} = \frac{-2973,327424}{1179,623} = -2,521 [mm]$$

En la Figura 66 se observa el eslabón 5 nombrado Pierna Derecha. Se encuentra representado la ubicación del origen de coordenadas, el centro de masa y las dimensiones considerables. El posterior tratamiento del eslabón como una línea recta simplificada, será usado como un vector de posición tanto para el centro de masa, como para la longitud total que se une con el siguiente eslabón. Las dimensiones de éste eslabón son 177,41 mm de alto y 160 mm de largo.



**Figura 66** Representación simplificada del eslabón Pierna Derecha

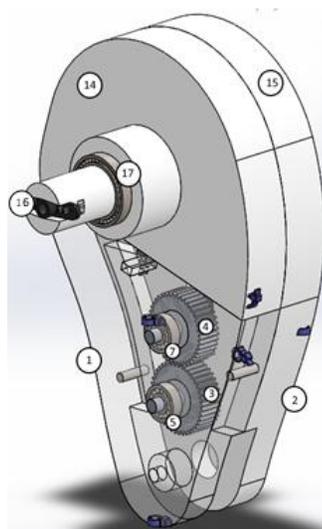
### *Pierna Izquierda*

El sexto eslabón de movimiento es el eslabón llamado Pierna Izquierda, cuyas funciones son las mismas que el eslabón Pierna Derecha. Se resume en la Tabla 39, en la Figura 67 y en la Figura 68 los componentes del eslabón Pierna Izquierda, con sus respectivas masas y centros de masa.

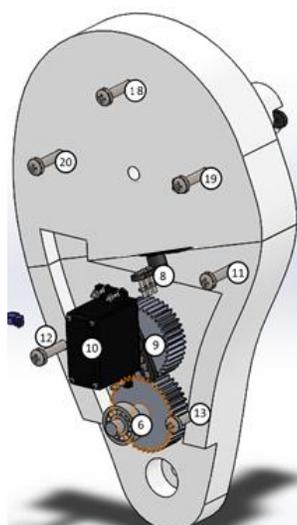
**Tabla 39**

*Componentes del Eslabón Pierna Izquierda*

Ítem	Componente	Masa (g)	Centro de masa (mm)		
			Eje X	Eje Y	Eje Z
1	parte pospierna izquierda 1	290,732	-4,53	73,04	18,15
2	parte pospierna izquierda 2	275,496	-4,69	71,72	-17,97
3	engrane pierna izquierda	58,56	0	41	2,3
4	engrane pierna izquierda para servo	52,4	0	82	4,12
5	Rodamiento d8_1	11	0	41	20
6	Rodamiento d8_2	11	0	82	20
7	Rodamiento d8_3	11	0	41	-20
8	Acople de servomotor_1	1,68	-14,41	128,45	0
9	Acople de servomotor_2	1,68	0	82	-6,51
10	Servomotor 20kg_1	58,32	0	91,71	-31,88
11	Perno M5x40_1	0,98	-65	136,08	-4,32
12	Perno M5x40_2	0,98	55	68,08	-4,32
13	Perno M5x40_3	0,98	-36	48,08	-4,32
14	parte pospierna izquierda 1 sup	171,8496	4,85	185,54	22,68
15	parte pospierna izquierda 2 sup	137,3112	5,93	187,31	-15,42
16	Acople de servomotor_3	1,68	0	177,41	103,91
17	Rodamiento d30	31,82	0	177,41	63,5
18	Perno M5x40_4	0,98	0	228,08	-4,32
19	Perno M5x40_5	0,98	-50	188,08	-4,32
20	Perno M5x40_6	0,98	50	178,08	-4,32
<b>Totales</b>		<b>1178,7288</b>			



**Figura 67** Esquema 1 eslabón Pierna Izquierda



**Figura 68** Esquema 2 eslabón Pierna Izquierda

Del cálculo de centro de masa del eslabón Pierna Izquierda se obtiene la Tabla 39 donde se observa los resultados del cálculo realizado para cada componente del eslabón Pierna Izquierda, con respecto a cada eje coordenado.

**Tabla 40***Cálculos del centro de masa para el eslabón Pierna Izquierda*

Cálculo del centro de masa (g-mm)				
Ítem	Componente	Masa x Eje X	Masa x Eje Y	Masa x Eje Z
1	parte pospierna izquierda 1	-1317,01596	21235,06528	5276,7858
2	parte pospierna izquierda 2	-1292,07624	19758,57312	-4950,66312
3	engrane pierna izquierda	0	2400,96	134,688
4	engrane pierna izquierda para servo	0	4296,8	215,888
5	Rodamiento d8_1	0	451	220
6	Rodamiento d8_2	0	902	220
7	Rodamiento d8_3	0	451	-220
8	Acople de servomotor_1	-24,2088	215,796	0
9	Acople de servomotor_2	0	137,76	-10,9368
10	Servomotor 20kg_1	0	5348,5272	-1859,2416
11	Perno M5x40_1	-63,7	133,3584	-4,2336
12	Perno M5x40_2	53,9	66,7184	-4,2336
13	Perno M5x40_3	-35,28	47,1184	-4,2336
14	parte pospierna izquierda 1 sup	833,47056	31884,97478	3897,548928
15	parte pospierna izquierda 2 sup	814,255416	25719,76087	-2117,338704
16	Acople de servomotor_3	0	298,0488	174,5688
17	Rodamiento d30	0	5645,1862	2020,57
18	Perno M5x40_4	0	223,5184	-4,2336
19	Perno M5x40_5	-49	184,3184	-4,2336
20	Perno M5x40_6	49	174,5184	-4,2336
<b>Totales</b>		<b>-1995,267824</b>	<b>128644,9291</b>	<b>2976,467704</b>

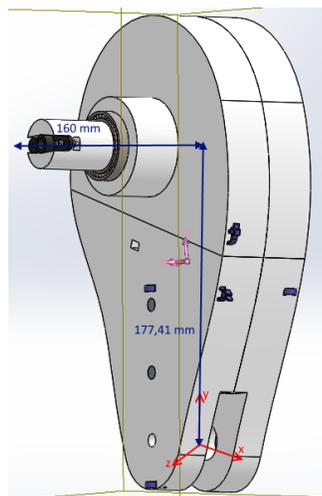
La posición del centro de masa para el eslabón Pierna Izquierda es el resultado de aplicar las ecuaciones ( 26.), ( 27.) y ( 28.), en los datos obtenidos de la Tabla 40, obteniendo los siguientes valores:

$$X_{piernaizquierda} = \frac{\sum m_i \times x_i}{\sum m_i} = \frac{-1995,267824}{1178,729} = -1,693 [mm]$$

$$Y_{\text{piernaizquierda}} = \frac{\sum m_i \times y_i}{\sum m_i} = \frac{128644,9291}{1178,729} = 109,139 \text{ [mm]}$$

$$Z_{\text{piernaizquierda}} = \frac{\sum m_i \times z_i}{\sum m_i} = \frac{2976,467704}{1178,729} = 2,525 \text{ [mm]}$$

En la Figura 69 se observa el eslabón 6 nombrado Pierna Izquierda. Se encuentra representado la ubicación del origen de coordenadas, el centro de masa y las dimensiones considerables. El posterior tratamiento del eslabón como una línea recta simplificada, será usado como un vector de posición tanto para el centro de masa, como para la longitud total que se une con el siguiente eslabón. Las dimensiones de éste eslabón son 177,41 mm de alto y 160 mm de largo.



**Figura 69** Representación simplificada del eslabón Pierna Izquierda

### *Eslabones para equilibrio o soporte*

Dichos eslabones conforman los miembros superiores, la cola y el tronco. Son encargados de lograr el equilibrio del prototipo por medio de su ubicación y orientación. Cuando el prototipo se encuentra en la fase de apoyo bipodal el eslabón torso se inclina hacia el ángulo calculado, logrando así posicionar el centro de masa de todo el prototipo sobre el plano formado por las dos líneas de acción de las fuerzas de reacción ejercidas en la planta de las patas. Por otro lado, el

movimiento realizado por la cola permite posicionar el centro de masa hacia los costados, esta acción es muy imprescindible debido a que cuando el bípedo este soportado solo por una pata, el plano de formado por la línea de acción de la fuerza de reacción estará ubicado sobre solo una pata. A continuación, se detallará los componentes de cada eslabón para equilibrio, con lo cual se especificará el peso y la ubicación del centro de masa de cada uno.

### *Torso*

El primer eslabón de equilibrio es el eslabón llamado Torso, cuyas funciones son: controlar el equilibrio del prototipo (mediante el posicionamiento del centro de masa sobre el área de soporte de las patas), contener el sistema de control, el sistema de análisis, sistema de potencia y de alimentación. Se resume en la Tabla 41, en la Figura 70, en la Figura 71 y en la Figura 72 los componentes del eslabón Torso, con sus respectivas masas y centros de masa.

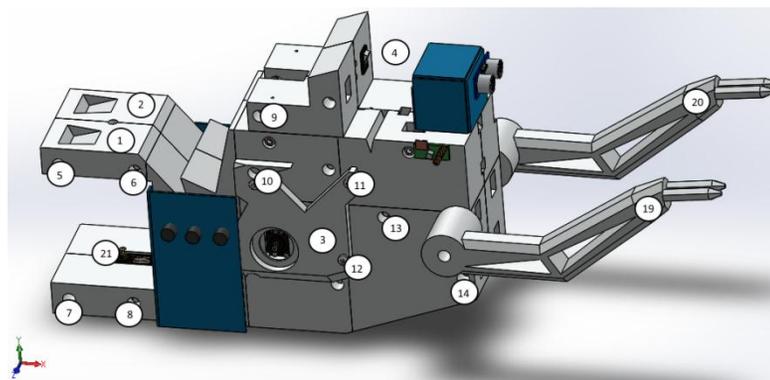
**Tabla 41**  
*Componentes del Eslabón Torso*

Ítem	Componente	Masa (g)	Centro de masa (mm)		
			Eje X	Eje Y	Eje Z
1	Torso central derecho	1170,988	78,94	56,07	26,15
2	Torso central izquierdo	1178,9128	77,4	55,9	-25,83
3	Torso derecha	937,8824	116,92	65,32	71,31
4	Torso izquierda	940,8672	114,94	64,78	-71,29
5	Perno M5x45_1	1,08	189,23	7	-1,81
6	Perno M5x45_2	1,08	189,23	202	-1,81
7	Perno M5x45_3	1,08	-185	-67,5	-1,81
8	Perno M5x45_4	1,08	-185	62,5	-1,81
9	Perno M5x40_1	0,98	203	57	50,62
10	Perno M5x40_2	0,98	218	127	50,62
11	Perno M5x40_3	0,98	-89,88	0	50,62
12	Perno M5x40_4	0,98	-89,88	0	-50,62
13	Perno M5x40_5	0,98	218	127	-50,62

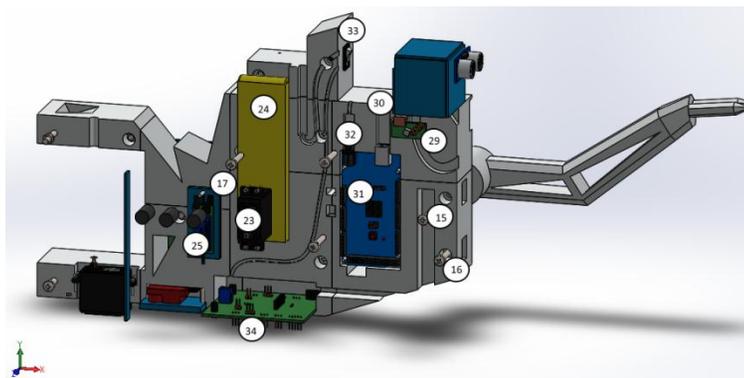


Continúa

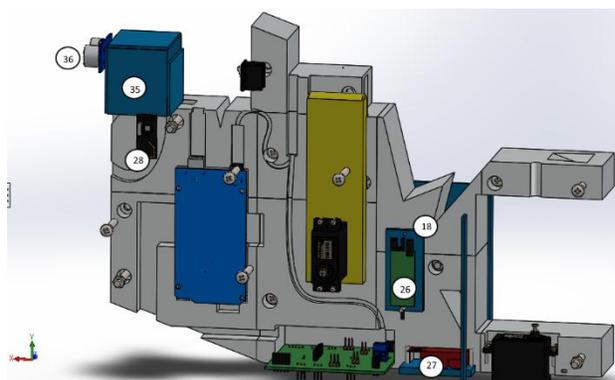
14	Perno M5x40_6	0,98	203	57	-50,62
15	Perno M5x40_7	0,98	269,23	87	-91,62
16	Perno M5x40_8	0,98	269,23	87	91,62
17	tapaubec_1	6,0216	-52	-6,42	-2,51
18	tapaubec_2	6,0216	-52	-6,42	2,51
19	Brazo derecha	80,9432	349,5	84,27	119,1
20	Brazo izquierda	80,7248	349,5	84,27	-119,1
21	Servomotor 20kg_1	58,32	-140,16	-71,78	0
22	Servomotor 20kg_2	58,32	0	9,71	-30,72
23	Servomotor 20kg_3	58,32	0	9,71	30,72
24	Batería LiPo 5000 mAh	361	0	54,98	0,06
25	UBEC_1	11	-51,96	-10,11	9,21
26	UBEC_2	11	-52,04	-10,11	-9,12
27	Tester de LiPo	10	-72,26	-70,57	0
28	NRF24L01	10	161,43	197,34	-0,33
29	Receptor RF334	10	215,02	205,37	0,68
30	Cable Arduino	15	135,47	86,75	0
31	Arduino Mega	55	94,37	15,85	-4,42
32	Plug alimentación Arduino	10	75	80,38	0,45
33	Switch grande	12	91,57	175,01	0
34	Placa control motores	20	-0,5	-76,55	-0,23
35	Placa control comunicación	10	203,56	163,83	-31,2
36	Ultrasónico	5	350	90,5	0
<b>Totales</b>			<b>5234,42</b>		



*Figura 70* Esquema 1 eslabón Torso



**Figura 71** Esquema 2 eslabón Torso



**Figura 72** Esquema 3 eslabón Torso

Del cálculo de centro de masa del eslabón Torso se obtiene la Tabla 42 donde se observa los resultados del cálculo realizado para cada componente del eslabón Torso, con respecto a cada eje coordenado.

**Tabla 42**

*Cálculos del centro de masa para el eslabón Torso*

Cálculo del centro de masa (g-mm)				
Ítem	Componente	Masa x Eje X	Masa x Eje Y	Masa x Eje Z
1	Torso central derecho	92437,79272	65657,29716	30621,3362
2	Torso central izquierdo	91247,85072	65901,22552	-30451,31762
3	Torso derecha	109657,2102	61262,47837	66880,39394
4	Torso izquierda	108143,276	60949,37722	-67074,42269
5	Perno M5x45_1	204,3684	7,56	-1,9548
6	Perno M5x45_2	204,3684	218,16	-1,9548
7	Perno M5x45_3	-199,8	-72,9	-1,9548

Continúa

8	Perno M5x45_4	-199,8	67,5	-1,9548
9	Perno M5x40_1	198,94	55,86	49,6076
10	Perno M5x40_2	213,64	124,46	49,6076
11	Perno M5x40_3	-88,0824	0	49,6076
12	Perno M5x40_4	-88,0824	0	-49,6076
13	Perno M5x40_5	213,64	124,46	-49,6076
14	Perno M5x40_6	198,94	55,86	-49,6076
15	Perno M5x40_7	263,8454	85,26	-89,7876
16	Perno M5x40_8	263,8454	85,26	89,7876
17	tapaubec_1	-313,1232	-38,658672	-15,114216
18	tapaubec_2	-313,1232	-38,658672	15,114216
19	Brazo derecha	28289,6484	6821,083464	9640,33512
20	Brazo izquierda	28213,3176	6802,678896	-9614,32368
21	Servomotor 20kg_1	-8174,1312	-4186,2096	0
22	Servomotor 20kg_2	0	566,2872	-1791,5904
23	Servomotor 20kg_3	0	566,2872	1791,5904
24	Batería LiPo 5000 mAh	0	19847,78	21,66
25	UBEC_1	-571,56	-111,21	101,31
26	UBEC_2	-572,44	-111,21	-100,32
27	Tester de LiPo	-722,6	-705,7	0
28	NRF24L01	1614,3	1973,4	-3,3
29	Receptor RF334	2150,2	2053,7	6,8
30	Cable Arduino	2032,05	1301,25	0
31	Arduino Mega	5190,35	871,75	-243,1
32	Plug alimentación Arduino	750	803,8	4,5
33	Switch grande	1098,84	2100,12	0
34	Placa control motores	-10	-1531	-4,6
35	Placa control comunicación	2035,6	1638,3	-312
36	Ultrasónico	1750	452,5	0
<b>Totales</b>		<b>482813,3261</b>	<b>307023,7184</b>	<b>-4583,689368</b>

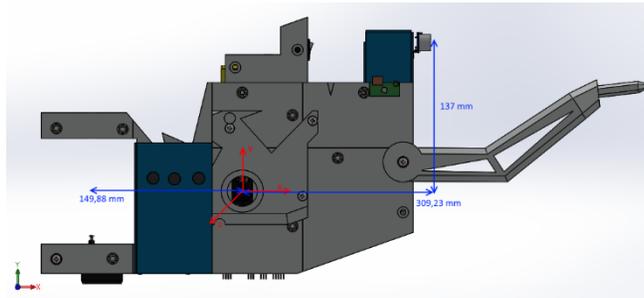
La posición del centro de masa para el eslabón Torso es el resultado de aplicar las ecuaciones ( 26.), ( 27.) y ( 28.), en los datos obtenidos de la Tabla 42, obteniendo los siguientes valores:

$$X_{torso} = \frac{\sum m_i \times x_i}{\sum m_i} = \frac{482813,3261}{5234,420} = 92,238 \text{ [mm]}$$

$$Y_{torso} = \frac{\sum m_i \times y_i}{\sum m_i} = \frac{307023,7184}{5234,420} = 58,655 \text{ [mm]}$$

$$Z_{torso} = \frac{\sum m_i \times z_i}{\sum m_i} = \frac{-4583,689368}{5234,420} = -0,876 \text{ [mm]}$$

En la Figura 73 se observa el eslabón 7 nombrado Torso. Se encuentra representado la ubicación del origen de coordenadas, el centro de masa y las dimensiones considerables. El posterior tratamiento del eslabón como una línea recta simplificada, será usado como un vector de posición tanto para el centro de masa, como para la longitud total que se une con el siguiente eslabón. Las dimensiones del eslabón son hacia el eslabón cabeza 309,23 mm de largo por 137 mm de alto y hacia el eslabón cola 149,88 mm de largo.



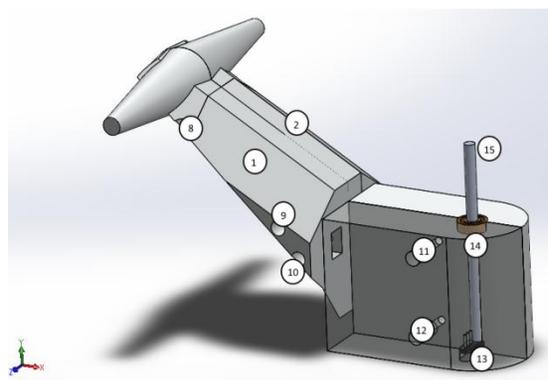
**Figura 73** Representación simplificada del eslabón Torso

### Cola

El segundo eslabón de equilibrio es el eslabón llamado Cola, cuya función es: controlar el equilibrio del prototipo (mediante el posicionamiento del centro de masa sobre el área de soporte de las patas. Se resume en la Tabla 43 y en la Figura 74 los componentes del eslabón Cola, con sus respectivas masas y centros de masa.

**Tabla 43***Componentes del Eslabón Cola*

Ítem	Componente	Masa (g)	Centro de masa (mm)		
			Eje X	Eje Y	Eje Z
1	Cola derecha punta	382,6344	-251,41	154,58	38,35
2	Cola izquierda punta	383,1752	-251,41	154,58	-38,35
3	Tuerca M5_1	0,19	-20	32	-19,65
4	Tuerca M5_2	0,19	-20	-13	-19,65
5	Tuerca M5_3	0,19	-130	79,5	-19,65
6	Tuerca M5_4	0,19	-225	54,5	-19,65
7	Tuerca M5_5	0,19	-305	187,5	-19,65
8	Perno M5x40_1	0,98	-20	32	1,62
9	Perno M5x40_2	0,98	-20	-13	1,62
10	Perno M5x40_3	0,98	-130	79,5	1,62
11	Perno M5x40_4	0,98	-225	54,5	1,62
12	Perno M5x40_5	0,98	-305	187,5	1,62
13	Acople de servomotor	1,68	0	-16,91	0
14	Rodamiento d8	11	0	38,51	0
15	Eje cola punta	17,64	0	49,98	0
<b>Totales</b>		<b>843,9796</b>			

**Figura 74** Esquema eslabón Cola

Del cálculo de centro de masa del eslabón Cola se obtiene la Tabla 44 donde se observa los resultados del cálculo realizado para cada componente del eslabón Cola, con respecto a cada eje coordenado.

**Tabla 44***Cálculos del centro de masa para el eslabón Cola*

Cálculo del centro de masa (g-mm)				
Ítem	Componente	Masa x Eje X	Masa x Eje Y	Masa x Eje Z
1	Cola derecha punta	-699582,1145	430139,6256	106714,0292
2	Cola izquierda punta	-699718,077	430223,2224	-106734,7689
3	Tuerca M5_1	-3,8	6,08	-3,7335
4	Tuerca M5_2	-3,8	-2,47	-3,7335
5	Tuerca M5_3	-24,7	15,105	-3,7335
6	Tuerca M5_4	-42,75	10,355	-3,7335
7	Tuerca M5_5	-57,95	35,625	-3,7335
8	Perno M5x40_1	-19,6	31,36	1,5876
9	Perno M5x40_2	-19,6	-12,74	1,5876
10	Perno M5x40_3	-127,4	77,91	1,5876
11	Perno M5x40_4	-220,5	53,41	1,5876
12	Perno M5x40_5	-298,9	183,75	1,5876
13	Acople de servomotor	0	-28,4088	0
14	Rodamiento d8	0	423,61	0
15	Eje cola punta	0	881,6472	0
<b>Totales</b>		<b>-1400119,192</b>	<b>862038,0814</b>	<b>-31,46918</b>

La posición del centro de masa para el eslabón Cola es el resultado de aplicar las ecuaciones ( 26.), ( 27.) y ( 28.), en los datos obtenidos de la Tabla 44, obteniendo los siguientes valores:

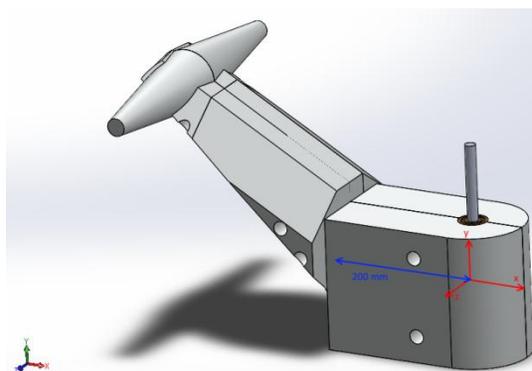
$$X_{puntacola} = \frac{\sum m_i \times x_i}{\sum m_i} = \frac{-1400119,192}{5601,980} = -249,933 [mm]$$

$$Y_{puntacola} = \frac{\sum m_i \times y_i}{\sum m_i} = \frac{862038,0814}{5601,980} = 153,881 [mm]$$

$$Z_{puntacola} = \frac{\sum m_i \times z_i}{\sum m_i} = \frac{-31,46918}{5601,980} = -0,006 [mm]$$

En la Figura 75 se observa el eslabón 8 nombrado Cola. Se encuentra representado la ubicación del origen de coordenadas, el centro de masa y las dimensiones considerables. El posterior tratamiento del eslabón como una línea recta simplificada, será usado como un vector

de posición tanto para el centro de masa, como para la longitud total que se une con el siguiente eslabón. Las dimensiones del eslabón son 200 mm de longitud total.



**Figura 75** Representación simplificada del eslabón Cola

En la Tabla 45 se recopila la información obtenida de los cálculos de la ubicación del centro de masa, longitud y la masa de cada eslabón. Y en la Figura 76 se observa la ubicación de cada eslabón en el conjunto del prototipo robótico.

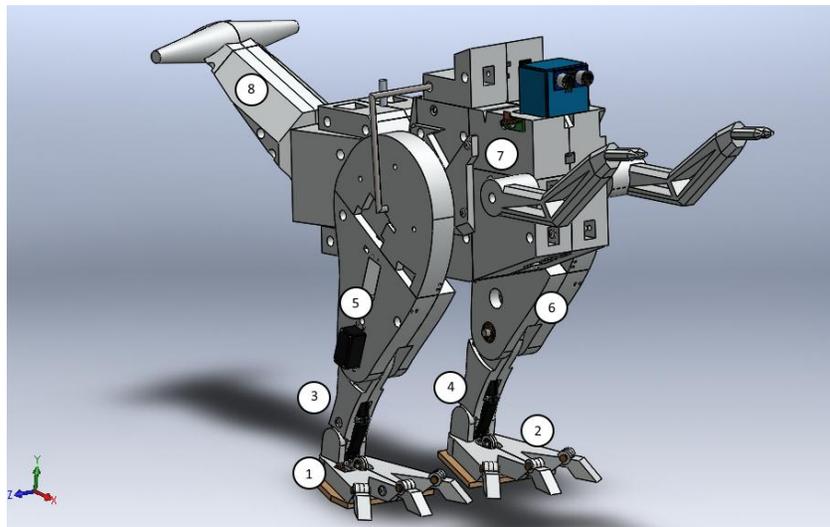
**Tabla 45**

*Resumen de los centros de masa y longitudes de cada eslabón*

Ítem	Eslabón	Masa (g)	Centro de Gravedad (mm)			Dimensiones Considerables (mm)		
			Eje X	Eje Y	Eje Z	Longitud	Eje X	Eje Y
1	Eslabón Pata Derecha	181,378	48,560	-27,214	-0,173	-	110	34
2	Eslabón Pata Izquierda	180,325	48,637	-27,219	-0,010	-	110	34
3	Eslabón Pantorrilla Derecha	164,988	-1,703	73,527	0,090	120,08	-	-
4	Eslabón Pantorrilla Izquierda	158,716	-1,557	74,323	0,251	120,08	-	-
5	Eslabón Pierna	1179,623	-1,686	109,198	-2,521	177,41	-	-

Continúa

Derecha								
<b>6</b>	Eslabón Pierna Izquierda	1178,729	-1,693	109,139	2,525	177,41	-	-
<b>7</b>	Eslabón Torso	3234,420	92,238	58,655	-0,876	-	309,23	137 y 0
							-	149,88
<b>8</b>	Eslabón Cola Punta	1601,980	-249,933	153,881	-0,006	200	-	-
	<b>Total</b>	<b>9268,988</b>						



**Figura 76** Conjunto de eslabones en el prototipo bípedo robótico

### 3.4.3. Análisis y simulación CAE

Las fuerzas aplicadas a cada parte del prototipo robótico se determinaron mediante el análisis de los pesos que soportaran. Las fuerzas aplicadas y las sujeciones a cada parte serán:

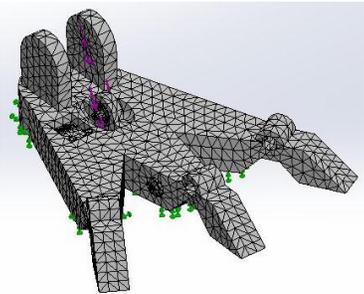
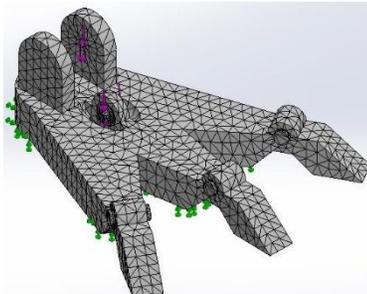
- Para el análisis de los pies lo asumiremos en caminata, es decir que el pie soportara todo el peso del prototipo. Por lo tanto, se aplicará una fuerza de 90N en el eje inferior del pie y en su tobillo, y su apoyo será la planta completa del pie.

- El análisis de la pantorrilla al igual que el pie asumiremos en caminata, pero soportará el peso del prototipo sin el pie. Se aplicará una fuerza de 90N en el eje de la rodilla y en el eje de la pierna-pie. Sus apoyos serán los mismos ejes donde se aplica la fuerza.
- El análisis de la pierna lo asumiremos en caminata, soportará el peso del prototipo sin el pie y la pantorrilla. Se aplicará una fuerza de 88N en superficie de unión al muslo, mientras que su apoyo será en la rodilla.
- El análisis del muslo será igual a la pantorrilla. Se aplicará una fuerza de 88N en el eje de la cadera y su apoyo será la superficie de unión la pierna.
- El análisis del torso posee dos fuerzas diferentes, una fuerza de 16,5N aplicado en el pecho por parte de los brazos; y una fuerza de 25N en el eje de la cola. Su apoyo se encuentra en la cadera.

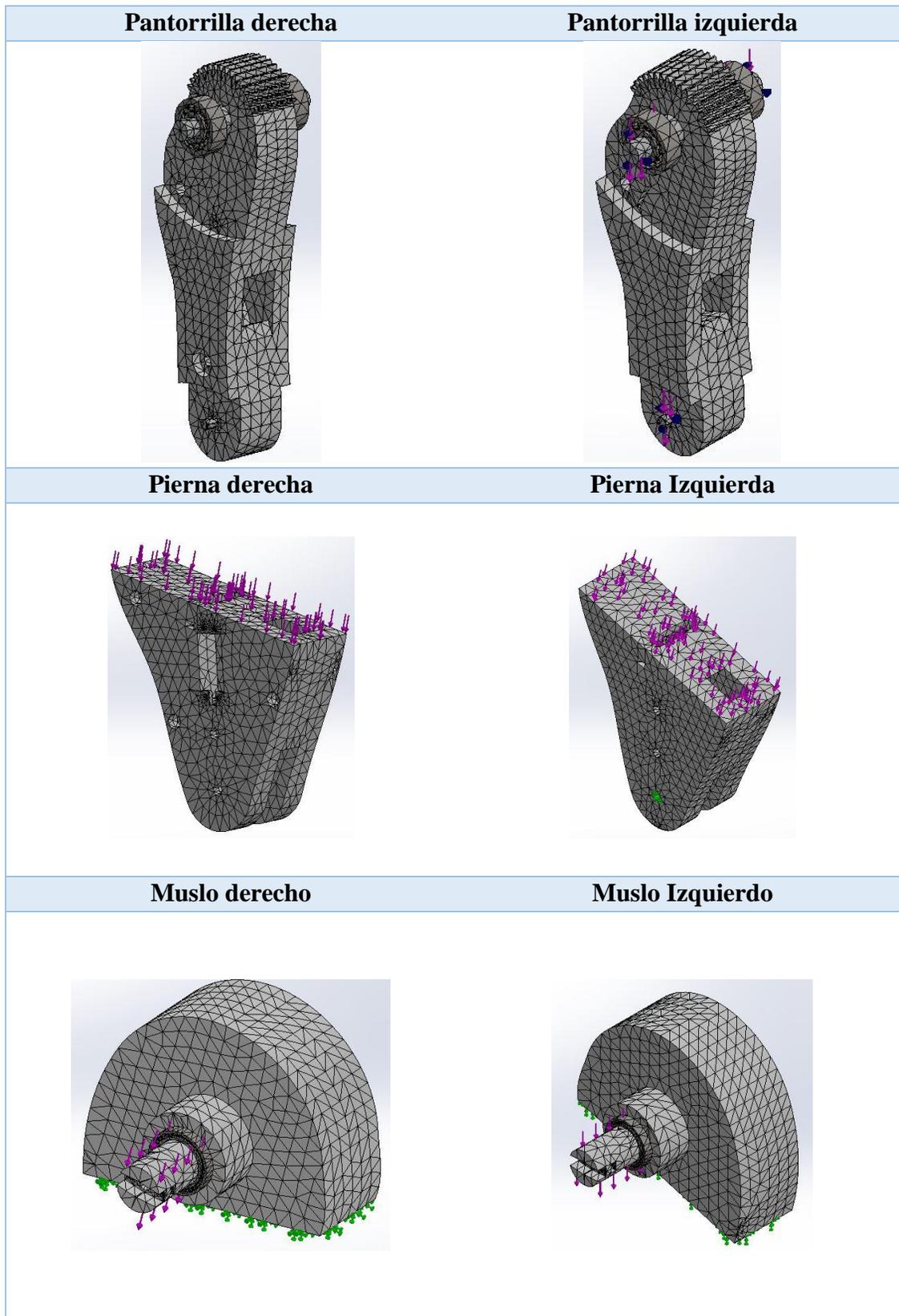
En la Tabla 46 se muestra el mallado realizado a cada una de las partes del prototipo robótico de un bípedo zoomórfico.

**Tabla 46**

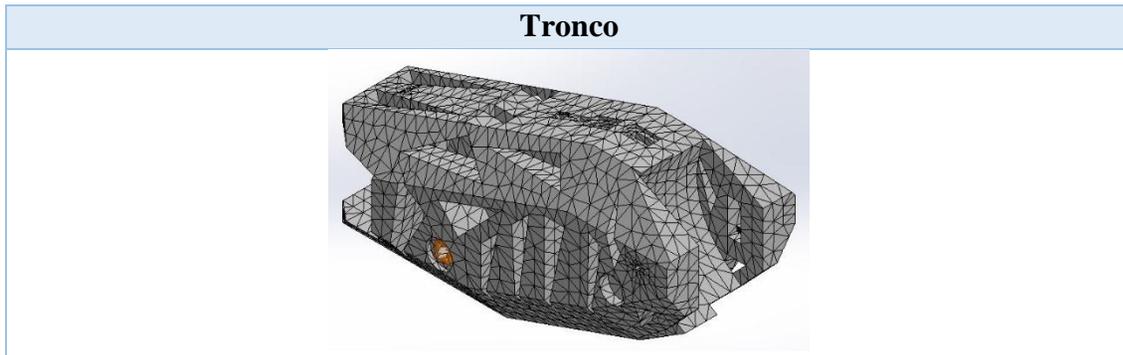
*Mallado de partes del prototipo robótico de un bípedo zoomórfico*

Eslabones	
Pie Derecho	Pie Izquierdo
	



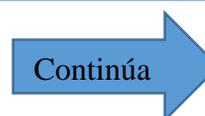
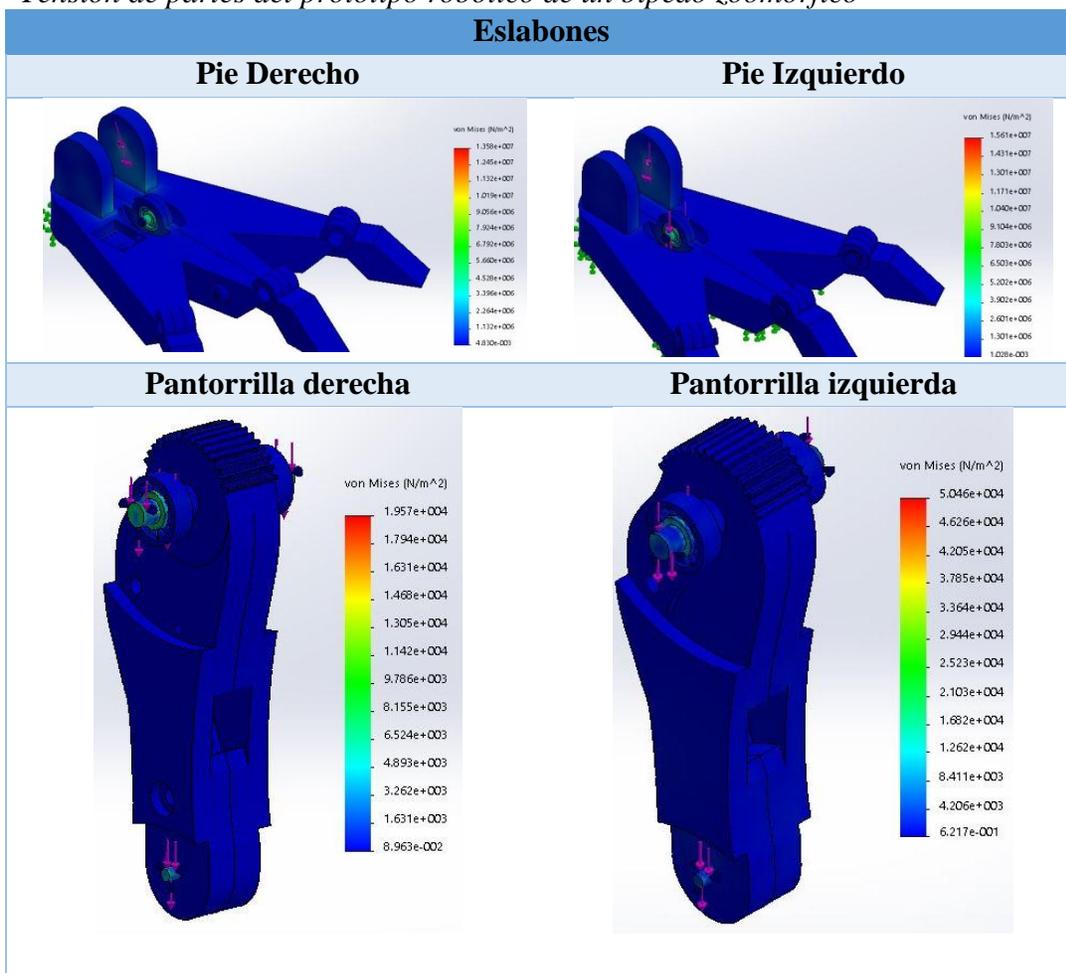


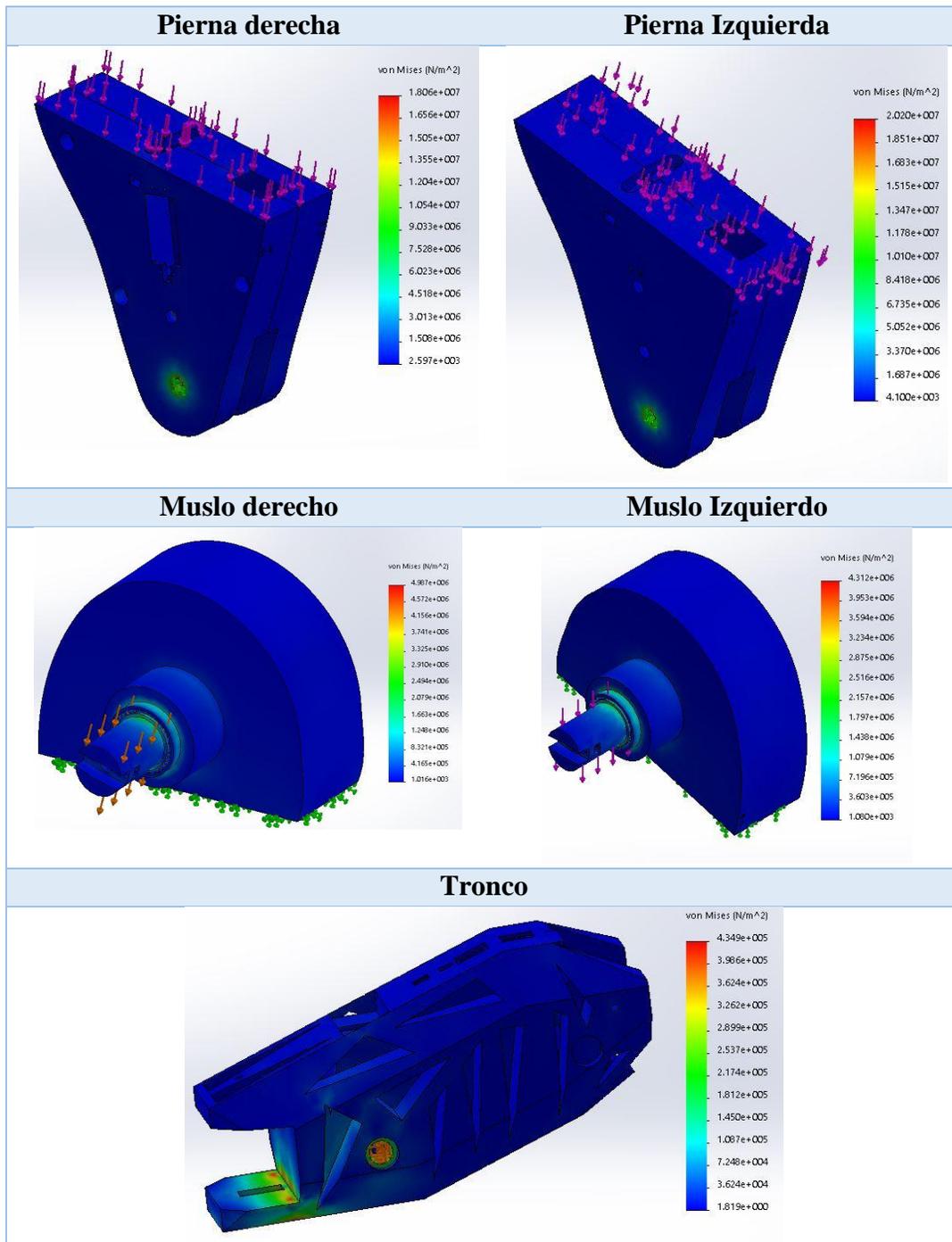
Continúa



En la Tabla 47 se muestra la Tensión de Von Mises de elementos del prototipo robótico de un bípedo zoomórfico.

**Tabla 47**  
Tensión de partes del prototipo robótico de un bípedo zoomórfico

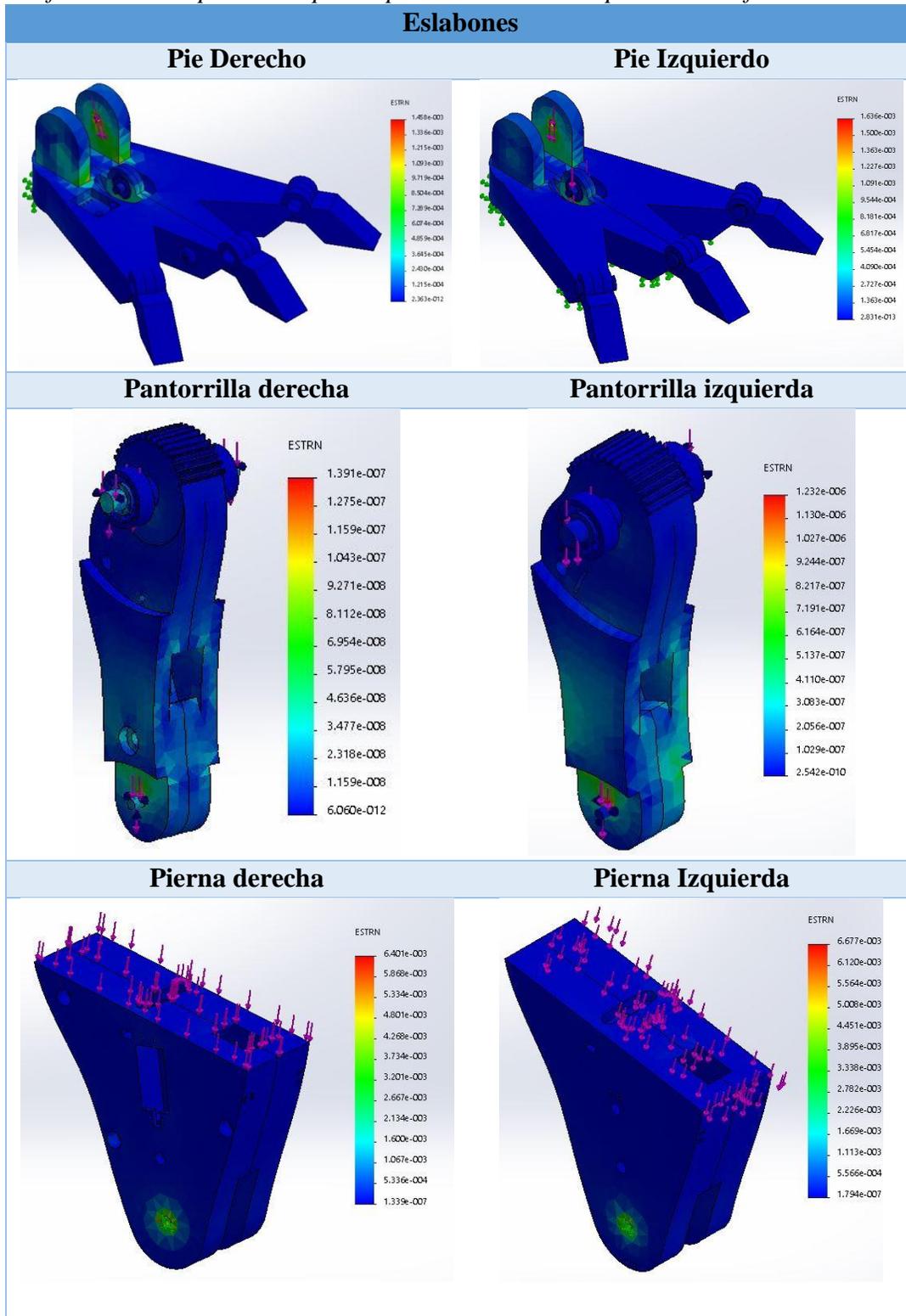




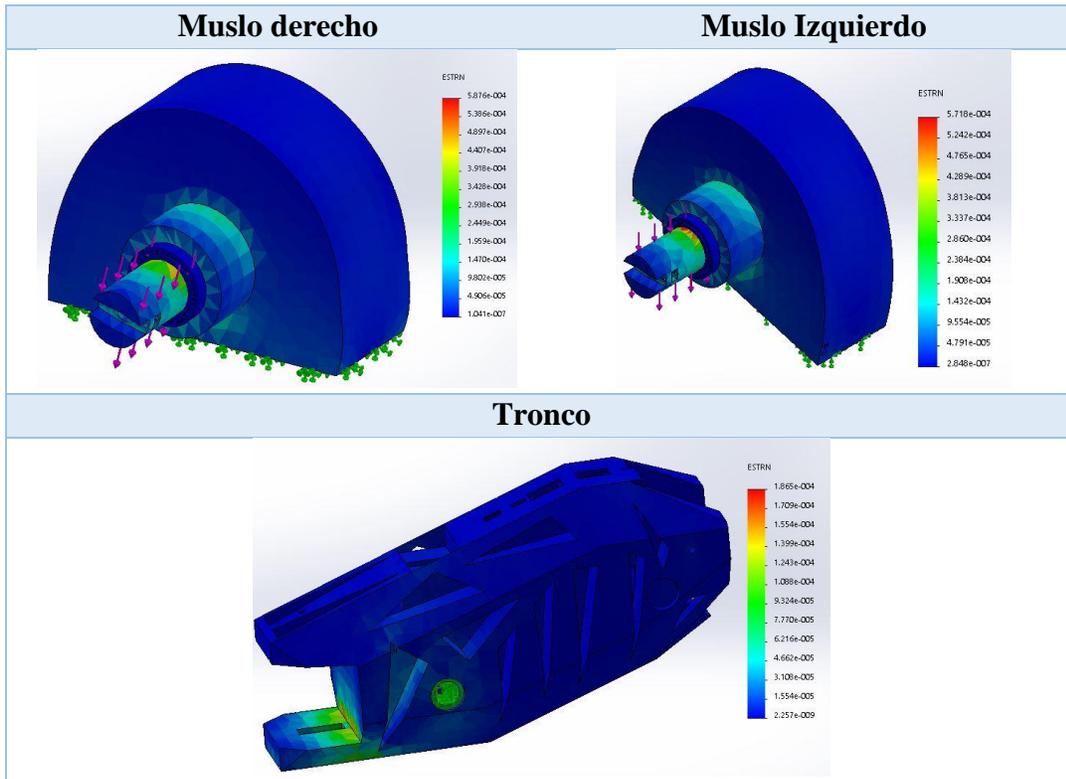
En la Tabla 48 se muestra la deformación de elementos del prototipo robótico de un bípedo zoomórfico.

**Tabla 48**

*Deformación de partes del prototipo robótico de un bípedo zoomórfico*

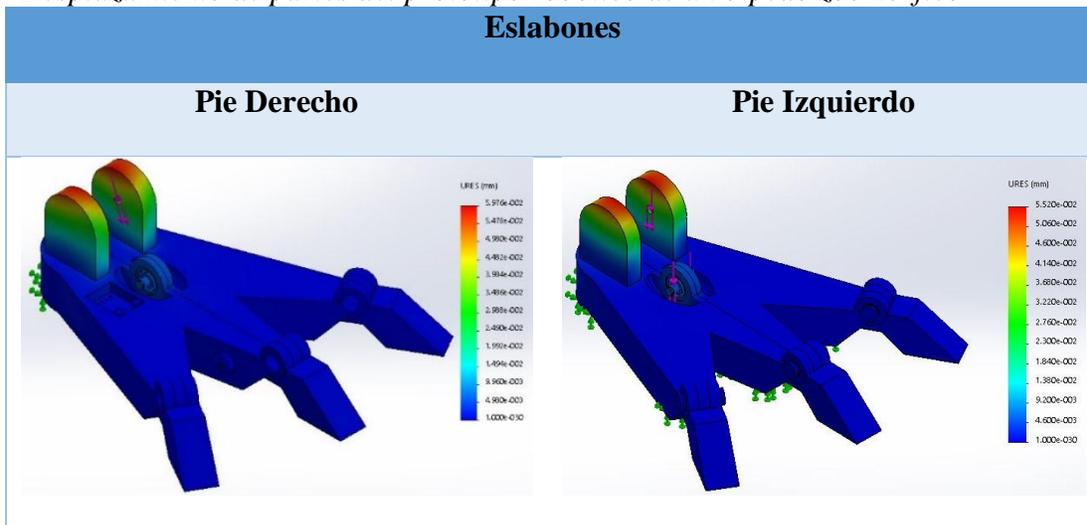


Continúa

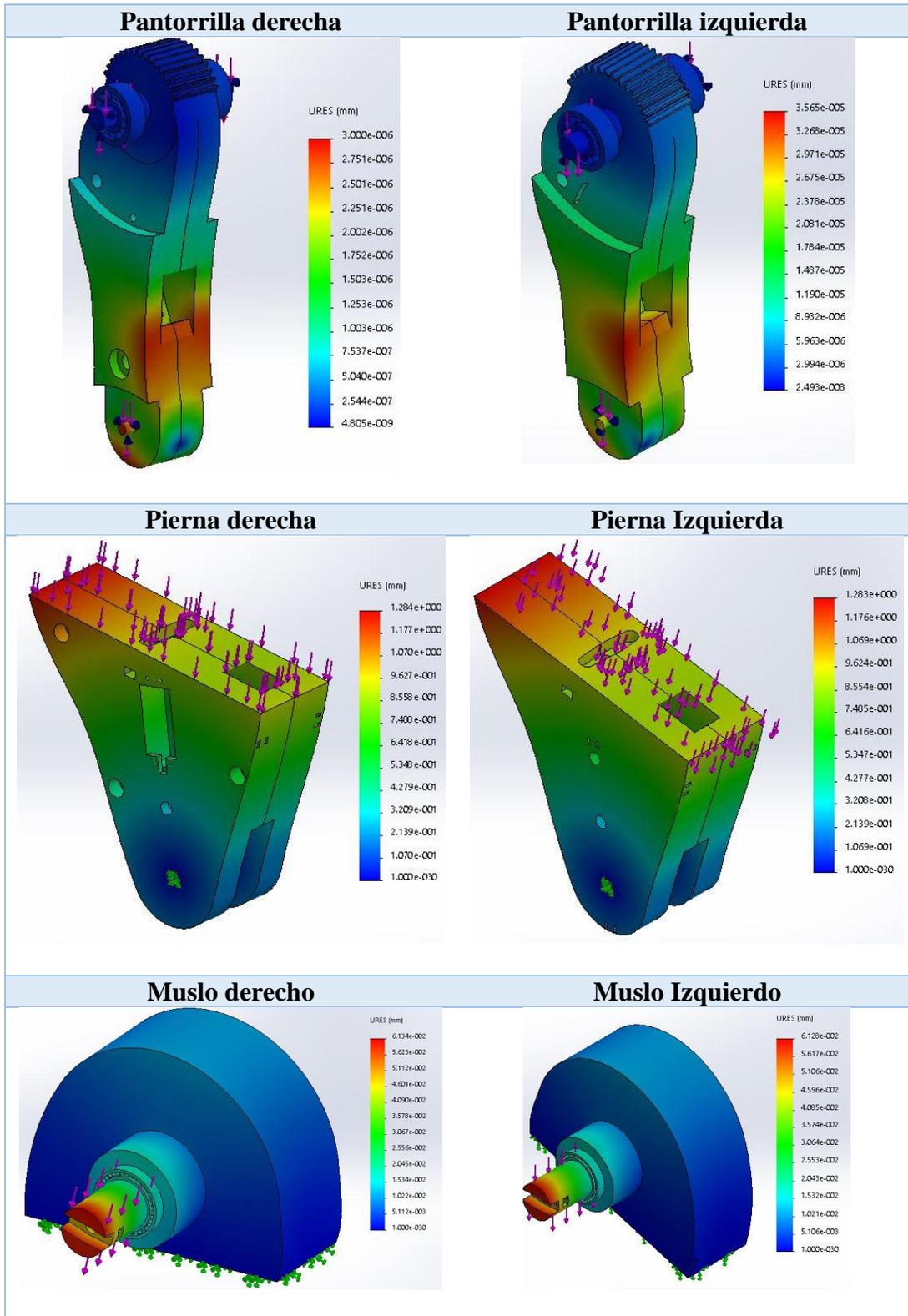


En la Tabla 49 se muestra el desplazamiento de los elementos del prototipo robótico de un bípedo zoomórfico.

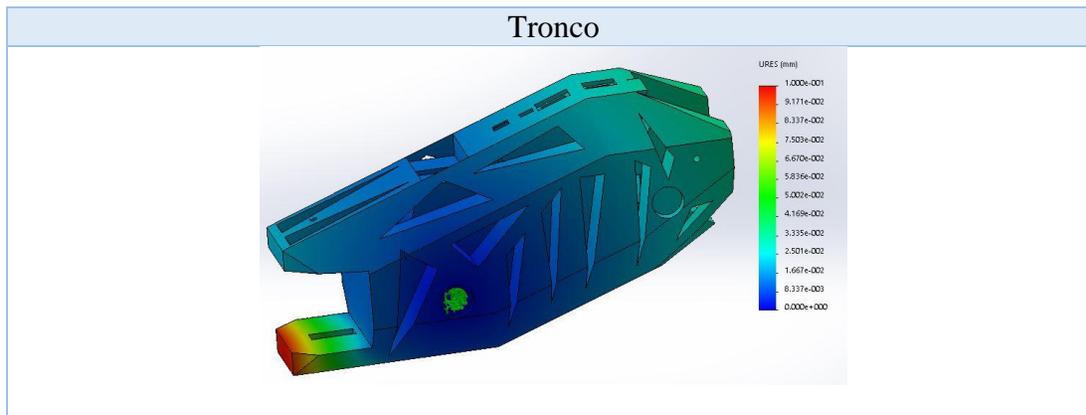
**Tabla 49**  
*Desplazamiento de partes del prototipo robótico de un bípedo zoomórfico*



Continúa



Continúa 



### 3.5. Subsistema de potencia y locomoción

#### 3.5.1. Selección de actuadores

Para la selección de actuadores se debe establecer las cargas en estado de reposo que afectan el comportamiento de los actuadores, cuando el prototipo se encuentre posicionado sobre una sola extremidad.

#### 3.5.2. Especificación de sistema de alimentación

La selección del sistema de alimentación dependerá de la autonomía que se desea dar al robot. En el caso de este proyecto el sistema de alimentación será por medio de baterías recargables, lo cual hará que el prototipo robótico se mueva de forma inalámbrica. Las baterías a seleccionar serán una para el bípedo y otra para el sistema de control remoto.

#### *Batería para el bípedo robótico*

Las baterías se seleccionarán utilizando las relaciones de potencia mecánica y la potencia eléctrica, con la Ecuación ( 30.):

$$T \times \omega = I \times V$$

( 30.)

Donde  $T$  es el torque de cada motor,  $\omega$  es la velocidad angular con la que se mueve,  $I$  es la intensidad de corriente que ocupan los motores y  $V$  es el voltaje de operación.

Los valores de torque máximo y velocidad angular de los motores se encuentran el en datasheet de los servomotores, lo cuales tienen un valor de: 20 kg-cm de torque y 0,18 segundos por cada 60° como velocidad angular. Usando ecuaciones de transformación de unidades se obtendrá los siguientes valores:

$$T = \frac{20 \times 9,81}{100} = 1,962 \text{ N} - \text{m}$$

$$\omega = \frac{60 \times \pi}{180 \times 0,18} = 5,81 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

De la Ecuación ( 30.) se procede a calcular la intensidad de corriente para poder mover los servo-motores, como se observa en la Ecuación ( 31.):

$$T \times \omega = V \times I$$

$$I_{servomotores} = \frac{T \times \omega}{V} = \frac{1,962 \times 5,81}{7,4} = 1,54 \text{ A}$$

(31.)

La capacidad de la batería se determina por la intensidad de corriente suministrada por un tiempo establecido, para el caso del prototipo el tiempo estimado es de 13 minutos o 0,2142 horas. El valor a total de capacidad será el resultado de sumar las capacidades individuales de cada servomotor. La ecuación ( 32.) indica el resultado de la operación.

$$C_{servomotores} = 7 \times I \times t = 7 \times 1,54 \times 0,2142 \text{ Ah} = 2,31 \text{ Ah} = 2310 \text{ mAh}$$

(32.)

El consumo de los controladores, reguladores y los dispositivos de comunicación es de (Ver Ecuación ( 33.)):

$$I_{c,r,com} = 46 \text{ mA} + 2 \times 100 \text{ mA} + 50 \text{ mA} + 100 \text{ mA} = 396 \text{ mA}$$

$$C_{c,r,com} = 395 \times 0,21 \text{ mAh} = 83 \text{ mAh}$$

(33.)

La capacidad total que debe tener la batería es de (Ver ecuación ( 34.)):

$$C_T = C_{servomotores} + C_{c,r,com} = 2393 \text{ mAh}$$

(34.)

Para conseguir un correcto funcionamiento, se aplicó dos factores denominados, factor de carga y factor de seguridad; el primero es un factor que se establece para evitar las caídas de tensión, debido a las descargas de las baterías y el segundo es un factor que permite omitir errores en el proceso de dimensionamiento. Estos valores son de 1,2 y 1,1 respectivamente y se los visualiza en la Ecuación ( 35.).

$$C = C_T \times 1,2 \times 1,1 = 3158,76 \text{ mAh}$$

(35.)

Para un funcionamiento de caminata continua durante 13 minutos el prototipo requiere de una batería con una capacidad de 3159 mAh. Se utilizará una batería de 5000 mAh y 7,4V para proporcionar caminata continua durante 20 minutos.

### *Batería para el control remoto*

El control remoto está compuesto por los siguientes elementos: módulo emisor de radiofrecuencia, led indicador, pulsadores, módulo Joystick y micro-controlador. Los cuales consumen energía eléctrica dada por los siguientes valores:

- Módulo emisor de radiofrecuencia: 2,5 mA a 5V
- Led Indicador: Color Verde, 5mA a 1,6V
- Módulo Joystick: 1mA a 5V
- Micro-controlador: 100mA a 5V

La capacidad de la batería necesaria para el funcionamiento del control remoto por 10 minutos se determina en la ecuación ( 36.):

$$I_{cr} = 2,5mA + 5mA + 1mA + 100mA = 108,5 mA$$

$$C_{cr} = 108,5 \times 0,21 [mAh] = 22,785 [mAh]$$

**(36.)**

Para conseguir un correcto funcionamiento, se aplicó dos factores denominados, factor de carga y factor de seguridad; el primero es un factor que se establece para evitar las caídas de tensión, debido a las descargas de las baterías y el segundo es un factor que permite omitir errores en el proceso de dimensionamiento. Estos valores son de 1,2 y 1,1 respectivamente y se los visualiza en la Ecuación ( 37.):

$$C = C_{cr} \times 1,2 \times 1,1 = 30 [mAh]$$

**(37.)**

Para un control y comunicación continuos durante 13 minutos el prototipo requiere de una batería con una capacidad de 30 mAh. Se utilizará una batería de 300 mAh y 7,4V para proporcionar alimentación continua durante 2 horas.

### 3.6. Subsistema de control

#### 3.6.1. Análisis cinemático

El análisis cinemático se basa en definir las ecuaciones que determinen el comportamiento del sistema mecánico del prototipo. Para ello se usarán ecuaciones vectoriales desde el origen de coordenadas hasta la posición del centro de gravedad de cada eslabón. La posición de los eslabones que se encuentran unidos, se la determina por medio de la suma de las componentes “xyz” de los eslabones antecesores, usando las llamadas longitudes considerables que se establecieron con anterioridad.

El sistema de coordenadas a utilizar es un sistema cartesiano ortogonal. Cada eslabón presenta una posición de su centro de masa (valor en milímetros [mm]), el valor de su masa (valor en gramos [g]), y las dimensiones a considerar para realizar la suma vectorial de los mismos. Los datos de cada eslabón tomados desde la posición original del sistema mecánico y de la masa total del prototipo robótico son los siguientes (Ver Tabla 50):

**Tabla 50**

*Datos y Variables a usar en el sistema mecánico*

Masa total: $m_T = 9269 \text{ g}$	
1 Eslabón Pata Derecha	2 Eslabón Pata Izquierda
Centro de masa eje x: $cmx_1 = 48,56$	Centro de masa eje x: $cmx_2 = 48,637$
Centro de masa eje y: $cmx_1 = -27,214$	Centro de masa eje y: $cmx_2 = -27,219$
Centro de masa eje z: $cmz_1 = -0,173$	Centro de masa eje z: $cmz_2 = -0,010$

Continúa

Longitud a lo largo de eje x:	$lx_1 = 110$	Longitud a lo largo de eje x:	$lx_2 = 110$
Longitud a lo largo de eje y:	$ly_1 = -34$	Longitud a lo largo de eje y:	$ly_2 = -34$
Masa:	$m_1 = 181,378$	Masa:	$m_2 = 180,325$
<b>3 Eslabón Pantorrilla Derecha</b>		<b>4 Eslabón Pantorrilla Izquierda</b>	
Centro de masa eje x:	$cmx_3 = -1,703$	Centro de masa eje x:	$cmx_4 = -1,557$
Centro de masa eje y:	$cm_y_3 = 73,527$	Centro de masa eje y:	$cm_y_4 = 74,323$
Centro de masa eje z:	$cmz_3 = 0,090$	Centro de masa eje z:	$cmz_4 = 0,251$
Longitud:	$l_3 = 120,08$	Longitud:	$l_4 = 120,08$
Masa:	$m_3 = 164,988$	Masa:	$m_4 = 158,716$
<b>5 Eslabón Pierna Derecha</b>		<b>6 Eslabón Pierna Izquierda</b>	
Centro de masa eje x:	$cmx_5 = -1,686$	Centro de masa eje x:	$cmx_6 = -1,693$
Centro de masa eje y:	$cm_y_5 = 109,198$	Centro de masa eje y:	$cm_y_6 = 109,139$
Centro de masa eje z:	$cmz_5 = -2,521$	Centro de masa eje z:	$cmz_6 = 2,525$
Longitud:	$l_5 = 177,41$	Longitud:	$l_6 = 177,41$
Masa:	$m_5 = 1179,623$	Masa:	$m_6 = 1178,729$
<b>7 Eslabón Torso</b>		<b>10 Eslabón Cola</b>	
Centro de masa eje x:	$cmx_7 = 92,238$	Centro de masa eje x:	$cmx_{10} = -249,93$
Centro de masa eje y:	$cm_y_7 = 58,655$	Centro de masa eje y:	$cm_y_{10} = 153,881$
Centro de masa eje z:	$cmz_7 = -0,876$	Centro de masa eje z:	$cmz_{10} = -0,006$
Vector cabeza eje x:	$lx_{7p} = 309,23$	Longitud:	$l_{10} = 200$
Vector cabeza eje y:	$ly_{7p} = 137$	Masa:	$m_{10} = 5601,980$
Vector cola eje x:	$lx_{7n} = -149,88$		
Vector cola eje y:	$ly_{7n} = 0$		
Vector Cadera z:	$lmz_7 = 160$		
Masa:	$m_7 = 5234,420$		

Las ecuaciones de los centros de masa de cada eslabón dentro del sistema completo, a desarrollar son el resultado de la suma vectorial de los eslabones antecesores y del vector posición del centro de masa, considerando que cada eslabón rotará para satisfacer las posiciones de caminata establecidas, se calculará la nueva posición de cada centro de masa usando el método de matrices de rotación.

### *Representación de la orientación*

El método de Matrices de Rotación definirá algebraicamente el movimiento de cada eslabón en un espacio en 3D considerando el ángulo en el que este girando. Las matrices de rotación que define la orientación del sistema OUVW con respecto al sistema OXYZ.

En una rotación del sistema OUVW (con el eje OU que coincide con el eje OX) de  $\alpha$  grados respecto a OX. Las ecuaciones que rijan a un giro en el eje X serán (Ver Ecuaciones ( 38.), ( 39.) y ( 40.)):

$$U = X \tag{38.}$$

$$V = Y \cos \alpha - Z \sin \alpha \tag{39.}$$

$$W = Y \sin \alpha + W \cos \alpha \tag{40.}$$

En una rotación del sistema OUVW (con el eje OV que coincide con el eje OY) de  $\Phi$  grados respecto a OY. Las ecuaciones que rijan a un giro en el eje Y serán (Ver Ecuaciones ( 41.), ( 42.) y ( 43.)):

$$U = X \cos \varphi + Z \sin \varphi \quad (41.)$$

$$V = Y \quad (42.)$$

$$W = -X \sin \varphi + W \cos \varphi \quad (43.)$$

En una rotación del sistema OUVW (con el eje OW que coincide con el eje OZ) de  $\theta$  grados respecto a OZ. Las ecuaciones que rijan a un giro en el eje Y serán (Ver Ecuaciones ( 44.), ( 45.) y ( 46.)):

$$U = X \cos \theta - Y \sin \theta \quad (44.)$$

$$V = X \sin \theta + Y \cos \theta \quad (45.)$$

$$W = Z \quad (46.)$$

*Desarrollo de las ecuaciones de posicionamiento del centro de masa*

El posicionamiento del centro de masa para cada fase en el ciclo de marcha tendrá dos puntos de vista: uno que involucra a tener el origen de coordenadas ubicado en el nodo entre el eslabón pata derecha y el eslabón pantorrilla derecha, y otro en que involucra tener al origen de coordenadas ubicado en el nodo entre el eslabón pata izquierda y el eslabón pantorrilla izquierda.

*Ecuaciones por eslabón tomada desde origen Pata Derecha, origen Pata Izquierda*

Ecuaciones del primer eslabón Pata Derecha origen derecha y segundo eslabón Pata Izquierda origen izquierda:

$$x_{1d,2i} = cmx_{1,2} \times \cos \theta_{1,2} - cmy_{1,2} \times \sin \theta_{1,2}$$

$$y_{1d,2i} = cmx_{1,2} \times \sin \theta_{1,2} + cmy_{1,2} \times \cos \theta_{1,2}$$

$$z_{1d,2i} = cmz_{1,2}$$

Ecuaciones del segundo eslabón Pata Izquierda origen derecha y primer eslabón Pata Izquierda origen izquierda:

$$x_{2d,1i} = l_{3,4} \times \cos \alpha_{3,4} + l_{5,6} \times \cos \alpha_{5,6} + l_{6,5} \times \cos(\alpha_{6,5} - 180^\circ) + l_{4,3} \times \cos(\alpha_{4,3} - 180^\circ) \\ + cmx_{2,1} \times \cos \theta_{2,1} - cmy_{2,1} \times \sin \theta_{2,1}$$

$$y_{2d,1i} = l_{3,4} \times \sin \alpha_{3,4} + l_{5,6} \times \sin \alpha_{5,6} + l_{6,5} \times \sin(\alpha_{6,5} - 180^\circ) + l_{4,3} \times \sin(\alpha_{4,3} - 180^\circ) \\ + cmx_{2,1} \times \sin \theta_{2,1} + cmy_{2,1} \times \cos \theta_{2,1}$$

$$z_{2d,1i} = \begin{matrix} -lmz_7 - lmz_7 + cmz_2 \\ +lmz_7 + lmz_7 + cmz_1 \end{matrix}$$

Ecuaciones del tercer eslabón Pantorrilla Derecha origen derecha y cuarto eslabón Pantorrilla Izquierda origen izquierda:

$$x_{3d,4i} = cmx_{3,4} \times \cos \theta_{3,4} - cmy_{3,4} \times \sin \theta_{3,4}$$

$$y_{3d,4i} = cmx_{3,4} \times \sin \theta_{3,4} + cmy_{3,4} \times \cos \theta_{3,4}$$

$$z_{3d,4i} = cmz_{3,4}$$

Ecuaciones del cuarto eslabón Pantorrilla Izquierda origen derecha y tercer eslabón Pantorrilla

Derecha origen izquierda:

$$x_{4d,3i} = l_{3,4} \times \cos \alpha_{3,4} + l_{5,6} \times \cos \alpha_{5,6} + l_{6,5} \times \cos(\alpha_{6,5} - 180^\circ) + cmx_{4,3} \times \cos \theta_{4,3} \\ - (cmy_{4,3} - l_{4,3}) \times \sin \theta_{4,3}$$

$$y_{4d,3i} = l_{3,4} \times \sin \alpha_{3,4} + l_{5,6} \times \sin \alpha_{5,6} + l_{6,5} \times \sin(\alpha_{6,5} - 180^\circ) + cmx_{4,3} \times \sin \theta_{4,3} \\ + (cmy_{4,3} - l_{4,3}) \times \cos \theta_{4,3}$$

$$z_{4d,3i} = \frac{-lmz_7 - lmz_7 + cmz_4}{+lmz_7 + lmz_7 + cmz_3}$$

Ecuaciones del quinto eslabón Pierna Derecha origen derecha y sexto eslabón Pierna Izquierda

origen izquierda:

$$x_{5d,6i} = l_{3,4} \times \cos \alpha_{3,4} + cmx_{5,6} \times \cos \theta_{5,6} - cmy_{5,6} \times \sin \theta_{5,6}$$

$$y_{5d,6i} = l_{3,4} \times \sin \alpha_{3,4} + cmx_{5,6} \times \sin \theta_{5,6} + cmy_{5,6} \times \cos \theta_{5,6}$$

$$z_{5d,6i} = cmz_{5,6}$$

Ecuaciones del sexto eslabón Pierna Izquierda origen derecha y quinto eslabón Pierna Derecha

origen izquierda:

$$x_{6d,5i} = l_{3,4} \times \cos \alpha_{3,4} + l_{5,6} \times \cos \alpha_{5,6} + cmx_{6,5} \times \cos \theta_{6,5} - (cmy_{6,5} - l_{6,5}) \times \sin \theta_{6,5}$$

$$y_{6d,5i} = l_{3,4} \times \sin \alpha_{3,4} + l_{5,6} \times \sin \alpha_{5,6} + cmx_{6,5} \times \sin \theta_{6,5} + (cmy_{6,5} - l_{6,5}) \times \cos \theta_{6,5}$$

$$z_{6d} = \begin{matrix} -lmz_7 - lmz_7 + cmz_6 \\ 5i \quad +lmz_7 + lmz_7 + cmz_5 \end{matrix}$$

Ecuaciones del séptimo eslabón Torso origen derecha y origen izquierda:

$$x_{7d,7i} = l_{3,4} \times \cos \alpha_{3,4} + l_{5,6} \times \cos \alpha_{5,6} + cmx_7 \times \cos \theta_7 - cmy_7 \times \sin \theta_7$$

$$y_{7d,7i} = l_{3,4} \times \sin \alpha_{3,4} + l_{5,6} \times \sin \alpha_{5,6} + cmx_7 \times \sin \theta_7 + cmy_7 \times \cos \theta_7$$

$$z_{7d} = -lmz_7 + cmz_7$$

Ecuaciones del décimo eslabón Cola origen derecha y origen izquierda:

Rotación en el eje Y del eslabón:

$$x_{bcd,bci} = cmx_{10} \times \cos \varphi_{10} + cmz_{10} \times \sin \varphi_{10}$$

$$y_{bcd,bci} = cmy_{10}$$

$$z_{bcd,bci} = -cmx_{10} \times \sin \varphi_{10} + cmz_{10} \times \cos \varphi_{10}$$

Rotación en el eje Z del eslabón:

$$x_{10d,10i} = l_{3,4} \times \cos \alpha_{3,4} + l_{5,6} \times \cos \alpha_{5,6} + lx_{7n} \times \cos \theta_7 - ly_{7n} \times \sin \theta_7 + x_{bcd,bci} \times \cos \theta_7 \\ - y_{bcd,bci} \times \sin \theta_7$$

$$y_{10d,10i} = l_{3,4} \times \sin \alpha_{3,4} + l_{5,6} \times \sin \alpha_{5,6} + lx_{7n} \times \sin \theta_7 + ly_{7n} \times \cos \theta_7 + x_{bcd,bci} \times \sin \theta_7 \\ + y_{bcd,bci} \times \cos \theta_7$$

$$z_{10d} = \begin{matrix} -lmz_7 + z_{bcd} \\ 10i \quad +lmz_7 + z_{bcd} \end{matrix}$$

*Ecuaciones de la ubicación del centro de masa*

Para hallar la ubicación del centro de masa del sistema completo se usará Teorema de distribución discreta de la materia, al igual que se lo aplicó en la ubicación del centro de masa de cada eslabón, tomando como radio vector de posición de cada partícula a las ecuaciones halladas para cada eslabón.

Vista desde origen en pata Derecha y origen pata izquierda:

$$\begin{aligned}
 & x_{mD}, x_{ml} \\
 &= \frac{x_{1d,1i} \times m_1 + x_{2d,2i} \times m_2 + x_{3d,3i} \times m_3 + x_{4d,4i} \times m_4 + x_{5d,5i} \times m_5 + x_{6d,6i} \times m_6}{mt} \\
 &+ \frac{x_{7d,7i} \times m_7 + x_{10d,10i} \times m_{10}}{mt}
 \end{aligned} \tag{47}$$

$$\begin{aligned}
 & y_{mD}, y_{ml} \\
 &= \frac{y_{1d,1i} \times m_1 + y_{2d,2i} \times m_2 + y_{3d,3i} \times m_3 + y_{4d,4i} \times m_4 + y_{5d,5i} \times m_5 + y_{6d,6i} \times m_6}{mt} \\
 &+ \frac{y_{7d,7i} \times m_7 + y_{10d,10i} \times m_{10}}{mt}
 \end{aligned} \tag{48}$$

$$\begin{aligned}
 & z_{mD}, z_{ml} \\
 &= \frac{z_{1d,1i} \times m_1 + z_{2d,2i} \times m_2 + z_{3d,3i} \times m_3 + z_{4d,4i} \times m_4 + z_{5d,5i} \times m_5 + z_{6d,6i} \times m_6}{mt} \\
 &+ \frac{z_{7d,7i} \times m_7 + z_{10d,10i} \times m_{10}}{mt}
 \end{aligned} \tag{49}$$

Al reemplazar los valores angulares de  $\alpha_k$ ,  $\theta_k$  y  $\varphi_k$  de cada eslabón en la posición actual de su ciclo de marcha, en las ecuaciones ( 47.), ( 48.) y ( 49.) se hallará la posición del centro de masa del sistema completo en los ejes XYZ, desde la vista del origen ubicado en el eslabón pata Derecha o la vista del origen ubicado en el eslabón pata Izquierda según corresponda.

## *Ciclo de Marcha*

### *Caminata en superficie plana*

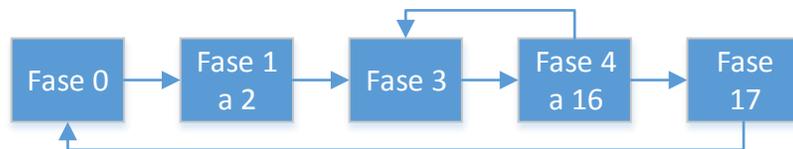
La caminata en superficie plana es la primera configuración de marcha que posee el prototipo, la cual consta de tres grandes fases: Fase 0 (fase de soporte, cuando el bípedo no camina y se encuentra sobre sus dos extremidades), Fase 1→16 (fase de caminata, cuando el bípedo mueve su cola hacia un extremo, alza una extremidad, avanza un paso, mueve la cola hacia el otro extremo y repite el proceso mientras se le ordene) y Fase 17 (fase de asentamiento, cuando el bípedo asienta las dos patas y vuelve a la posición inicial o de soporte).

Las fases que intervienen en este tipo de ciclo de marcha son las siguientes:

- Fase 0: Soporte
- Fase 1: Desplazo de cola a la derecha
- Fase 2: Desplazo de extremidad izquierda
- Fase 3: Apoyo de extremidad izquierda
- Fase 4: Centro de masa en  $X=0$  de extremidad izquierda
- Fase 5: Desplazo de cola al centro
- Fase 6: Desplazo de cola a la izquierda
- Fase 7: Desplazo de extremidad derecha
- Fase 8: Desplazo de extremidad derecha
- Fase 9: Desplazo de extremidad derecha
- Fase 10: Apoyo de extremidad derecha
- Fase 11: Centro de masa en  $X=0$  de extremidad derecha
- Fase 12: Desplazo de cola al centro

- Fase 13: Desplazo de cola a la derecha
- Fase 14: Desplazo de extremidad izquierda
- Fase 15: Desplazo de extremidad izquierda
- Fase 16: Desplazo de extremidad izquierda
- Fase 17: Asentamiento pies

El bípedo seguirá en ciclo de marcha continua empezando desde la fase 0, hacia la fase 1, seguida de la fase 2, avanzará hasta la fase 16 y volverá hacia la fase 3 y seguirá a la fase 16, hasta que se detenga la orden, por lo cual seguirá a la fase 17 y finalmente volverá a la fase 0 (Ver Figura 77).



**Figura 77** Diagrama del ciclo de marcha en superficie plana

Cada fase del ciclo de marcha dependerá de donde será asentado sistema robótico ya sea en el eslabón pata derecha, eslabón pata izquierda o ambos eslabones por lo que las ecuaciones: ( 47.), ( 48.), serán utilizadas para determinar la inclinación del eslabón torso, con el fin de lograr que el centro de masa se ubique sobre el valor  $X=0$  dentro del eslabón donde se encuentre asentado el bípedo. Por otro lado, la ecuación ( 49.) afirmará que el giro producido por el eslabón Cola, trasladará al centro de masa a lo largo del eje Z hacia dentro de la superficie de soporte del eslabón de asentamiento.

Fase 0: Origen desde Pata Derecha, los ángulos que definen esta fase son los siguientes:

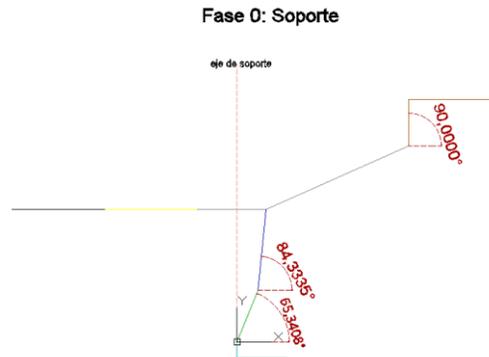
$\alpha_3 = 65,34079261^\circ$	$\alpha_6 = 84,33350383^\circ$	$\theta_3 = \alpha_3 - 90^\circ$	$\theta_6 = \alpha_6 - 90^\circ$
$\alpha_4 = 65,34079261^\circ$	$\theta_1 = 0^\circ$	$\theta_4 = \alpha_4 - 90^\circ$	$\varphi_{10} = 0^\circ$
$\alpha_5 = 84,33350383^\circ$	$\theta_2 = 0^\circ$	$\theta_5 = \alpha_5 - 90^\circ$	

Al reemplazar estos valores angulares en las ecuaciones correspondientes se obtiene la siguiente ecuación:

$$82,879 - 86,382 \times \sin(\theta_7) - 156,53 \times \cos(\theta_7) = 0$$

Resolviendo la ecuación se obtiene el ángulo que debe rotar el eslabón torso para conseguir el equilibrio siendo este:

$$\theta_7 = -33,4887^\circ$$



**Figura 78 Fase 0**

Fase 1: Origen desde Pata Derecha, los ángulos que definen esta fase son los siguientes:

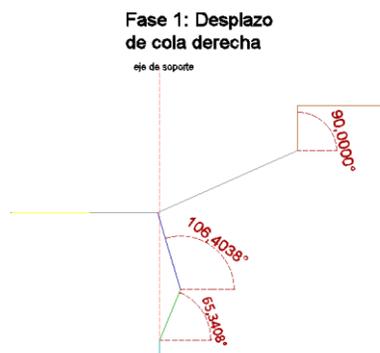
$\alpha_3 = 65,34079261^\circ$	$\alpha_6 = 106,40383828^\circ$	$\theta_3 = \alpha_3 - 90^\circ$	$\theta_6 = \alpha_6 - 90^\circ$
$\alpha_4 = 65,34079261^\circ$	$\theta_1 = 0^\circ$	$\theta_4 = \alpha_4 - 90^\circ$	$\varphi_{10} = 90^\circ$
$\alpha_5 = 106,40383828^\circ$	$\theta_2 = 0^\circ$	$\theta_5 = \alpha_5 - 90^\circ$	

Al reemplazar estos valores angulares en las ecuaciones correspondientes se obtiene la siguiente ecuación:

$$21,888 - 86,382 \times \sin(\theta_7) - 33,687 \times \cos(\theta_7) = 0$$

Resolviendo la ecuación se obtiene el ángulo que debe rotar el eslabón torso para conseguir el equilibrio siendo este:

$$\theta_7 = -7,64964^\circ$$



**Figura 79** Fase 1

Fase 2: Origen desde Pata Derecha, los ángulos que definen esta fase son los siguientes:

$\alpha_3 = 65,34079261^\circ$	$\alpha_6 = 155,64097261^\circ$	$\theta_3 = \alpha_3 - 90^\circ$	$\theta_6 = \alpha_6 - 90^\circ$
$\alpha_4 = 110,31200753^\circ$	$\theta_1 = 0^\circ$	$\theta_4 = \alpha_4 - 90^\circ$	$\varphi_{10} = 90^\circ$
$\alpha_5 = 106,40383828^\circ$	$\theta_2 = 0^\circ$	$\theta_5 = \alpha_5 - 90^\circ$	

Al reemplazar estos valores angulares en las ecuaciones correspondientes se obtiene la siguiente ecuación:

$$28,747 - 86,382 \times \sin(\theta_7) - 33,687 \times \cos(\theta_7) = 0$$

Resolviendo la ecuación se obtiene el ángulo que debe rotar el eslabón torso para conseguir el equilibrio siendo este:

$$\theta_7 = -3,242746^\circ$$



**Figura 80** Fase 2

Fase 3: Origen desde Pata Derecha, los ángulos que definen esta fase son los siguientes:

$\alpha_3 = 65,34079261^\circ$	$\alpha_6 = 108,20905439^\circ$	$\theta_3 = \alpha_3 - 90^\circ$	$\theta_6 = \alpha_6 - 90^\circ$
$\alpha_4 = 110,31200753^\circ$	$\theta_1 = 0^\circ$	$\theta_4 = \alpha_4 - 90^\circ$	$\varphi_{10} = 90^\circ$
$\alpha_5 = 77,94878919^\circ$	$\theta_2 = 0^\circ$	$\theta_5 = \alpha_5 - 90^\circ$	

Al reemplazar estos valores angulares en las ecuaciones correspondientes se obtiene la siguiente ecuación:

$$106,36 - 86,382 \times \sin(\theta_7) - 33,687 \times \cos(\theta_7) = 0$$

Resolviendo la ecuación se obtiene el ángulo que debe rotar el eslabón torso para conseguir el equilibrio siendo este:

$$\theta_7 = 68,69537^\circ$$



**Figura 81 Fase 3**

Fase 4: Origen desde Pata Izquierda, los ángulos que definen esta fase son los siguientes:

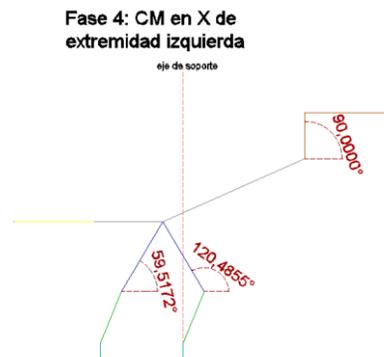
$\alpha_3 = 65,34079261^\circ$	$\alpha_6 = 120,48551913^\circ$	$\theta_3 = \alpha_3 - 90^\circ$	$\theta_6 = \alpha_6 - 90^\circ$
$\alpha_4 = 65,34079261^\circ$	$\theta_1 = 0^\circ$	$\theta_4 = \alpha_4 - 90^\circ$	$\varphi_{10} = 90^\circ$
$\alpha_5 = 59,51719364^\circ$	$\theta_2 = 0^\circ$	$\theta_5 = \alpha_5 - 90^\circ$	

Al reemplazar estos valores angulares en las ecuaciones correspondientes se obtiene la siguiente ecuación:

$$- 22,934 - 86,382 \times \sin(\theta_7) - 33,687 \times \cos(\theta_7) = 0$$

Resolviendo la ecuación se obtiene el ángulo que debe rotar el eslabón torso para conseguir el equilibrio siendo este:

$$\theta_7 = -35,625589^\circ$$



**Figura 82 Fase 4**

Fase 5: Origen desde Pata Izquierda, los ángulos que definen esta fase son los siguientes:

$\alpha_3 = 65,34079261^\circ$	$\alpha_6 = 120,48551913^\circ$	$\theta_3 = \alpha_3 - 90^\circ$	$\theta_6 = \alpha_6 - 90^\circ$
$\alpha_4 = 65,34079261^\circ$	$\theta_1 = 0^\circ$	$\theta_4 = \alpha_4 - 90^\circ$	$\varphi_{10} = 0^\circ$
$\alpha_5 = 59,51719364^\circ$	$\theta_2 = 0^\circ$	$\theta_5 = \alpha_5 - 90^\circ$	

Al reemplazar estos valores angulares en las ecuaciones correspondientes se obtiene la siguiente ecuación:

$$-22,934 - 86,382 \times \sin(\theta_7) - 156,53 \times \cos(\theta_7) = 0$$

Resolviendo la ecuación se obtiene el ángulo que debe rotar el eslabón torso para conseguir el equilibrio siendo este:

$$\theta_7 = -68,47741^\circ$$



**Figura 83** Fase 5

Fase 6: Origen desde Pata Izquierda, los ángulos que definen esta fase son los siguientes:

$\alpha_3 = 65,34079261^\circ$	$\alpha_6 = 120,48551913^\circ$	$\theta_3 = \alpha_3 - 90^\circ$	$\theta_6 = \alpha_6 - 90^\circ$
$\alpha_4 = 65,34079261^\circ$	$\theta_1 = 0^\circ$	$\theta_4 = \alpha_4 - 90^\circ$	$\varphi_{10} = -90^\circ$
$\alpha_5 = 59,51719364^\circ$	$\theta_2 = 0^\circ$	$\theta_5 = \alpha_5 - 90^\circ$	

Al reemplazar estos valores angulares en las ecuaciones correspondientes se obtiene la siguiente ecuación:

$$-22,934 - 86,382 \times \sin(\theta_7) - 33,681 \times \cos(\theta_7) = 0$$

Resolviendo la ecuación se obtiene el ángulo que debe rotar el eslabón torso para conseguir el equilibrio siendo este:

$$\theta_7 = -35,622729^\circ$$



**Figura 84** Fase 6

Fase 7: Origen desde Pata Izquierda, los ángulos que definen esta fase son los siguientes:

$\alpha_3 = 32,76742024^\circ$	$\alpha_6 = 106,40383828^\circ$	$\theta_3 = \alpha_3 - 90^\circ$	$\theta_6 = \alpha_6 - 90^\circ$
$\alpha_4 = 65,34079261^\circ$	$\theta_1 = -32,57337237^\circ$	$\theta_4 = \alpha_4 - 90^\circ$	$\varphi_{10} = -90^\circ$
$\alpha_5 = 47,58714146^\circ$	$\theta_2 = 0^\circ$	$\theta_5 = \alpha_5 - 90^\circ$	

Al reemplazar estos valores angulares en las ecuaciones correspondientes se obtiene la siguiente ecuación:

$$12,559 - 86,382 \times \sin(\theta_7) - 33,681 \times \cos(\theta_7) = 0$$

Resolviendo la ecuación se obtiene el ángulo que debe rotar el eslabón torso para conseguir el equilibrio siendo este:

$$\theta_7 = -13,5162109^\circ$$



**Figura 85** Fase 7

Fase 8: Origen desde Pata Izquierda, los ángulos que definen esta fase son los siguientes:

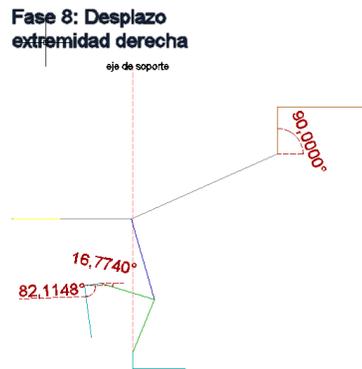
$\alpha_3 = -16,77399365^\circ$	$\alpha_6 = 106,40383828^\circ$	$\theta_3 = \alpha_3 - 90^\circ$	$\theta_6 = \alpha_6 - 90^\circ$
$\alpha_4 = 65,34079261^\circ$	$\theta_1 = -82,11478626^\circ$	$\theta_4 = \alpha_4 - 90^\circ$	$\varphi_{10} = -90^\circ$
$\alpha_5 = 106,40383828^\circ$	$\theta_2 = 0^\circ$	$\theta_5 = \alpha_5 - 90^\circ$	

Al reemplazar estos valores angulares en las ecuaciones correspondientes se obtiene la siguiente ecuación:

$$20,163 - 86,382 \times \sin(\theta_7) - 33,681 \times \cos(\theta_7) = 0$$

Resolviendo la ecuación se obtiene el ángulo que debe rotar el eslabón torso para conseguir el equilibrio siendo este:

$$\theta_7 = -8,740845538^\circ$$



**Figura 86** Fase 8

Fase 9: Origen desde Pata Izquierda, los ángulos que definen esta fase son los siguientes:

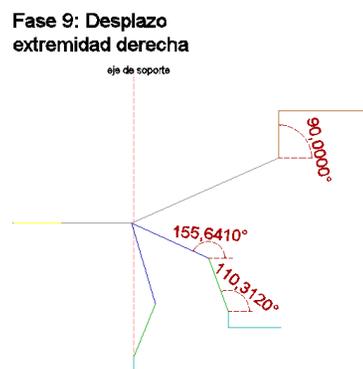
$\alpha_3 = 110,31200753^\circ$	$\alpha_6 = 106,40383828^\circ$	$\theta_3 = \alpha_3 - 90^\circ$	$\theta_6 = \alpha_6 - 90^\circ$
$\alpha_4 = 65,34079261^\circ$	$\theta_1 = 0^\circ$	$\theta_4 = \alpha_4 - 90^\circ$	$\varphi_{10} = -90^\circ$
$\alpha_5 = 155,64097261^\circ$	$\theta_2 = 0^\circ$	$\theta_5 = \alpha_5 - 90^\circ$	

Al reemplazar estos valores angulares en las ecuaciones correspondientes se obtiene la siguiente ecuación:

$$28,822 - 86,382 \times \sin(\theta_7) - 33,681 \times \cos(\theta_7) = 0$$

Resolviendo la ecuación se obtiene el ángulo que debe rotar el eslabón torso para conseguir el equilibrio siendo este:

$$\theta_7 = -3,1902898^\circ$$



**Figura 87** Fase 9

Fase 10: Origen desde Pata Izquierda, los ángulos que definen esta fase son los siguientes:

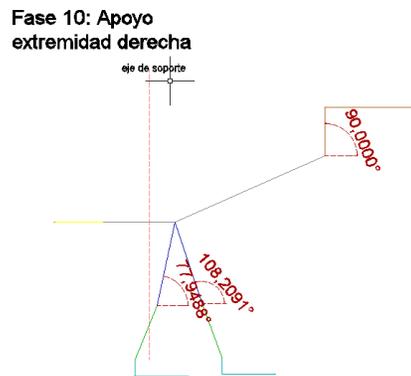
$\alpha_3 = 110,31200753^\circ$	$\alpha_6 = 77,94878919^\circ$	$\theta_3 = \alpha_3 - 90^\circ$	$\theta_6 = \alpha_6 - 90^\circ$
$\alpha_4 = 65,34079261^\circ$	$\theta_1 = 0^\circ$	$\theta_4 = \alpha_4 - 90^\circ$	$\varphi_{10} = -90^\circ$
$\alpha_5 = 108,20905439^\circ$	$\theta_2 = 0^\circ$	$\theta_5 = \alpha_5 - 90^\circ$	

Al reemplazar estos valores angulares en las ecuaciones correspondientes se obtiene la siguiente ecuación:

$$106,43 - 86,382 \times \sin(\theta_7) - 33,681 \times \cos(\theta_7) = 0$$

Resolviendo la ecuación se obtiene el ángulo que debe rotar el eslabón torso para conseguir el equilibrio siendo este:

$$\theta_7 = 68,6985457^\circ$$



**Figura 88** Fase 10

Fase 11: Origen desde Pata Derecha, los ángulos que definen esta fase son los siguientes:

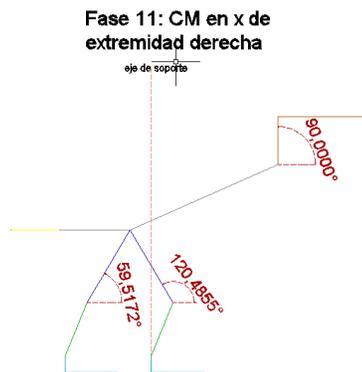
$\alpha_3 = 65,34079261^\circ$	$\alpha_6 = 59,51719364^\circ$	$\theta_3 = \alpha_3 - 90^\circ$	$\theta_6 = \alpha_6 - 90^\circ$
$\alpha_4 = 65,34079261^\circ$	$\theta_1 = 0^\circ$	$\theta_4 = \alpha_4 - 90^\circ$	$\varphi_{10} = -90^\circ$
$\alpha_5 = 120,48551913^\circ$	$\theta_2 = 0^\circ$	$\theta_5 = \alpha_5 - 90^\circ$	

Al reemplazar estos valores angulares en las ecuaciones correspondientes se obtiene la siguiente ecuación:

$$- 22,854 - 86,382 \times \sin(\theta_7) - 33,681 \times \cos(\theta_7) = 0$$

Resolviendo la ecuación se obtiene el ángulo que debe rotar el eslabón torso para conseguir el equilibrio siendo este:

$$\theta_7 = -35,571387^\circ$$



**Figura 89** Fase 11

Fase 12: Origen desde Pata Derecha, los ángulos que definen esta fase son los siguientes:

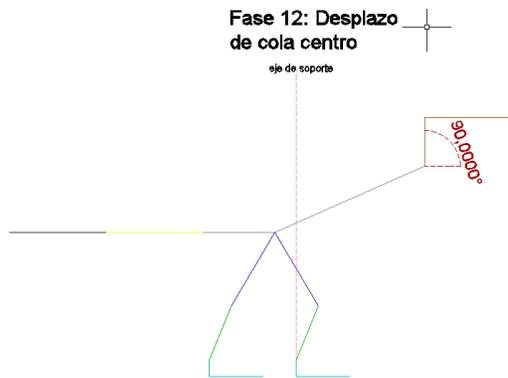
$\alpha_3 = 65,34079261^\circ$	$\alpha_6 = 59,51719364^\circ$	$\theta_3 = \alpha_3 - 90^\circ$	$\theta_6 = \alpha_6 - 90^\circ$
$\alpha_4 = 65,34079261^\circ$	$\theta_1 = 0^\circ$	$\theta_4 = \alpha_4 - 90^\circ$	$\varphi_{10} = 0^\circ$
$\alpha_5 = 120,48551913^\circ$	$\theta_2 = 0^\circ$	$\theta_5 = \alpha_5 - 90^\circ$	

Al reemplazar estos valores angulares en las ecuaciones correspondientes se obtiene la siguiente ecuación:

$$- 22,854 - 86,382 \times \sin(\theta_7) - 156,53 \times \cos(\theta_7) = 0$$

Resolviendo la ecuación se obtiene el ángulo que debe rotar el eslabón torso para conseguir el equilibrio siendo este:

$$\theta_7 = -68,45139^\circ$$



**Figura 90** Fase 12

Fase 13: Origen desde Pata Derecha, los ángulos que definen esta fase son los siguientes:

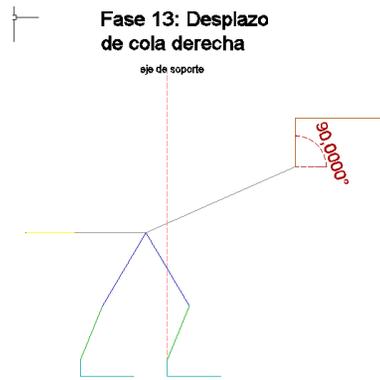
$\alpha_3 = 65,34079261^\circ$	$\alpha_6 = 59,51719364^\circ$	$\theta_3 = \alpha_3 - 90^\circ$	$\theta_6 = \alpha_6 - 90^\circ$
$\alpha_4 = 65,34079261^\circ$	$\theta_1 = 0^\circ$	$\theta_4 = \alpha_4 - 90^\circ$	$\varphi_{10} = 90^\circ$
$\alpha_5 = 120,48551913^\circ$	$\theta_2 = 0^\circ$	$\theta_5 = \alpha_5 - 90^\circ$	

Al reemplazar estos valores angulares en las ecuaciones correspondientes se obtiene la siguiente ecuación:

$$- 22,854 - 86,382 \times \sin(\theta_7) - 33,687 \times \cos(\theta_7) = 0$$

Resolviendo la ecuación se obtiene el ángulo que debe rotar el eslabón torso para conseguir el equilibrio siendo este:

$$\theta_7 = -35,5742478^\circ$$



**Figura 91** Fase 13

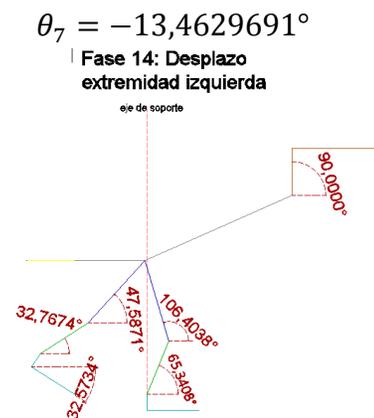
Fase 14: Origen desde Pata Derecha, los ángulos que definen esta fase son los siguientes:

$\alpha_3 = 65,34079261^\circ$	$\alpha_6 = 47,58714146^\circ$	$\theta_3 = \alpha_3 - 90^\circ$	$\theta_6 = \alpha_6 - 90^\circ$
$\alpha_4 = 32,76742024^\circ$	$\theta_1 = 0^\circ$	$\theta_4 = \alpha_4 - 90^\circ$	$\varphi_{10} = 90^\circ$
$\alpha_5 = 106,40383828^\circ$	$\theta_2 = -32,57337237^\circ$	$\theta_5 = \alpha_5 - 90^\circ$	

Al reemplazar estos valores angulares en las ecuaciones correspondientes se obtiene la siguiente ecuación:

$$12,65 - 86,382 \times \sin(\theta_7) - 33,687 \times \cos(\theta_7) = 0$$

Resolviendo la ecuación se obtiene el ángulo que debe rotar el eslabón torso para conseguir el equilibrio siendo este:



**Figura 92** Fase 144

Fase 15: Origen desde Pata Derecha, los ángulos que definen esta fase son los siguientes:

$\alpha_3 = 65,34079261^\circ$	$\alpha_6 = 106,40383828^\circ$	$\theta_3 = \alpha_3 - 90^\circ$	$\theta_6 = \alpha_6 - 90^\circ$
$\alpha_4 = -16,77399365^\circ$	$\theta_1 = 0^\circ$	$\theta_4 = \alpha_4 - 90^\circ$	$\varphi_{10} = 90^\circ$
$\alpha_5 = 106,40383828^\circ$	$\theta_2 = -82,11478626^\circ$	$\theta_5 = \alpha_5 - 90^\circ$	

Al reemplazar estos valores angulares en las ecuaciones correspondientes se obtiene la siguiente ecuación:

$$20,182 - 86,382 \times \sin(\theta_7) - 33,687 \times \cos(\theta_7) = 0$$

Resolviendo la ecuación se obtiene el ángulo que debe rotar el eslabón torso para conseguir el equilibrio siendo este:

$$\theta_7 = -8,732101^\circ$$



**Figura 93** Fase 15

Fase 16: Origen desde Pata Derecha, los ángulos que definen esta fase son los siguientes:

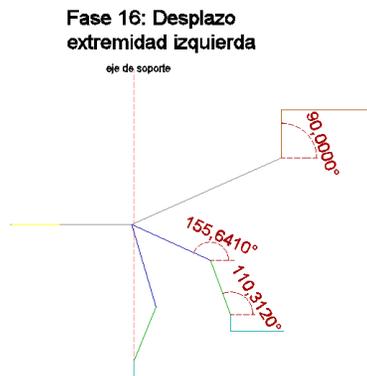
$\alpha_3 = 65,34079261^\circ$	$\alpha_6 = 155,64097261^\circ$	$\theta_3 = \alpha_3 - 90^\circ$	$\theta_6 = \alpha_6 - 90^\circ$
$\alpha_4 = 110,31200753^\circ$	$\theta_1 = 0^\circ$	$\theta_4 = \alpha_4 - 90^\circ$	$\varphi_{10} = 90^\circ$
$\alpha_5 = 106,40383828^\circ$	$\theta_2 = 0^\circ$	$\theta_5 = \alpha_5 - 90^\circ$	

Al reemplazar estos valores angulares en las ecuaciones correspondientes se obtiene la siguiente ecuación:

$$28,747 - 86,382 \times \sin(\theta_7) - 33,687 \times \cos(\theta_7) = 0$$

Resolviendo la ecuación se obtiene el ángulo que debe rotar el eslabón torso para conseguir el equilibrio siendo este:

$$\theta_7 = -3,242746^\circ$$



**Figura 94** Fase 16

Fase 17: Origen desde Pata Derecha, los ángulos que definen esta fase son los siguientes:

$\alpha_3 = 65,34079261^\circ$	$\alpha_6 = 106,40383828^\circ$	$\theta_3 = \alpha_3 - 90^\circ$	$\theta_6 = \alpha_6 - 90^\circ$
$\alpha_4 = 65,34079261^\circ$	$\theta_1 = 0^\circ$	$\theta_4 = \alpha_4 - 90^\circ$	$\varphi_{10} = 90^\circ$
$\alpha_5 = 106,40383828^\circ$	$\theta_2 = 0^\circ$	$\theta_5 = \alpha_5 - 90^\circ$	

Al reemplazar estos valores angulares en las ecuaciones correspondientes se obtiene la siguiente ecuación:

$$21,888 - 86,382 \times \sin(\theta_7) - 33,687 \times \cos(\theta_7) = 0$$

Resolviendo la ecuación se obtiene el ángulo que debe rotar el eslabón torso para conseguir el equilibrio siendo este:

$$\theta_7 = -7,64964^\circ$$

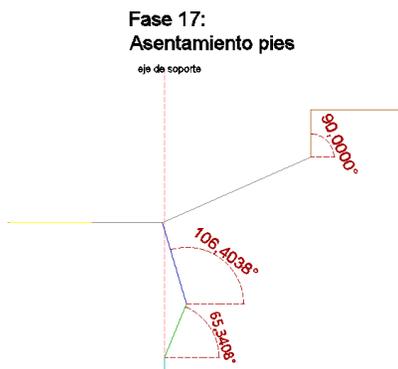


Figura 95 Fase 17

### 3.6.2. Análisis dinámico

El análisis dinámico se modeló mediante las ecuaciones de Euler-LaGrange, las cuales analizan las energías cinética y potencial que intervienen en el movimiento. A continuación, se presenta el análisis energético de cada uno de los eslabones:

**Tabla 51**

*Análisis energético de los eslabones*

Eslabones	Análisis Cinemático	Análisis Potencial
<b>Pata Derecha (1)</b>	$T_1 = E_{cx1} + E_{cy1} + E_{I1}$ $T_1 = \frac{1}{2}m_1\dot{x}_{1d}^2 + \frac{1}{2}m_1\dot{y}_{1d}^2 + \frac{1}{2}J_1\dot{\theta}_1^2$	$U_1 = m_1gy_{1d}$
<b>Pata Izquierda (2)</b>	$T_2 = E_{cx2} + E_{cy2} + E_{I2}$ $T_2 = \frac{1}{2}m_2\dot{x}_{2d}^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{y}_{2d}^2 + \frac{1}{2}J_2\dot{\theta}_2^2$	$U_2 = m_2gy_{2d}$
<b>Pantorrilla Derecha (3)</b>	$T_3 = E_{cx3} + E_{cy3} + E_{I3}$ $T_3 = \frac{1}{2}m_3\dot{x}_{3d}^2 + \frac{1}{2}m_3\dot{y}_{3d}^2 + \frac{1}{2}J_3\dot{\theta}_3^2$	$U_3 = m_3gy_{3d}$
<b>Pantorrilla Izquierda (4)</b>	$T_4 = E_{cx4} + E_{cy4} + E_{I4}$ $T_4 = \frac{1}{2}m_4\dot{x}_{4d}^2 + \frac{1}{2}m_4\dot{y}_{4d}^2 + \frac{1}{2}J_4\dot{\theta}_4^2$	$U_4 = m_4gy_{4d}$
<b>Pierna Derecha (5)</b>	$T_5 = E_{cx5} + E_{cy5} + E_{I5}$ $T_5 = \frac{1}{2}m_5\dot{x}_{5d}^2 + \frac{1}{2}m_5\dot{y}_{5d}^2 + \frac{1}{2}J_5\dot{\theta}_5^2$	$U_5 = m_5gy_{5d}$
<b>Pierna Izquierda (6)</b>	$T_6 = E_{cx6} + E_{cy6} + E_{I6}$	$U_6 = m_6gy_{6d}$

Continúa

	$T_6 = \frac{1}{2}m_6\dot{x}_{6d}^2 + \frac{1}{2}m_6\dot{y}_{6d}^2 + \frac{1}{2}J_6\dot{\theta}_6^2$	
<b>Torso (7)</b>	$T_7 = E_{cx7} + E_{cy7} + E_{I7}$	$U_7 = m_7gy_{7d}$
	$T_7 = \frac{1}{2}m_7\dot{x}_{7d}^2 + \frac{1}{2}m_7\dot{y}_{7d}^2 + \frac{1}{2}J_7\dot{\theta}_7^2$	
<b>Cola (10)</b>	$T_{10} = E_{cx10} + E_{cy10} + E_{cz10} + E_{I10} + E_{I7}$	$U_{10} = m_{10}gy_{10d}$
	$T_{10} = \frac{1}{2}m_{10}\dot{x}_{10d}^2 + \frac{1}{2}m_{10}\dot{y}_{10d}^2 + \frac{1}{2}m_{10}\dot{z}_{10d}^2$	
	$+ \frac{1}{2}J_{10}\dot{\theta}_7^2 + \frac{1}{2}J_{10}\dot{\theta}_{10}^2$	

### Lagrangiano total

La ecuación ( 53.) identifica el Lagrangiano y la ecuación ( 54.) es la fórmula de Euler-LaGrange la cual permitirá modelar al prototipo.

$$\mathcal{L} = \sum_{i=1}^{10} T_i - \sum_{j=1}^{10} U_j$$

(50.)

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}} \right) = \frac{\partial F}{\partial \dot{q}}$$

(51.)

El punto más crítico en movimiento del prototipo está ubicado en la articulación respectiva a la rodilla, debido a que en esta zona tiene una mayor concentración de fuerzas. Además, en la fase número 2 denominada Desplazo de extremidad izquierda o Derecha en el caso de la fase 9, todo el peso del prototipo se encuentra en la extremidad opuesta a la extremidad en movimiento. Por lo tanto, el análisis se lo realiza sobre el eslabón Pantorrilla derecha y ubicando el punto de trabajo en la Fase 2 (Ver ecuación ( 52.)).

*Lagrangiano Eslabón Pantorrilla Derecha*

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta_3} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}_3} \right) = \frac{\partial F}{\partial \dot{\theta}_3}$$

**Tabla 52**

*Valores de trabajo en la Fase 2*

$\alpha_3 = 65,34079261^\circ$	$\alpha_6 = 155,64097261^\circ$	$\theta_3 = \alpha_3 - 90^\circ$	$\theta_6 = \alpha_6 - 90^\circ$
$\alpha_4 = 110,31200753^\circ$	$\theta_1 = 0^\circ$	$\theta_4 = \alpha_4 - 90^\circ$	$\varphi_{10} = 90^\circ$
$\alpha_5 = 106,40383828^\circ$	$\theta_2 = 0^\circ$	$\theta_5 = \alpha_5 - 90^\circ$	

Al reemplazar los valores de la Tabla 52 en el resultado de la ecuación de Euler-LaGrange en el modelo se obtiene el resultado siguiente:

$$785,0791427 [N] = \frac{\partial F}{\partial \dot{\theta}_i} = \frac{T_m}{r_s} \quad (52.)$$

$$T_m = 785,0791427 \times r_s [N - m] \quad (53.)$$

$$T_m = 785.0791427 \times 0.00125 \times 10 [kg - cm]$$

$$T_m = 9.8135 [kg - cm]$$

$$T_n = T_m \times fs = 9.8135 \times 2 \approx 20 [kg - cm] \quad (54.)$$

Como resultado se utilizarán motores con un torque nominal de 20 kg-cm, el cual satisface el movimiento a una velocidad angular de 20 grados por segundo y utilizando un factor de seguridad de 2.

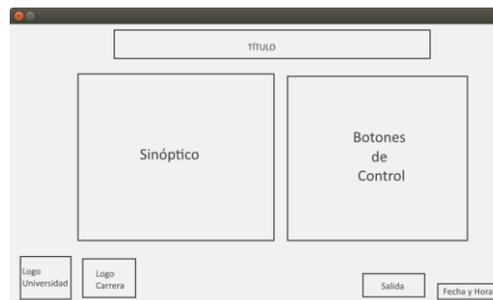
### 3.6.3. Cambio de fase

El cambio de fase se describe con la siguiente ecuación, en la cual, usando los valores angulares de torso obtenidos por cada fase, se hallan valores intermedios para lograr un movimiento uniforme y equilibrado para cada cambio de fase.

$$T_{ti} = \frac{T_{i+1} - T_i}{100}(t) + T_i \quad (55.)$$

### 3.6.4. Diseño de HMI

Para el diseño de HMI nos guiaremos con la distribución establecida por la norma GEDIS. De dicha norma nos guiamos en la distribución de objetos y el uso de colores, para lograr una fácil y entendible navegación. En la Figura 96 se aprecia la distribución basada en esta norma y en la Figura 97 la aplicación del a misma.



**Figura 96** Distribución de HMI



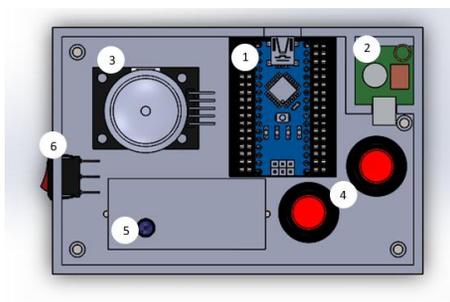
**Figura 97** HMI final

### 3.7. Subsistema de radiofrecuencia

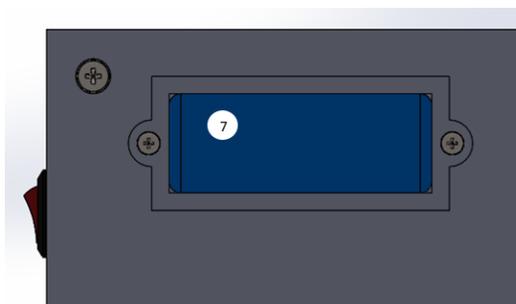
#### 3.7.1. Diseño de control remoto

Uno de los mandos diseñados para el manejo del prototipo es un control remoto, el cual, mediante comunicación por radiofrecuencia, proveerá de los comandos necesarios para la realización de un ciclo de caminata continua. Los elementos que contiene el control remoto son (Ver Figura 98 y Figura 99):

- 1.- Micro-controlador
- 2.- Módulo emisor de Radiofrecuencia
- 3.- Módulo Joystick
- 4.- Pulsadores
- 5.- Led indicador de alimentación
- 6.- Switch de Encendido/Apagado
- 7.- Batería



**Figura 98** Control remoto- Parte 1



**Figura 99** Control remoto- Parte 2

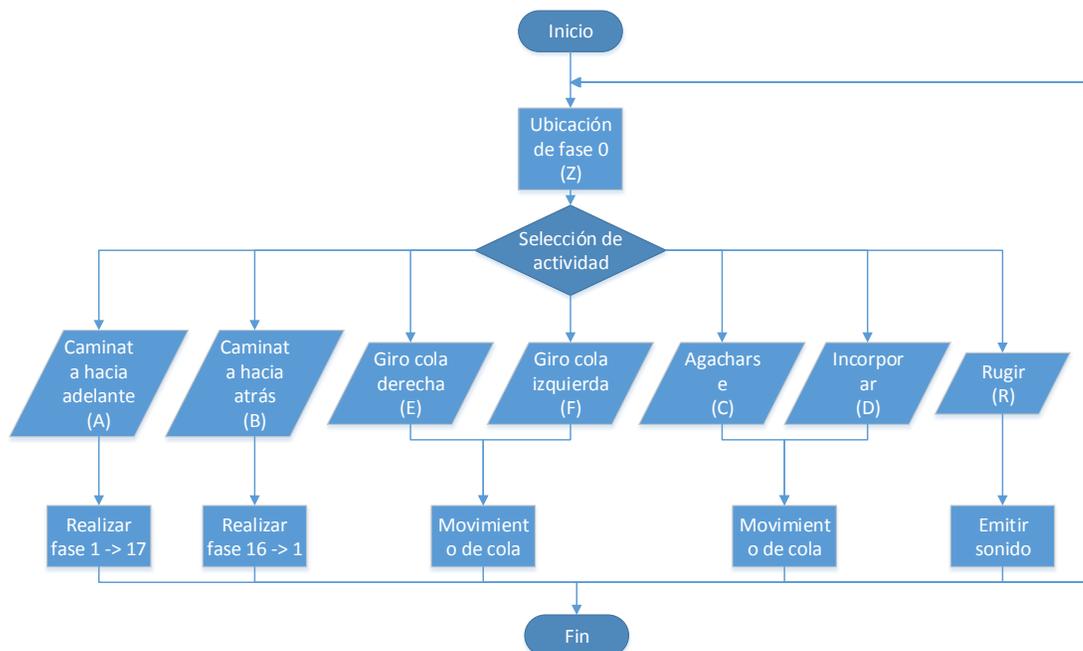
Como resultado de la implementación de los componentes antes mencionados se ha obtenido un control remoto con dimensiones de 12x8x4 cm (Ver Figura 100).



**Figura 100** Control Remoto

### 3.7.2. Diseño de comandos de orden

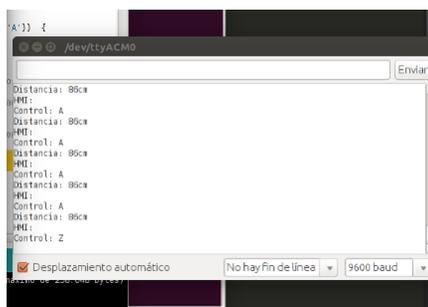
En la Figura 101 se presenta un diagrama de flujo que explica los comandos enviados desde el HMI o el control remoto hacia el prototipo.



**Figura 101** Diagrama de flujo de comandos

Como se puede observar en la figura anterior, el prototipo al ser encendido se ubicará en la posición de equilibrio inicial o también llamada fase 0, la cual está dada cuando no se oprime

ningún botón de los controles. Los controles al estar en este escenario envían el comando “Z”, el cual indica al robot que se mantenga en la fase 0. Al presionar el pulsador de caminata hacia adelante los controles enviarán el comando “A”, el cual indicará al prototipo iniciar la caminata desde la fase 1 hasta la fase 17, de igual forma sucede con el presionar los demás botones de los controles los cuales enviarán los siguientes comandos: Caminata hacia atrás (B), Giro de la cola hacia la derecha (E), Giro de cola hacia la izquierda (F), Agacharse (C), Incorporarse (D) y Rugir (R). En la Figura 102 se observa el monitor serial del controlador del prototipo, el cual muestra los datos recibidos del control remoto y el HMI.



**Figura 102** Monitor serial de lectura recibida

### 3.8. Resumen

El prototipo deseado es un robot bípedo zoomórfico el cual consta con características como: piezas desmontables, hecho de material duradero, usa módulos de comunicación tipo radiofrecuencia, el HMI está diseñada de acuerdo al uso de la norma GEDIS, motores adecuados al fin deseado y lo más importante la realización del cálculo de centro de masa para un correcto posicionamiento en todo momento. Se ha separado los distintos requerimientos del prototipo en 7 secciones llamados “módulos”, los cuales son: Equilibrio, Mecanismo, Caminata, Estructura, Alimentación, Comunicación y HMI.

El módulo 1 o Equilibrio define la metodología que se usa para el cálculo de centro de masa del prototipo, donde se ha seleccionado el teorema de distribución discreta de la materia que permite el cálculo del centro de masa de un sistema de partículas, de distintas masas, densidades y dimensiones.

El módulo 2 o Mecanismo el cual define los mecanismos a utilizar para: cambio de posición del centro de gravedad hacia un costado, control de equilibrio en la marcha bípeda, transmisión de movimiento en las rodillas, transmisión de movimiento en el fémur, transmisión de movimiento en el tobillo y los actuadores a utilizar. Donde se ha seleccionado: motor ubicado en la cola, inclinación del tronco, tren de engranes, acople directo, manivela corredera y servomotores respectivamente.

El módulo 3 o Caminata define: elección del sistema sensorial de inclinación de la superficie, elección del sistema sensorial para colisiones y elección de tipo de movimiento para la marcha bípeda. Se seleccionó: acelerómetro ubicado en el pie, sensor ultrasónico en los ojos y realizar caminata mientras un elemento de acción mecánica este pulsado respectivamente. El módulo 4 o Estructura es donde se selecciona los materiales a usar tanto para la carcasa, los engranes y ejes. Para ello se seleccionó plástico ABS, aluminio y acero de transmisión, debido a las propiedades que cada uno de ellos posee.

Los módulos 5, 6 y 7 son los encargados de definir la alimentación que tiene el prototipo, la forma de comunicación y protocolos a usar, y el HMI. De los cuales son a base de baterías recargables, comunicación mediante radiofrecuencia y HMI realizada en QtDesigner respectivamente.

Una vez seleccionada la metodología en aplicar por cada módulo se decidió separar cada problemática de diseño en subsistemas, los cuales dividen cada problema de diseño en subsecciones a resolver, para posteriormente implementarlos en conjunto, estos son: subsistema estructural, subsistema de potencia y locomoción, subsistema de control y subsistema de radiofrecuencia.

Subsistema estructural es el análisis y definición de la estructura. Está basado en el movimiento de eslabones los cuales componen las partes móviles de la misma, los transmisores de movimiento y los elementos de estabilización. Las partes móviles o llamados eslabones son un total de 8 partes. Los transmisores de movimiento diseñados son utilizando tres diferentes conceptos que son: transmisión directa, transmisión por medio de engranes, transmisión por medio de mecanismo. Para la transmisión directa el eslabón es movido directamente por el movimiento del actuador, por medio de un acople que sujeta al eslabón en un punto definido. En cuanto a la transmisión por medio de engranes se diseñó un tren de engranajes de 3 unidades los cuales son de módulo 1 y poseen 41 dientes cada uno. Y finalmente la transmisión por mecanismo el movimiento ejercido por un actuador se transforma en otro tipo de movimiento, la articulación que requiere este tipo de transmisión es la que provoca el movimiento entre la Pata y la Pantorrilla, debido al poco espacio disponible que se tiene en esta zona, se ha optado por seleccionar el mecanismo manivela corredera inverso. Cada extremidad o también llamadas eslabones se ha dimensionado y analizado por separado para conseguir simplificarlos a una línea recta que expresa la longitud máxima que posee el eslabón entre articulaciones y una las articulaciones pertenecientes al eslabón, por otro lado, los eslabones presentan la característica de tener la ubicación del centro de masa y del valor numérico de masa total por eslabón.

Subsistema de potencia y locomoción, es la sección donde se dimensiona los actuadores a usar y el tipo de alimentación a implementar, para ello se debe establecer las cargas en estado de reposo que afectan el comportamiento de los actuadores, cuando el prototipo se encuentre posicionado sobre una sola extremidad y se halló que con el uso de servomotores de 20 kg-cm es el adecuado para la implementación en el prototipo. Por otra parte, el uso de baterías recargables LiPo es la opción más conveniente en cuanto la alimentación. La capacidad de batería necesaria para mover todos los actuadores y alimentar los cerebros de prototipo tiene un valor de 3200 mAh para un funcionamiento continuo de 13 minutos, se recomendó el uso de una batería de 5000 mAh a 7.4 V y para el control remoto una batería de 300 mAh a 7.4 V.

Subsistema de control, es la sección donde se resuelve la problemática de mantener el equilibrio del prototipo, para ello se realizó un análisis cinemático y un análisis dinámico al bípedo. El análisis cinemático se basa en definir las ecuaciones que determinen el comportamiento del sistema mecánico del prototipo. Para ello se usarán ecuaciones vectoriales desde el origen de coordenadas hasta la posición del centro de gravedad de cada eslabón. La posición de los eslabones que se encuentran unidos, se la determina por medio de la suma de las componentes “xyz” de los eslabones antecesores, usando las llamadas longitudes considerables. Las ecuaciones de los centros de masa de cada eslabón dentro del sistema completo, a desarrollar son el resultado de la suma vectorial de los eslabones antecesores y del vector posición del centro de masa, considerando que cada eslabón rotará para satisfacer las posiciones de caminata establecidas, se calculará la nueva posición de cada centro de masa usando el método de matrices de rotación. Para hallar la ubicación del centro de masa del sistema completo se usará Teorema de distribución discreta de la materia, al igual que se lo aplicó en la ubicación del centro de masa

de cada eslabón, tomando como radio vector de posición de cada partícula a las ecuaciones halladas para cada eslabón. El análisis dinámico se modeló mediante las ecuaciones de Euler-LaGrange, las cuales analizan las energías cinética y potencial que intervienen en el movimiento. El punto más crítico en movimiento del prototipo está ubicado en la articulación respectiva a la rodilla, debido a que en esta zona tiene una mayor concentración de fuerzas. Al desarrollar la ecuación de Euler-LaGrange en punto de trabajo de mayor esfuerzo se halló que el torque necesario para mover cada eslabón es de 20 kg-cm aproximadamente en los cuales cada eslabón podrá moverse a una velocidad de 20° por segundo.

Subsistema de radiofrecuencia es el encargado de definir el diseño de control remoto y los comandos de orden que se utilizarán. El mando diseñado para el manejo del prototipo es un control remoto, el cual mediante comunicación por radiofrecuencia, proveerá de los comandos necesarios para la realización de un ciclo de caminata continua. Por otra parte, los comandos a enviar serán letras mayúsculas, las cuales serán enviadas por el HMI o el control remoto hacia el cerebro del prototipo, donde se analizarán y se ejecutará la orden deseada.

## 4. CAPÍTULO 4 – IMPLEMENTACIÓN, PRUEBA Y RESULTADOS

El capítulo trata de la construcción del prototipo bípedo robótico zoomórfico, enfocándose en la estructura, los elementos actuadores y mecanismos de movimiento, también en los componentes de alimentación y control, la implementación de una interfaz para el usuario, y por último la construcción del control remoto. Cada sección explica de forma separada los puntos mencionados; de forma detallada apoyándose en imágenes o fotografías del proceso de construcción. Al final del capítulo se detallará la sección de pruebas y resultados, donde verificamos el correcto funcionamiento de los comandos establecidos para los ciclos de caminata; se verifica el correcto funcionamiento de los elementos electrónicos, actuadores y sensores.

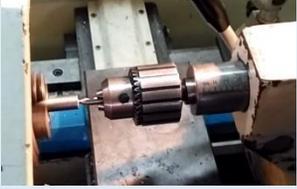
### 4.1. Implementación de los actuadores y mecanismos de movimiento

#### 4.1.1. Mecanizado de ejes y engranes

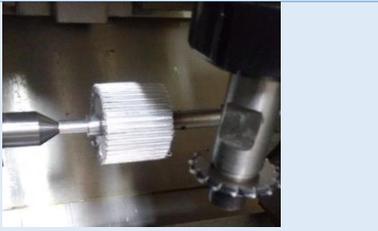
Para el sistema de transmisión se decidió que los engranes sean de aluminio y los ejes de acero de transmisión; para su maquinado se utilizó un torno de mano y una fresadora CNC. Las operaciones de mecanizados se realizaron en las instalaciones de la Universidad, con la tutoría de Ingenieros a cargo de dichas maquinas. El proceso de mecanizado de los ejes y engranes se puede observar en la Tabla 53.

**Tabla 53**

*Mecanizado de ejes y engranes*

Proceso o máquina	Operación	Descripción	Figura
<i>Torno de Mano</i>	Taladrado central de ejes y engranes	Una vez ubicado el eje o el engrane en el mandril, se procede a taladrar un pequeño agujero cónico de 60°; para posteriormente centrar la pieza con el contrapunto.	

Continúa

	<p>Cilindrado de ejes y engranes</p>	<p>Consistió en la reducción del diámetro del eje o engrane. Una vez determinado el avance y la profundidad adecuada, la herramienta se desplazó automáticamente para realizar el corte.</p> 
	<p>Refrentado de ejes y engranes</p>	<p>Consistió en la reducción de la superficie plana perpendicular al eje de giro, de ambas caras de los ejes como de los engranes.</p> 
<p><i>Fresadora CNC</i></p>	<p>Mecanizado de engranes en la CNC</p>	<p>Una vez ubicado el engrane en el mandril de la fresadora, ingresamos el código G previamente generado, para luego realizar el mecanizado de dientes.</p> 
	<p>Mecanizado de acabado final</p>	<p>Generamos una última pasada en los dientes para mejor acabado.</p> 
<p><i>Trabajo Manual</i></p>	<p><i>Limpieza de rebabas</i></p>	<p>Procedemos a limar las rebabas o excesos de la pieza y verificar las dimensiones.</p> 
	<p><i>Resultados finales</i></p>	<p>Se obtuvo cuatro engranes de aluminio y cinco ejes de acero de transmisión.</p> 

#### *4.1.2. Implementación de servomotores lineales y componentes extras*

En la Figura 103 y Figura 104 se puede observar las ubicaciones de los servos lineales y otros componentes (rodamientos y ejes). A su vez se observa el efecto de los posibles cambios de posición de los pies, dados por la carrera del servo-motor lineal.



**Figura 103** Posición pie cerrado



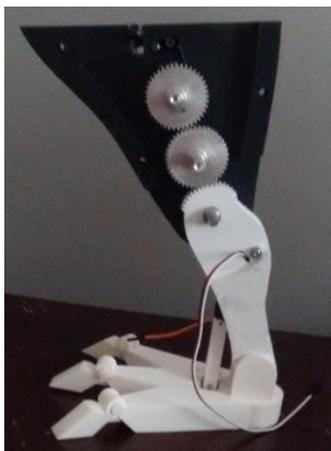
**Figura 104** Posición pie abierto

#### *4.1.3. Acople de engranes al eslabón fémur*

En las siguientes figuras se puede observar el acople entre engrane - servomotor y tren de engranes.



**Figura 105** Unión engrane –servomotor



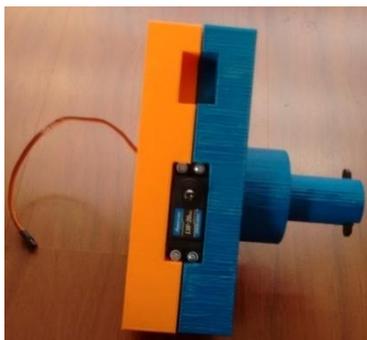
**Figura 106** Tren de engranes fémur

#### *4.1.4. Adecuación de acoples y actuadores a eslabones*

A continuación, se muestra un ejemplo de cómo están ubicados los actuadores y acoples en la estructura.



**Figura 107** Ubicación acople-eslabón



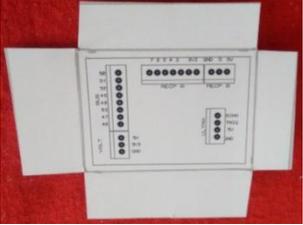
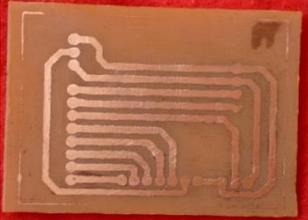
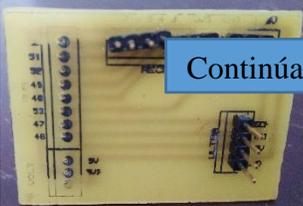
**Figura 108** Ubicación servo-eslabón

#### 4.2. Implementación de los componentes eléctricos y/o electrónicos

Para facilitar la implementación de los componentes electrónicos y su cableado, se diseñó placas electrónicas. Dichas placas disminuyeron la cantidad de cableado en su comunicación total. En la Tabla 54 detallaremos el proceso de fabricación de las placas PCB, utilizadas en el prototipo robótico.

**Tabla 54**  
*Fabricación de placas PCB*

Proceso	Descripción	Figura
<i>Diseño de placas</i>	Utilizando un software de diseño de placas PCB se creó el boceto dev las placas a usar.	
<i>Impresión</i>	Con el uso de impresión láser, se impregnó las placas diseñadas en papel fotográfico.	

	
<p><i>Plasmado y revelado</i></p>	<p>Con el uso de calor se traspasó el diseño de placas a la baquelita.</p>  
<p><i>Ataque Ácido</i></p>	<p>Se sumergió las baquelitas en una solución de Ácido Clorhídrico y agua, para la disolución del cobre.</p> 
<p><i>Limpieza</i></p>	<p>Se retiró el exceso de barniz y ácido, con agua. Para finalmente dar una limpieza con thinner empapado en algodón.</p> 
<p><i>Resultado final</i></p>	<p>Se obtuvo dos placas, en las cuales se añadió los elementos electrónicos finales.</p> 

Continúa

Terminada la fabricación de placas, se incluyó todos los componentes electrónicos en la estructura. En la Figura 109 y Figura 110 se observa el resultado de dicha incorporación.



*Figura 109* Montaje de placa



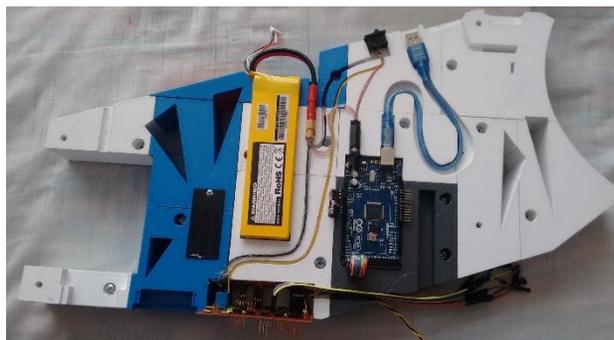
*Figura 110* Implementación de los elementos electrónicos a la estructura

### **4.3. Implementación de la estructura**

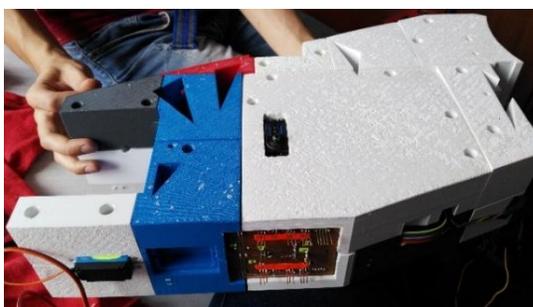
La estructura del bípedo robótico es de filamento ABS utilizando impresión 3D; dado el tamaño del Área de impresión de la máquina, se decidió seccionar las piezas en elementos más pequeños y posteriormente ensamblarse en sus piezas totales.

#### *4.3.1. Construcción del Torso y Cola*

Las siguientes figuras muestran el resultado de construcción de los eslabones Torso, Cola y sus componentes.



**Figura 111** Vista interna eslabón Torso



**Figura 112** Vista lateral del torso ensamblado



**Figura 113** Ensamble del eslabón Cola

#### *4.3.2. Construcción extremidades inferiores*

Las siguientes figuras muestran el proceso y resultado de la construcción de las extremidades inferiores y sus componentes.



**Figura 114** Unión pies y pantorrillas



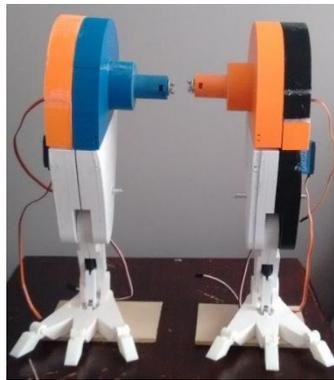
**Figura 115** Ensamble pantorrillas-muslos



**Figura 116** Vista frontal del ensamble pantorrilla-muslo



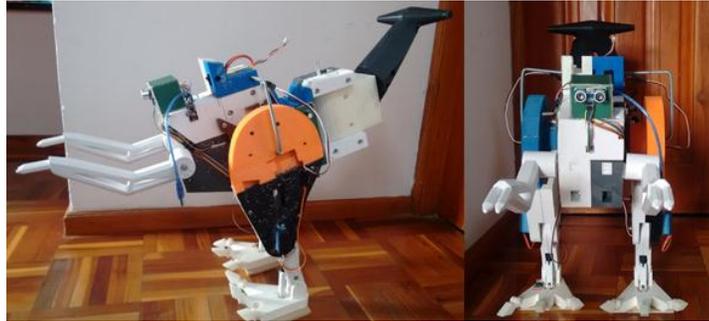
**Figura 117** Elementos de la cadera



**Figura 118** Ensamble extremidades inferiores

#### *4.3.3. Resultado final de la estructura*

En la etapa de construcción final se percibió un aumento de peso en los eslabones, dado el uso de tornillos extras por la división de piezas. Para mejor el desenvolvimiento de los motores, se decidió reducir peso en cada uno de los eslabones de tal manera que se conserve la simetría calculada. La Figura 119 y Figura 120 muestran el ensamble de todos los eslabones que componen la estructura, la posición mostrada es la llamada fase 0 o fase de equilibrio estático. En la Figura 121 muestra el robot pintado y con sus detalles finales.



*Figura 119* Cuerpo ensamblado vista lateral y frontal



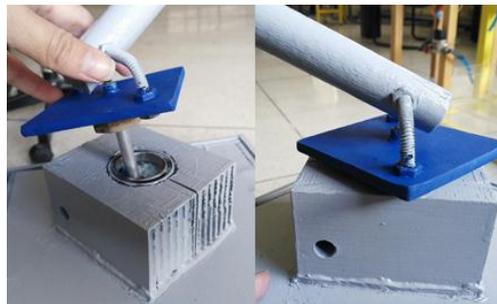
*Figura 120* Cuerpo ensamblado vista isométrica



*Figura 121* Robot pintado

#### 4.4. Implementación del sistema de apoyo

El sistema de apoyo consta de una base pesada de MDF y un eje de madera. Ambos elementos se empatan mediante un eje y un rodamiento, para un movimiento de 360°. Su unión se puede observar en la Figura 122, mientras que el empate del robot se realiza por un eje roscado, como se muestra en la Figura 123. El sistema de apoyo ensamblado en el robot puede observarse en la Figura 124.



*Figura 122* Empate de base y eje de apoyo



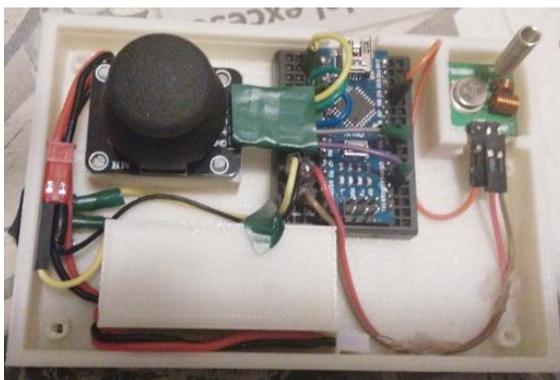
*Figura 123* Unión al robot



*Figura 124* Robot con sistema de apoyo

#### 4.5. Implementación del control remoto

El control remoto fue fabricado usando elementos de comunicación del tipo radiofrecuencia, una batería recargable pequeña, un joystick para usarlo de mando y dos pulsadores. El material utilizado para la construcción de la carcasa es de plástico ABS. Ver Figura 125 y Figura 126.



*Figura 125* Vista interna del control remoto



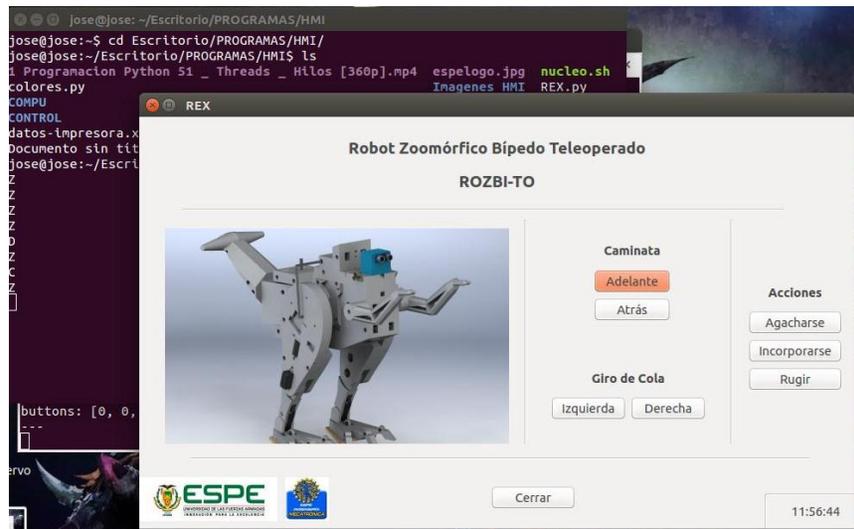
*Figura 126* Control en funcionamiento

#### 4.6. Implementación de interfaz de usuario

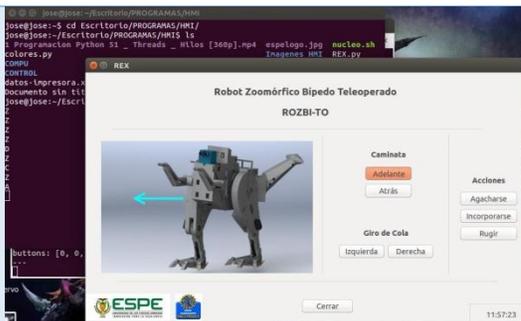
El sistema operativo seleccionado es Ubuntu 14.0.4, dado que es un sistema libre y de fácil uso; la implementación del HMI se realizó en el programa QtDesigner y usando lenguaje Python. También se utilizó nodos del sistema ROS para realizar tareas dedicadas a robótica. Las siguientes figuras muestran la corrida del interfaz, el HMI, su funcionamiento, elementos de mando y comunicación.

```
Terminal Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda
jose@jose: ~/Escritorio/PROGRAMAS/HMI
jose@jose:~$ cd Escritorio/PROGRAMAS/HMI/
jose@jose:~/Escritorio/PROGRAMAS/HMI$ ./tesis.sh
```

**Figura 127** Corrida de HMI



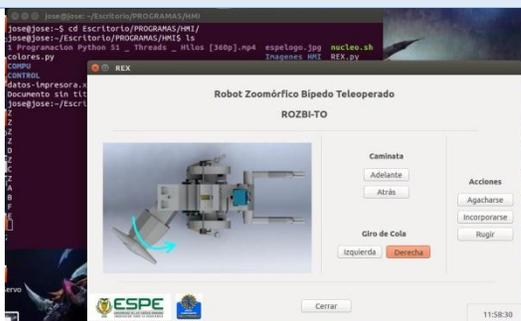
**Figura 128** HMI



**Figura 129** Caminata hacia adelante



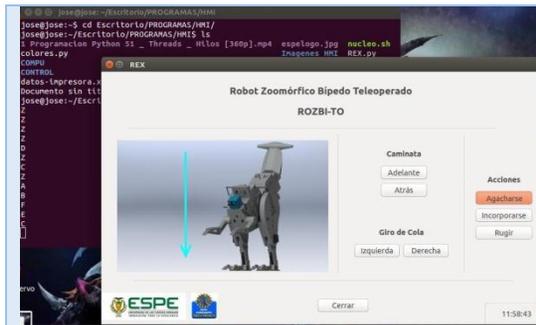
**Figura 130** Caminata hacia atrás



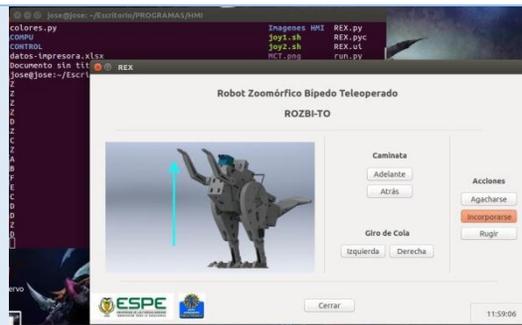
**Figura 131** Giro cola hacia derecha



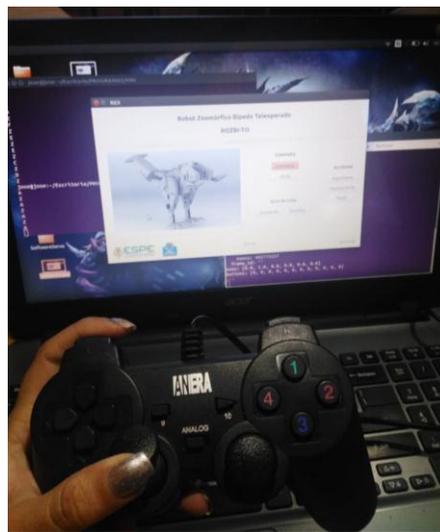
**Figura 132** Giro cola hacia izquierda



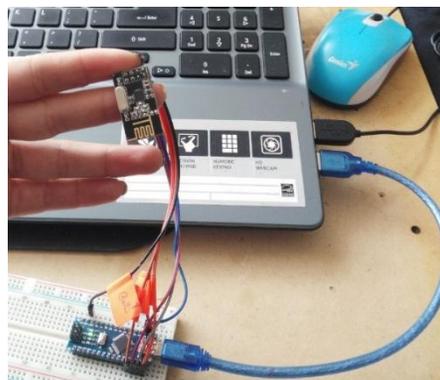
**Figura 133** Agacharse



**Figura 134** Incorporarse



**Figura 135** Joystick



**Figura 136** Circuito de comunicación HMI – robot

## 4.7. Pruebas y Resultados

Para el desarrollo de pruebas y resultados los dividiremos en 4 subsistemas, con el fin de obtener un funcionamiento óptimo del robot. Cada subsistema detallará los componentes sometidos a prueba, su duración, responsables y los diferentes tipos de pruebas; y resumiremos los resultados en una tabla a continuación. Los subsistemas para el desarrollo de las pruebas serán: un mecánico, eléctrico, de software y un mecatrónico.

### 4.7.1. Subsistema Mecánico

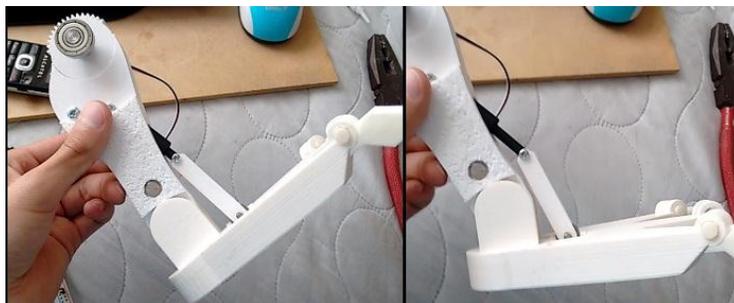
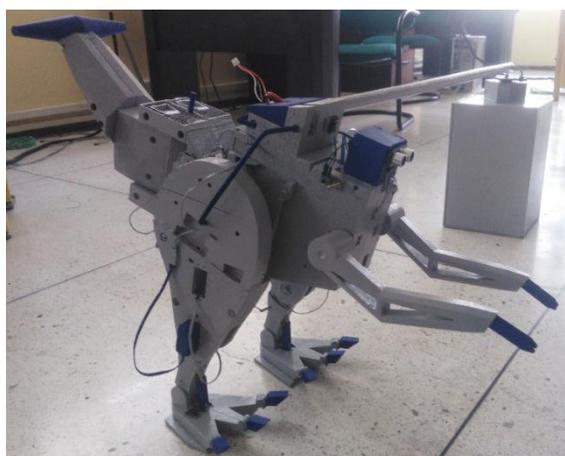
Realizaremos pruebas de los componentes mecánicos para verificar su acople y que las superficies presenten un bajo coeficiente de rozamiento dinámico. En el caso de fallas serán corregidos para obtener los resultados deseados.

**Tabla 55**  
*Pruebas Mecánicas*

<b>Prueba</b>	
<b>Identificación de la Prueba</b>	Prueba de estructura y componentes mecánicos
<b>Objetivo General de la Prueba</b>	Verificar el acople y el coeficiente de rozamiento dinámico de las piezas.
Componentes sometidos a Prueba	Torso, muslos, pantorrillas y patas.
<b>Responsables</b>	Chiluisa Melanie Hidalgo José Luis
<b>Duración estimada</b>	2 semanas
<b>Descripción de las Pruebas</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ensamblado del torso, muslos, pantorrillas y patas.</li> <li>2. Ubicación y encero de servomotores para cada nodo estructural.</li> <li>3. Verificación de pesos de cada una de las estructuras.</li> <li>4. Verificación de los acoples entre estructuras.</li> <li>5. Verificación de un adecuado rozamiento dinámico entre piezas.</li> <li>6. Verificación de la estructura de apoyo.</li> </ol>	

**Tabla 56***Resultados de las Pruebas Mecánicas*

<b>Prueba</b>	<b>Resultado</b>
<b>Ensamblado de estructuras</b>	Correcto y con tendencia a ajuste
<b>Ubicación y encero de servomotores</b>	Correcto
<b>Verificación de pesos</b>	Correcto y con tendencia a ser mayor
<b>Verificación de acoples</b>	Correcto
<b>Verificación de rozamientos</b>	Correcto en el caso de estructuras y variable según la superficie de asentamiento de las patas
<b>Verificación de la estructura de apoyo</b>	Correcto

**Figura 137** Resultados Mecánicos**Figura 138** Robot y sistema de apoyo

#### 4.7.2. Subsistema Eléctrico

Realizaremos pruebas de los componentes eléctricos para verificar la alimentación del robot y el control remoto independiente; y la adquisición de datos para los motores.

**Tabla 57**

*Pruebas Eléctricas*

<b>Prueba</b>	
<b>Identificación de la Prueba</b>	Prueba de los componentes eléctricos
<b>Objetivo General de la Prueba</b>	Verificar la alimentación de cada componente y del control remoto; y la adquisición de datos de los motores
<b>Componentes sometidos a Prueba</b>	Placas electrónicas, motores y cableado
<b>Responsables</b>	Chiluisa Melanie Hidalgo José Luis
<b>Duración estimada</b>	1 semana
<b>Descripción de las Pruebas</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Verificación de alimentación de servomotores.</li> <li>2. Verificación de los elementos de protección.</li> <li>3. Verificación de datos para servomotores.</li> <li>4. Verificación de alimentación del control remoto.</li> </ol>	

**Tabla 58**

*Resultados de las Pruebas Eléctricas*

<b>Prueba</b>	<b>Resultado</b>
<b>Alimentación de motores</b>	Correcto en máximo 6V
<b>Elementos de protección</b>	Correcto
<b>Obtención de datos de control</b>	Correcto
<b>Alimentación del control remoto</b>	Correcto

#### 4.7.3. Subsistema de Software

Realizaremos pruebas del software para verificar la comunicación entre el robot y los componentes de mando; y el seguimiento de marcha. Las pruebas realizadas para la comunicación son: Robot – Control Remoto, Robot – HMI y Robot – Control Joystick. Cada comunicación detallará diferentes parámetros de pruebas; y sus resultados igualmente serán calificados por parámetros.

**Tabla 59**  
*Pruebas de Software*

<b>Prueba</b>	
<b>Identificación de la Prueba</b>	Prueba de software
<b>Objetivo General de la Prueba</b>	Verificar la comunicación entre Robot – Control Remoto, Robot – HMI y Robot – Control Joystick; y el seguimiento de marcha.
<b>Componentes sometidos a Prueba</b>	Robot, control remoto, HMI y Joystick.
<b>Responsables</b>	Chiluisa Melanie Hidalgo José Luis
<b>Duración estimada</b>	1 semana
<b>Descripción de las Pruebas</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Corrida óptima del HMI</li> <li>2. Verificación de comunicación Robot – Control Remoto.</li> <li>3. Verificación de comunicación Robot – HMI.</li> <li>4. Verificación de comunicación Robot – Control Joystick.</li> <li>5. Seguimiento de marcha.</li> </ol>	

**Tabla 60**  
*Resultado de las Pruebas de Software*

<b>Prueba</b>	<b>Parámetros</b>	<b>Resultado</b>
<b>Corrida de HMI</b>	Corrida de todos los nodos	Correcto – Latencia: 3s
<b>Comunicación Robot – Control Remoto</b>	Conexión Inicial	Correcto – Tiempo: 1s
	Envío de los datos del Control Remoto	Correcto – Latencia: 500ms
	Recepción de los datos por el Robot	Correcto con retardo – Latencia: 2s
<b>Comunicación Robot – HMI</b>	Conexión Inicial	Correcto – Tiempo: 1s
	Envío de los datos del HMI	Correcto – Latencia: 500ms
	Recepción de los datos por el Robot	Correcto – Latencia: 1s
<b>Comunicación Robot – Control Joystick</b>	Conexión Inicial	Correcto – Tiempo: 1s
	Envío de los datos del Control Joystick	Correcto – Latencia: 500ms
	Recepción de los datos por el Robot	Correcto – Latencia: 1s
<b>Seguimiento de marcha</b>	Repetición del comando	Correcto
	Respuesta al cambio de orden	Correcto – Latencia: 2s

```

Terminal
roscoreMtp://ose:11311/ x Terminal x Terminal
nsecs: 238888621
frame_id: ''
axes: [-0.0, -0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0]
buttons: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
---
header:
seq: 8
stamp:
secs: 1527954922
nsecs: 894390372
frame_id: ''
axes: [-0.0, -0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0]
buttons: [0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
---
header:
seq: 9
stamp:
secs: 1527954922
nsecs: 894370000
frame_id: ''
axes: [-0.0, -0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0]
buttons: [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]

```

**Figura 139** Señal recibida de joystick



**Figura 140** Comunicación joystick con HMI

#### 4.7.4. Subsistema Mecatrónico

Realizaremos las pruebas Mecatrónicas para verificar la comunicación entre el robot y los componentes de mando en paralelo, la caminata y el cumplimiento de las otras actividades. Los resultados de las pruebas serán resumidos en la Tabla 62 y en la Tabla 63 observaremos las actividades del robot.

**Tabla 61**

#### *Pruebas Mecatrónicas*

Prueba	
<b>Identificación de la Prueba</b>	Pruebas Mecatrónicas
<b>Objetivo General de la Prueba</b>	Verificar la comunicación del Robot – Componentes de mando paralelos. La caminata principal y cumplir las diferentes actividades.
<b>Componentes sometidos a Prueba</b>	Robot, control remoto, HMI y Joystick.
<b>Responsables</b>	Chiluisa Melanie Hidalgo José Luis Loza David

Continúa

<b>Duración estimada</b>	2 semana
<b>Descripción de las Pruebas</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Verificación de comunicación Robot – Componentes de mando.</li> <li>2. Comprobación de la caminata principal.</li> <li>3. Desempeño de las actividades extras.</li> </ol>	

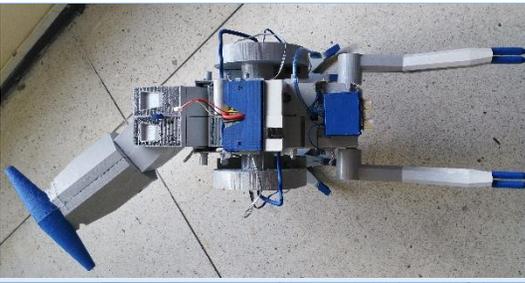
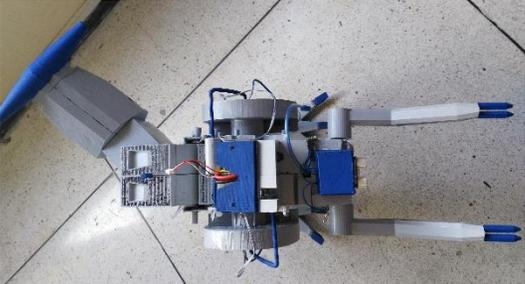
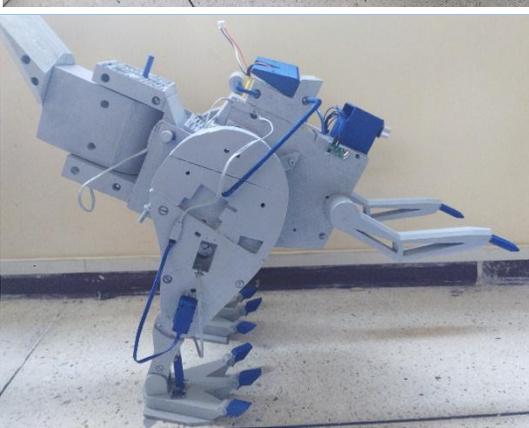
**Tabla 62***Resultado de las Pruebas Mecatrónicas*

Prueba	Parámetros	Resultado
<b>Comunicación Robot – Componentes de Mando</b>	Conexión Inicial	Correcto – Tiempo: 1s
	Envío de los datos de los Componentes de Mando	Correcto – Latencia: 500ms
	Recepción de los datos por el Robot	Correcto con retardo – Latencia: 2s
<b>Comprobación de la caminata principal</b>	Conexión Inicial	Correcto – Tiempo: 1s
	Repetición del comando	Correcto
	Respuesta al cambio de orden	Correcto – Latencia: 2s
<b>Desempeño de actividades extras</b>	Caminata Atrás	Correcto
	Giro a la derecha de la cola	Correcto – Latencia: 10ms
	Giro a la izquierda de la cola	Correcto – Latencia: 10ms
	Agacharse	Correcto – Latencia: 10ms
	Incorporarse	Correcto – Latencia: 10ms

**Tabla 63***Resultados gráficos de la Pruebas Mecatrónicas*

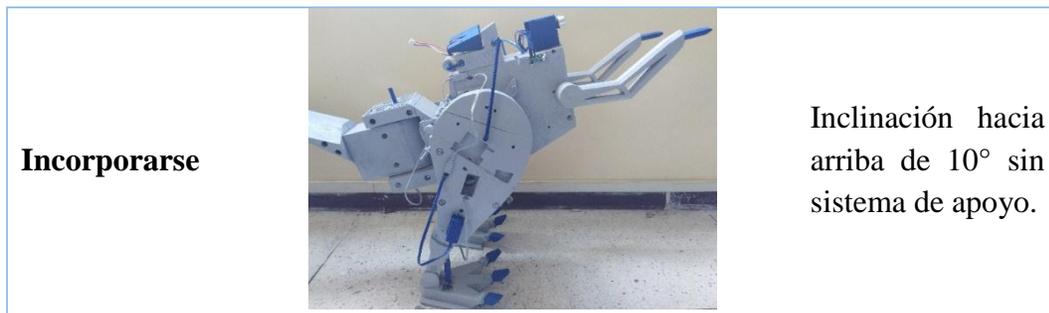
Actividades	Figura	Resultados
<b>Caminata Principal</b>		Caminata 100% en una superficie lisa, con una velocidad de 30cm/min.



<p><b>Caminata Atrás</b></p>		<p>Caminata 100% en una superficie lisa, con una velocidad de 30cm/min.</p>
<p><b>Giro a la derecha de la cola</b></p>		<p>Giro de 60° a la derecha sin sistema de apoyo.</p>
<p><b>Giro a la izquierda de la cola</b></p>		<p>Giro de 60° a la izquierda sin sistema de apoyo.</p>
<p><b>Agacharse</b></p>		<p>Inclinación hacia abajo de 10° sin sistema de apoyo.</p>

Continúa





#### 4.8. Resumen

En el capítulo explicamos la construcción del prototipo bípedo robótico zoomórfico, enfocándose en la estructura, los elementos actuadores y mecanismos de movimiento, también en los componentes de alimentación y control, la construcción del control remoto, y por último la implementación de una interfaz para el usuario.

La estructura del bípedo robótico fue construida por impresiones 3D en ABS, los cuales tuvieron una reducción del peso para mantener la simetría calculada y evitar el exceso de peso por elementos de unión. Para facilitar la ubicación y comunicación de los elementos electrónicos fueron incluidas dos placas PCB. El sistema de apoyo fue construido de madera y MDF; permitiendo un empate sencillo a la caminata y obtener un movimiento de 360°. Los componentes de mando constan de un control de remoto fabricado en impresión 3D y elementos básicos de electrónica, un control Joystick y un interfaz de usuario en el sistema Ubuntu y nodos ROS.

En el desarrollo de pruebas y resultados lo dividimos en 4 subsistemas, cada subsistema detallo los componentes sometidos a prueba, la duración de la misma, sus responsables y los diferentes tipos de pruebas. Los subsistemas para el desarrollo de las pruebas fueron: un mecánico, eléctrico, de software y un mecatrónico.

Las pruebas mecánicas verificaron el acople de sus componentes y el coeficiente de rozamiento dinámico de las piezas. Las pruebas eléctricas verificaron la alimentación del robot y el control remoto, y la adquisición de datos para los motores. Las pruebas de software confirmaron la comunicación entre el Robot y los componentes de mando independientes y el seguimiento de marcha. En cada una de las comunicaciones detallamos tres parámetros principales: conexión inicial, envío de datos de los componentes de mando y la recepción de los datos en el Robot. Las Pruebas Mecatrónicas verificaron la comunicación entre el Robot y los componentes de mando en paralelo, la caminata y el cumplimiento de sus actividades extras. Entre las actividades extra podemos encontrar la caminata hacia atrás, el giro de la cola a ambos lados y la inclinación del torso hacia arriba y abajo.

Como resultado de las pruebas obtuvimos una caminata al 100% en una superficie lisa, con una velocidad de 30cm/min y un tiempo de latencia de 2s. En la caminata hacia atrás obtuvimos resultados al 100% en una superficie lisa, con una velocidad de 30cm/min y un tiempo de latencia de 2s. Como resultados de actividades externas tenemos un giro de 60° a ambos lados sin el sistema de apoyo, y una inclinación de 10° del torso hacia arriba y abajo sin sistema de apoyo.

## 5. CAPÍTULO 5 – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

- Se diseñó y construyó un prototipo robótico, de morfología bípeda zoomórfica. Con desplazamiento dinámico y estabilidad cuasi-estática, de dimensiones 550 mm de alto, 770 mm de largo y 340 mm de ancho. Y manejado mediante un control remoto y una HMI implementada en software libre.
- El movimiento con piernas es el más usado en la robótica cuando se requiere trasladarse en superficies irregulares. A mayor número de patas que posea el robot caminante y a una altura menor del centro de masa, se consigue que el robot permanezca en equilibrio durante todo el ciclo de caminata.
- Se implementó un circuito electrónico, el cual permite la comunicación entre actuadores y la tarjeta de control, con el menor ruido, mayor eficiencia y reducción de cableado. Esto se logró usando una placa PCB diseñada con un espesor de pista de 3 mm, debido a la potencia que pasa a través de las mismas.
- El uso de módulos radiofrecuencia facilitó la comunicación entre el HMI y el control remoto al prototipo robótico, debido a la gran cantidad de opciones de banda. En el caso del prototipo implementado se utilizó de dos tipos, una banda de baja frecuencia (433 MHz) para la comunicación con el control remoto y una banda de alta frecuencia (2,4 GHz) para la comunicación con el HMI. Este ancho de banda entre las dos frecuencias usadas facilita que no exista interferencia ni superposición entre los datos enviados.
- Se utilizó circuitos de protección y regulación de voltaje para la alimentación de los actuadores. Dichos circuitos son los llamados UBEC, los cuales son reguladores de voltaje del

tipo conmutador, que trabajan a 6 voltios y 3 amperios. Por otra parte, para lograr un mejor desempeño y eficiencia en la alimentación se colocó en paralelo a las líneas de alimentación de cada regulador, un capacitor de 2200 uF y 16V, el cual anula el voltaje de rizo.

- Para lograr un mejor rendimiento y mayor resolución de movimiento se implementó el actuador directo al nodo de unión entre eslabones, consiguiendo así un movimiento uniforme y exacto. Es decir, los comandos programados de movimiento se reflejan directamente en los movimientos del eslabón acoplado.
- Gracias a los cálculos realizados en el capítulo 3, acerca de las posiciones que debe tomar el eslabón Torso en las diferentes fases del ciclo de marcha, se logró equilibrio estático y mantener una simetría estructural del prototipo. Dicho equilibrio se da cuando las distancias y los pesos de los puntos extremos generan un mismo valor de momento. En la implementación se consiguió que el prototipo tenga una estructura donde el momento ejercido por la cola se asemejó al momento producido por el torso y brazos.
- El prototipo implementado puede trasladarse sobre un piso plano, horizontal y con una rugosidad muy baja. La superficie descrita permite que el prototipo se deslice fácilmente en las fases de acomodo en el ciclo de marcha programado. También permitirá el giro del robot alrededor del sistema de apoyo. También se equipó un sistema de apoyo al prototipo robótico para eliminar las fuerzas axiales, por la falta de giro de caderas. El giro de caderas es necesario para lograr un mayor traslado del centro de gravedad hacia los costados. El traslado es necesario cuando el robot se encuentra apoyado sobre una sola extremidad, por lo tanto, la implementación del sistema de apoyo brinda mayor facilidad a esta problemática.

## 5.2. Recomendaciones

- Es aconsejable, para un trabajo futuro, reducir las dimensiones generales del prototipo próximo a construir. Esta acción reducirá el peso del prototipo y por lo tanto bajará el costo de potencia requerida y se podrán usar motores de menor torque y más baratos.
- Es recomendable el aumento de extremidades en los robots caminantes, para conseguir una mejor estabilidad y mayor número de superficies de apoyo. También el implementar una estructura, con el centro de gravedad cercano al suelo. Esto asegura el equilibrio estático más estable.
- Para un mejor desempeño, el uso de un circuito implementado en una placa PCB es de gran utilidad, debido a que se reduce el cableado por lo tanto pérdidas de potencia y se ahorra mucho espacio.
- El uso de dispositivos de radiofrecuencia facilita la comunicación entre los mandos de control y los prototipos robóticos. Para trabajos futuros se recomienda el uso de frecuencias con ancho de banda muy alto entre sí, esto evitará la superposición de las mismas. Por otra parte, cuando se use controladores AVR, y se utilicen librerías específicas para el uso de módulos de radiofrecuencia, es necesario que las librerías nombradas sean compatibles entre sí.
- Para tener una mayor eficiencia de potencia es recomendable el uso de sistemas de regulación y protección. Esto se debe a subidas de voltaje inesperadas y posibles corrientes parásitas. Otra alternativa es el uso de un capacitor ubicado en paralelo a las alimentaciones de los actuadores y con ello lograr la eliminación de voltaje de rizo y descargas del sistema de alimentación.

- Es recomendable al momento de diseñar la estructura, eliminar las distancias entre el actuador y el eslabón que mueve, es decir usar acople directo en vez de trenes de engranes o mecanismos alternos.
- El uso prolongado del prototipo desgasta de manera continua a las baterías recargables, por lo tanto, se recomienda el uso de una fuente de alimentación continua, para evitar el bajo rendimiento de los actuadores y otros elementos; y lograr un óptimo desempeño de los mismos.
- Al usar un sistema de apoyo para eliminación de fuerzas axiales, es aconsejable usar un sistema empotrado con la superficie de caminata. El empotramiento es una solución práctica al uso de una base de apoyo que sea pesada para evitar que el prototipo mueva a dicha base. A su vez se propone que el sistema de sujeción robot-apoyo tenga una articulación del tipo rotula.

### **5.3. Trabajos futuros**

Se debe realizar un rediseño completo de la estructura del prototipo bípedo robótico, con el fin de reducir el peso y espesor de los eslabones. A fin de que sean más notables los cambios de centro de gravedad y sea independiente a un sistema de apoyo, lo cual se consigue tomando a consideración el traslado del centro de gravedad hacia los costados con el uso de caderas en lugar de una cola de gran peso. Para ellos es necesario realizar un estudio de número de Froude, para obtener un valor el cual indique que el bípedo puede realizar cambios de ciclos de marcha. El estudio permite desarrollar una relación de tamaños entre los eslabones fémur-pantorrilla y asegurar una caminata sin colisiones con la superficie y libre de rozamientos. A su vez los nodos de unión entre pantorrilla y pies se debe asociar un sistema de amortiguación con el fin de lograr de reducir la carga dinámica producida en los actuadores ubicados en el nodo nombrado y

asegurar un correcto asentamiento de la planta de los pies. Los pies deben tener una ligera curvatura convexa ubicada en su planta, para disminuir el área de contacto con la superficie y eliminar colisiones con las aristas vivas de las plantas. Por último, se debe cambiar la tarjeta de control a una Raspberry, la cual trabaja en paralelo, posee mayor rapidez de procesamiento, tiene capacidad de conexión con módulos externos, usa comunicación Ethernet y Wifi, posee mayor memoria y tiene un sistema operativo libre y propio.

## BIBLIOGRAFÍA

Abdallah, M., & Goswami, A. (2005). *A Biomechanically Motivated Two-Phase Strategy for Biped Upright Balance Control*. IEEE. doi:10.1109/ROBOT.2005.1570406

Abourachid, A., & Hugel, V. (2016). *The Natural Biped, Birds and Humans*. Edinburgh: Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-42417-0 1

Aclan, M. C., & Ramos, M. C. (2009). *Bipedal Robot Locomotion Using Multivariable Control*. IEEE. doi:10.1109/TENCON.2009.5396036

Aghabalaie, P., Hosseinzadeh, M., Talebi, H. A., & Shafiee, M. (2010). *Nonlinear Robust Control of a Biped Robot*. IEEE. doi:10.1109/ISIE.2010.5637535

Ames, A. D., Galloway, K., & Grizzle, J. W. (2012). *Control Lyapunov Functions and Hybrid Zero Dynamics*. doi:10.1109/CDC.2012.6426229

Ames, A., & Galloway, K. (2013). *Rapidly Exponentially Stabilizing Control Lyapunov Functions and Hybrid Zero Dynamics*.

Anybots, I. (2007). Recuperado el 05 de Mayo de 2017, de Anybots: <https://www.anybots.com>

Aoyama, T., Sekiyama, K., Hasegawa, Y., & Fukuda, T. (2012). *3-D Biped Walking over Rough Terrain Based on the Assumption of Point-Contact*. IEEE. doi:10.1109/IROS.2010.5650891

Asada, H., & Slotine, J. E. (1986). *Robot analysis and control*.

Azuma, A. (1992). *The Biokinetics of Flying and Swimming*.

Benalcazar, P., & Noboa, A. (2017). *Diseño y construcción de una plataforma robótica zoomórfica de cuatro extremidades con 12 grados de libertad*. Obtenido de <http://playhd.me/watch?v=QHVzSmR5WXBZOWdZ>

Calderón, G. F. (2017). *Diseño y construcción de un prototipo didáctico de péndulo invertido con 4 diferentes tipos de controladores*. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/12670/1/TESPE-053627.pdf>

Canudas-de-Wit, C. (2004). *On the Concept of Virtual Constraints as a Tool for Walking Robot Control and Balancing*. doi:10.1016/j.arcontrol.2004.03.002

Carvajal, A. S., & Martínez, S. S. (2016). *Diseño y construcción de un torso robótico colaborativo de dos brazos para la unión de una junta empernada en una celda de trabajo* . Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/12260/1/T-ESPE-053545.pdf>

Cavagna, G. A., Willems, P. A., & Heglund, N. C. (1998). *Walking on Mars*.

Chevallereau, C., Abba, G., Aoustin, Y., Plestan, F., Westervelt, E. R., Canudas-de-Wit, C., & Grizzle, J. W. (2003). *RABBIT: A Testbed for Advanced Control Theory*. doi:10.1109/MCS.2003.1234651

Chevallereau, C., Grizzle, J. W., & Shih, C. I. (2009). *Asymptotically Stable Walking of a Five-Link Underactuated 3-D Bipedal Robot*. doi:10.1109/TRO.2008.2010366

Corpuz, F. J., Lafoteza, B. C., Broas, R. A., & Ramos, M. (2009). *Design and Implementation of a ClosedLoop Static Balance System for the YICAL Leg 2 Biped*. Singapur: IEEE. doi:10.1109/TENCON.2009.5395815

Ferreira, J. P., Crisóstomo, M. M., & Coimbra, A. P. (2010). *SVR Sagittal Balance of a Biped Robot Controlling the Torso and Ankle Joint Angles*. IEEE. doi:10.1109/IEEEM.2010.5674629

García, I. (2007). *Introduction to Dynamic Balance for Humanoid Robots, the Key of Biped Locomotion*. Málaga.

Garzón, P. M., & Obando, C. A. (2016). *Diseño y construcción de una plataforma robótica para exteriores tele operada, para el laboratorio de manufactura* . Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/12086/1/T-ESPE-053403.pdf>

Ge, S. S., Li, Z., & Yang, H. (2012). *Data Driven Adaptive Predictive Control for Holonomic Constrained Under-Actuated Biped Robots*. doi:10.1109/TCST.2011.2145378

Genta, G. (2012). *Introduction to the Mechanics of Space Robots*. Londres: Space Technology Library. doi:10.1007/978-94-007-1796-1

Grizzle, J. W. (2002). *Rabbit Robot Biped*. Recuperado el 3 de Mayo de 2017, de <http://web.eecs.umich.edu/~grizzle/papers/RABBITExperiments.html>

Grizzle, J. W. (2008). *Mabel*. Recuperado el 3 de Mayo de 2017, de Mabel.de <http://web.eecs.umich.edu/~grizzle/papers/MABEL.html>

Guihard, M., & Gorce, P. (2002). *Dynamic Control of Bipedes Using Ankle and Hip Strategies*. IEEE. doi:10.1109/IRDS.2002.1041660

Guzmán Valdivia, C. H. (2010). *Construcción de un robot bípedo basado en caminado dinámico*.

Hamed, K., & Grizzle, J. W. (2013). *Event-Based Stabilization of Periodic Orbits for Underactuated 3D Bipedal Robots with Left-Right Symmetry*.

Hardt, M., & Von Stryk, O. (2002). *The role of motion dynamics in the design, control and stability of bipedal and quadrupedal robots*. Berlin: Heidelberg.

Honda Motor. (2007). *Robot Asimo*. Obtenido de <http://asimo.honda.com/downloads/pdf/asimo-technical-information.pdf>

Jironza, J. A., & Arellano, F. D. (2015). *Diseño y construcción de un mecanismo estabilizador para la cámara de un dron*. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/11232>

Kajita, S., Morisawa, M., Miura, K., Nakaoka, S., Harada, K., Kaneko, K., . . . et ál. (2010). *Biped Walking Stabilization Based on Linear Inverted Pendulum Tracking*. IEEE. doi:10.1109/IROS.2010.5651082

Kim, J., Kwak, H., Lee, H., Seo, K., Lim, B., Lee, M., . . . et ál. (2012). *Balancing Control of a Biped Robot*. IEEE. doi:10.1109/ICSMC.2012.6378165

Kwon, W., Kim, H. K., Park, J. K., Roh, C. H., Lee, J., Park, J., . . . et ál. (2007). *Biped Humanoid Robot Mahru III*. IEEE. doi:10.1109/ICHR.2007.4813930

Li, G., Huang, Q., Xu, Q., Li, G., Li, J., & Li, M. (2010). *Design of a Small Biped Mechanism with 7 DOFs Legs and Double Spherical Hip Joint*. IEEE. doi:10.1109/WCI-CA.2010.5554999

Li, T., Su, Y., & Liu, S. H. (2012). *Dynamic Balance Control for Biped Robot Walking Using Sensor Fusion, Kalman Filter, and Fuzzy Logic*. doi:10.1109/TIE.2011.2175671

Li, Z., & Ge, S. S. (2012). *Adaptive Robust Controls of Biped Robots*. doi:10.1049/iet-cta.2012.0066

Lim, H., Setiawan, S. A., & Takanishi, A. (2001). *Balance and Impedance Control for Biped Humanoid Robot Locomotion*. IEEE. doi:10.1109/IROS.2001.973405

Lim, S., Oh, S. N., & Kim, K. I. (2012). *Balance Control for Biped Walking Robots Using only Zero-Moment-Point Position Signal*. doi:10.1049/el.2011.3091

Lin, C. M., Chen, L. Y., & Chen, C. H. (2007). *RC-MAC hybrid control for MIMO Uncertain Nonlinear Systems Using Sliding-Mode Technology*. doi:10.1109/TNN.2007.891198

Liu, G., Li, M., Guo, W., & Cai, H. (2012). *Control of a Biped Walking with Dynamic Balance*. doi:10.1109/ICMA.2012.6282852

Llanos, F., & Lliguin Silva, Á. (2010). *Control electrónico por comandos de voz para un*. Obtenido de Tesis de Grado de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo: <http://dspace.espech.edu.ec/bitstream/123456789/630/1/38T00248.pdf>

Ltd., I. T. (Abril de 2017). *Dinosaurio Dragón Andante Gris Con Control Remoto*. Obtenido de Juguetes.es: <http://www.juguetes.es/comprar/dinosaurio-dragon-andante-gris-con-control-remoto/>

Matsumoto, K., & Kawamura, A. (2010). *The Direction Control of a Biped Robot Using Gyro Sensor Feedback*. IEEE. doi:10.1109/AMC.2010.5464012

Matt, R., Shane, B., Allison, L., & Philip, V. (2010). *MABEL Robotic Foot Design Final Report ME 450 Fall 2010*.

Mecatrónica, C. (2014). *Proyectos de Titulación Realizados: ESPE - Ingeniería*. Obtenido de ESPE - Ingeniería Mecatrónica: <http://mecatronica.espe.edu.ec/trabajos-de-titulacion-realizados/>

MIT. (s.f.). *MIT Leg Lab's Spring Flamingo Robot*. Obtenido de MIT Leg Laboratory: [http://www.ai.mit.edu/projects/leglab/robots/Spring\\_Flamingo/Spring\\_Flamingo](http://www.ai.mit.edu/projects/leglab/robots/Spring_Flamingo/Spring_Flamingo)

MIT. (s.f.). *MIT Leg Lab's Spring Turkey Robot*. Obtenido de MIT Leg Laboratory: [http://www.ai.mit.edu/projects/leglab/robots/Spring\\_Turkey/Spring\\_Turkey.html](http://www.ai.mit.edu/projects/leglab/robots/Spring_Turkey/Spring_Turkey.html)

MIT. (s.f.). *Troody the Robotic Dinosaur*. Obtenido de MIT Leg Laboratory: <http://web.mit.edu/spotlight/archives/troody.html>

Mora, A. (2016). *El robot que enseña robótica y programación a niños*. Obtenido de Propiedad intelectual Ecuador: <https://www.propiedadintelectual.gob.ec/teebot-el-robot-que-ensena-programacion-y-robotica-a-ninos/>

Ono, H., Sato, T., & Ohnishi, K. (2011). *Balance Recovery of Ankle Strategy: Using Knee Joint for Biped Robot*. doi:10.1109/ISAS.2011.5960955

Pardos Gotor, J. M. (2005). *Algoritmos de geometría diferencial para la locomoción y navegación bípedas de robots humanoides aplicación al robot RH0 director*.

Parsa, M., & Farrokhi, M. (2010). *Robust Nonlinear Model Predictive Trajectory Free Control of Biped Robots Based on Nonlinear Disturbance Observer*. doi:10.1109/IRANIANCEE.2010.5506996

Peabody, J., & Gurocak, H. B. (1998). *Design of a Robot that Walks in Any Direction*.

Pratt, J. E., Chew, C. M., Torres, A., Dilworth, P., & Pratt, G. (2001). *Virtual Model Control: An Intuitive Approach for Bipedal Locomotion*. doi:10.1177/02783640122067309

Rehbinder, H., & Hu, X. (2001). *Drift-Free Attitude Estimation for Accelerated Rigid Bodies*. IEEE. doi:10.1109/ROBOT.2001.933281

Roa, M., & Ott, C. (2013). *Balance and Posture Control for Biped Robots*. doi:10.1007/978-3-7091-1289-2\_8

Rokbani, N., Benbousaada, E., Ammar, B., & Alimi, A. M. (2010). *Biped Robot Control Using Particle Swarm Optimization*. IEEE. doi:10.1109/ICSMC.2010.5642027

S., G., M., R. J., & J., A. E. (s.f.). *Técnicas de control para el balance de un robot bípedo: un estado del arte*. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.1.a010>

Salazar, M. A., & Viteri, M. A. (2016). *Diseño y construcción de un prototipo robot electro neumático escalador para exploración de superficies verticales lisas* . Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/11422/1/T-ESPE-049130.pdf>

Salvador, R. (2008). *Robots: Arquitectura y Tipos*. Obtenido de Robótica y más: <http://roboticarmil.blogspot.com/2007/11/robotica-arquitectura-y-tipos.html>

Santana Hernández, J. L. (2006). *Control del equilibrio en el proceso de caminado de un robot bípedo*.

Sheng-jun, P., Hai-tao, S., Tao, S., & Hong-xu, M. (2009). *A novel Stability Criterion for Underactuated Biped Robot*. IEEE. doi:10.1109/ROBIO.2009.5420550

Shih, C. L., Grizzle, J. W., & Chevallereau, C. (2007). *Asymptotically Stable Walking of a Simple Underactuated 3D Bipedal Robot*. doi:10.1109/IECON.2007.4460177

Stephens, B. J., & Atkeson, C. G. (2010). *Dynamic Balance Force Control for Compliant Humanoid Robots*. IEEE. doi:10.1109/IROS.2010.5648837

Suwanratchatamane, K., Matsumoto, M., & Hashimoto, S. (2010). *Walking on the Slopes with Tactile Sensing System for Humanoid Robot*. IEEE.

Van Heerden, K., & Kawamura, A. (2010). *An Investigation on Robust Biped Walking Using Compliant Force Control and a Online Walking Pattern Generator*. IEEE. doi:10.1109/IECON.2010.5675470

Xin, R., & Xiao, N. (2009). *A Novel Compound Biped Locomotion Algorithm for Humanoid Robots to Realize Biped Walking*. doi:10.1007/s11768-009-7153-z

Yazdekhashti, S., Sheikholeslam, F., & Ghayour, M. (2010). *Stability Analysis of Biped Robot with Direct Control of Zero Moment Point*. IEEE. doi:10.1109/IC-CAE.2010.5451643

Yeoun-Jae, K., Joon-Yong, L., & Ju-Jang, L. (2012). *A Balance Control Strategy of a Walking Biped Robot in an Externally Applied Force*.

Zermeño Sobrino, P. M. (2006). *Elementos con rotación atrás*. México: Dirección de la Escuela Nacional de Entrenadores Deportivos.