

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**DESARROLLO DE UN ROBOT ARTRÓPODO**

**Marcos Agüero Carnerero**

**Julio 2015**



# **DESARROLLO DE UN ROBOT ARTRÓPODO**

**AUTOR: Marcos Agüero Carnerero**

**TUTOR: Fernando Jesús López Colino**

**PONENTE: Guillermo González de Rivera Peces**



**Hardware & Control Technology Laboratory  
Dpto. Tecnología Electrónica y de Comunicaciones  
Escuela Politécnica Superior  
Universidad Autónoma de Madrid  
Julio 2015**



## ***Resumen***

Este proyecto presenta el proceso de diseño, desarrollo y montaje de un robot artrópodo de seis patas articuladas, con capacidad para desplazarse sobre diversos terrenos.

Se ha comenzado con un estudio biológico para conocer las diferentes estructuras anatómicas de los artrópodos y los tipos de locomoción que realizan. Se presenta también el estudio realizado sobre el estado del arte actual acerca de la construcción de robots móviles en diferentes universidades y centros de investigación. Este estudio se centra en la fisionomía y número de articulaciones de cada modelo.

Tras este estudio, se ha descrito el proceso completo de construcción del robot, desde el planteamiento inicial y las condiciones aplicadas en el diseño hasta el desarrollo de los mecanismos de control del robot artrópodo. Se ha creado un prototipo inicial, que ha permitido mejorar la estructura de las piezas y validar el diseño mecánico. Se ha construido el robot artrópodo con todas las capacidades de movimiento necesarias para desplazarse, así como la implementación de toda la electrónica y programación del software de control.

El diseño final se ha validado mediante una batería de pruebas en la que están implicados todos los componentes del robot, tanto de manera individual como conjunta. Se consigue finalmente un sistema capaz de realizar los movimientos deseados, con un sistema de sensores capaces de aportar información en tiempo real.

## **Palabras Clave**

Robot Artrópodo, servomotor, lazo cerrado, sistemas empotrados.



## ***Abstract***

This project presents the process of design, development and assembly of an arthropod robot with six articulated legs that is capable to move on diverse grounds.

In first place we performed a biological study in order to analyse the different anatomical structures of the arthropods and its locomotion techniques. We have also reviewed the state of art in terms of the design and construction of mobile robots in different universities and research centers. This section is focused on the appearance and the number of joints of each model.

Secondly we have described the whole process of robot construction, from the initial planning and the proposed conditions to the development of the arthropod robot control mechanism. We created an initial prototype that made it possible to improve the structure and to validate the mechanical design. Later, we built the arthropod robot with all the necessary movement capabilities, as well as the electronics and programming the control software.

The final design has been validated by different tests in which all the robot components were involved, individually and as a whole. Finally, we have achieved a system that is capable of realizing the desired movements and that is provided with a sensor system capable of supplying real time information.

## **Keywords**

Arthropod Robot, servomotor, closed loop, embedded systems.



## ***Agradecimientos***

Con la elaboración de este proyecto concluye una de las etapas más trascendentes e importantes de mi vida. Ha sido un camino largo y en ocasiones duro, pero echando la vista atrás me quedo con los buenos momentos vividos y todas aquellas personas que, de mayor o menor manera, han contribuido y me han acompañado a lo largo de la carrera.

En primer lugar me gustaría agradecer a mi tutor Fernando López-Colino la posibilidad de realizar este proyecto. Desde su nacimiento, este proyecto ha supuesto un reto constante y enriquecedor, en el que el he aprendido multitud de cosas gracias a su ayuda y su buena disposición.

Todo este camino se inició con ese grupo tan heterogéneo y animado el que todos tenemos siempre algo que aportar. Por ello quiero dar las gracias a Adrián, Bogdan, Borja, Carlos, Fran, Gabi, Isaac, Joe, Lucía, Luis, Mario, Miguel, Real y Víctor. La vida nos ha llevado por distintos caminos a cada uno, pero saber que siempre estáis ahí para recordar buenos tiempos no hace más que alegrarme de haberos conocido.

En estos años han sido muchas las vivencias por las que he pasado en la Universidad. Saber que estás rodeado de buenos compañeros ha hecho que todo sea más fácil, que cuando el esfuerzo es compartido se superen mejor las adversidades y que nunca haya faltado el ánimo entre nosotros. Todos ellos han aportado algo en este tiempo, pero me gustaría destacar a Agustín, David, Guille, Javier, Jesús, Luis, Pablo, Pedro y Sergio.

Sin el apoyo incondicional de mi familia nada de esto hubiese sido posible. Gracias por haberme permitido estudiar esta carrera, a sus preocupaciones y atenciones, al haber estado en todo momento apoyándome y confiar ciegamente en mi trabajo y esfuerzo día tras día.

Por último, agradecer a todas aquellas personas que me han acompañado estos años fuera del contexto universitario. A mi grupo de amigos de siempre, que han sido comprensivos con las épocas de ausencia por estudio y se han alegrado de mis aprobados tanto como yo. A todas esas personas que en la distancia, han tenido a bien acordarse de mí, apoyarme, animarme, sacarme una sonrisa en los malos momentos y hacer que todo esto haya resultado más llevadero.

A todos vosotros, este éxito también os pertenece, ¡Muchas gracias!



## Índice general

1.	<b>Introducción</b> .....	1
1.1.	Motivación del proyecto .....	1
1.2.	Objetivos .....	2
1.3.	Estructura del documento .....	2
2.	<b>Aspectos teóricos</b> .....	3
2.1.	Introducción .....	3
2.2.	Anatomía general.....	3
2.3.	Fisionomía de los apéndices .....	5
2.4.	Características del desplazamiento.....	6
3.	<b>Estado del arte</b> .....	9
3.1.	Introducción .....	9
3.2.	Una pata.....	9
3.3.	Dos patas.....	11
3.4.	Tres patas .....	13
3.5.	Cuatro patas .....	14
3.6.	Seis patas.....	16
4.	<b>Desarrollo del robot artrópodo</b> .....	21
4.1.	Condiciones y decisiones aplicadas.....	21
4.2.	Elección de los actuadores.....	22
4.3.	Elección de los sensores.....	23
4.4.	Diseño mecánico .....	25
4.4.1.	Articulación CF.....	25
4.4.2.	Articulaciones FT y TT .....	26
4.4.3.	Antena .....	27
4.5.	Diseño final.....	28
4.5.1.	Prototipo inicial .....	28
4.5.2.	Diseño de las patas .....	29
4.5.3.	Diseño de la antena .....	31
4.5.4.	Diseño del cuerpo.....	32
4.6.	Construcción del robot.....	33
5.	<b>Control del robot artrópodo</b> .....	39
5.1.	Hardware de control .....	39
5.2.	Placa de control.....	40

5.3.	Software de control.....	47
5.4.	Control del robot artrópodo .....	48
6.	<b>Pruebas y resultados</b> .....	53
7.	<b>Conclusiones y trabajo futuro</b> .....	57
7.1.	Trabajo futuro .....	57
	<b>Bibliografía</b> .....	59
<b>A.</b>	<b>Construcción del robot artrópodo</b> .....	<b>63</b>
	Elección de los materiales.....	63
	Fabricación de las piezas.....	64
	Preparación de los servomotores .....	66
	Ensamblaje de las patas .....	67
	Integración de patas y sistema control.....	68
	Integración de antena y sensores .....	70
<b>B.</b>	<b>Estudio de servomotores</b> .....	73
	Descripción.....	73
	Funcionamiento .....	74
	Control.....	75
	Analógico vs digital.....	76
	Estudio de mercado .....	76
<b>C.</b>	<b>Programación del robot</b> .....	79
	<b>Presupuesto</b> .....	87
	<b>Pliego de condiciones</b> .....	89

## ***Índice de figuras***

Figura 2.1. Anatomía de los diferentes grupos de artrópodos .....	4
Figura 2.2. Patas de artrópodos según su funcionalidad .....	5
Figura 2.3. Movimientos de marcha de onda y marcha trípode.....	7
Figura 3.1 .MIT hoppers .....	10
Figura 3.2. Robots Oregon State University .....	11
Figura 3.3. Robot Spring Flamingo .....	12
Figura 3.4. Evolución desde la serie E hasta ASIMO .....	12
Figura 3.5. Mecanismos de estabilidad en el desplazamiento de ASIMO .....	13
Figura 3.6 Robot CHEETAH .....	14
Figura 3.7. Robot BigDog.....	15
Figura 3.8 Robot LS3.....	15
Figura 3.9. Robot Robosimian .....	16
Figura 3.10. Robot Genghis .....	17
Figura 3.11. Robot Katharina .....	17
Figura 3.12. Robot RHex.....	18
Figura 3.13. Robot Slair 2 .....	18
Figura 3.14. Robot Lauron.....	19
Figura 4.1. Sensor de distancia HC-SR04.....	23
Figura 4.2. Sensor de temperatura BMP085.....	24
Figura 4.3. Módulo GY-87 .....	24
Figura 4.4. Sensor de infrarrojos FC-35.....	25
Figura 4.5. Articulación CF.....	26
Figura 4.6. Integración de actuador en fémur y tibia.....	26
Figura 4.7. Ejes rotatorios de fémur y tibia .....	27
Figura 4.8. Integración de los actuadores en la antena .....	27
Figura 4.9. Prototipo inicial .....	29
Figura 4.10. Prototipos de piezas de las patas .....	29
Figura 4.11. Diseño 3D de la coxa .....	30
Figura 4.12. Diseño 3D del fémur y la tibia .....	30
Figura 4.13. Diseño 3D del tarso .....	31
Figura 4.14. Diseño 3D del escapo .....	31
Figura 4.15. Diseño 3D del flagelo.....	32
Figura 4.16. Diseño de placa superior del cuerpo.....	33
Figura 4.17. Disposición numérica de las patas .....	34
Figura 4.18. Robot artrópodo completo en posición media .....	35
Figura 4.19. Dimensiones del robot .....	36
Figura 4.20. Robot en posición baja.....	36
Figura 4.21. Robot en posición alta.....	37
Figura 5.1. Plano esquemático de la placa de control. ....	43
Figura 5.2. Diseño de la placa de control .....	44
Figura 5.3. Cara superior de la placa de control. ....	45
Figura 5.4. Cara inferior de la placa de control.....	46
Figura 5.6. Ventana de inicio del cliente SSH PuTTY.....	49
Figura 5.7. Puertos de expansión de la BeagleBone .....	50

Figura 5.8.Ventana de comandos del cliente SHH. ....	51
Figura 6.1 Posiciones de las patas en las pruebas realizadas.....	55
Figura A.1. Parámetros de configuración de la impresión .....	64
Figura A.2. Cubos de prueba parámetros de impresión. ....	65
Figura A.3. Pieza de fémur/tibia impresa.....	65
Figura A.4. Pieza fabricada para el cuerpo.....	66
Figura A.5. Modificaciones realizadas en el servomotor .....	67
Figura A.6. Detalles ensamblaje de las patas .....	68
Figura A.7. Pata completamente ensamblada .....	68
Figura A.8.Conexiones y situación del sistema de control.....	69
Figura A.9. Separador metálico junto a una de las patas.....	69
Figura A.10.Servomotores de las antenas.....	70
Figura A.11.Antena integrada en el cuerpo .....	70
Figura A.12.Soporte y posición del sensor HC-SR04 .....	71
Figura A.13.Sensor infrarrojo en la parte interior del tarso.....	71
Figura A.14.Conexión de los sensores y actuadores en la placa de control .....	72
Figura B.1. Estructura de un servomotor .....	74
Figura B.2. Esquema de funcionamiento de un servomotor .....	74
Figura B.3.Posiciones del servomotor en función del ancho de pulso .....	75

## ***Índice de tablas***

Tabla 4.1. Rango de movimiento de las distintas articulaciones .....	28
Tabla 6.1 Prueba de patas sin apoyo .....	54
Tabla 6.2. Prueba de patas con apoyo .....	55
Tabla 6.3. Prueba de patas con apoyo tras mejora.....	56
Tabla B.1. Características y precio de los servomotores candidatos .....	76
Tabla B.2. Características y precio de los servomotores candidatos .....	77



## ***Glosario de términos***

**BeagleBone:** Plataforma empotrada de bajo consumo montado en una única placa, diseñado para ser programado con código abierto.

**DOF:** Grado de libertad (Degree Of Freedom).

**GPIO:** Entrada/Salida de propósito general (General Purpose Input Output).

**I<sup>2</sup>C:** Bus de comunicaciones serie. (Inter-Integrated Circuit.)

**LIPo:** Batería recargable de polímero de litio (Lithium Polymer battery).

**PCB:** Placa de circuito impreso (Printed Circuit Board).

**PFC:** Proyecto Fin de Carrera.

**PWM:** Modulación por ancho de pulsos (Pulse Width Modulation).

**Python:** Lenguaje de programación funcional orientado a objetos.

**SSH:** Intérprete de órdenes seguro (Secure Shell).



# 1. Introducción

---

## 1.1. Motivación del proyecto

En la actualidad, el diseño y construcción de robots móviles está ampliamente extendido en diversas universidades y centros de investigación. Desde el área doméstica hasta su uso militar o de rescate [1], estos robots son capaces de adaptarse a la zona por la que se desplazan, con un mayor o menor grado de autonomía. Teniendo en cuenta el estudio de las capacidades cinemáticas observadas en la naturaleza, robots bio-inspirados tratan de imitar los movimientos de animales como insectos, reptiles o peces. De esta manera, se obtiene un tipo de locomoción que hace posible acceder a los lugares donde otro tipo de robots (por ejemplo, con ruedas) no pueden alcanzar.

El objetivo de este proyecto fin de carrera (PFC) es el diseño, construcción y desarrollo de los mecanismos de control de un robot artrópodo de seis patas articuladas. El robot debe adaptarse a diferentes entornos, desplazándose por terreno irregular. La motivación del proyecto pretende satisfacer varios aspectos:

- Continuar una línea de investigación dentro del grupo Hardware & Control Technology Laboratory (HCTLab) en el que se desarrollan estructuras robóticas articuladas gobernadas por microcontroladores.
- Incorporar a estos modelos distintas técnicas y tecnologías de sensado, generando de esta manera un sistema de lazo cerrado capaz de controlar el sistema.
- Servir de plataforma para futuros desarrollos, donde el software implementado sea ampliado para posibilitar un movimiento inteligente y eficiente del robot.
- Ampliar los conocimientos sobre electrónica, hardware y mecánica adquiridos a lo largo de la carrera.

## **1.2. Objetivos**

Como se ha indicado anteriormente, el objetivo de este proyecto es la construcción de un robot artrópodo articulado, desarrollando tanto la parte hardware como software. El movimiento de estas articulaciones, tanto para posicionamiento como desplazamiento, se realizará con servomotores. Además del conjunto de patas destinadas a la locomoción, se incluirán otras extremidades que contarán con un conjunto de sensores. El cuerpo del robot también contará con diversos sensores, tales como acelerómetro y sensores de distancia, que informarán en tiempo real de la orientación y el movimiento del mismo. La mayoría de sus partes se construirán mediante la tecnología de impresión 3D. El control del sistema se llevará a cabo a través de la tarjeta BeagleBone, empleando mediante el bus de comunicaciones I2C chips controladores de PWM (Pulse-Width Modulation). Finalmente se desarrollará una librería software para controlar los distintos elementos del robot.

## **1.3. Estructura del documento**

La estructura del documento se ha dividido en siete capítulos que contienen la información básica del proyecto. Complementariamente, se han incluido una serie de anexos donde se desarrollan algunos aspectos con mayor profundidad.

En el capítulo 2 se desarrolla un breve estudio biológico sobre los artrópodos y la forma de locomoción de las distintas especies.

En el capítulo 3 se presenta el estado del arte relacionado con el diseño y las aplicaciones de los robots artrópodos.

En el capítulo 4 se describe el desarrollo de la creación del robot artrópodo, desde la elección de los actuadores y sensores hasta su construcción final.

En el capítulo 5 se describen la parte electrónica y los mecanismos de control implementados, tanto para la parte hardware como software.

En el capítulo 6 se detalla la batería de pruebas realizadas para verificar el funcionamiento del robot artrópodo, desde las pruebas individuales para cada sensor/actuador hasta el funcionamiento de todo el conjunto.

Finalmente, las conclusiones extraídas de este proyecto, así como las posibilidades de trabajo futuro se exponen en el capítulo 7.

Para completar el proyecto, se han añadido al documento una serie de anexos entre los que figuran un desarrollo extendido de la construcción del robot (Anexo A), un estudio sobre los servomotores y las opciones disponibles para este proyecto (Anexo B), un resumen de la librería software implementada (Anexo C), el presupuesto y el pliego de condiciones.

## 2. Aspectos teóricos

---

### 2.1. Introducción

El diseño y construcción del robot artrópodo que se plantea en este PFC implica un conocimiento previo de dos aspectos fundamentales: La morfología que puede adoptar su estructura y la tipología del desplazamiento que se puede implementar. Al tener un claro componente bio-inspirado, el estudio de las características anatómicas y cinemáticas de los artrópodos ha constituido un elemento de gran relevancia para el diseño final. Este diseño no pretende imitar una especie en concreto, sino que ha tomado aspectos de diferentes especies para adaptarlos al propósito buscado. A continuación se presentan los aspectos más destacables de este estudio, centrándose en la anatomía general, la fisionomía de las patas y las características del desplazamiento.

### 2.2. Anatomía general

Los artrópodos constituyen el filo más numeroso y diverso del reino animal. Componen casi el 90 % del total de los animales, y viven en diferentes medios: terrestre, aéreo o acuático. La adopción de la palabra artrópodos para designar a esta categoría proviene de la unión de las palabras griegas "*arthron*", que significa articulación, con "*podos*", que se traduce como pie, pues las patas (y el cuerpo) de estos animales son articuladas. Dentro de los artrópodos se incluyen gran variedad de especies, entre las cuales podemos ubicar a los insectos, que con cerca de un millón de especies son los más numerosos (hormigas, moscas, mariposas, cucarachas, escarabajos); los crustáceos (langostas, cangrejos, camarones); los arácnidos (arañas, garrapatas, escorpiones) y los miriápodos (ciempiés).

Además de por sus extremidades articuladas, se caracterizan por ser ovíparos e invertebrados, con un esqueleto externo (exoesqueleto) compuesto por quitina. Su cuerpo también está articulado, formado por segmentos. El conjunto de cuerpo y patas presenta una simetría

bilateral. Sus músculos son estriados, conformados por haces independientes. Algunos artrópodos mandibulados poseen antenas, como sucede en los insectos y crustáceos. El número de patas es variable: en los insectos son seis, en los arácnidos son ocho y en los crustáceos cinco pares o más.

Las características anatómicas de los diferentes grupos, representadas en la Figura 2.1, se detallan a continuación:

- *Insectos*: Tres regiones del cuerpo (cabeza, tórax y abdomen). Seis patas unidas al tórax (el cual tiene 3 segmentos). Dos antenas. Adultos con uno o dos pares de alas unidas al tórax (en el caso de tenerlas).
- *Arácnidos*: Dos regiones del cuerpo (cefalotórax y abdomen). Ocho patas y ausencia de antenas. Disponen de partes bucales, los cuales son colmillos en el caso de las arañas.
- *Crustáceos*: Dos regiones del cuerpo. Dos pares de antenas situadas en la cabeza. Disponen de cinco o más pares de patas y son principalmente acuáticos.
- *Mirápodos (Cienpiés)*: Cabeza bien definida y primer par de patas modificadas para envenenar. Cuerpo aplanado de arriba abajo. Dispone de un par de antenas y un par de patas por cada segmento.
- *Diplópodos (Milpiés)*: Cabeza bien definida y cuerpo cilíndrico por norma general. Disponen de un par de antenas. Dos pares de patas en cada segmento salvo los cuatro primeros, con un solo par.

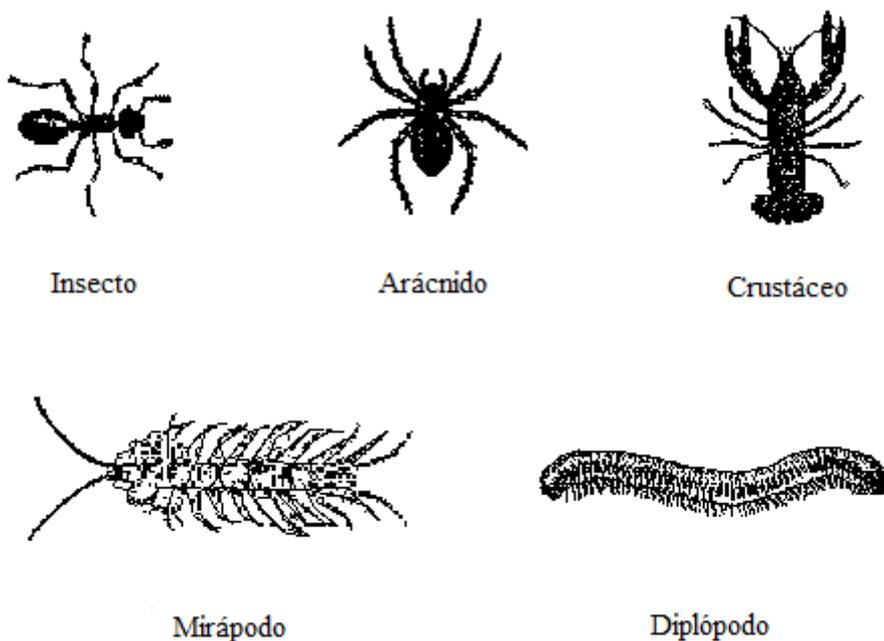


Figura 2.1. Anatomía de los diferentes grupos de artrópodos.

### 2.3. Fisionomía de los apéndices

El filo de los artrópodos está compuesto por un grupo de especies diverso y variado. Debido a este hecho, en cada grupo de artrópodos los apéndices tendrán diferentes funcionalidades, que determinan su clasificación: cavadora, nadadora, raptora o prensora, saltadora, colectora, ambulatoria o caminadora y colgante. Esta distribución implica la existencia de diferentes configuraciones de patas, como se observa en la Figura 2.2.

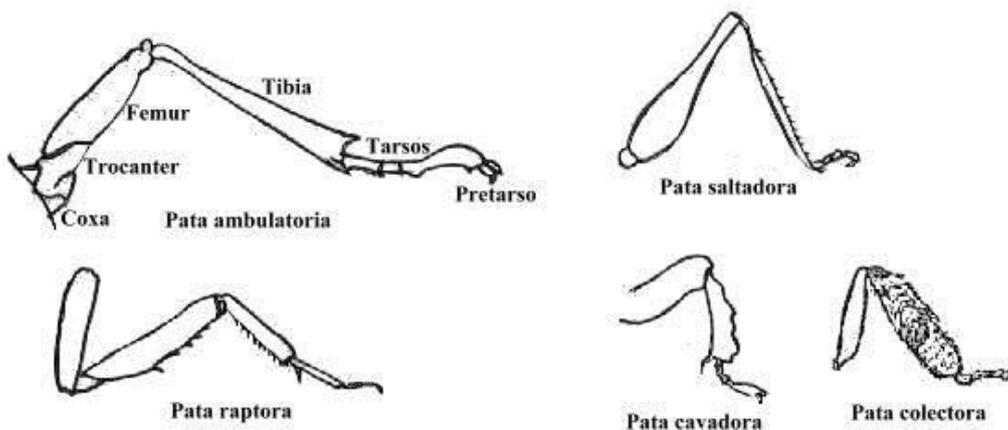


Figura 2.2. Patas de artrópodos según su funcionalidad.

Los apéndices están formados por una serie de segmentos articulados, denominados podómeros. Cada uno de ellos está formado por un anillo que forma parte del exoesqueleto, una serie de músculos, membranas y articulaciones. Por norma general, las patas de los hexápodos se encuentran subdivididas en las siguientes partes: coxa, trocánter, fémur, tibia y tarso, el cual se puede subdividir hasta en cinco partes.

Los movimientos de los apéndices requieren de la participación de músculos. La musculatura asociada se puede dividir en dos grandes grupos:

- **Músculos apendiculares extrínsecos:** Una parte de ellos está en el interior del cuerpo del animal, y su extremo se inserta en los márgenes proximales del protopodio (base del apéndice). Estos músculos son: promotores (mueven el apéndice hacia delante), remotores (hacia atrás), elevadores dorsales (levantan el apéndice) y depresores ventrales (bajan el apéndice). Este conjunto de músculos actúa de forma antagónica, y son los responsables del movimiento de balanceo promotor-remotor de los apéndices.
- **Músculos apendiculares intrínsecos:** Se encuentran situados en el interior del apéndice, disponiéndose entre podómeros consecutivos. Existen dos categorías de músculos intrínsecos, los elevadores y los depresores, que se disponen por pares. El conjunto de elevadores y de depresores pueden actuar de forma combinada.

Entre podómeros colindantes existen un par de membranas de articulación. Las articulaciones apendiculares más frecuentes son:

- **Articulaciones en charnela:** tiene un solo músculo, el flexor, más una membrana de articulación especialmente dispuesta. La fuerza antagónica de este músculo, que determina su distensión en cuanto termina su periodo de contracción, la proporciona la membrana en su necesidad de recuperar su estado normal.
- **Articulaciones condilares:** Este otro mecanismo de articulación se realiza mediante cóndilos, que son proyecciones cuticulares del extremo de un podómero que encajan en una depresión excavada en el podómero adyacente. Las hay de dos tipos:

**Articulaciones unicóndilas:** Sólo poseen un cóndilo. Son por lo general de amplios movimientos (en parte rotatorios) condicionados por el tamaño de la membrana articular.

**Articulaciones dicóndilas:** Se realizan mediante dos cóndilos. Tienen movimientos más limitados, de tipo bisagra, y son articulaciones más robustas.

Los movimientos de los apéndices siguen básicamente dos modelos:

- **Balanceo promotor-remotor:** Es responsable de los movimientos locomotores del artrópodo sobre el sustrato, de los movimientos minadores superficiales en el interior del sustrato, y de los movimientos natatorios simples. Son movimientos realizados desde la base del apéndice, y se deben al movimiento antagónico de la musculatura apendicular extrínseca.
- **Movimiento elevador-depresor:** Este movimiento se produce a lo largo del eje apendicular, en un plano que forma  $45^\circ$  con el cuerpo del animal. Es el resultado de la acción de la musculatura intrínseca apendicular. Ello se consigue mediante la contracción antagónica de cada paquete muscular, produciéndose la elevación o depresión del podómero distal. El movimiento puede ser más o menos amplio dependiendo del tipo de especie:  $16^\circ$ - $27^\circ$  en crustáceos,  $70^\circ$ - $85^\circ$  en mirápodos, ya que disponen de una buena musculatura, y  $100^\circ$ - $105^\circ$  en insectos.

## **2.4. Características del desplazamiento**

Como se ha detallado en el apartado 2.3, la morfología de las patas parte de un esquema general hacia una diferenciación funcional debida a diversos condicionantes, entre los que se encuentran la anatomía general de cada especie y el medio por el que se desplaza. Estos condicionantes tienen relación directa con los distintos tipos de locomoción que desarrollan los artrópodos.

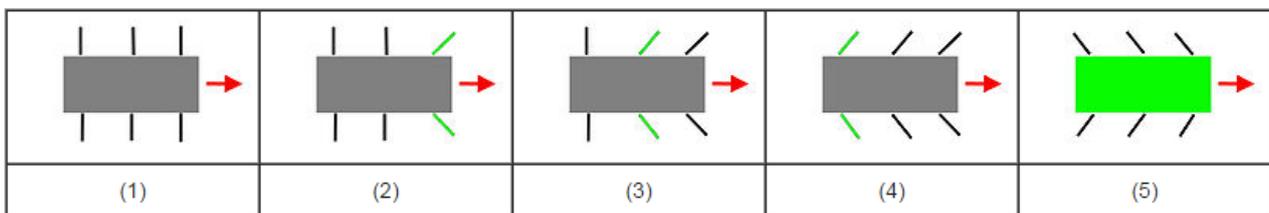
La locomoción surcadora la emplean aquellas especies que tienen que moverse en terrenos de fango y humedecidos. Las patas locomotoras acaban en pinza, las cuales actúan como punto de anclaje. Es característica de los crustáceos.

La locomoción minadora se fundamenta en la disposición de patas locomotoras para excavar. Mientras uno o dos pares de apéndices se dedican a excavar, el resto de apéndices tiene como misión expulsar la tierra hacia atrás. En ocasiones, un par de estos apéndices tienen la funcionalidad de anclar al animal a las paredes de la excavación que hacen. Es característica de muchas especies de crustáceo y algún insecto como la cigarra.

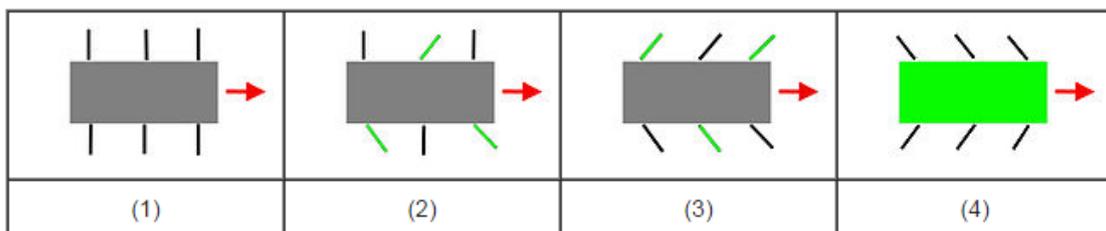
La locomoción saltadora se produce en los hexápodos. En general, la mayoría tienen una modificación especial del último par de patas, con un fémur más largo y una articulación fémur-tibia desarrollada. Esta estructura permite una buena amortiguación que potencia el salto y suaviza la llegada al suelo.

La marcha es uno de los tipos más característicos de la locomoción. La coordinación necesaria para andar implica un doble control; por una parte el de las patas de forma individual, para que se alternen de forma satisfactoria los movimientos de la pata y los tarsales; y por otra la coordinación de todas patas a la vez, que permite realizar movimientos adaptados a las condiciones del terreno por el que se desplaza. Para hexápodos, existen dos tipos de marcha, representadas en la Figura 2.3:

- **Marcha de onda:** Basado en el movimiento simétrico de las patas. Una vez desplazadas todas las patas, el cuerpo se desplaza hacia delante. Durante todo este proceso, hay al menos cuatro patas tocando el suelo.
- **Marcha trípede:** Las patas se mueven en grupos de tres patas no contiguas. Al realizar el movimiento completo en menos pasos esta marcha es más rápida que la de onda. Sin embargo, requiere mayor coordinación, lo que incrementa la complejidad.



(a) Marcha de onda.



(b) Marcha trípede.

Figura 2.3. Movimientos de marcha de onda y marcha trípede.

Los milpiés no son animales muy ágiles y muchas especies reptan lentamente sobre el suelo. La fuerza es ejercida enteramente por las patas, donde el movimiento de impulsión es activado en ondas que discurren a lo largo del cuerpo. La duración de este movimiento es mayor que la correspondiente a la del movimiento de recuperación. Así, en cualquier momento, hay más patas en contacto con el substrato que patas en el aire.

Una particularidad de algunos hexápodos y arañas es que pueden caminar sobre el agua, aprovechando la tensión superficial. Los insectos que caminan sobre el agua no se mojan, ya que el exoesqueleto está cubierto por ceras que repelen las moléculas de agua. La superficie del agua, mantenida tensa por la tensión superficial, se hunde bajo cada pata y crea una depresión u hoyo, que empuja al animal hacia arriba sosteniéndolo.

## 3. Estado del arte

---

### 3.1. Introducción

En el capítulo 2 se han descrito las características anatómicas de los principales grupos que componen el filo de los artrópodos. La primera etapa de este proyecto ha sido evaluar la viabilidad o conveniencia de realizar un diseño final con dichas características. Se pretende crear un robot estable tanto en situaciones de movimiento como de pausa, buscando un compromiso entre los componentes que proporcionan dicha estabilidad y la complejidad de su inclusión. El coste de estos componentes también será un factor determinante a la hora de su elección.

Por esta razón, se ha llevado a cabo un estudio de los robots articulados existentes, prestando especial atención a la capacidad de movimiento y a la inclusión de sensores y sistemas de control, los cuales proporcionan la posibilidad de un desplazamiento más eficiente. Considerando la gran variedad de usos y funciones de los robots articulados, existen multitud de modelos bio-inspirados que se diferencian entre sí en el número y complejidad de sus patas. A continuación se describen los modelos más representativos estableciendo como criterio de clasificación el número de patas.

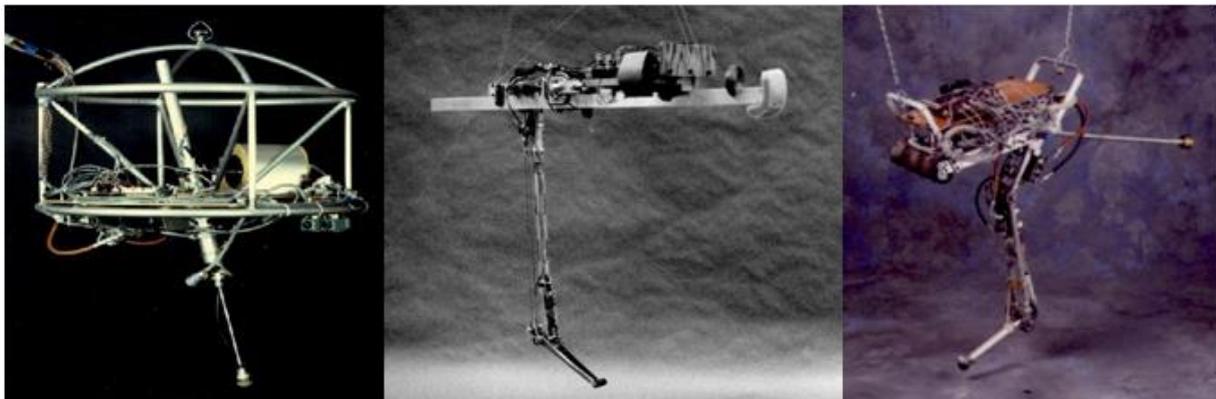
### 3.2. Una pata

Entre los años 1980 y 1993 se desarrollaron diversos robots en el Massachusetts Institute of Technology (MIT), conocidos como “MIT hoppers” [2]. Estos robots eran capaces de equilibrarse por sí solos y recorrer un camino establecido. El gran reto con este tipo de robots fue la imposibilidad de mantenerse de pie, por lo que necesitaban saltar continuamente para mantener el equilibrio. En la Figura 3.1 se pueden observar algunos ejemplos, detallados a continuación.

El modelo 3D One-Leg Hopper fue construido para experimentos de equilibrio activo y locomoción dinámica con patas. Este robot está compuesto por una pata que cambia de longitud, un cuerpo que contiene sensores e interfaz electrónica y una cadera con dos ejes de accionamiento. La cadera funciona de manera hidráulica y la pata por aire comprimido. Su altura es de 1,10 m, con un peso de 17,3 kg.

Monopod es un robot plano de una sola pata. Su característica distintiva es el uso de una articulación en la pata. Adicionalmente, la pata termina en un resorte de lámina, a diferencia de las cámaras de aire presentes en otros robots. Este robot fue utilizado para investigar el uso de patas articuladas que usan juntas rotativas, siendo capaz de desplazarse a una velocidad máxima de 2,3 m/s en una distancia de 16 metros.

El robot Uniuroo es cinemáticamente similar a un canguro. Con un peso de 6,6 kg, está formado por cuerpo, una pata articulada conjunta (cadera, rodilla, tobillo) y una cola con un solo grado de libertad. El cuerpo es un marco atornillado de puntales de aluminio mientras que la pata está compuesta por tubos de aluminio soldados. Cada articulación está controlada por actuadores hidráulicos. Un muelle de acero en el tobillo se encarga de almacenar energía potencial durante el apoyo.



(a) 3D One-Leg Hopper.

(b) Monopod.

(c) Uniuroo.

Figura 3.1. MIT hoppers.

En la actualidad, el desarrollo y construcción de estos robots articulados con una sola pata está encabezado por Dynamic Robotics Laboratory, situado en la Oregon State University. En la Figura 3.2 se pueden observar los modelos que se exponen a continuación.

Thumper [3] es un robot basado en anteriores diseños de piernas robóticas capaz de comportarse de manera muy dinámica. Está compuesto por grandes resortes de fibra de vidrio capaces de almacenar la energía mientras marcha, de manera similar a los tendones de un canguro. Frente a los actuadores neumáticos o hidráulicos de otros modelos, el uso de motores eléctricos ofrece un control más simple y preciso. Estos motores se conectan a las articulaciones utilizando cables de acero.

ATRIAS 1.0 [4] formó parte de dos proyectos de investigación en paralelo. El primero de ellos tenía el objetivo científico de entender las estrategias de locomoción de las aves cuando corren. De este conocimiento se aprovechó el segundo proyecto, centrado en la agilidad y eficiencia de la locomoción robótica. El comportamiento de los componentes mecánicos del sistema está diseñado para que coincida con un modelo matemático de inspiración biológica. Esta implementación simple permite un control basado en la teoría y una clara comprensión y análisis de los comportamientos dinámicos. La versión 2.0 es una revisión del diseño original ATRIAS. Los cambios más significativos son la incorporación de una transmisión de accionamiento armónico (en lugar de una unidad de cables), un torso más grande para alojar la parte electrónica, baterías y los motores de la cadera.

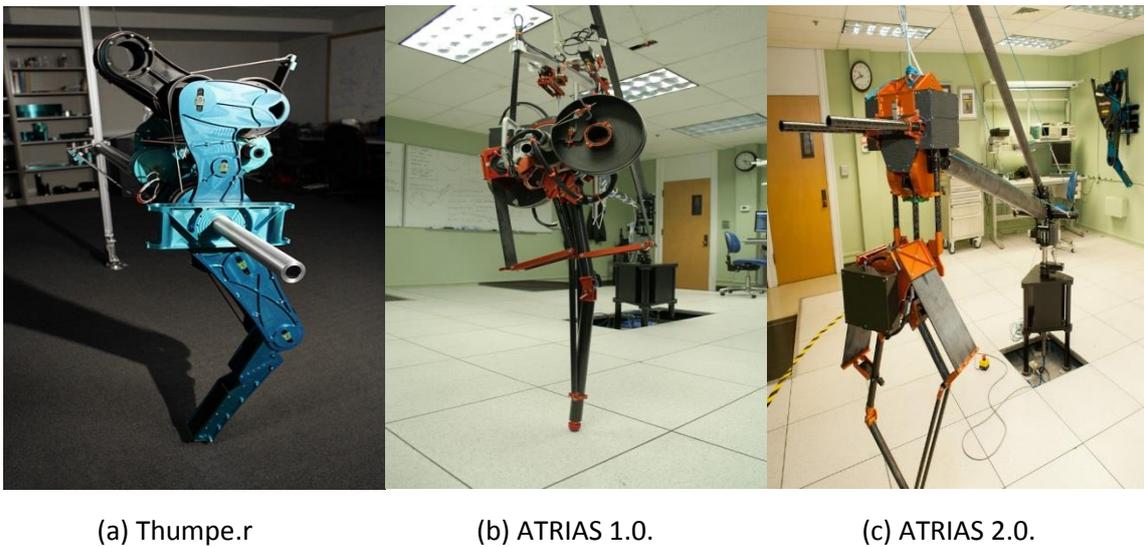


Figura 3.2. Robots Oregon State University.

En Septiembre de 2006 la firma Japonesa Toyota presentó una avanzada pierna-robot [5] capaz de saltar como un humano. Con una altura de un metro, posee una articulación similar a un dedo del pie y otra similar a la rodilla. El movimiento de flexión y extensión de estas articulaciones le permite saltar una altura aproximada de 4 cm. La gran ventaja de este robot es su capacidad para mantener el equilibrio en ausencia de movimiento, frente a sus predecesores que siempre tenían que saltar para mantenerse equilibrados.

### **3.3. Dos patas**

Desarrollado por el MIT, Spring Flamingo [2] es un robot bípedo planar. Fue desarrollado como una plataforma experimental para la implementación de algoritmos para caminar, descripción de movimiento, técnicas de control y técnicas de actuación de control de la fuerza. Dispone de cadera, rodilla y tobillo en cada pata, como se observa en la Figura 3.3. Todos sus motores están situados en la parte superior, transmitiendo la energía a las piernas a través de cables. El par máximo o torque que se puede aplicar a las caderas y los tobillos es de aproximadamente 16 N/m, mientras que las rodillas admiten hasta 24 N/m.

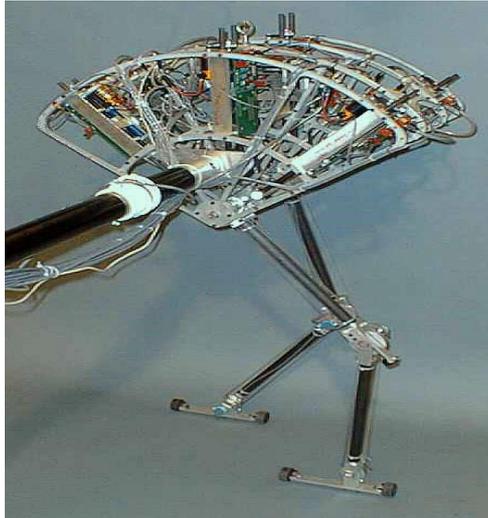


Figura 3.3. Robot Spring Flamingo.

La E series [6] [7] fue una colección de robots humanoides experimentales creados por Honda Motor Company. La serie E continuó su evolución bajo el nombre de Serie P, que permitió acumular los conocimientos y la experiencia necesarios para crear el avanzado robot humanoide ASIMO. Dicha evolución se observa en la Figura 3.4. Las características más destacadas de los modelos de la serie E son:

- El E0 (1986) fue el primer robot. Caminaba en línea recta con dos pies de manera similar a la locomoción humana y tardaba unos 5 segundos en completar un solo paso.
- E1 (1987) era capaz de caminar a una velocidad de 0,25 km/h.
- E2 (1989) podía viajar a 1,2 Km/h, gracias a la mejora del movimiento dinámico.
- E6 (1993), era capaz de equilibrarse de manera autónoma, caminar por encima de obstáculos e incluso subir escaleras. Todos estos modelos se caracterizan por tener 12 grados de libertad: tres en cada ingle, uno en cada rodilla y dos en cada tobillo.

HONDA

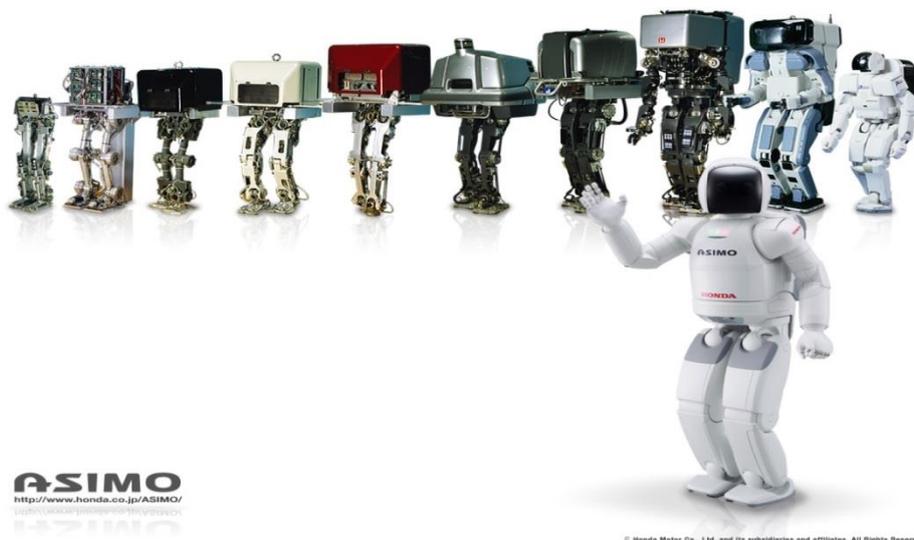


Figura 3.4. Evolución desde la serie E hasta ASIMO.

Gracias a un nuevo sistema de movilidad avanzado implantado por Honda, ASIMO no sólo puede avanzar y retroceder, sino que también se desplaza lateralmente, sube y baja escaleras y se da la vuelta mientras anda. En este aspecto, es el robot que mejor imita los movimientos de avance naturales de los seres humanos. La combinación de un hardware muy receptivo con la tecnología "Posture Control" permite que ASIMO flexione el torso para mantener el equilibrio y evitar los patinazos y giros en el aire, que suelen estar vinculados a los movimientos rápidos. Estas técnicas de estabilidad se muestran en la Figura 3.5.

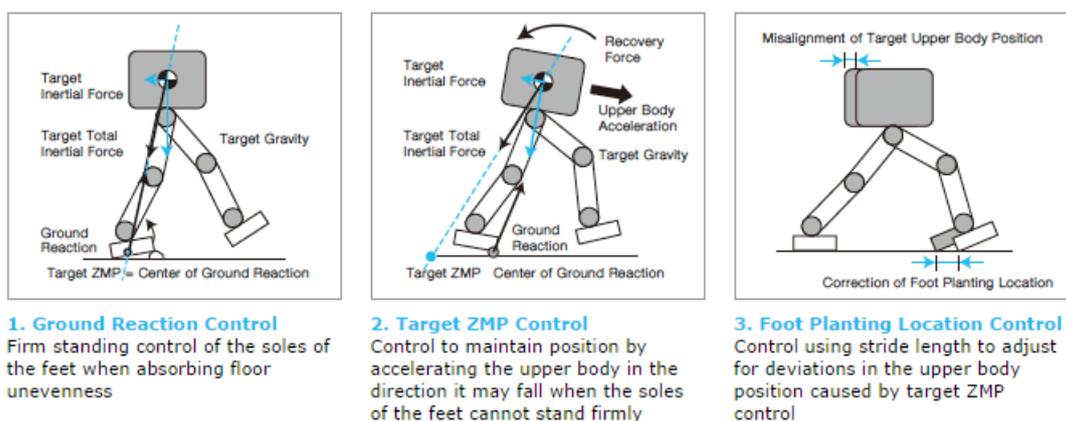


Figura 3.5. Mecanismos de estabilidad en el desplazamiento de ASIMO.

En su última versión (Julio 2014), su rostro está formado por dos cámaras que funcionan como los ojos. También se han realizado mejoras en su funcionamiento, siendo capaz de predecir trayectorias de objetos y apartándose si algo viene hacia él. Se han rediseñado sus manos para trabajar en la lengua de signos y mejorado el reconocimiento de personas y voces. También incluye avances en cuanto a la interacción con objetos, como llevar una bandeja, destapar una botella y servir su contenido en un vaso.

### 3.4. Tres patas

Debido a que carecen de equivalentes biológicos, los robots con 3 patas no suelen ser muy comunes. Sin embargo existen algunos diseños con maneras de desplazarse muy características.

Creados por el animador y dibujante I-Wei para Crabfu Steamworks, la saga de robots Swashbot presenta apariencias diversas (insectos o cangrejo). Dispone de cuatro servomotores para gobernar sus tres patas, dirigidas por radiocontrol. Sus movimientos son toscos e ineficientes, empleando en cada momento una pata para la locomoción y las otras dos para mantener su estabilidad. Forman parte de un proyecto destinado al ocio y no tienen una funcionalidad específica.

Desarrollado por el Robotics & Mechanisms Laboratory (RoMeLa) de la universidad Virginia Tech, STRIDER (Self-excited Tripedal Dynamic Experimental Robot) es un robot caminante de tres patas que explota el concepto de locomoción dinámica pasiva para caminar con una alta eficiencia energética, ejerciendo un control mínimo. Este robot de locomoción tripedal es inherentemente estable con su postura trípode y puede cambiar de dirección mientras camina. Su funcionamiento radica en su capacidad de giro: mientras dos de las patas actúan como soporte, la pata restante gira por encima del robot hasta volver a situarse entre las otras dos patas, pero en el lado opuesto. Este movimiento implica un giro del cuerpo del robot de 180°.

### 3.5. Cuatro patas

De la misma manera que un robot articulado de dos patas viene inspirado por el modelo motriz humano, en la naturaleza se encuentran multitud de modelos para implementar sistemas de locomoción artificiales de cuatro patas. Estos modelos tienen la ventaja de ser estables cuando se encuentran parados, pero requieren de control dinámico cuando están en movimiento.

Cheetah [8] es el robot con patas más rápido del mundo, superando los 46 km/h. La Figura 3.6 muestra cómo este robot dispone de una espalda articulada que se flexiona hacia delante y hacia atrás, imitando el movimiento del leopardo, lo que le permite aumentar la zancada y la velocidad de carrera. Es alimentado por una bomba hidráulica y se ha probado en una cinta transportadora. Su evolución WildCat, presentada en 2013 pero aún en fase de pruebas, está programada para funcionar de manera autónoma.

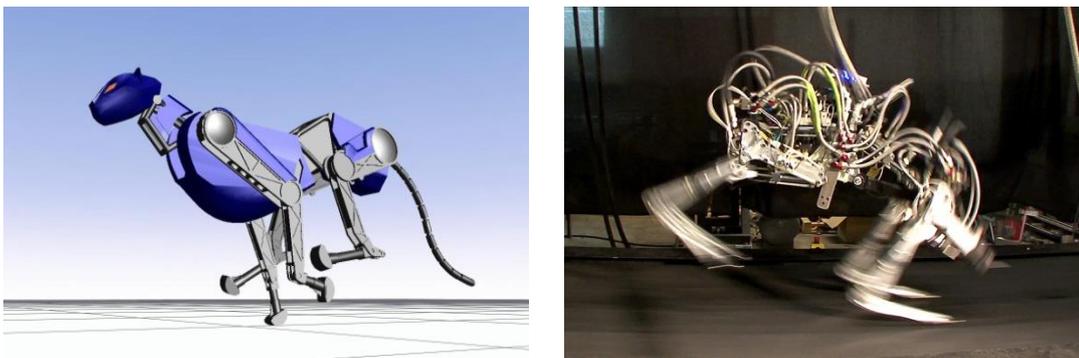


Figura 3.6 Robot CHEETAH.

BigDog [9] es un robot todoterreno financiado por la agencia militar DARPA, capaz de subir pendientes de 35°, caminar a través de escombros y terrenos fangosos y almacenar 155 kg de carga, como muestra la Figura 3.7. Está propulsado por un motor con sistema hidráulico. Sus patas están diseñadas para absorber golpes y conservar energía de un paso a otro. Dispone de un ordenador de a bordo, que procesa los distintos sensores y maneja las comunicaciones con el usuario. Este conjunto de sensores gestiona la locomoción en una amplia variedad de terrenos, controlando la posición y fuerza de las articulaciones.



Figura 3.7. Robot BigDog.

LS3 (Legged Squad Support Systems, 2012) [11] es un robot todoterreno financiado por el cuerpo de marines de Estados Unidos. Con aspecto equino, representado en la Figura 3.8, está diseñado para acompañar a los soldados, ayudándoles a transportar su carga. Cada unidad es capaz de transportar 182 kg de equipo militar con un depósito de combustible que proporciona una autonomía de 32 km. Gracias a la visión por ordenador tiene la capacidad de seguir a su líder, por lo que no necesita ser guiado. A pesar de ello, es capaz de desplazarse hacia un punto concreto empleando sensores de terreno y GPS.



Figura 3.8. Robot LS3.

Quadruped (desarrollado por el MIT) [2] fue utilizado para explorar el movimiento con cuatro patas. Se programó para trotar, saltar y realizar varias transiciones mientras anda. Los principios de los robots saltadores de una pierna se generalizaron para este modelo, añadiendo un mecanismo de bajo nivel para la coordinación entre piernas. Su diseño se inspiró en aquellos animales que utilizan las patas de dos en dos: patas diagonales para el trote, patas laterales para andar y par delantero/trasero para saltar. Al restringir el movimiento a cada par de patas, el control de Quadruped se restringe al de un bípedo virtual.

Desarrollado por Jet Propulsion Lab, RoboSimian (2013) [11] es un robot inspirado en un simio capaz de completar tareas difíciles de manera supervisada. Está diseñado para que sus cuatro extremidades terminadas en manos puedan lograr posturas estables (Figura 3.9), crear múltiples puntos de conexiones anclados a soportes tales como escaleras, barandillas o escalones y apoyarse sobre sí mismo en operaciones de manipulación. Destaca por su

modularidad y destreza. Posee 28 actuadores idénticos en las cuatro extremidades, lo cual simplifica el diseño, fabricación y mantenimiento. El robot se pliega en un volumen relativamente pequeño y puede funcionar con baterías para simplificar su transporte. Destaca por su completa simetría (lado frontal y trasero iguales).



Figura 3.9. Robot Robosimian.

En el año 2012, Toshiba diseñó un robot para llevar a cabo tareas de inspección en la central nuclear de Fukushima Daiichi, donde estaba prohibido el paso debido a la radiación presente tras el maremoto de 2011. En su interior se encuentra otro robot con ruedas más pequeñas para navegar por las zonas de difícil acceso. Es capaz de caminar por escaleras, terreno irregular y evitar los obstáculos de baja altitud. Los robots están equipados con cámaras y dosímetros de radiación para comprobar en qué zonas existe radiación letal. Ambos robots funcionan de manera inalámbrica.

### **3.6. Seis patas**

A mayor número de patas, mayor estabilidad. Este hecho, acompañado de la inspiración biológica en diversos insectos son las principales ventajas para construir un robot con seis patas. Debido a los múltiples puntos de apoyo, estos robots pueden ser controlados con técnicas tanto estáticas como dinámicas.

Construido por el MIT, Ghengis [2] fue uno de los primeros robots autónomos de seis patas. Su construcción demostró que los sistemas de control de los robots móviles pueden ser implementados usando máquinas de estados finitos. Con una longitud de 35 cm, cada una de sus patas disponía de sólo dos grados de libertad. Está equipado con multitud de sensores, tales como sensores de inclinación (informan de cabeceo y alabeo) y seis sensores infrarrojos de proximidad. Sus antenas son capaces de detectar obstáculos. Se trata de un robot completamente autónomo, gracias a su microprocesador de ocho bits y a las baterías situadas entre pata y pata. Estas características se muestran en la Figura 3.10.



Figura 3.10. Robot Genghis.

Desarrollado por el Fraunhofer Institute for Factory Operation and Automation (IFF) en Magdeburgo, el robot Katharina [12] posee un sistema de control y sensores de fuerza que permiten realizar distintos tipos de locomoción. Debido a su estructura hexagonal, representada en la Figura 3.11, es capaz de moverse en cualquier dirección. Con un control individual de cada pata, éstas se adaptan automáticamente a pequeñas irregularidades de la superficie, ofreciendo una distribución uniforme de los apoyos. Los sensores y actuadores están controlados por el sistema DSP que alberga en su interior.

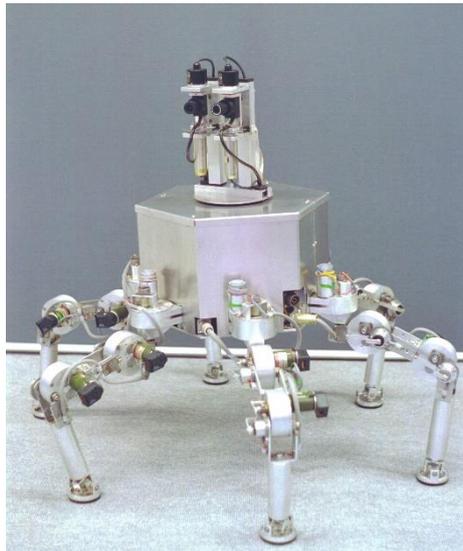


Figura 3.11. Robot Katharina.

Desarrollado por Boston Dynamics en colaboración con distintas universidades, RHex [13] es un robot de seis patas de alta movilidad. Gracias a sus potentes piernas controladas de manera independiente, es capaz de desplazarse por terrenos accidentados (roca, arena, vegetación, escaleras) con una intervención mínima del operador (hasta 700 m de distancia). Dispone de cámaras de luz visible y de infrarrojos para proporcionar vistas frontales y traseras. Al estar completamente sellado, puede operar sin problema en condiciones de humedad. En la Figura 3.12 se observan las características descritas.



Figura 3.12. Robot RHex.

Slair 2 [14] posee un cuerpo articulado que permite una mayor flexibilidad, representado en la Figura 3.13. Este hecho le permite medir y controlar las reacciones de apoyo de manera eficiente, así como controlar y predecir la estabilidad de movimiento del robot. La estructura de su hombro permite dos grados de libertad. Diseñado para investigación, alguno de sus propósitos fueron el uso del cuerpo del robot como chasis adaptativo, movimientos en superficie resbaladiza y la capacidad de usar alguna de sus patas como manipulador. De la misma manera que otros modelos diseñados por el IFF, un sistema DSP controla todos los motores y actuadores.



Figura 3.13. Robot Slair 2.

La familia de robots LAURON ha sido diseñada por el Forschungszentrum Informatik Karlsruhe (FZI) en Alemania. La mecánica y sus movimientos están biológicamente inspirados en los del insecto palo. El propósito de su diseño fue el estudio de la configuración del cuerpo sin desplazamiento en terrenos accidentados. Gracias a su diseño mecánico robusto, el alto número de grados de libertad y la variedad de formas de caminar que ofrece puede mantener una locomoción estable incluso en circunstancias extremas. Las distintas evoluciones son capaces de reunir información sobre su entorno y planificar una ruta hacia un objetivo determinado de forma autónoma. Gracias a la cámara situada en su parte posterior, el operador puede observar en todo momento el entorno del robot. La última versión de este robot es LAURON V (2013)[15]. Mediante la adición de una articulación de rotación en cada pata, se mejoró la flexibilidad y la maniobrabilidad. Esto incrementa el área de trabajo de cada pierna y le permite orientar sus pies hacia el suelo, como se observa en la Figura 3.14. Aumentando los ángulos de montaje, se ha conseguido que sea capaz de manipular objetos con sus patas delanteras.



Figura 3.14. Robot Lauron V.

Construido por iRobot y financiado por la agencia militar DARPA, Ariel fue la primera plataforma capaz de caminar tanto en tierra como en el agua. Sus piernas y su cuerpo están diseñados con el objetivo de minimizar la fricción. Capaz de superar los obstáculos que bloquearían a los vehículos tradicionales con ruedas, también resiste el impacto de las olas. Como está diseñado para ser completamente invertible, sus piernas se pueden reorientar en caso de volcar por efecto de las olas. Como contrapartida, para aumentar el control se minimizan los grados de libertad.



## 4. Desarrollo del robot artrópodo

---

### 4.1. Condiciones y decisiones aplicadas

Tras el punto de partida que supone el estudio realizado en los capítulos 2 y 3, se ha dado comienzo a la fase de desarrollo del proyecto, estableciendo una serie de condiciones y requerimientos que tiene que cumplir el diseño. A continuación se exponen las más relevantes:

- **Diseño bio-inspirado:** El robot tiene una clara inspiración biológica, tomando como ejemplo grupos de artrópodos como el cangrejo de mar común (*Carcinus maenas*) o la araña (*Araneae Arachnida*). Sin embargo, se ha decidido realizar una serie de modificaciones respecto a estos modelos, para hacer más sencilla su construcción y el control del sistema. Por ello, el robot contará con un total de seis extremidades y una antena, mientras que cuerpo estará formado por una única pieza no articulada, para reducir la complejidad mecánica.
- **Movimientos:** Debido al alto grado de complejidad mecánica observada en algunas especies, se ha decidido simplificar el diseño final, de tal manera que cada pata estará formada por cuatro secciones: **coxa, fémur, tibia y tarso**. El movimiento de estas secciones estará gobernado por tres articulaciones: **coxa-fémur (CF), fémur-tibia (FT) y tibia-tarso (TT)**. En el caso de la antena, estará formada por dos secciones, **escapo y flagelo**, gobernadas por dos articulaciones: **cadera-escapo (CE) y escapo-flagelo (EF)**. El robot contará por tanto con 26 DoF, cuatro correspondientes a cada pata y dos para la antena. Las patas podrán realizar el movimiento activo de flexión/extensión de las articulaciones CF, FT y TT y el movimiento de abducción/aducción de la articulación CF. La antena podrá realizar el movimiento activo de flexión/extensión de la articulación EF y movimiento de abducción/aducción en la articulación CE.

- **Sensado:** Complementariamente al control de los actuadores, se equipará al robot con una serie de sensores distribuidos por todo el cuerpo. Su propósito principal será el de obtener información en tiempo real para establecer un sistema de lazo cerrado, donde el movimiento dependa de la información aportada por los mismos. La función de cada uno de los sensores se detalla en el apartado 4.3.
- **Modularidad:** Se realizará un diseño modular, que implique un montaje y desmontaje fácil de todo el conjunto para poder trabajar con cada parte de manera independiente. Este hecho será útil ante la aparición de eventuales problemas que impliquen la sustitución de algún elemento. En el caso de introducir mejoras independientes, tales como sustitución de actuadores o cambio de piezas, se favorecerá su integración sin afectar al resto del conjunto. Paralelamente a la modularidad se desea un diseño autocontenido, formando una estructura independiente sin la presencia de elementos funcionales externos.
- **Control:** Para controlar la electrónica del robot, se ha decidido optar por la plataforma de hardware libre BeagleBone, basada en una placa con un microcontrolador, numerosos puertos de entrada/salida y un entorno de desarrollo específico. Esta plataforma tiene que ser capaz procesar correctamente las órdenes enviadas desde un PC. El control de los servomotores se realizará mediante PWM (Pulse Width Modulation). Los sensores se controlarán con los pines de entrada/salida (GPIOs) y con el bus de datos I2C. Dado que la BeagleBone no dispone de las salidas necesarias para el control del número total de actuadores, se desarrollará una placa PCB con una serie de componentes electrónicos que facilitará la generación de los PWM necesarios y permitirá la integración de los sensores en el sistema y contendrá diferentes elementos de protección.

## **4.2. Elección de los actuadores**

A la hora de elegir los actuadores para la construcción del robot, es necesario tener en cuenta diversas características de los mismos, tales como la velocidad, el torque o fuerza (kg/cm), el frenado, la inercia y el modo de control. El uso de motores de corriente continua está muy extendido en el campo de la robótica. Sin embargo, para el objetivo que se desea presentan el inconveniente de poseer alta velocidad de giro y un bajo torque. Algunos modelos de motor paso a paso si poseen las características buscadas, pero presentan el inconveniente de funcionar generalmente en sistema de lazo abierto.

Una posible solución es el empleo de cajas reductoras, que permiten disminuir la velocidad de giro y aumentar el torque del motor. De manera complementaria, al buscar un diseño autocontenido, se pretende que estos actuadores ocupen el menor espacio posible y puedan situarse en el interior de las piezas, aplicando el movimiento directamente sobre ellas. También deben incluir la posibilidad de control en lazo cerrado. Con estos condicionantes se ha determinado que los servomotores digitales son los actuadores que tienen las prestaciones más acordes al objetivo del proyecto.

Las características de funcionamiento y control de estos actuadores se desarrollan con mayor precisión en el apéndice B, donde también se incluye un estudio con los servomotores disponibles en el mercado que cumplen con las especificaciones buscadas. Fruto de este estudio se han elegido servomotores de la marca Tower Pro, concretamente el modelo 996MG para el movimiento de las patas y el modelo SG90 para el movimiento de la antena.

### 4.3. Elección de los sensores

Dentro de la amplia variedad de sensores disponibles en el mercado, se pretende que los seleccionados para este proyecto analicen principalmente dos parámetros: estado del robot y características de su entorno. Como criterio para su elección, estos deben tener fácil integración en el sistema y un coste reducido. Con estas condiciones el conjunto de sensores seleccionados es el siguiente:

- **HC-SR04:** Sensor de distancia por ultrasonidos (Figura 4.1). Su misión consiste en localizar objetos situados delante del robot. Está formado por un emisor y un receptor de ultrasonidos. Su funcionamiento se basa en el tiempo transcurrido entre la emisión de un pulso cuadrado y su posterior recepción, al rebotar en el objeto sobre el que se calcula la distancia. Se conectará a la BeagleBone mediante pines de entrada/salida[16]. Tiene un rango de medida aproximado de 2 a 450 cm y su precio es de 2,50 €.



Figura 4.1. Sensor de distancia HC-SR04.

- **BMP085:** Sensor de temperatura, presión atmosférica y altitud (Figura 4.2). Su misión consiste en obtener la temperatura de objetos situados delante del robot. Este sensor se situará en la antena, con un diseño que hace que sea fácilmente intercambiable, al conectarse al bus I2C. Su funcionamiento se basa en tecnología piezo-resistiva para medir la presión. Se conectará a la BeagleBone mediante el bus de datos I2C, ocupando su dirección 0X77. Tiene cuatro modos de resolución, con un rango de medida de 300-1100 hPa [17]. Su precio es de 2,70 €.

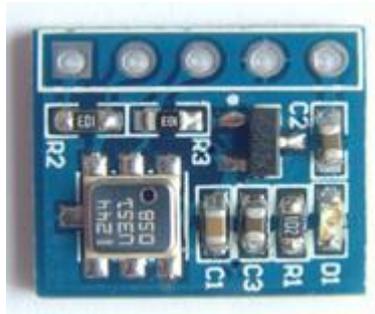


Figura 4.2. Sensor de temperatura BMP085.

- **GY-87:** Módulo que mide 10 DoF: Giróscopo (tres ejes)+ Acelerómetro (tres ejes) + Campo magnético (tres ejes) + módulo de presión (Figura 4.3). Módulo formado por los sensores MPU6050 (Acelerómetro+ Giróscopo) y HMC5883L (Campo Magnético). Su misión es informar de la posición del robot relativa a los ejes de coordenadas. Para este proyecto solo se empleará el sensor MPU6050 [18]. Su funcionamiento se basa en la medida variaciones de movimiento y posición. Se conectará a la BeagleBone mediante el bus de datos I2C, ocupando su dirección 0X68. Su precio es de 11,90 €.

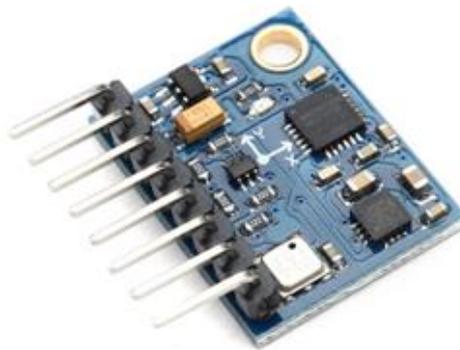


Figura 4.3. Módulo GY-87.

- **FC-35:** Módulo de sensores infrarrojos para detección de obstáculos (Figura 4.4). Está formado por una unidad central y cuatro sensores, compuestos cada uno de ellos por un diodo emisor infrarrojo y un transistor que ejerce de receptor. Estos sensores se colocarán en las patas de cabeza y cola. Su misión es la de informar de la ausencia de superficie sobre la que apoyarse. Su funcionamiento se basa en el cambio de estado activo alto a activo bajo cuando la señal infrarroja emitida rebota en un objeto y es captada por el receptor. El rango de detección se puede variar mediante potenciómetros independientes para cada sensor, situados en su módulo central. Se conectará a la BeagleBone mediante pines de entrada/salida. Su precio es de 6,69 €

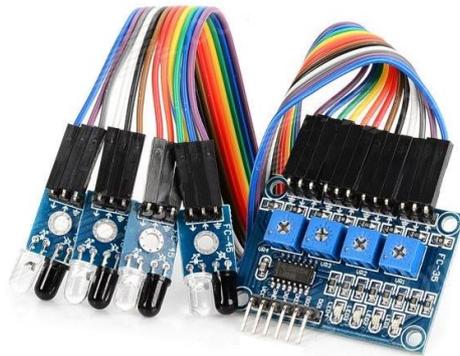


Figura 4.4. Sensor de infrarrojos FC-35.

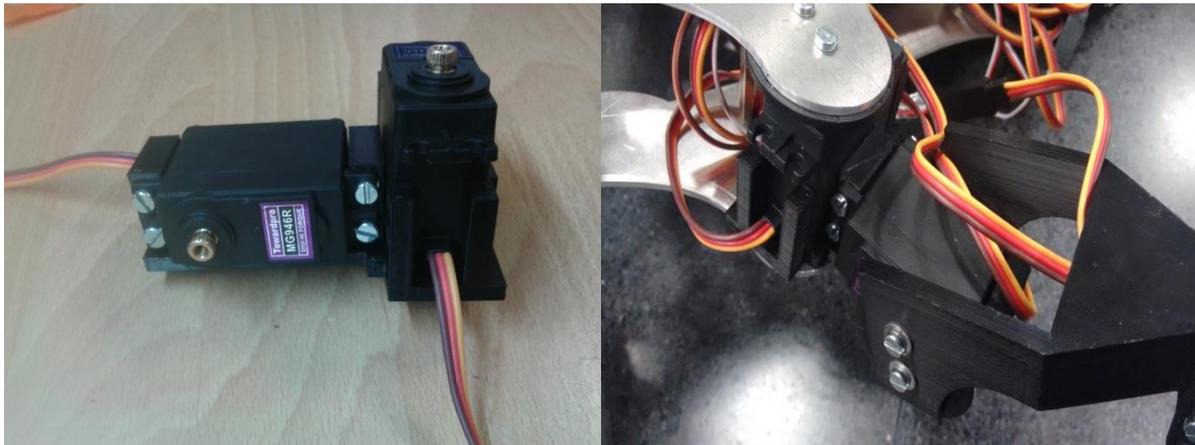
#### **4.4. Diseño mecánico**

En el apartado 4.1 se han establecido una serie de condiciones iniciales que el diseño ha de cumplir. En lo referente al diseño mecánico, tiene especial importancia en el movimiento del robot y la modularidad. A continuación se muestran las soluciones implementadas para cada pieza, que satisfacen estas condiciones.

##### **4.4.1. Articulación CF**

Como se observa en el análisis del apartado 2.3, la articulación CF se encuentra en el punto de unión entre el cuerpo y la pata. Esta articulación se caracteriza por su capacidad de realizar movimientos en dos ejes, permitiendo dos DoF. Generalmente, estos movimientos son realizados por la coxa y el trocánter, pero por simplificación del diseño se ha decidido implementar una sola pieza para este propósito. Para posibilitar estos DoF, es necesario integrar dos servomotores en una misma pieza. De esta manera se puede generar el movimiento desde dos puntos distintos, y aplicarlos sobre la articulación CF.

El movimiento de flexión/extensión será proporcionado por un servomotor integrado en la coxa, en posición horizontal. El servomotor que proporciona el movimiento de abducción/aducción se integrará también en la coxa, pero en posición vertical. Este actuador se integra entre las dos placas que forman el cuerpo, mediante los ejes rotatorios activo y pasivo. El fémur se une a los ejes rotatorios activo y pasivo del servomotor horizontal, generando el movimiento directamente sobre esta sección. En la Figura 4.5 se observa la disposición de los actuadores en la coxa y su unión con el cuerpo y el fémur respectivamente.



(a) Servomotores en la coxa.

(b) Integración de articulación CF.

Figura 4.5. Articulación CF.

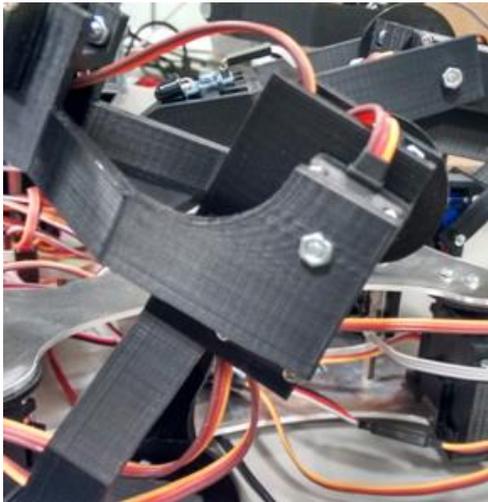
#### **4.4.2. Articulaciones FT y TT**

Por cuestiones de simplificación de diseño, se ha decidido que las articulaciones FT y TT tengan el mismo diseño mecánico. El movimiento de flexión/extensión de ambas articulaciones se realiza por aplicación directa del actuador sobre las piezas de la tibia y el tarso, respectivamente. Los servomotores se sitúan en el interior de la propia articulación, donde la articulación FT une el fémur con la tibia, mientras que la articulación TT une la tibia con el tarso. Como se observa en la Figura 4.6, las piezas del fémur y la tibia, cuya estructura es la misma, se encajan directamente sobre el servomotor.

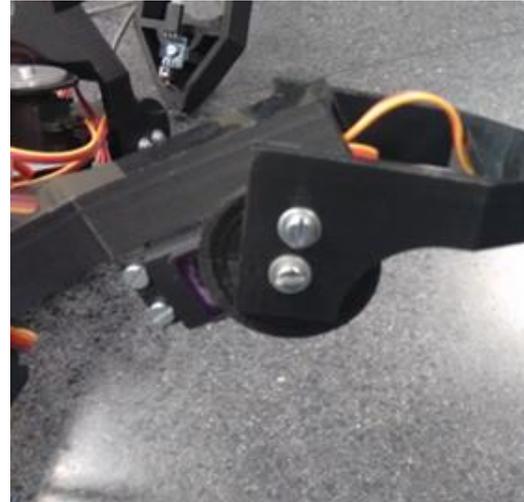


Figura 4.6. Integración de actuador en fémur y tibia.

Las piezas de la tibia y el tarso se unen a los ejes rotatorios activo y pasivo de los servomotores, generando de esta manera el movimiento de flexión/extensión sobre la siguiente pieza de la pata. En la Figura 4.7 puede observarse la unión de ambos ejes con las piezas.



(a) Eje rotatorio pasivo.



(b) Eje rotatorio activo.

Figura 4.7. Ejes rotatorios de fémur y tibia.

#### 4.4.3. Antena

El diseño mecánico de la antena también se ha simplificado notablemente respecto a los modelos biológicos. En el caso de este proyecto, se ha optado por realizar un diseño de antena dividida en dos secciones, cada una gobernada por un actuador independiente. Dado que la antena requiere de menor esfuerzo mecánico que las patas, se emplean actuadores de menor torque y tamaño más reducido.

Ambos actuadores generan su movimiento por aplicación directa sobre la pieza correspondiente. Los ejes rotatorios activo y pasivo se unen a las piezas respectivas de manera similar a la seguida en el caso de las patas. Estas características mecánicas se pueden apreciar en la Figura 4.8.

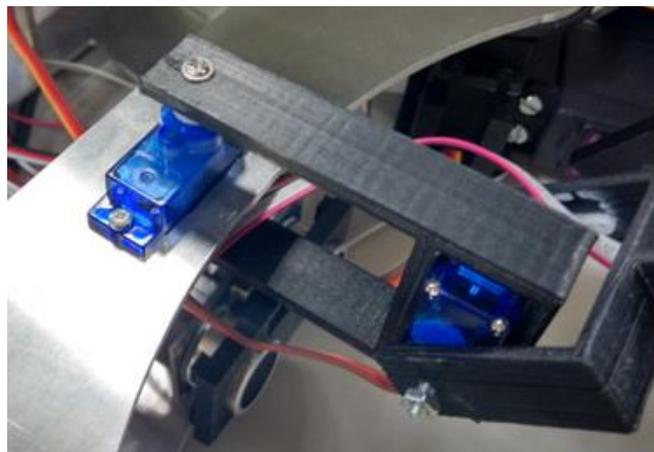


Figura 4.8. Integración de los actuadores en la antena.

Tanto la disposición de los actuadores como su colocación dentro de la estructura se han realizado teniendo en cuenta el tipo de movimiento que realizará cada uno. En la Tabla 4.1 se muestra un resumen con los rangos de movimiento de cada articulación:

Rango de movimiento de las articulaciones			
Extremidad	Articulación	Movimiento	Amplitud
Patas	CF	Abducción/Aducción	-45°/+45°
		Flexión/Extensión	-90°/+90°
	FT	Flexión/Extensión	-90°/+90°
	TT	Flexión/Extensión	-90°/+90°
Antena	CE	Abducción/Aducción	-45°/+45°
	EF	Flexión/Extensión	-45°/+45°

Tabla 4.1. Rango de movimiento de las distintas articulaciones.

## 4.5. Diseño final

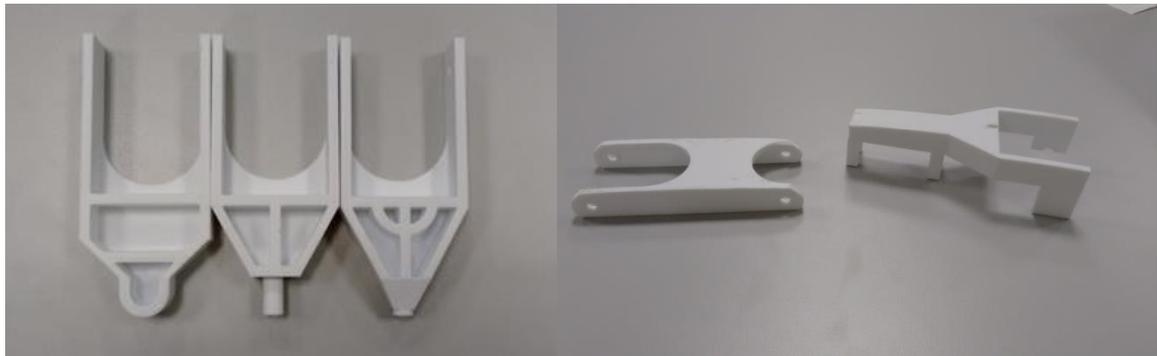
### 4.5.1. Prototipo inicial

Una vez establecidos los criterios mecánicos del conjunto, se inicia la fase de diseño estructural. Para respetar que el conjunto sea modular y autocontenido, se ha buscado integrar todos los actuadores en las piezas implementadas, y que estas sean lo más independientes posibles unas de otras. El primer paso ha sido diseñar y fabricar el prototipo inicial de una de las patas. Esto ha permitido comprobar la viabilidad de diseño mecánico y realizar diversas mejoras estructurales sobre un modelo real.

En primer lugar, se han creado los diseños 3D iniciales de las cuatro piezas que componen la pata. El software empleado para estos diseños ha sido Autodesk 3DS Max, en su versión 2013. En este proceso han tenido especial relevancia dos factores: el primero ha sido tener en cuenta las dimensiones de los servomotores, para que la pieza se ajuste a ellos de la manera más óptima. El segundo ha consistido en realizar diseños que respeten las características de impresión, evitando formas estructuralmente débiles o un uso innecesario de material en estructuras de soporte de impresión. El prototipo completo se puede observar en la Figura 4.9, mientras que la Figura 4.10 muestra alguna de piezas descartadas de cara al diseño final.



Figura 4.9. Prototipo inicial.



(a) Tarso.

(b) Tibia y fémur.

Figura 4.10. Prototipos de piezas de las patas.

#### **4.5.2. Diseño de las patas**

Gracias a la creación del prototipo inicial se ha podido comprobar la viabilidad del diseño mecánico realizado. Por tanto, partiendo de este diseño, se ha procedido a realizar el diseño final. La estructura principal de cada pieza se mantiene, introduciendo los siguientes cambios:

- Se equipara el tamaño de fémur, tibia y tarso, estableciendo en 10 cm la distancia entre los ejes de rotación de los servomotores que realizan el movimiento de flexión/extensión.
- **Coxa:** Se aumenta ligeramente el grosor de sus paredes para aportar robustez al servomotor que ejerce acción sobre la cadera. Se han creado orificios hexagonales en los puntos de anclaje para insertar tuercas. En la parte inferior se ha incluido un hueco donde irá colocado un rodamiento circular que evitará la fricción entre la coxa y la placa inferior del cuerpo. Estas características se observan en la Figura 4.11.

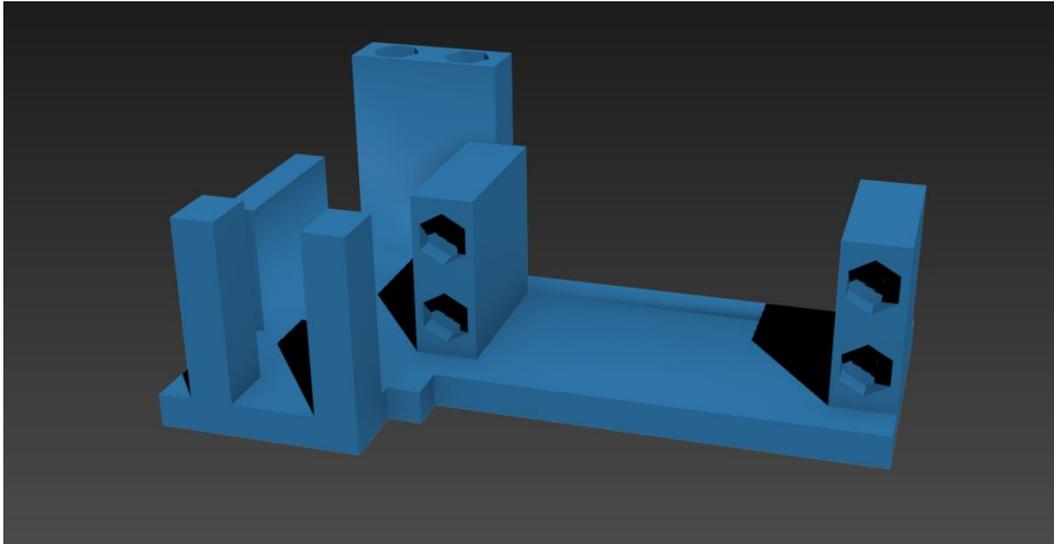


Figura 4.11. Diseño 3D de la coxa.

- **Tibia y fémur:** Se ha aumentado ligeramente su altura, de manera que se genera un hueco por el que pasan los cables de los servomotores. En este hueco también se colocará el cable del sensor infrarrojo en las patas que lo contenga. Se suavizan algunas formas (de forma cuadrada a circular) y se aumenta el grosor de los puntos de anclaje, de manera que se evitan posibles puntos de rotura de piezas. Estas características se observan en la Figura 4.12.

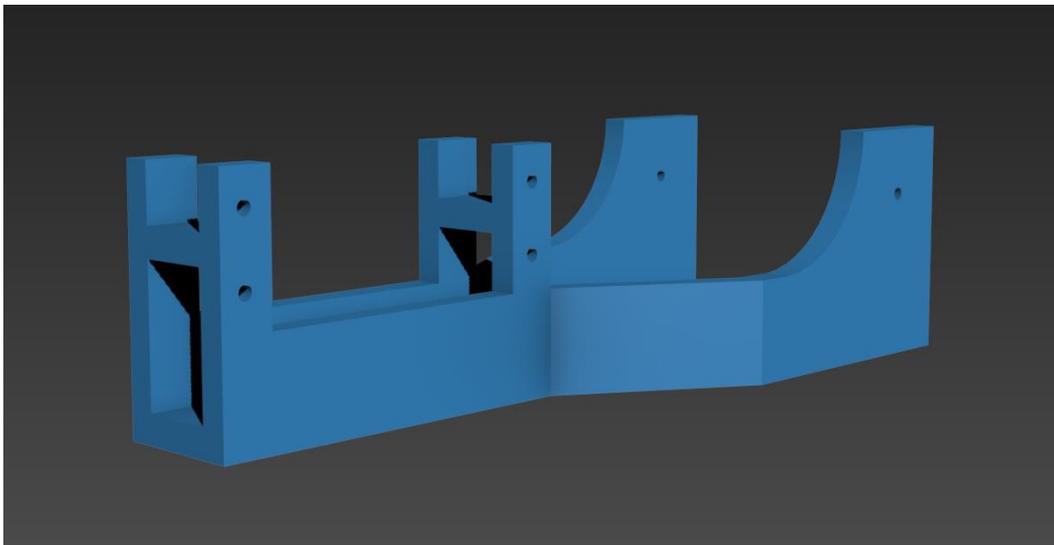


Figura 4.12. Diseño 3D del fémur y la tibia.

- **Tarso:** Se incluye en la zona inferior un punto de anclaje para los sensores infrarrojos. La estructura interna se ve reforzada, mientras que se perfila el punto de contacto con el suelo para evitar roturas. Estas características se observan en la Figura 4.13.

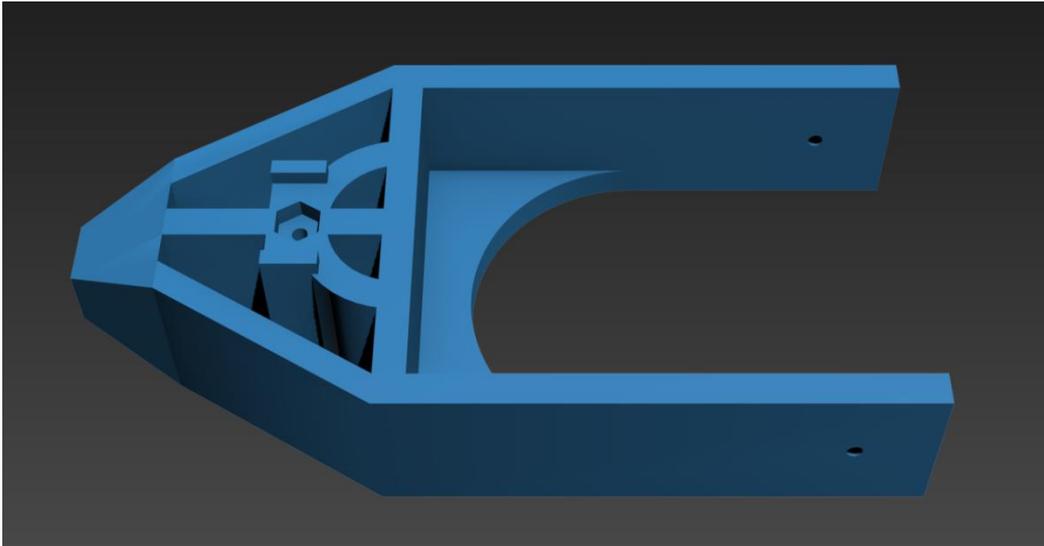


Figura 4.13. Diseño 3D del fémur y la tibia.

### **4.5.3. Diseño de la antena**

En el apartado 4.4.3 se ha determinado que la antena estará compuesta por dos secciones. Al no tener que soportar esfuerzos mecánicos grandes, ambas piezas pueden diseñarse con un menor grosor, lo que conlleva un menor gasto de material. El diseño del escapo se representa en la Figura 4.14. Se ha realizado ajustando su anchura a la altura del servomotor, con una longitud que permita un rango de movimiento de  $90^\circ$ . De esta manera, no existirán colisiones entre el cuerpo y la antena. En su extremo, existe un orificio donde el servomotor que genera el movimiento de flexión/extensión se encaja a presión. El flagelo se ha diseñado con una longitud de 10 cm, de tal forma que la antena quede a escasa distancia del suelo cuando el robot mantiene una posición de altura media. En la Figura 4.15 se muestra el diseño 3D de esta pieza, acabada en un rectángulo con cuatro orificios destinados a sostener la estructura del sensor de temperatura.

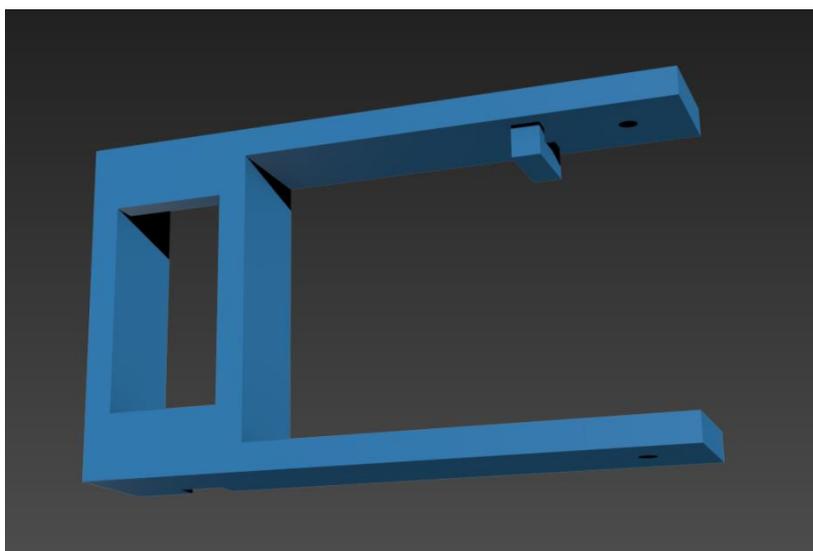


Figura 4.14. Diseño 3D del escapo.

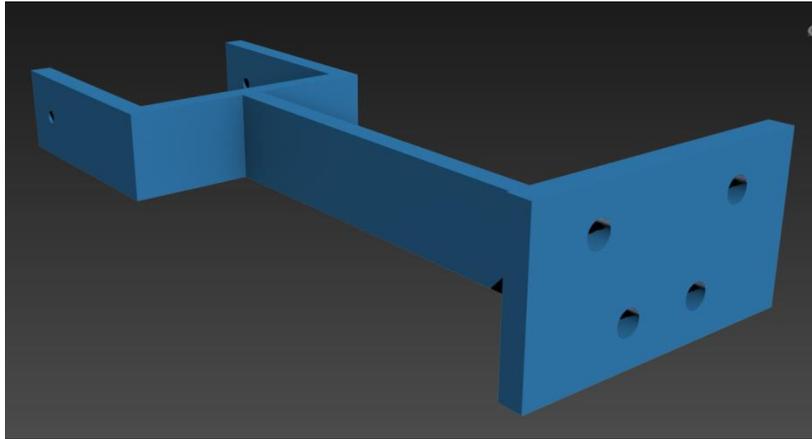


Figura 4.15. Diseño 3D del flagelo.

#### **4.5.4. Diseño del cuerpo**

Como se ha descrito en el apartado 2.2, la estructura más habitual del cuerpo de los artrópodos está formada por varias secciones: cabeza, tórax y abdomen. Diseñar estas tres partes por separado implicaría añadir complejidad mecánica al sistema, por lo que siguiendo el ejemplo de los robots descritos en el apartado 3.6 se ha optado por diseñar únicamente el tórax.

La función principal del cuerpo es la de ejercer de soporte a las patas del robot. A su vez, tendrá que alojar tanto al sistema de control como a los sensores y a la antena. A diferencia de las patas, su diseño se ha realizado con el software Catia versión 5.21, empleado de manera extendida en diseños industriales. El diseño del cuerpo se ha creado buscando facilidad de montaje y permitiendo la máxima movilidad de las patas. Sus características se describen a continuación:

- La parte principal del cuerpo está formada por dos superficies planas que hacen las funciones de tórax. Para evitar añadir peso a la estructura, se ha realizado el vaciado de estas placas, sin comprometer la robustez del conjunto. También se ha realizado un orificio en la parte delantera de la pieza superior, donde se integrará el primer servomotor de la antena.
- Existe simetría bilateral en ambos ejes de la estructura. Los puntos de ensamblaje de las patas se han situado en los bordes de las placas, dentro de unos salientes circulares. Para mantener la proporcionalidad del conjunto, la diagonal del cuerpo tiene aproximadamente la misma longitud que una pata extendida. El problema de posibles colisiones durante el movimiento se evitará estableciendo mediante software una distancia adecuada entre patas contiguas.
- Para facilitar el desplazamiento, las líneas imaginarias que unen los pares de patas (delanteras, centrales y traseras) son paralelas entre sí. Aumentando ligeramente la distancia entre las patas centrales se consigue una mayor estabilidad del conjunto.

- En este diseño, también se han incluido los orificios correspondientes a los puntos de unión entre las placas superior e inferior, así como los puntos de anclaje del sistema de control con estas dos placas.

La Figura 4.16 muestra el diseño 3D de la placa superior. La placa inferior es idéntica, diferenciándose únicamente en la ausencia de orificio para la inclusión del servomotor de la antena.

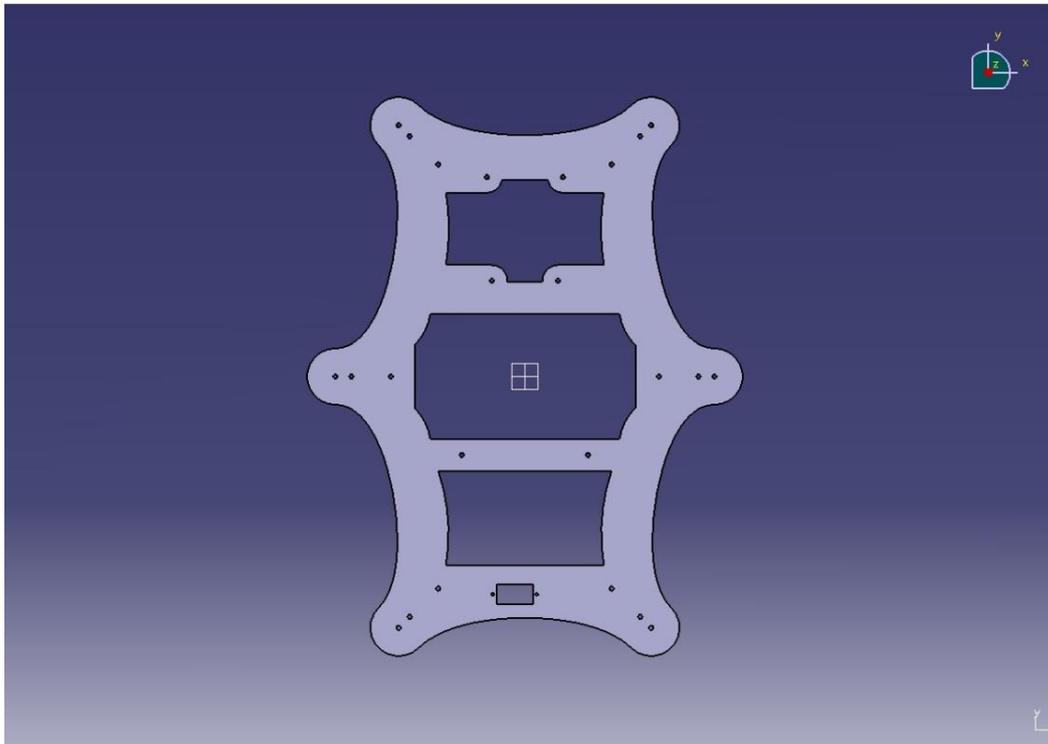


Figura 4.16. Diseño de placa superior del cuerpo.

### **4.6. Construcción del robot**

Con la fabricación del prototipo inicial se ha podido tener una primera toma de contacto con los materiales y herramientas empleados para la construcción del diseño final. A continuación se resumen los pasos más destacables del proceso. En el anexo A se describe este proceso de manera más detallada.

Se han establecido una serie de premisas que han de cumplir los materiales utilizados. Se ha buscado un método de fabricación sencillo, que permita realizar modificaciones sin excesivo coste. En cuanto al material, ha de ser ligero para no aumentar el peso de la estructura, pero lo suficientemente resistente para evitar roturas en situaciones de alto esfuerzo mecánico. Por todo ello, se ha decidido fabricar las piezas con el material plástico ABS empleando la tecnología de impresión 3D. Debido a las características de la impresora y de los materiales con los que trabaja, se descartó emplear el ABS para las dos piezas que componen el cuerpo del robot. En su lugar se ha optado por fabricar estas piezas con placas de aluminio de 2,5 mm de espesor. Este material aporta la solidez necesaria para sostener al resto del conjunto.

La fabricación de las piezas de las patas y la antena se ha realizado con la impresora 3D Ultimaker 2, mientras que una máquina de control numérico ha cortado las piezas metálicas que forman el cuerpo. Gracias a que la impresión tiene una serie de parámetros configurables, la fabricación de las piezas optimiza el compromiso entre uso de material y robustez de la estructura. La máquina de control numérico permite realizar cortes con gran precisión, de tal forma que se aprovecha este proceso para realizar los taladros necesarios para la unión de las patas al cuerpo.

Todos los servomotores de la estructura actúan como articulaciones, aplicando su movimiento directamente sobre las piezas. Para reforzar la estructura y aportar precisión a estos movimientos, se ha añadido un eje pasivo en el lado contrario al eje rotor, completando de esta manera un eje transversal total. También se ha creado un segundo punto de unión entre las piezas y el soporte circular del servomotor, que complementa al situado en el eje rotor.

Los servomotores se integran en las piezas con sujeciones mediante tornillos de métrica tres. El ensamblaje de las patas se ha realizado prestando especial atención a que la posición en grados del servomotor coincida con la posición relativa de la pieza. Una vez fabricada una pata, se replica el proceso para las demás.

Como las patas se integran entre las dos superficies que forman el cuerpo, la altura de la coxa determina la distancia entre la placa inferior y superior. La disposición numérica de las patas se muestra en el esquema de la Figura 4.17. La tarjeta controladora se une mediante separadores de nylon a estas dos superficies. Para añadir solidez a la estructura, existen ocho puntos de unión complementarios distribuidos por todo el cuerpo.

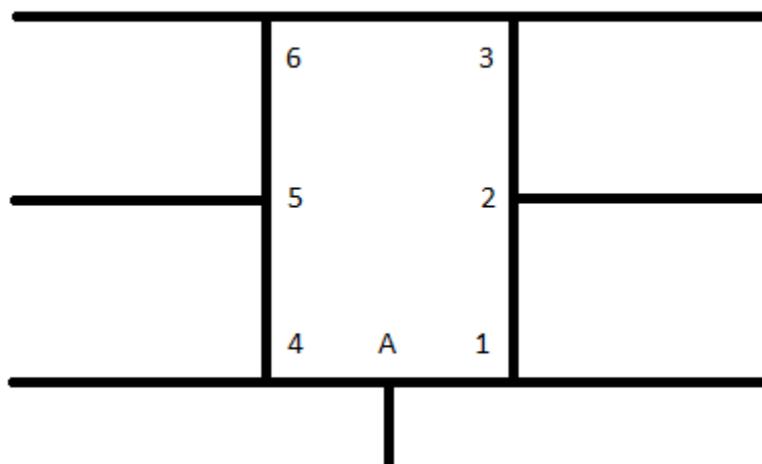


Figura 4.17. Disposición numérica de las patas.

La construcción finaliza con la colocación de la antena y el sensor de distancia en la parte frontal del robot, mientras que los sensores de infrarrojos se posicionan en las patas delanteras y traseras. En la Figura 4.18 se muestra el resultado final de la construcción en su posición media, con el robot completamente ensamblado y preparado para su funcionamiento.

Con un peso 2,45 kg (323 gramos correspondientes a cada pata), el robot tiene unas dimensiones de 74 cm x 80 cm, como se observa en la Figura 4.19. La altura máxima que puede alcanzar es de 28 cm. Para este proyecto se han configurado tres posiciones básicas: alta, media y baja. Sobre estas posiciones se realizarán las distintas pruebas de sensado y desplazamiento del robot. La disposición del robot en las posiciones baja y alta se muestra en la Figura 4.20 y la Figura 4.21.

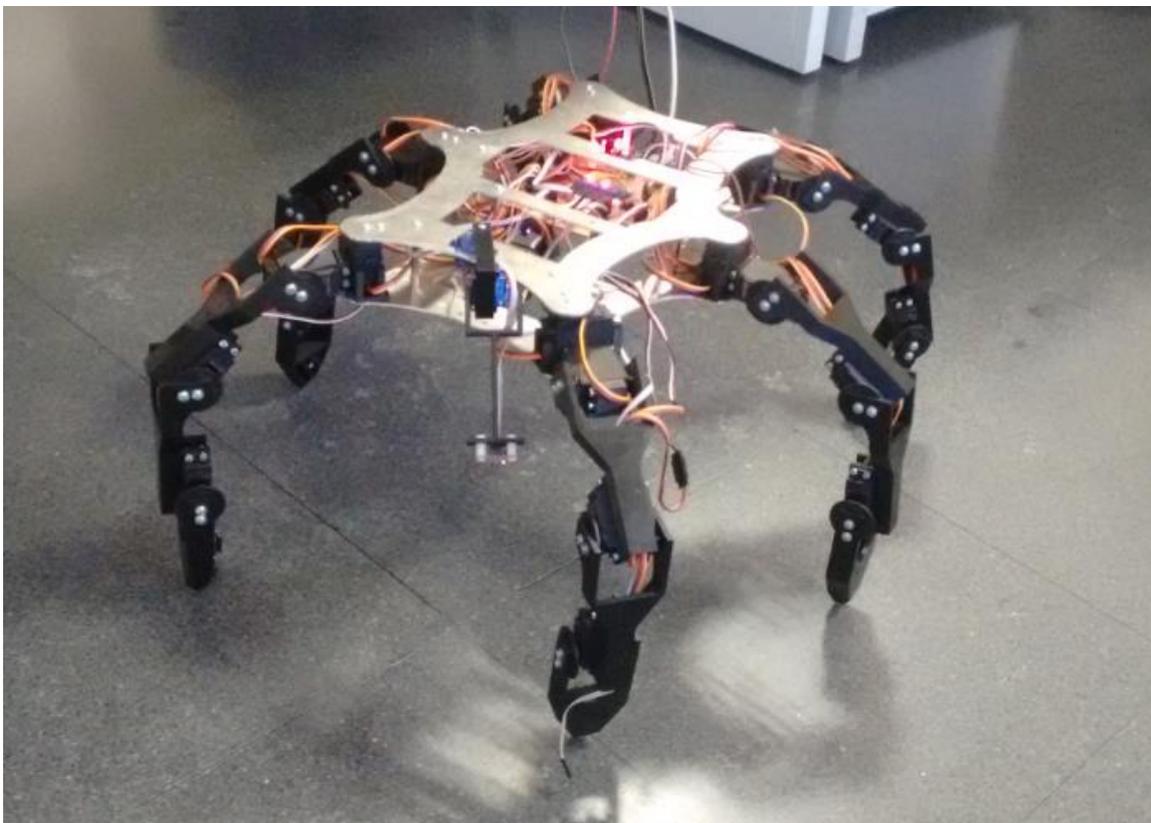


Figura 4.18. Robot artrópodo completo en posición media.

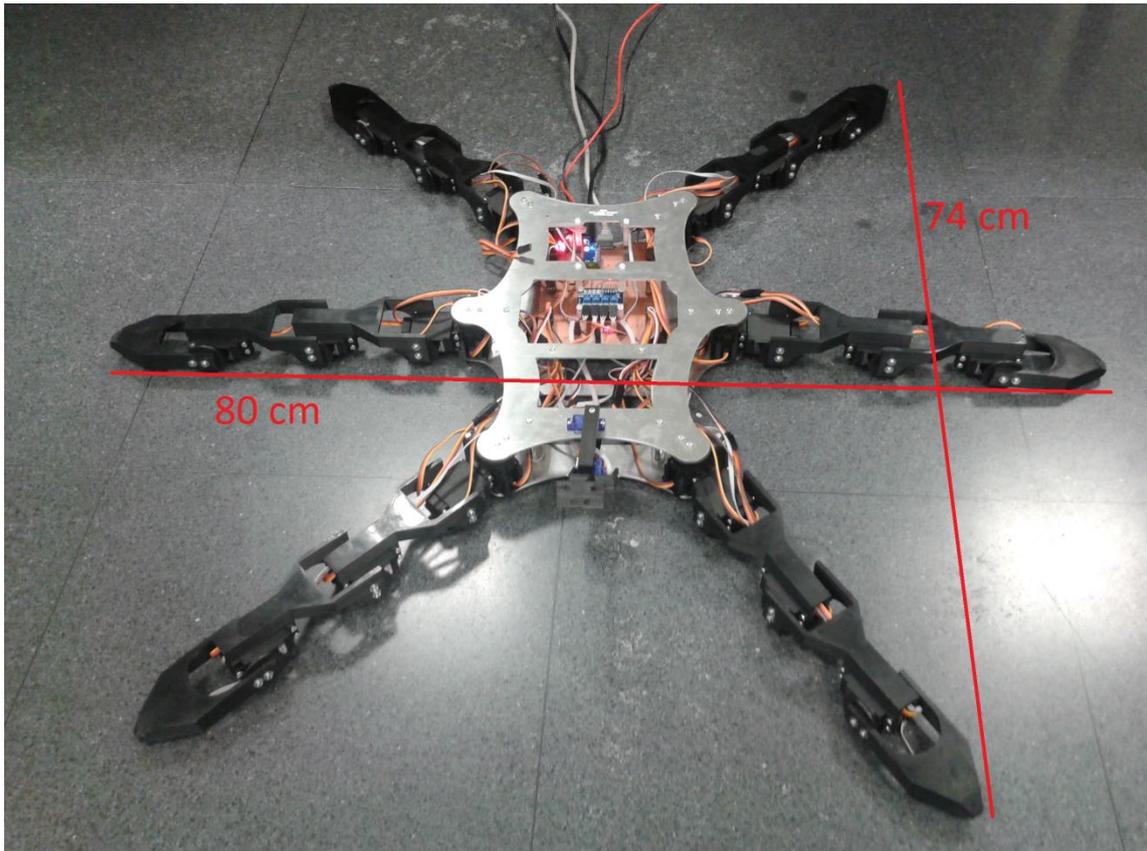


Figura 4.19. Dimensiones del robot.

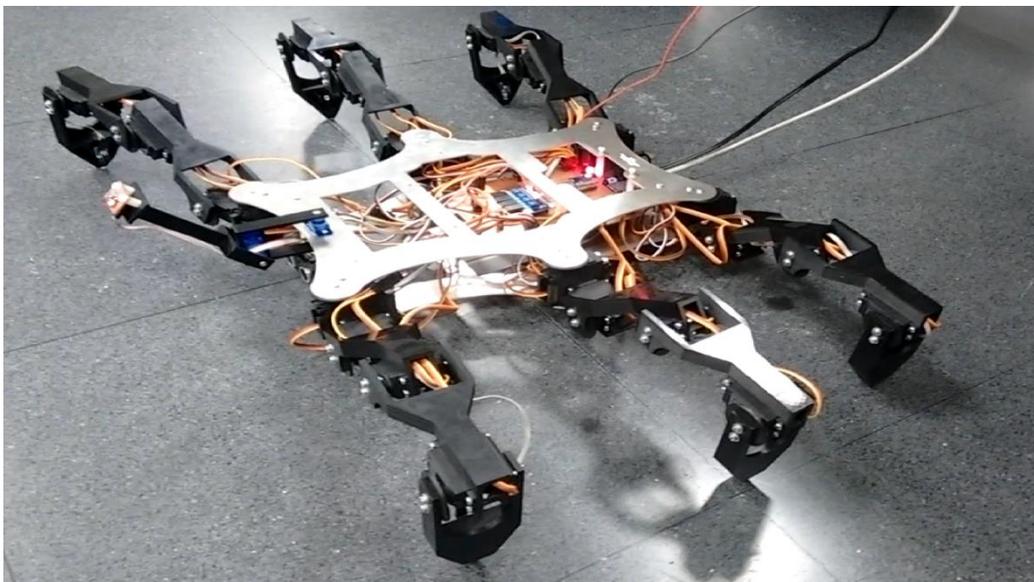


Figura 4.20. Robot en posición baja.



Figura 4.21. Robot en posición alta.



## 5. Control del robot artrópodo

---

Las características eléctricas, electrónicas y de funcionamiento de los actuadores y sensores utilizados suponen el punto de partida del desarrollo del sistema de control. La elaboración de este sistema ha tenido dos partes claramente diferenciadas: el hardware, que incluye el diseño y construcción de una tarjeta PCB con diferentes componentes electrónicos; y el software, donde se ha elaborado una librería con funciones básicas para el control del sistema a través del hardware implementado.

### 5.1. Hardware de control

El sistema de control tiene como objetivos crear y enviar las instrucciones precisas para el funcionamiento de los actuadores y sensores, para posteriormente procesar la información que recibe de estos. Por tanto, el sistema seleccionado debe cumplir una serie de requisitos, descritos a continuación:

- Los servomotores deben ser controlados de manera independiente, por lo que el sistema debe tener suficientes canales PWM o trabajar mediante buses de datos (UART o I2C) que permitan un control PWM software.
- Debe disponer necesariamente de las herramientas para el control de los sensores: pines de entrada/salida para el control de los sensores de distancia e infrarrojo; y bus de datos I2C para el control del acelerómetro y el sensor de temperatura.
- Los ciclos de control de los servomotores requieren rapidez de procesamiento, por lo que necesita un sistema con gran capacidad computacional. Esto se consigue con un procesador que funcione con una frecuencia de reloj alta.

- Para poder integrar todos los elementos, debe disponer de una cantidad de puertos de comunicación suficientes. En caso de no cumplirse esta condición, debe permitir la inclusión de sistemas de expansión. También se ha valorado la conectividad mediante distintas tecnologías y un tamaño reducido, para cumplir con la modularidad del conjunto.

Dentro de las alternativas disponibles, los sistemas empotrados son los que más se ajustan a los requisitos establecidos. Por sistema empotrado se denomina a un sistema de computación diseñado y empleado para cubrir una serie de necesidades específicas. La parte fundamental de estos sistemas es la placa base (plataforma o tarjeta embebida) que contiene el microprocesador, las memorias, los puertos de comunicación (conectores físicos), otros chips, etc.

Para este proyecto se ha escogido la tarjeta BeagleBone Black (<http://beagleboard.org/bone>), entre otras razones por su bajo coste, su alta capacidad computacional y su buena comunicación con el exterior. Se trata de un mini ordenador que incluye un procesador de 1 GHz AM335x ARM Cortex-A8, 512MB DDR3 RAM, puerto HDMI y 2 GB de memoria flash eMMC. Cuenta con 66 GPIO, ocho salidas PWM, siete entradas ADC y tres puertos I2C. Se trabaja con el sistema operativo Debian (basado en Linux), que proporciona una estructura de archivos que hace posible controlar todos los puertos de entrada y de salida. Todas sus características se pueden consultar en el manual oficial [19].

## **5.2. Placa de control**

Con el uso de la plataforma BeagleBone se obtienen las herramientas básicas necesarias para el control del sistema. Sin embargo, debido a las particularidades del proyecto, es necesario incluir una serie de componentes electrónicos que permitan el control y alimentación de un alto número de actuadores. De manera paralela, se debe posibilitar también la conexión y el manejo de los sensores. Por ese motivo, se ha desarrollado una placa de control que contiene estos elementos electrónicos adicionales. Esta placa se situará sobre la BeagleBone, conectando los pines de sus puertos de expansión con los pines de los sensores y la electrónica complementaria.

La placa controladora se construirá con PCB de dos caras, de manera que se puedan situar pistas y componentes electrónicos en la parte superior e inferior. El tamaño de esta placa se debe adaptar a las dimensiones del robot, para poder incluir el sistema de control completo en el interior del mismo. En esta placa se han integrado el acelerómetro y el módulo central del sensor de infrarrojos descritos en el apartado 4.3. Los componentes electrónicos adicionales integrados en esta placa se detallan a continuación:

- **PCA9685:** Como se ha descrito en las características de la BeagleBone, esta sólo dispone de ocho canales PWM. Para controlar patas y antena de manera simultánea se necesitarían 26 canales PWM, lo cual demuestra que los puertos ofrecidos son insuficientes. Para solucionar este problema, existen en el mercado componentes electrónicos que actúan como controladores de PWM. En este caso se ha empleado el modelo PCA9685, de la compañía NXP Semiconductors. Este chip es capaz de controlar hasta 16 puertos PWM a través del bus de datos I2C. Cada puerto tiene su propia resolución de 12 bits (4096 pasos), pudiendo ajustar tanto la frecuencia como el ciclo de trabajo. Dispone de cinco pines para configurar físicamente la dirección I2C y trabaja a un voltaje de entre 2,3 y 5,5 V. Sus características completas se pueden ver en la hoja de datos del componente [20].
- **Buffer:** En el manual de la BeagleBone se observa como la mayoría de los pines de entrada/salida de los puertos de expansión trabajan a 3,3 V. Sin embargo, alguno de los sensores trabajan a 5 V. Para adaptar las diferentes tensiones de los componentes y eliminar parte del ruido de la señal se han incluido buffers que transforman el nivel lógico de la señal. Para este proyecto se ha seleccionado el modelo MC14050B de la compañía ON Semiconductors.
- **Regulador de tensión:** La BeagleBone ofrece, en sus puertos de expansión una fuente de tensión de 5 V, que puede trabajar hasta 1 A. Sin embargo los buffers, los controladores PWM y todos los sensores a excepción del de distancia trabajan a 3,3 V. Por ello, se ha incluido un regulador de tensión de 3,3 V que permite adaptar el voltaje de salida al necesario para cada componente. Para este proyecto se ha seleccionado el regulador LD1117S33TR de la compañía ST Microelectronics.
- **Alimentación:** La corriente de salida que ofrece la BeagleBone (1 A) es claramente insuficiente para alimentar a todos los servomotores del robot. Por ello, dentro de la placa se ha creado un circuito de alimentación que recorre el perímetro de la misma. Las pistas de este circuito serán bastante más anchas que las de las señales de control, para permitir que toda la corriente necesaria circule sin problemas. Para llevar la alimentación desde una fuente externa se ha incluido un jack al comienzo de estas pistas.
- **Conectores:** Las conexiones de los servomotores con la tarjeta se realizan mediante conectores de tres pines, situados en el borde de la tarjeta. Dos de estos pines se conectan con el circuito de alimentación de los servomotores (VCC Y GND). El tercer pin está destinado a conectar cada servomotor con su señal de control PWM correspondiente. En el caso de los sensores de distancia y temperatura, la conexión se realiza mediante conectores de cuatro pines. También se colocarán conectores en los puertos de comunicación de la placa con la BeagleBone.

- **Resistencias:** En el bus de datos I2C es necesario incluir resistencias de pull-up. Su valor viene determinado por la velocidad de transmisión del bus. En ese caso, para una frecuencia de 100 kHz se emplean resistencias de 2,2 k $\Omega$  tanto en SCL (reloj) como en SDA (datos). Para proteger las salidas de los controladores PWM se han incluido resistencias en serie de 220  $\Omega$ .
- **Condensadores de desacoplo:** La corriente que circula por las pistas del circuito genera interferencias electromagnéticas. Para eliminar estas interferencias y estabilizar los pines de alimentación del circuito, se han colocado condensadores de desacoplo. Estos condensadores funcionan como filtro paso bajo, eliminando las componentes de frecuencias altas. Para este circuito se han escogido condensadores de 100 nF, situados lo más cerca posible de las fuentes de alimentación. Complementariamente, cerca de la conexión de alimentación de los servomotores y de la BeagleBone se han colocado en paralelo condensadores de 2200  $\mu$ F y 100  $\mu$ F, respectivamente.
- **Leds:** Se han incorporado leds indicadores para comprobar que las fuentes de alimentación de 5 V (BeagleBone), 3,3 V (tras paso por regulador) y 6 V (Servomotores) funcionan correctamente.

Para diseñar la placa de control, se ha empleado el software Altium Designer, en su versión 14.3. Algunos elementos no existen en las librerías del programa, por lo que se ha creado tanto su esquemático como su footprint. En la Figura 5.1 se observa el esquemático general con todas las conexiones entre elementos de la placa.

A continuación, estos datos del esquemático se han trasladado al diseño PCB. En esta fase se ha determinado la posición todos los elementos dentro de la placa y el ancho de las pistas. Los criterios seguidos para este posicionamiento han sido la colocación de los condensadores de desacoplo cerca de las fuentes de alimentación, minimizar el cruce de pistas y separar de manera suficiente los elementos para evitar problemas de soldadura. La Figura 5.2 muestra el resultado final de este diseño.

Tras haber exportado el diseño PCB al formato adecuado, se ha procedido a construir la placa PCB. Tras su fabricación con la máquina de circuitos impresos disponible en el taller de la EPS, se han soldado todos los elementos electrónicos. El resultado final se muestra en la Figura 5.3 y en la Figura 5.4.

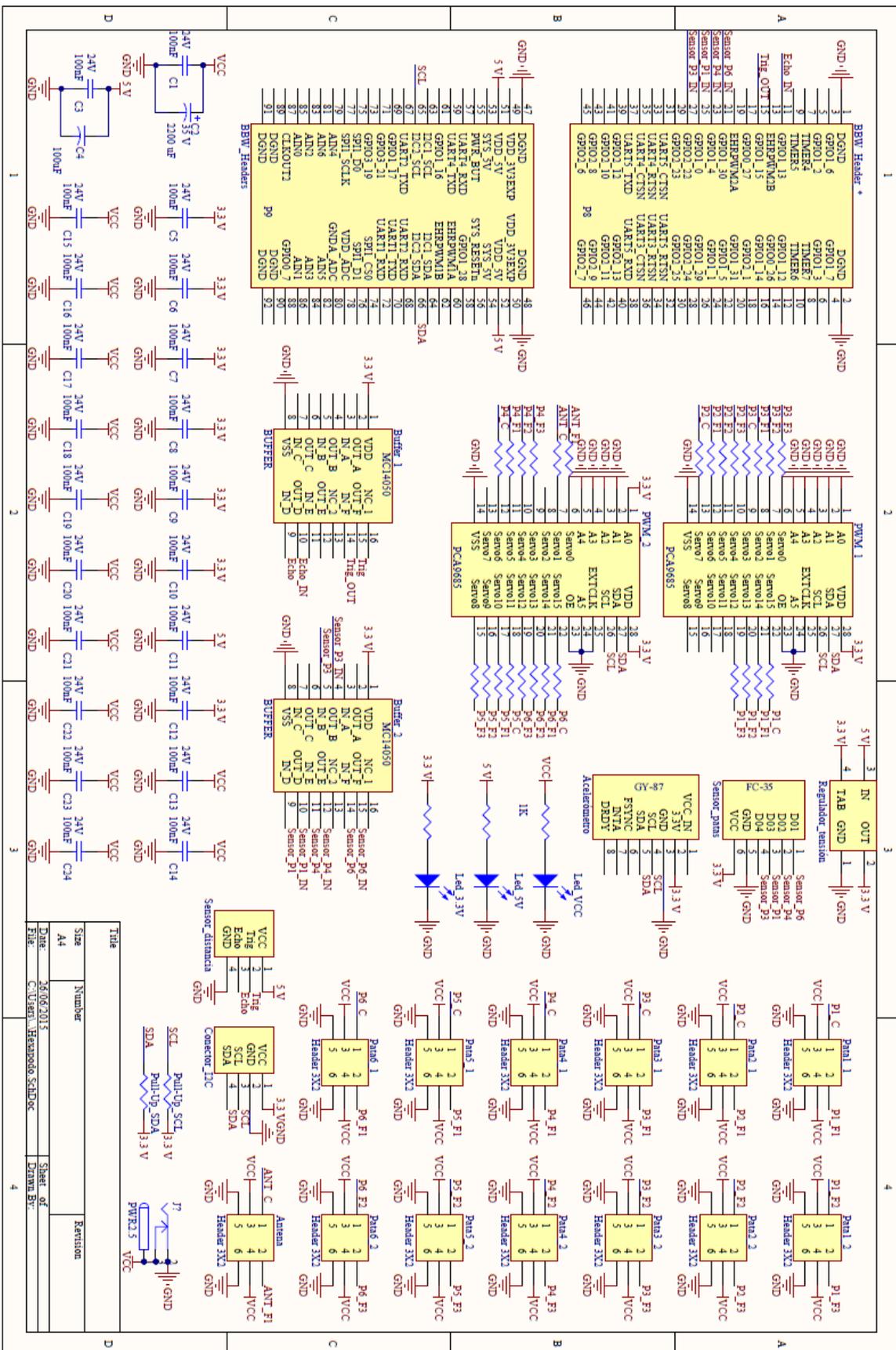


Figura 5.1. Plano esquemático de la placa de control.

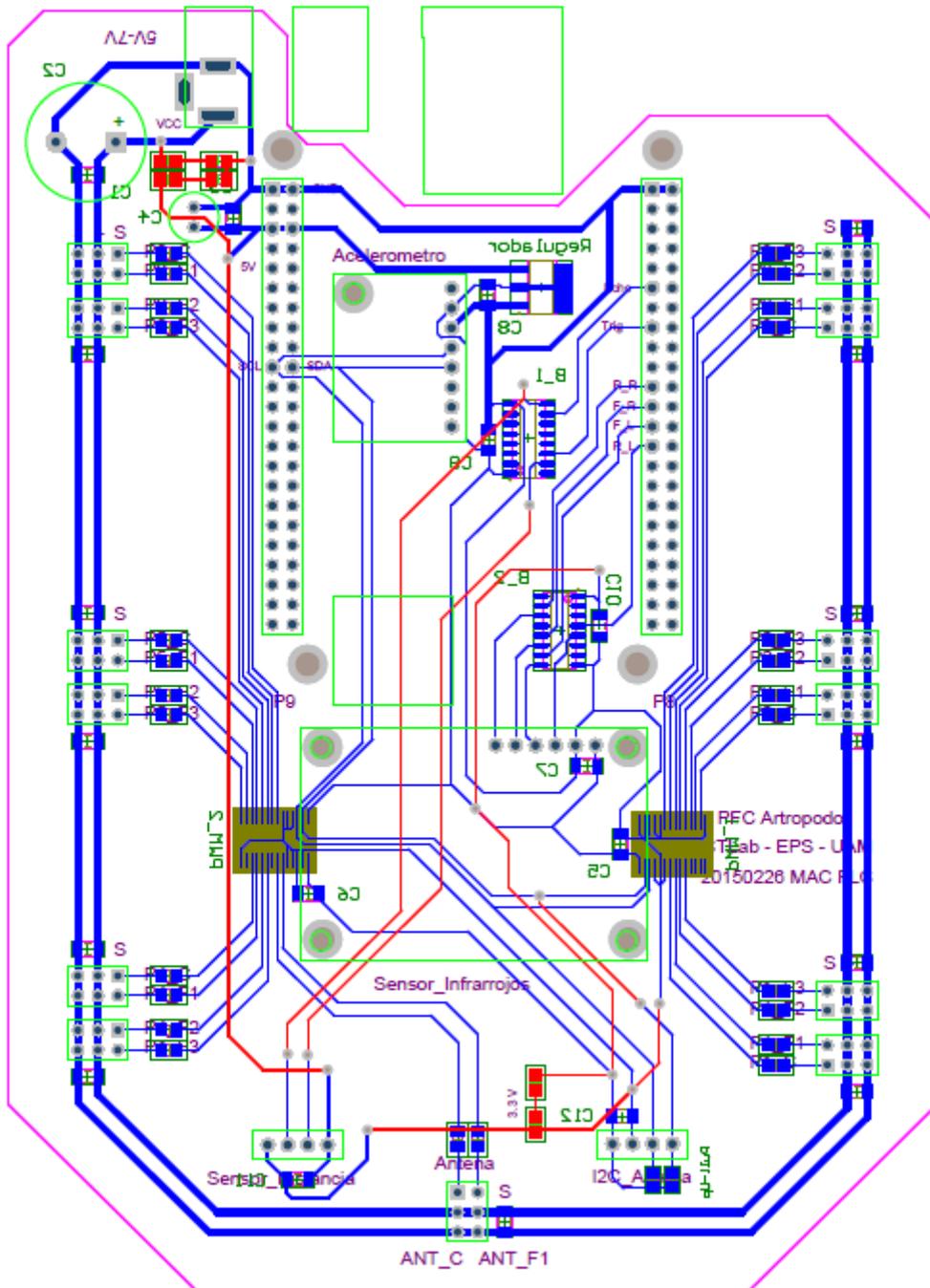


Figura 5.2. Diseño de la placa de control.

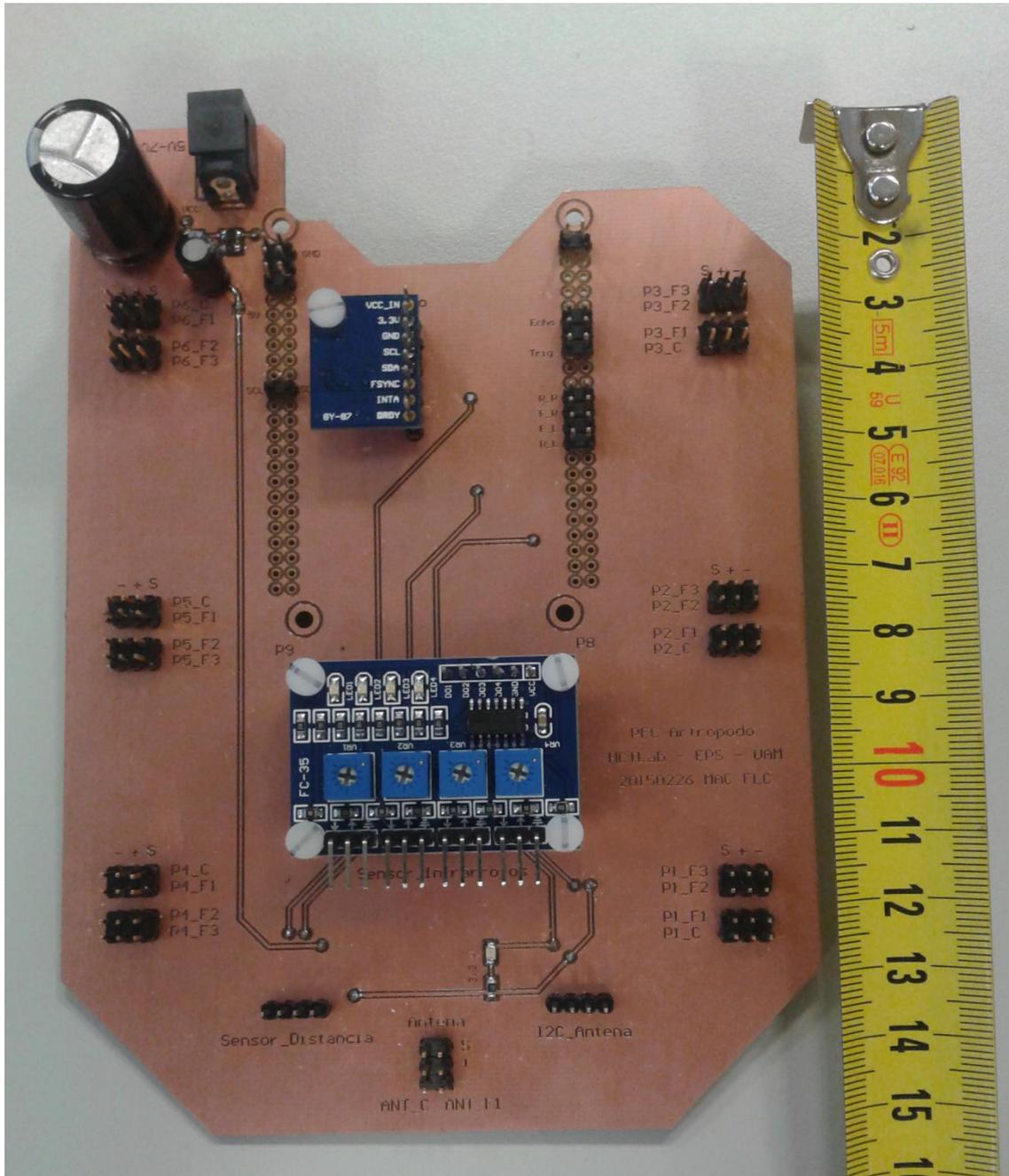


Figura 5.3. Cara superior de la placa de control.

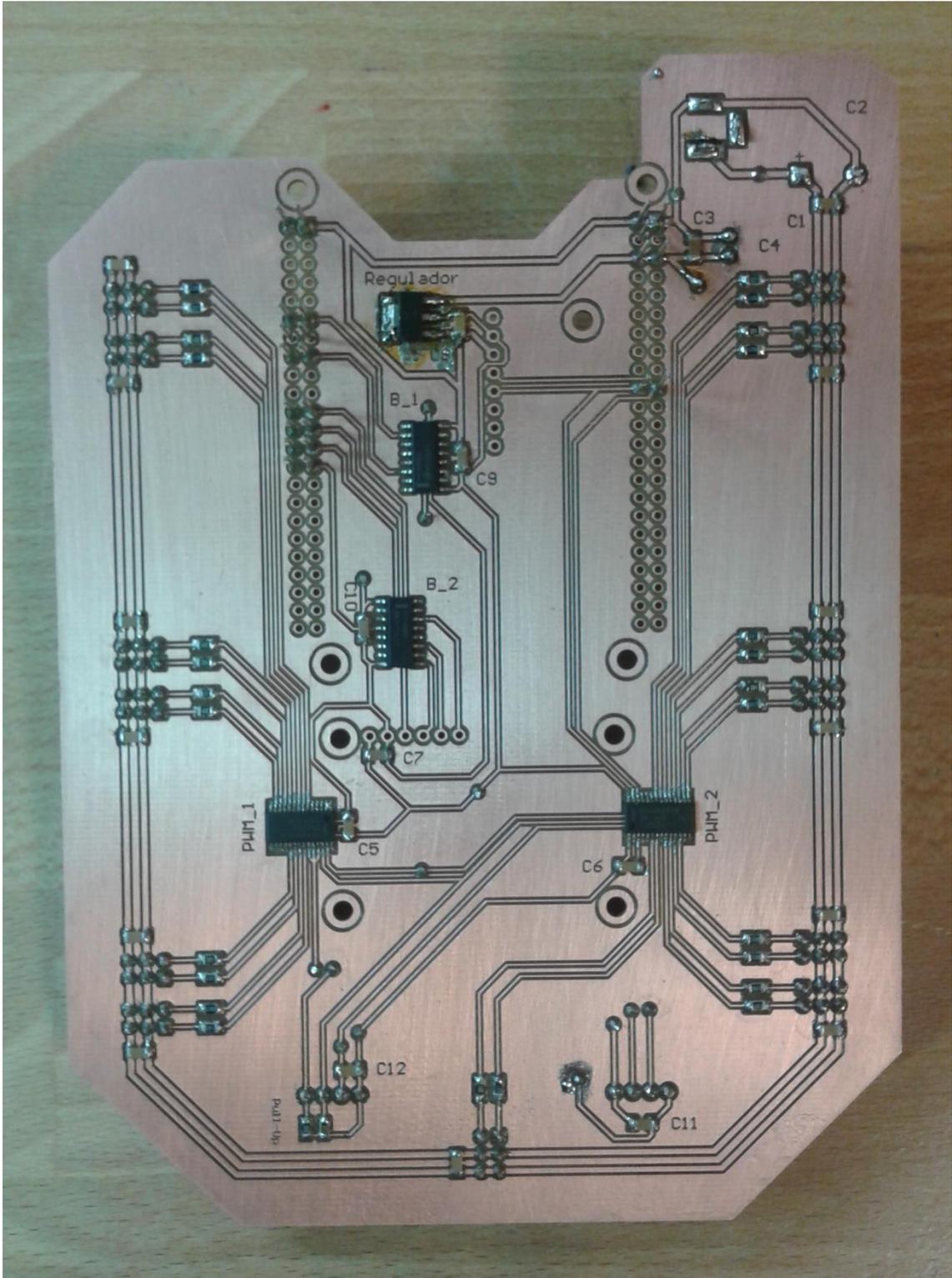


Figura 5.4. Cara inferior de la placa de control.

### 5.3. Software de control

Con el objetivo de controlar toda la electrónica del proyecto, se ha creado una librería software con las funcionalidades básicas para el manejo del robot. El sistema operativo Debian (Linux) instalado en la BeagleBone permite trabajar con varios lenguajes de programación. Dentro de todas las posibilidades existentes, se ha escogido Python en su versión 2.6. Esta elección viene determinada por varios aspectos, entre ellos su sintaxis simple que hace un código legible, su facilidad de interacción con los sensores y a la existencia de librerías similares a las necesarias escritas en este lenguaje. Para generar los programas se ha trabajado a través del entorno de programación Ninja IDE (<http://www.ninja-ide.org>).

A continuación se exponen los archivos implementados. En el anexo C se describe su estructura y funcionamiento de manera más detallada:

- `Gestor_I2C.py`: Gestor del bus de datos I2C. Es el encargado de inicializar dicho bus en la dirección indicada y de leer (tanto valores signed como unsigned) y escribir en los registros correspondientes.
- `PWM_Servo_Driver.py`: Gestor del controlador PWM de 16 canales. Se encarga de ajustar la frecuencia de PMW (previo escalado) y definir, mediante el bus IC2, el ciclo de trabajo del pulso PWM en los registros correspondientes para cada canal. Dispone también de una función que activa todos los canales con el mismo pulso.
- `Sensor_temperatura.py`: Gestor del sensor de temperatura, presión atmosférica y altitud. Se encarga de leer, mediante el bus I2C, los registros correspondientes a cada magnitud. Tras aplicar un escalado y ciertos algoritmos sobre los datos leídos, proporciona los datos de presión y temperatura. La altitud se calcula en función de la presión. Dispone de cuatro modos de operación que posibilitan variar la precisión de la medida.
- `Acelerometro.py`: Gestor del acelerómetro y giróscopo. Se encarga de leer, mediante el bus I2C, los registros correspondientes a cada magnitud. Tras aplicar un escalado, calcula la rotación en cada eje mediante funciones matemáticas contenidas en el archivo.
- `Sensor_distancia.py`: Gestor del sensor de distancia. Se encarga de configurar los pines como emisor y receptor y generar un pulso cuadrado de 10  $\mu$ s. La distancia se calcula en función del tiempo transcurrido entre la emisión y recepción de la señal y la velocidad de propagación de la señal sobre el medio.
- `Sensor_infrarrojos.py`: Gestor de los sensores de infrarrojos. Se encarga de configurar los pines correspondientes como entrada y leer si se obtiene un '1' o un '0'. En función de estos valores, devuelve un valor booleano indicando si la pata tiene superficie donde apoyar. Si la pata sobre la que se realiza la consulta no contiene sensor de infrarrojos, devuelve por pantalla un mensaje de error.

- `Articulacion.py`: Gestor del movimiento de cada articulación. Contiene los canales correspondientes a cada articulación y los valores de ancho de pulso PWM correspondientes a ángulos de  $10^{\circ}$ . Mueve la articulación hasta la posición deseada indicada. Dispone de un algoritmo que controla la velocidad a la que se realiza el movimiento. Todos los movimientos se realizan en función de la posición anterior. Estas posiciones se almacenan en archivos de texto con lectura y escritura durante el ciclo del programa.
- `Antena.py`: Gestor de movimiento de la antena. Contiene los valores de ancho de pulso PWM para posibilitar nueve puntos de medida en el espacio. Dirige la antena hacia el punto deseado sin posibilidad de variación de velocidad.

Los gestores de lectura de sensores y movimiento de articulaciones van acompañados de un programa de ejemplo. En el caso del programa `Articulación.py`, se incluyen ejemplos de las tres posiciones básicas del robot (alta, media y baja) y del desplazamiento básico en estas posiciones.

#### **5.4. Control del robot artrópodo**

Para controlar los movimientos del robot artrópodo, la tarjeta BeagleBone debe conectarse a un PC que le envíe las instrucciones con los programas a ejecutar. Esta conexión puede realizarse de dos maneras: mediante cable USB o mediante cable Ethernet. Con la primera opción no es necesario alimentación externa. Sin embargo, empleando una alimentación externa de 5 V y la conexión por cable Ethernet, permite que el microprocesador trabaje a su máximo rendimiento. El PC empleado dispone de una tarjeta de red secundaria que posibilita la conexión sin perder la señal de internet. Por ello, se ha elegido esta segunda opción como método de conexión PC-BeagleBone.

La comunicación entre los dos dispositivos se realiza mediante el protocolo de comunicaciones cifrado SSH (Secure SHell), que permite acceder a máquinas remotas a través de una red. En este caso, el PC actúa como cliente SSH y la BeagleBone como servidor SSH. Para realizar esta comunicación, es necesario instalar en el PC un software que ejerza de cliente SSH. Dentro de las posibilidades existentes, se ha elegido PuTTY en su versión 0.61, como se muestra en la Figura 5.6. Para operar sobre los archivos remotos contenidos en el directorio Debian de la BeagleBone, se ha empleado WinSCP. Este software es un cliente SFTP (SSH File Transfer Protocol) para Windows que opera sobre SSH.

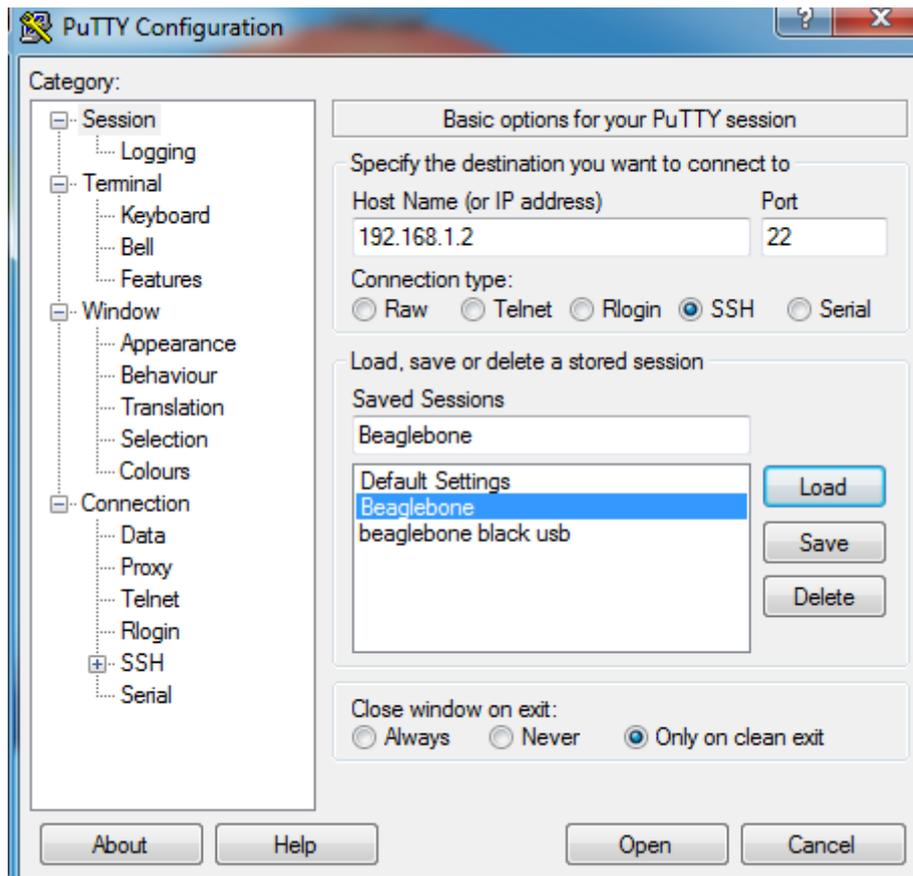


Figura 5.6. Ventana de inicio del cliente SSH PuTTY.

Para establecer la conexión, es necesario configurar la BeagleBone con la misma red IP que la tarjeta secundaria de red del PC (192.168.1.2). Existen una serie de librerías o complementos que son necesarios descargar de internet y se deben añadir la versión básica del sistema operativo provista. Esta operación puede realizarse descargando el contenido en el PC y copiándolo a la BeagleBone mediante WinSCP. También se puede realizar introduciendo los comandos directamente en el terminal, siempre que la tarjeta disponga de conexión a internet. En primer lugar, se ejecutan varias instrucciones que actualizan la versión de python e instalan varias funcionalidades: **python-dev** contiene herramientas de desarrollo para módulos escritos en este lenguaje. **Python-pip** gestiona la instalación y el uso de paquetes de software. Finalmente **python-smbus** gestiona el acceso a dicho bus de datos a través de I2C.

1. `sudo ntpdate pool.ntp.org`
2. `sudo apt-get update`
3. `sudo apt-get install build-essential python-dev python-pip python-smbus -y`

Para facilitar el control de los pines de entrada/salida, se ha instalado la librería Adafruit\_BBIO de la compañía Adafruit Industries, dedicada a la gestión de hardware en código abierto.

4. `git clone git://github.com/adafruit/adafruit-beaglebone-io-python.git`
5. `cd adafruit-beaglebone-io-python`
6. `sudo python setup.py install`

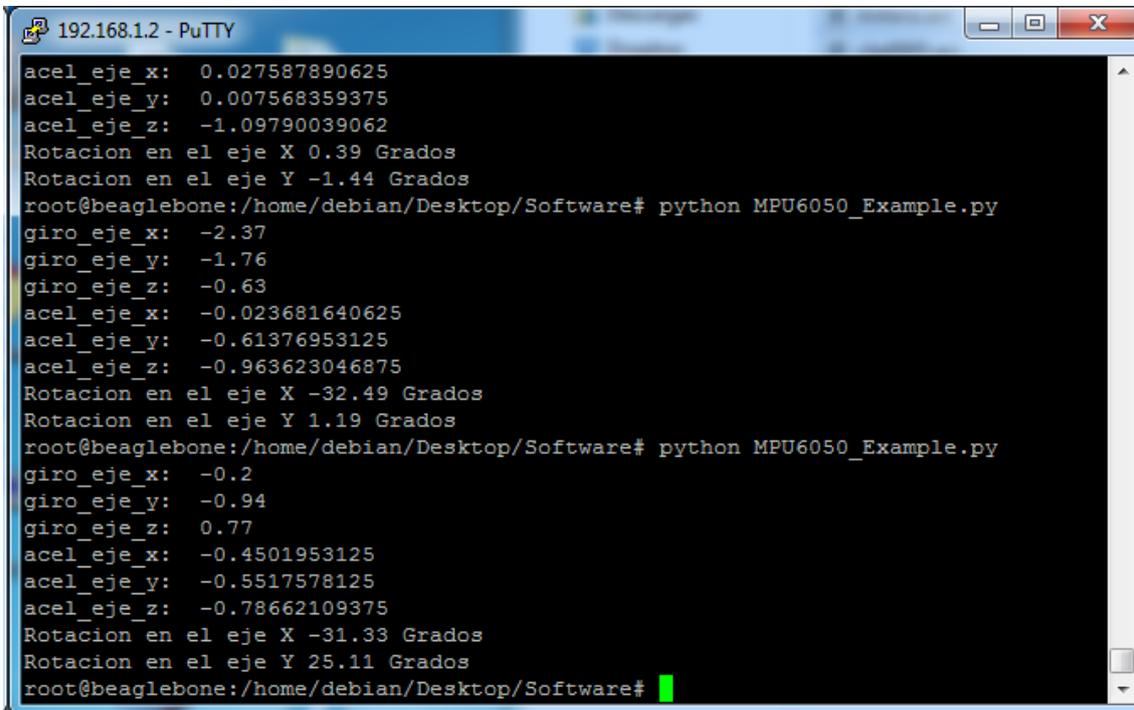
La Figura 5.7 representa los dos puertos de expansión disponibles en la BeagleBone junto con su modo de funcionamiento. Una de las ventajas que ofrece este sistema empotrado es la multiplexación de sus pines. Esto permite que, alternativamente a su modo principal, la mayoría de pines tengan varias funcionalidades. Estos modos pueden consultarse en el manual de la BeagleBone [19]. Por ello, es necesario configurar el sistema para que cada pin trabaje en el modo deseado. En la BeagleBone Black, esta operación se realiza generando un nuevo *device tree* o árbol de dispositivos, que describe el software del sistema. Cuando se genera un *device tree*, se crea una nueva “capa” donde se determina el modo de funcionamiento de cada pin. En este proyecto, los pines del bus de datos I2C ya funcionaban en su modo principal. Para los pines de control de los sensores de distancia e infrarrojo, se ha generado un nuevo *device tree*. Tras compilarlo en el formato adecuado se instala en el directorio correspondiente.

**Pin Names for Beaglebone Black**  
(see Reference Manual for usage)

P8		P9	
DGND	1	DGND	1
VDD_3V3	3	VDD_3V3	3
VDD_5V	5	VDD_5V	5
SYS_5V	7	SYS_5V	7
PWR_BTN	9	SYS_RESETN	9
GPIO_30	11	GPIO_60	11
GPIO_31	13	GPIO_40	13
GPIO_48	15	GPIO_51	15
GPIO_4	17	GPIO_5	17
I2C2_SCL	19	I2C2_SDA	19
GPIO_3	21	GPIO_2	21
GPIO_49	23	GPIO_15	23
GPIO_117	25	GPIO_14	25
GPIO_125	27	SPI1_CS0	27
SPI1_DO	29	GPIO_122	29
SPI1_SCLK	31	VDD_ADC	31
AIN4	33	GNDA_ADC	33
AIN6	35	AIN5	35
AIN2	37	AIN3	37
AIN0	39	AIN1	39
GPIO_20	41	GPIO_7	41
DGND	43	DGND	43
DGND	45	DGND	45
		MMC1_DAT6	3
		MMC1_DAT2	5
		GPIO_66	7
		GPIO_69	9
		GPIO_45	11
		GPIO_23	13
		GPIO_47	15
		GPIO_27	17
		GPIO_22	19
		MMC1_CLK	21
		MMC1_DATA4	23
		MMC1_DATA0	25
		LCD_VSYNC	27
		LCD_HSYNC	29
		LCD_DATA14	31
		LCD_DATA13	33
		LCD_DATA12	35
		LCD_DATA8	37
		LCD_DATA6	39
		LCD_DATA4	41
		LCD_DATA2	43
		LCD_DATA0	45
		MMC1_DAT7	4
		MMC1_DAT3	6
		GPIO_67	8
		GPIO_68	10
		GPIO_44	12
		GPIO_26	14
		GPIO_46	16
		GPIO_65	18
		MMC1_CMD	20
		MMC1_DAT5	22
		MMC1_DAT1	24
		GPIO_61	26
		LCD_PCLK	28
		LCD_AC_BIAS_E	30
		LCD_DATA15	32
		LCD_DATA11	34
		LCD_DATA10	36
		LCD_DATA9	38
		LCD_DATA7	40
		LCD_DATA5	42
		LCD_DATA3	44
		LCD_DATA1	46

Figura 5.7. Puertos de expansión de la BeagleBone.

Una vez instalados todos los módulos y librerías necesarios, se coloca el software implementado en el apartado 5.2 en el directorio elegido. Mediante el terminal del cliente SSH se accede hasta la ruta de ese directorio para ejecutar los programas que se deseen. En la Figura 5.8 se muestra a modo de ejemplo la ejecución del acelerómetro.



```
192.168.1.2 - PuTTY
acel_eje_x: 0.027587890625
acel_eje_y: 0.007568359375
acel_eje_z: -1.09790039062
Rotacion en el eje X 0.39 Grados
Rotacion en el eje Y -1.44 Grados
root@beaglebone:/home/debian/Desktop/Software# python MPU6050_Example.py
giro_eje_x: -2.37
giro_eje_y: -1.76
giro_eje_z: -0.63
acel_eje_x: -0.023681640625
acel_eje_y: -0.61376953125
acel_eje_z: -0.963623046875
Rotacion en el eje X -32.49 Grados
Rotacion en el eje Y 1.19 Grados
root@beaglebone:/home/debian/Desktop/Software# python MPU6050_Example.py
giro_eje_x: -0.2
giro_eje_y: -0.94
giro_eje_z: 0.77
acel_eje_x: -0.4501953125
acel_eje_y: -0.5517578125
acel_eje_z: -0.78662109375
Rotacion en el eje X -31.33 Grados
Rotacion en el eje Y 25.11 Grados
root@beaglebone:/home/debian/Desktop/Software#
```

Figura 5.8. Ventana de comandos del cliente SSH.



## 6. Pruebas y resultados

---

Para verificar el funcionamiento del robot y sus componentes, se han realizado una serie de pruebas a lo largo de toda su fase de desarrollo. En estas pruebas, se han evaluado tanto aspectos mecánicos y de consumo eléctrico como de control software. A continuación se detallan las mismas, ordenadas cronológicamente.

El funcionamiento individual de los servomotores de las patas se ha realizado conectando uno de ellos directamente a un canal PWM de la BeagleBone. Se ha implementado un programa sencillo que mueve alternativamente el servomotor de un lado hacia otro. Con ayuda del osciloscopio, se ha comprobado que el pulso PWM se genera con el ancho y la frecuencia deseada. Se ha ido añadiendo peso progresivamente, hasta 75 gr, sobre el aspa de plástico situada en el eje rotatorio del servomotor. Gracias a esta prueba se ha determinado la amplitud máxima (unos 190 grados) y el consumo en situaciones de máximo esfuerzo (cerca de 0,6 A).

Con el desarrollo del prototipo inicial, se procedió a mover los cuatro actuadores que componen cada pata de manera simultánea. Esto permitió comprobar tanto la validez del diseño mecánico realizado como el consumo completo de una pata. Mecánicamente, no se encontraron problemas de choques y rozamientos entre las piezas. En cuanto al consumo, se verificó que, sin aplicar fuerzas externas, este rondaba los 400 mA. Al añadir peso en el extremo de la pata (unos 100 gr) este consumo llegaba a alcanzar los 2.2 A en situaciones de máximo esfuerzo. Por ello, se ha determinado que para alimentar todos los servomotores sería necesaria una fuente que entregue al menos 10 A.

Antes de construir la placa de control, se probaron los sensores individualmente con ayuda de una placa protoboard. En esta fase se ha verificado tanto el funcionamiento como el consumo individual de cada sensor, de cara a elegir el regulador de tensión adecuado.

Una vez construida la placa de control, en primer lugar se verificó que no existiesen cortocircuitos en la misma. Tras unir esta placa con la BeagleBone, se ha comprobado que todos los pines están configurados correctamente según su funcionalidad. A diferencia del procedimiento seguido en el prototipo, el control los actuadores es llevado a cabo por los chips controladores de PWM. Estos chips funcionan a través del canal I2C. Por ello, en primer lugar se comprobó con el osciloscopio que la señal I2C se genera correctamente en la dirección indicada. En esta fase del proyecto ya se disponía de una fuente de 10 A, por lo que el movimiento de una pata, incluso en situaciones de máximo esfuerzo, se realizó sin problemas.

Con las pruebas realizadas hasta el momento, se ha procedido a realizar la construcción completa del robot, integrando los sensores en el sistema de control. En este punto, se ha comprobado el funcionamiento de cada sensor. Para ello, se han empleado los drivers implementados en la librería software. La prueba del sensor de temperatura implica el movimiento de la antena hacia nueve posiciones diferentes, por lo que de esta manera también se verifica su funcionamiento.

La velocidad de movimiento de los actuadores es configurable a través del software implementado. A modo de prueba se ha realizado el movimiento de una misma pata a tres velocidades diferentes. Se ha comprobado cómo la posición final que se alcanza es la misma en todas las situaciones.

El control simultáneo de todas las patas se ha realizado activando alternativamente varias de ellas. En esta prueba el robot se encuentra apoyado en un soporte, gracias al cual las patas no llegan a tener contacto con el suelo. De esta manera, se evitan posibles problemas de consumo en esta medida. De cada combinación, se han realizado 10 medidas para evaluar el porcentaje de éxito del control. En la Tabla 6.1 se representa la combinación de patas seguida junto con el consumo total de los actuadores implicados.

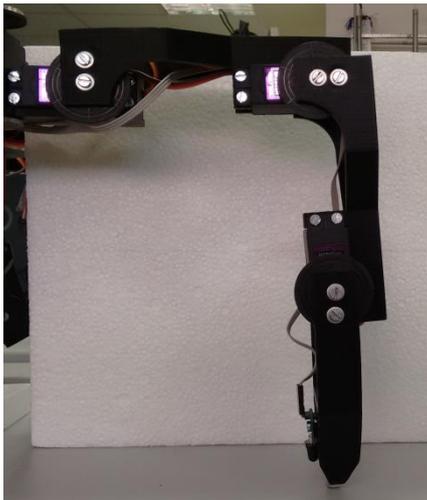
Patras activas	Posición correcta	Consumo
1	10/10	400 mA
1-2-3	10/10	792 mA
3-6	10/10	675 mA
4	10/10	687 mA
4-5-6	9/10	826 mA
5-6	10/10	642 mA
1-3-4-6	10/10	1,144 A
Todas	9/10	1,715 A

Tabla 6.1 Prueba de patas sin apoyo.

A raíz de estos datos, se observa cómo existe un alto porcentaje de éxito en el movimiento de las patas. En general el consumo es bajo, pero este no es constante en situaciones donde se emplean el mismo número de actuadores. Por ejemplo, entre la activación de la pata 1 y la activación de la pata 4 hay una diferencia de consumo de 287 mA. Durante estas pruebas, se ha observado como algunos de los servomotores sufren sobrecalentamiento, particularmente

los situados en la articulación cadera-tibia. Este hecho es indicativo de cierto desgaste de los servomotores, lo que conlleva un aumento de consumo y pérdida de precisión.

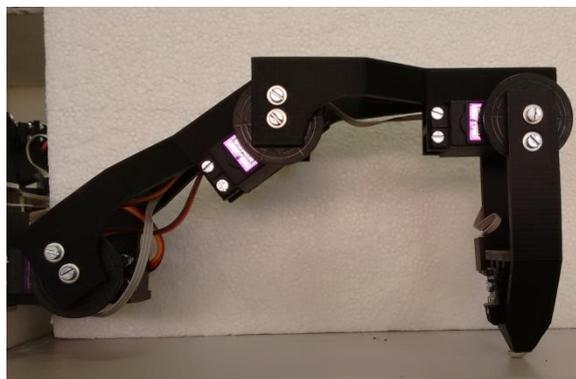
Situando el robot sobre el suelo en una posición fija, se ha observado el consumo total de los servomotores en distintas situaciones. Se han realizado pruebas para las tres posiciones básicas en dos configuraciones: Todas las patas activas o sólo las patas delanteras y traseras activas. La Figura 6.1. muestra la colocación de las patas en cada posición. La Tabla 6.2 muestra los resultados obtenidos.



(a) Posición alta.



(b) Posición media.



(c) Posición baja.

Figura 6.1. Posiciones de las patas en las pruebas realizadas.

		4 patas		6 patas	
		Posición correcta	Consumo medio	Posición correcta	Consumo medio
Posición	Alta	8/10	6,8 A	6/10	9,8 A
	Media	9/10	5,2 A	7/10	7,8 A
	Baja	9/10	6,7 A	5/10	9,6 A

Tabla 6.2. Prueba de patas con apoyo.

Se observa cómo en las posiciones alta y baja, en la configuración de seis patas activas, el consumo es muy cercano a la corriente máxima que entrega la fuente. En ocasiones se producen picos de corriente que hacen que el consumo sobrepase los 10 A. Este hecho hace que no sea posible alimentar a todos los servomotores correctamente, por lo que algunos dejan de funcionar. La posición media es la que menos corriente consume, de ahí que sea la que mejores resultados presenta. La tasa de éxito en el posicionamiento baja considerablemente cuando se encuentran activas todas las patas.

Debido a estos resultados, se decidió realizar una serie de cambios. Se ha observado que algunas patas sufren una ligera desviación de su posición. Por ello, en primer lugar se calibró cada pata individualmente para aportar mayor precisión. Para paliar los problemas derivados de los picos de corriente, la activación de los actuadores no se realizará de manera simultánea, sino que se introducirá un breve desfase entre los distintos PWM de cada servomotor. En estas condiciones, los resultados obtenidos se reflejan en la Tabla 6.3.

		4 patas		6 patas	
		Posición correcta	Consumo medio	Posición correcta	Consumo medio
Posición	Alta	10/10	6,5 A	9/10	9,3 A
	Media	10/10	4,9 A	10/10	7,5 A
	Baja	10/10	6,3 A	7/10	9,0 A

Tabla 6.3. Prueba de patas con apoyo tras mejora

Los datos reflejados indican que se produce una mejoría notable en el funcionamiento del sistema. Los consumos son ligeramente más bajos, y al existir menos picos de corriente el sistema se comporta de manera más estable. A pesar de todo ello, en estas pruebas se sigue produciendo un calentamiento excesivo de algunos servomotores, llegando a romperse alguno de ellos.

La última prueba llevada a cabo ha sido la relacionada con el movimiento del robot. Para ello, se han tomado como referencia diversos estudios previos acerca de la cinemática de los robots artrópodos [21] [22]. Partiendo de la posición media, se he llevado a cabo su movimiento tanto con cuatro patas activas como con seis. En ambos casos, al intentar realizar el movimiento se ha producido un fallo general de los servomotores en todos los intentos realizados. Existen varios factores que imposibilitan este movimiento. Al consumo asociado a la posición media, se le añade el movimiento que realizan las caderas de las patas implicadas. Al reducirse los puntos de apoyo, los servomotores implicados en el apoyo del robot en el suelo deben realizar un esfuerzo extra. Paralelamente, fruto de las numerosas pruebas realizadas, los servomotores han dejado de ofrecer sus mejores prestaciones. Todos estos factores se traducen en un aumento de la corriente necesaria y un mal funcionamiento de los servomotores, lo que imposibilita el movimiento del robot con los medios disponibles. En el capítulo 7 se desarrollan una serie de propuestas para paliar esta problemática.

## 7. Conclusiones y trabajo futuro

---

Este proyecto lleva a cabo el diseño de un robot artrópodo, adaptando a los medios disponibles y a la complejidad deseada los modelos mostrados en el capítulo 3. En el desarrollo de las diferentes etapas de este proyecto se tratan y amplían diversas áreas estudiadas a lo largo de la carrera, haciendo de este trabajo un reto multidisciplinar, completo y enriquecedor.

Tras analizar algunos aspectos biológicos y los modelos existentes de robots artrópodos, se han establecido una serie de condiciones para el desarrollo del diseño. Tras elegir los actuadores y sensores que se han utilizado, el diseño mecánico del sistema emplea soluciones de bajo coste que permiten realizar los movimientos necesarios. Tras haber comprobado su viabilidad, el diseño de las piezas se ha realizado con varios programas de diseño 3D.

Para poder realizar el control del sistema, se ha implementado una librería software con las funcionalidades básicas necesarias. Paralelamente, se ha diseñado y fabricado una placa de control complementaria al sistema empotrado empleado.

Con todo el conjunto fabricado, se ha procedido a ensamblar la totalidad del robot e incorporar los diferentes sensores en todo el cuerpo. En este punto, se ha procedido a realizar todas las pruebas necesarias para validar la funcionalidad del proyecto.

### 7.1. Trabajo futuro

La principal vía de trabajo futuro que se plantea pasa por solucionar el problema de la imposibilidad de realizar movimientos con el robot. Tras las pruebas realizadas, se ha elaborado un estudio en profundidad para buscar el motivo de estos problemas y las posibles soluciones a aplicar:

- **Servomotores:** Las especificaciones de los servomotores empleados son erróneas. A pesar de indicar que su consumo máximo es de 1 A, en situaciones de carga elevada estos consumos se pueden disparar hasta las 3 A por servomotor. Debido a ello, tienden a presentar inestabilidades de corriente, picos esporádicos y a sobrecalentarse. Al no refrigerarse, debido al calor las soldaduras de estaño se deshacen provocando cortocircuitos y la rotura de los mismos. Este sobrecalentamiento viene dado también por el tamaño de las patas. El torque de estos servos es de 9,4 Kg/cm. Esto significa que el servo tiene capacidad de levantar ese peso a una distancia de 1 cm de su eje. Según se aleja de ese punto, la fuerza del mismo desciende proporcionalmente respecto a la distancia. Teniendo en cuenta que entre el servomotor integrado en la cadera y el extremo de la pata hay unos 30 cm, los servomotores encargados de realizar el movimiento de la tibia sufren bastante sobreesfuerzo. Otro problema asociado a los actuadores es que con el uso tienden a tomar holgura, haciendo complicado precisar una posición determinada. Para un trabajo de estas características, donde están implicados un gran número de actuadores, se necesitarían servomotores de mayor calidad y algo más de torque. El precio de estos dispositivos puede rondar los 100 €. Debido a que su compra dispararía el presupuesto del proyecto, se ha descartado esa opción. Otra posible solución pasa por acortar la longitud de las secciones de las patas, de manera que el torque necesario para realizar el movimiento sea menor.
- **Alimentación:** Paralelamente al problema de los servomotores empleados, la fuente de alimentación disponible es claramente insuficiente para hacer frente a las inestabilidades y al consumo de todos los servomotores. En ejemplos estudiados del mundo del aeromodelismo, para controlar unos 12 servomotores se integran baterías de 16 A para obtener una buena precisión. Las baterías LIPO son capaces de soportar picos de corriente superiores a su carga propia. Como posible solución, existe la posibilidad de emplear una de estas baterías LIPO de unos 40 A junto con un regulador de tensión, que proporcionaría a la entrada del circuito 6 V y una corriente de entre 16 A y 20 A. Estas baterías necesitan un cargador específico, que también habría que adquirir.
- **Control:** Una vez solucionados los problemas del movimiento, se plantea el desarrollo de una librería software más extensa, que aproveche todos los recursos ofrecidos por los sensores para el control del robot. Para facilitar esta tarea, cabe la opción de realizar una interfaz gráfica que simplifique el manejo del robot. Por último, se puede dotar al robot de una autonomía total incluyendo un “*demonio*” en la BeagleBone, que arranque automáticamente el software de control.

## **Bibliografía**

- [1] P. Gonzalez, J. A. Cobano, E. Garcia. "A six legged robot-based system for humanitarian demining missions". *Mechatronics*, vol.17, pp. 417-430, 2007
- [2] "MIT Leg Lab Robots [Online] <http://www.ai.mit.edu/projects/leglab/robots/robots-main.html>
- [3] Poulakakis, I. Grizzle, J.W. "Modeling and control of the monopodal robot Thumper". *Conference on Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on 12-17 May 2009*
- [4] Jesse A. Grimes, Jonathan W. Hurst "The design of ATRIAS 1.0. A unique monopod, hopping robot".. *Fifteenth International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Baltimore, MD, USA, 23 – 26 July 2012*
- [5] Mohd Faizul Shazrin, Shukor (2007) "The Hopping Robot With One Leg". pp 15. Project Report. UTeM, Melaka, Malaysia
- [6] «History of the Humanoids: E1-E2-E3 (1987 - 1991)». Honda Motor Co., Ltd.
- [7] «History of the Humanoids: E4-E5-E6 (1991 - 1993)». Honda Motor Co., Ltd.
- [8] CHEETAH - Fastest Legged Robot [Online] [http://www.bostondynamics.com/robot\\_cheetah.html](http://www.bostondynamics.com/robot_cheetah.html)
- [9] BigDog-The Most Advanced Rough-Terrain Robot on Earth [Online] [http://www.bostondynamics.com/robot\\_bigdog.html](http://www.bostondynamics.com/robot_bigdog.html)
- [10] LS3 - Legged Squad Support Systems [Online] [http://www.bostondynamics.com/robot\\_ls3.html](http://www.bostondynamics.com/robot_ls3.html)
- [11] Brian Satzinger, Chelsea Lau, Marten Byl and Katie Byl. "Experimental Results for Dexterous Quadruped Locomotion Planning with RoboSimian". ISER 2014
- [12] Walking Robot Katharina. [Online]. Available: [http://www1.iff.fhg.de/iff/aut/english/start\\_katharina\\_e.html](http://www1.iff.fhg.de/iff/aut/english/start_katharina_e.html)
- [13] Saranli, U.; Buehler, M.; Koditschek, D.E. (2001). "RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot". *The International Journal of Robotics Research* 20 (7): pp 616.
- [14] SLAIR 2 - Six Legged Autonomous Intelligent Robot [Online] [www.unimagdeburg.de/ieat/robotslab/slair2.php](http://www.unimagdeburg.de/ieat/robotslab/slair2.php)

- [15] Roennau, A. ; Heppner, G. ; Nowicki, M. ; Dillmann, R. "LAURONV: A versatile six-legged walking robot with advanced maneuverability" Advanced Intelligent Mechatronic (AIM), 2014. IEEE/ASME International Conference.
- [16] HC-SR04 datasheet [Online] <http://www.micropik.com/PDF/HCSR04.pdf>
- [17] BMP085 datasheet <http://ae-bst.resource.bosch.com/media/products/dokumente/bmp180/BST-BMP180-DS000-12~1.pdf>
- [18] MPU6050 datasheet [Online]] [http://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU-6050\\_DataSheet\\_V3%204.pdf](http://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU-6050_DataSheet_V3%204.pdf)
- [19] ManualBeagleBone [http://beagleboard.org/static/beaglebone/latest/Docs/Hardware/BONE\\_SRM.pdf](http://beagleboard.org/static/beaglebone/latest/Docs/Hardware/BONE_SRM.pdf)
- [20] PCA9685 datasheet [http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/PCA9685.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/PCA9685.pdf)
- [21] Manoiu-Olaru, S.; Nitulescu, M. "Hexapod robot. Virtual models for preliminary studies". 15th International Conference on System Theory, Control, and Computing (ICSTCC). 14-16 Oct. 2011.
- [22] Gao Jianhua. "Design and Kinematic Simulation for Six-DOF Leg Mechanism of Hexapod Robot". IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), pp.625-629.17-20 Dic 2006.

## ***Anexos***



## A. Construcción del robot artrópodo

---

En este anexo se describe de forma más detallada el proceso de construcción del robot artrópodo. Se presentan varias fases diferenciadas, como son: la elección de los materiales y fabricación de las piezas; la preparación e integración de los elementos actuadores en las patas y antena; ensamblaje de las patas y tarjeta controladora en el cuerpo del robot; y colocación de sensores.

### Elección de los materiales

Tras haber realizado un diseño previo del robot artrópodo, se ha procedido a evaluar los distintos condicionantes para la elección de los materiales. En primer lugar, se pretende que el peso de la estructura sea el menor posible. De esta forma los servomotores se verán menos forzados, lo que implicará un menor deterioro de los mismos y una mejor entrega de sus prestaciones. Este factor debe ir acompañado de una cierta robustez, evitando en la medida de lo posible puntos de ensamblado que puedan provocar la rotura de alguna pieza. En segundo lugar, con la pieza una vez fabricada es más sencillo realizar distintas pruebas y medidas que con su diseño 3D. Por ello, y sumado al gran volumen de piezas a fabricar, se busca un método de fabricación fácil y accesible. Por último, se debe buscar un compromiso entre el coste de los materiales y los dos factores expuestos anteriormente.

Teniendo en cuenta todos estos factores, una las soluciones planteadas en este proyecto es el uso de la tecnología de impresión 3D para la fabricación de la mayor parte de las piezas del robot. Gracias a la presencia de la impresora Ultimaker2 en el laboratorio del grupo, el proceso de diseño de las piezas ha ido acompañado de prototipos reales sobre los que realizar una serie de modificaciones para llegar al resultado final. El proceso de fabricación es altamente automatizado, por lo que el factor humano se limita a la preparación de la superficie donde se va a imprimir y a retirar la pieza una vez concluida.

Esta impresora es capaz de imprimir empleando dos materiales: PLA y ABS. Se ha escogido este último debido a las características físicas, en particular a su mayor flexibilidad, lo que facilita el montaje de la estructura completa. La robustez de las piezas también vendrá dada por las características de fabricación. En cuanto al coste del material, para todos los diseños previos y piezas finales (patas, antena y soporte del sensor de distancia) se han empleado aproximadamente 125 m de material. El coste aproximado de un rollo de 100 m de ABS compatible con esta impresora es de 25 €, por lo que el coste total de este apartado no sobrepasa los 30 €.

En un primer momento también se pretendió realizar el cuerpo del robot con material ABS. Sin embargo, se presentaron una serie de inconvenientes, por los que finalmente se descartó. El primero fue que debido a las características de la impresora no se podría realizar la impresión de piezas de gran tamaño. El segundo punto crítico tiene que ver con la robustez, ya que el cuerpo soporta la mayor parte del peso. Este debe tener cierta rigidez y ser poco flexible para evitar combarse con el movimiento. Por ello, en lugar del ABS se han empleado placas de aluminio de 2,5 mm de espesor. De esta manera, y gracias al diseño de estas dos piezas expuesto en el apartado 4.5.4, se dota al robot de la base sólida buscada con el mínimo peso posible.

### **Fabricación de las piezas**

Una vez diseñados los modelos 3D, se procede a adaptarlos a un formato compatible con la impresora. Para ello se emplea el software Cura en su versión 14.09. Este software permite variar la calidad de la impresión mediante la configuración de una serie de parámetros. Para este proyecto, los principales parámetros que determinan esta calidad son el mallado de relleno de las piezas, la velocidad de impresión y el grosor de cada capa de material, remarcados en la Figura A.1.

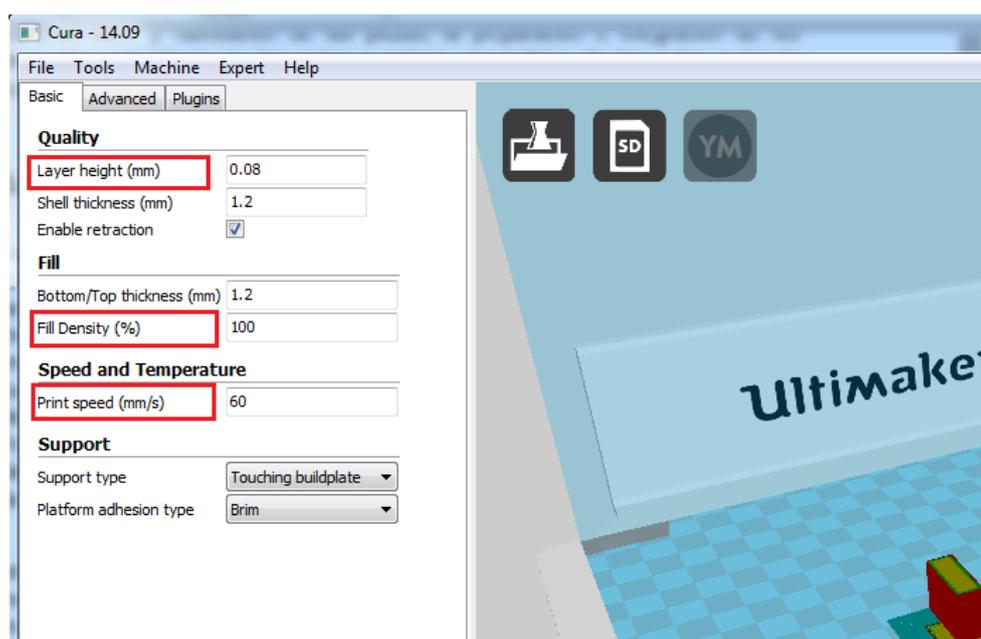


Figura A.1. Parámetros de configuración de la impresión.

Con el objetivo de conseguir la combinación idónea, se han realizado una serie de cubos de prueba. En la Figura A.2 se observan estos cubos junto con la información de su grosor y mallado interno. En estas pruebas se han evaluado tanto el peso de la pieza, su resistencia y las imperfecciones del material, para evitar posibles roturas en situaciones de esfuerzo mecánico alto.

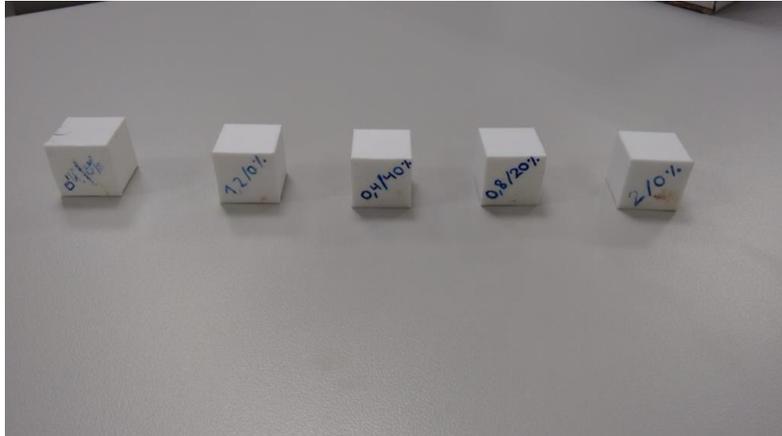


Figura A.2. Cubos de prueba parámetros de impresión.

Para realizar la impresión, es necesario informar a la impresora del material que se va a utilizar, ya que tanto la temperatura de la base como del cabezal varían entre materiales para ofrecer un resultado óptimo. Una baja temperatura de la base puede provocar que las capas de material no cohesionen correctamente, mientras que una baja temperatura del cabezal puede provocar que el material no se funda, quedando imperfecciones visibles en la pieza.

Tras aplicar a la base una capa de material adherente, se procede a imprimir todas las piezas. Las piezas se han impreso una por una para evitar que un posible fallo de la impresora afecte a varias de ellas. Se han diseñado de tal forma que no sea necesario realizar grandes modificaciones, simplemente retirar algunas partes de plástico sobrantes y lijar los bordes. En la Figura A.3 se observa el resultado final de la impresión de una de ellas.



Figura A.3. Pieza de fémur/tibia impresa.

La fabricación del cuerpo del robot se ha realizado mediante una máquina de corte por control numérico. Tras exportar el diseño en el formato adecuado, esta máquina realiza tanto los cortes como los taladros para los tornillos de sujeción en las placas de acero. En la Figura A.4 se observa el resultado final de esta pieza, tras realizarle un pulido que suaviza los bordes y abrillanta la superficie.

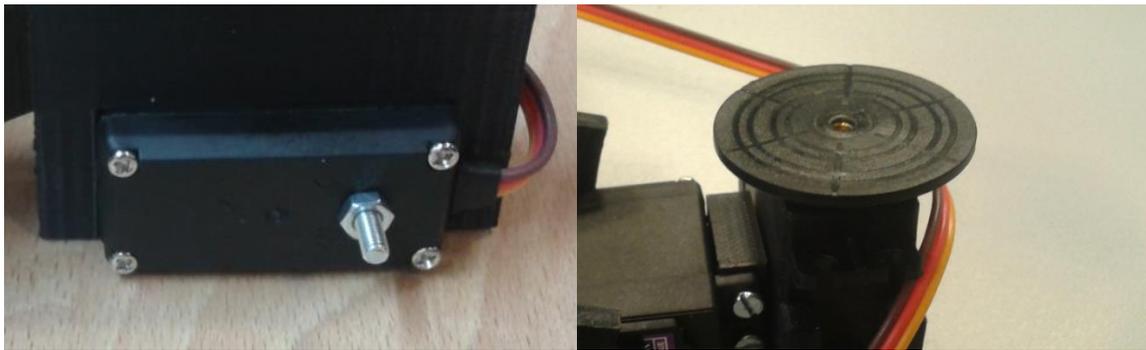


Figura A.4. Pieza fabricada para el cuerpo.

### **Preparación de los servomotores**

La principal misión de los servomotores es la de actuar como articulación entre las distintas secciones de las patas y la antena. Los servomotores TowerPro empleados disponen de un eje rotatorio en uno de sus extremos, donde van ancladas las piezas. Para completar el eje transversal total y dotar a la articulación de más apoyo, en todos los servomotores se ha creado un segundo eje pasivo en el extremo opuesto al eje de rotación.

En la Figura A.5 se representa este segundo eje, consistente en un tornillo que atraviesa un taladro realizado en el encapsulado del servomotor. Para evitar posibles cortocircuitos entre el tornillo y el servomotor se ha cubierto la zona interna con pegamento termofusible. Los servomotores encargados del movimiento de la antena también disponen de esta modificación. Finalmente, se añade en el eje rotatorio un soporte plástico circular (aspa de un solo brazo en el caso de los servomotores de la antena) sobre el que se apoyará la pieza de la sección correspondiente.



(a) Eje rotatorio pasivo.

(b) soporte circular eje activo.

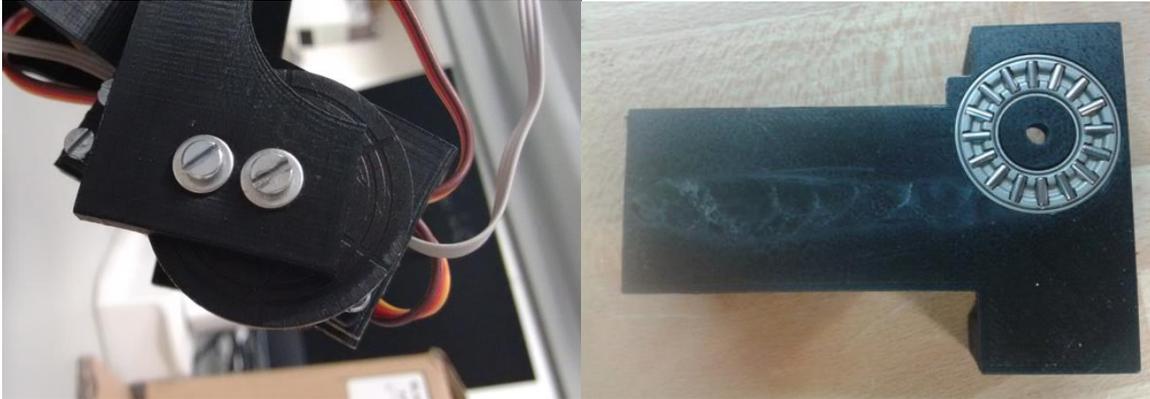
Figura A.5. Modificaciones realizadas en el servomotor.

### **Ensamblaje de las patas**

Con todas las piezas y servomotores listos, se ha procedido al montaje de una de las patas. En primer lugar se han integrado los servomotores en las piezas, de la manera descrita en el apartado 4.4: En la cadera se han integrado dos servomotores, que actuarán como eje del movimiento de abducción/aducción de toda la pata (servomotor vertical) y como eje del movimiento de flexión/extensión del fémur (servomotor horizontal). En el fémur y la tibia se integran los servomotores que generarán el movimiento de flexión/extensión de la tibia y el tarso, respectivamente. Los ejes de rotación se colocan cerca de los extremos de la pieza, de tal manera que la superposición entre distintas falanges sea mínima.

Para unir todas las piezas que forman la pata es necesario calibrar los servomotores, para que la posición relativa de cada pieza coincida con la posición en grados del servomotor. Esta operación se simplifica calibrando todos los motores a  $90^{\circ}$ , ya que con ayuda de un nivel y trabajando en una superficie completamente horizontal se obtiene una gran precisión. La Figura A.6 muestra el segundo punto de unión con el soporte circular del servomotor para aportar mayor estabilidad.

El eje de rotación pasivo se une a la pieza por su parte exterior mediante una tuerca. Finalmente, se pasan todos los cables de los servomotores por los huecos existentes en las piezas y se añade una pieza de goma antideslizante en el punto de contacto de la pata con el suelo. En la base de la cadera se ha introducido un rodamiento circular concéntrico al eje de rotación, representado en la Figura A.6. Este rodamiento evitará el rozamiento entre la base del cuerpo y la cadera.



(a) Segundo punto de unión pieza-servomotor. (b) Rodamiento circular en la cadera.

Figura A.6. Detalles ensamblaje de las patas.

Por último se agrupan todos los cables de cada pata, ya que durante el movimiento pueden sufrir desgaste al rozar con las piezas o los servomotores. La Figura A.7 muestra el resultado final del ensamblaje de todas las piezas de la pata. Todo ese proceso se replica en las cinco patas restantes.



Figura A.7. Pata completamente ensamblada.

### **Integración de patas y sistema control**

La Figura A.8 ilustra la integración del sistema de control en la parte trasera del cuerpo del robot. De esta manera, se facilita el acceso al botón de reseteo y a las conexiones de la BeagleBone. Para su fijación se han empleado separadores de nylon de métrica tres, que unen el sistema tanto a la placa superior como a la inferior. La distancia entre placas viene determinada por la altura de la cadera, por lo que ha sido necesario modificar alguno de estos separadores para ajustarse a esta altura y evitar el choque entre el condensador de entrada y la placa superior.

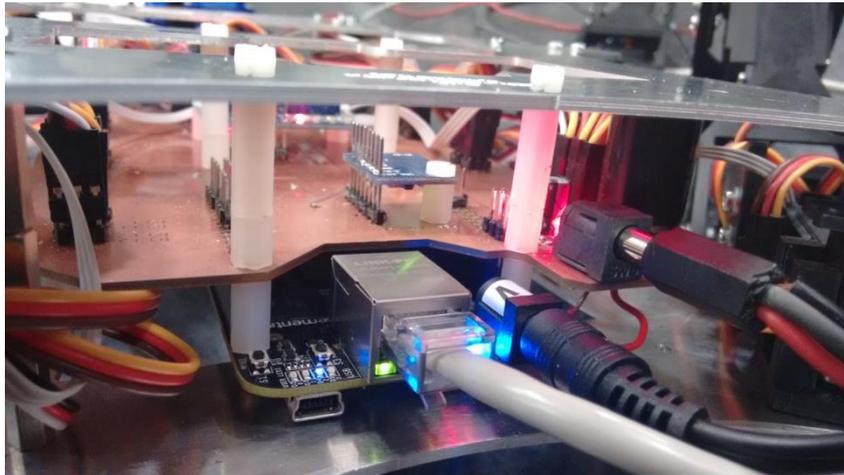


Figura A.8. Conexiones y situación del sistema de control.

A continuación, se han introducido los ejes de rotación pasivos de la cadera en los orificios correspondientes de la placa inferior, quedando unidos por una tuerca en el lado opuesto. La sujeción de todo el conjunto se realiza con los propios servomotores de la coxa y mediante ocho separadores metálicos, situados cerca de las patas y en el centro de la estructura, como muestra la Figura A.9. Las uniones entre el tórax y la tarjeta controladora también colaboran en esta tarea, consiguiendo un diseño compacto y resistente.

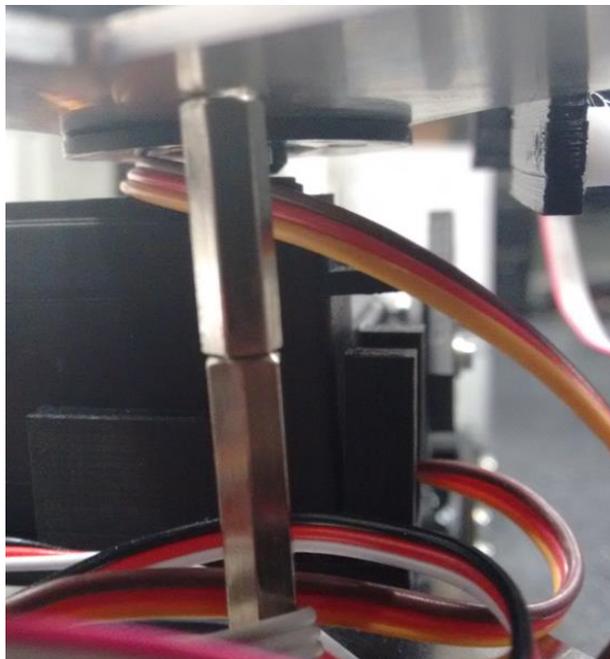
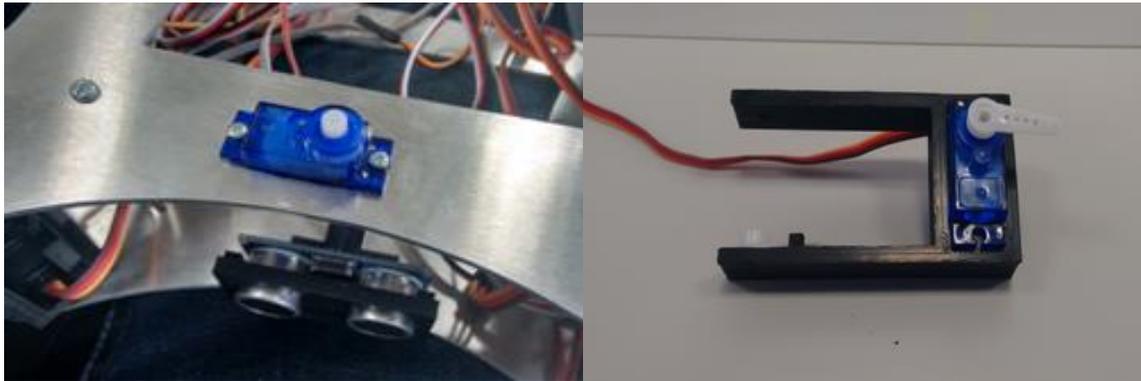


Figura A.9. Separador metálico junto a una de las patas.

### Integración de antena y sensores

Para el caso de la antena, se ha decidido integrar el conjunto directamente en el cuerpo del robot. La Figura A.10 muestra cómo los servomotores se han integrado a presión en el cuerpo y el escapo respectivamente. Como la antena no va a realizar esfuerzos mecánicos grandes, se ha optado por unir las piezas y los servomotores con pegamento de contacto instantáneo. Se ha seguido un proceso similar al realizado con las patas (calibración y unión del segundo eje de rotación pasivo).



(a) Servomotor integrado en el cuerpo.

(b) Servomotor del escapo.

Figura A.10. Servomotores de las antenas.

El sensor de temperatura BMP085 se ha integrado mediante una pequeña placa PCB en el extremo de la antena. Esta placa se observa en la Figura A.11, con la antena completamente ensamblada e integrada.

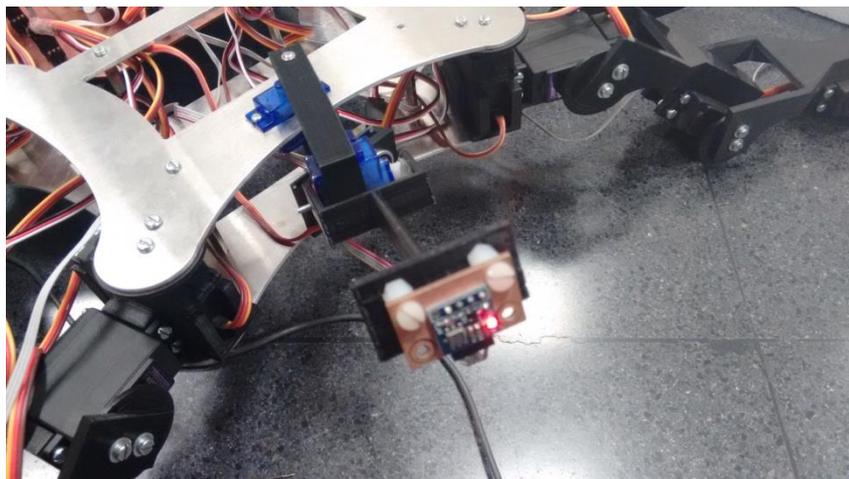


Figura A.11. Antena integrada en el cuerpo.

El sensor de distancia HC-SR04 se ha situado en la placa inferior del robot, justo en su extremo delantero, quedando debajo de la antena. Con la ayuda de la impresora 3D, se ha realizado en material ABS un pequeño soporte (Figura A.12).

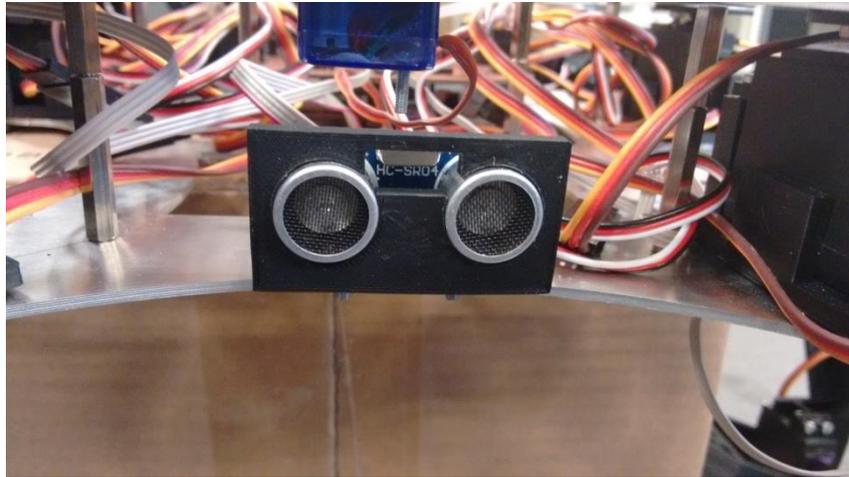


Figura A.12. Soporte y posición del sensor HC-SR04.

El módulo sensor de infrarrojos está compuesto por una unidad central (integrado en la placa de control) y cuatro sensores, colocados en la tercera falange de las patas delanteras y traseras. La Figura A.13 muestra la posición de estos sensores, unidos a la pieza mediante un tornillo de métrica tres.

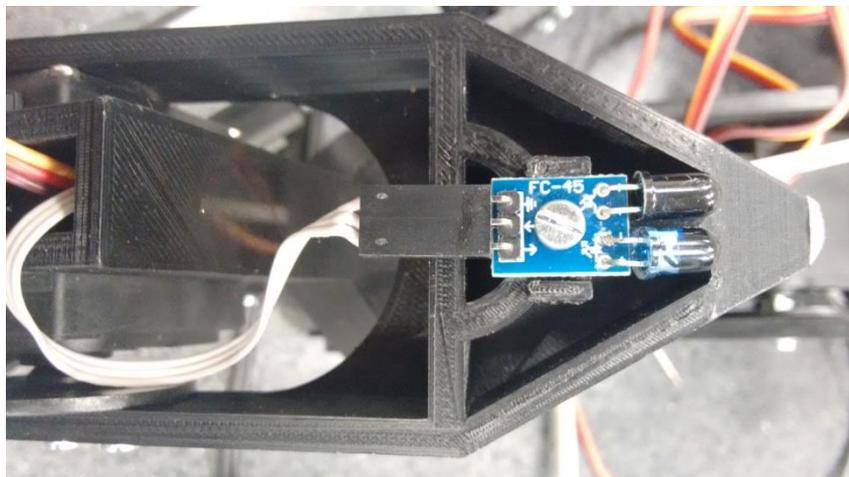


Figura A.13. Sensor infrarrojo en la parte interior del tarso.

En la Figura A.14 se muestra el interior del cuerpo del robot, donde se observan el acelerómetro y el módulo de sensor de infrarrojos, junto con todas las conexiones de los sensores y servomotores en la placa de control. Para todas estas conexiones se han fabricado cables de tres y cuatro vías, de tal manera que su longitud se adapte a la posición de cada sensor dentro del robot.

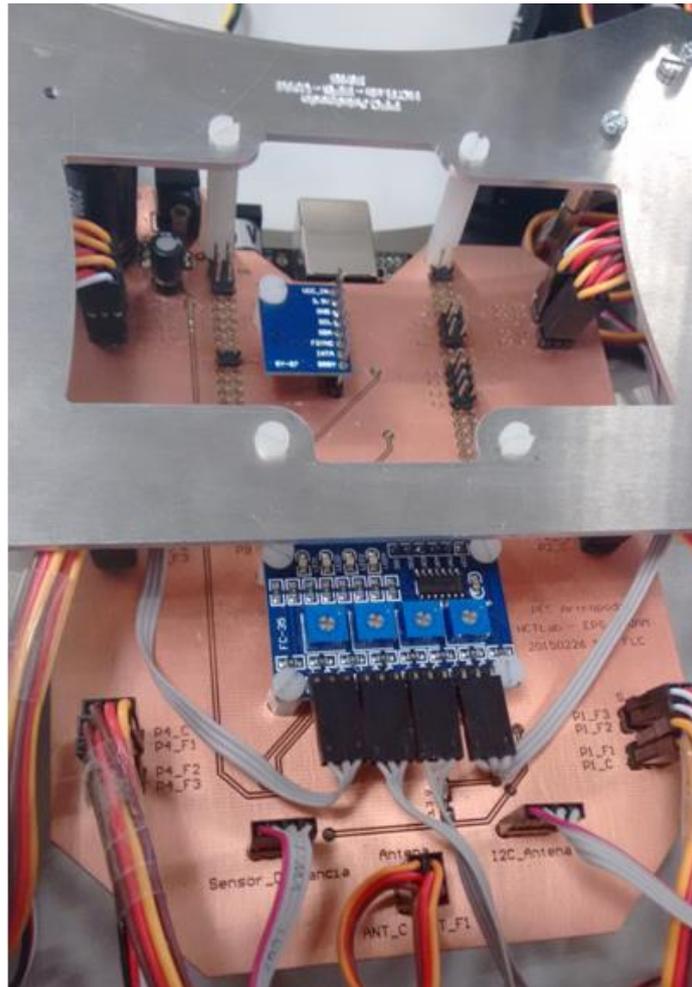


Figura A.14. Conexión de los sensores y actuadores en la placa de control.

## B. Estudio de servomotores

---

### Descripción

Un servomotor es un dispositivo actuador similar a un motor de corriente continua, que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier ángulo dentro de su rango de operación, manteniéndose estable en dicha posición. Está formado por un motor de corriente continua, una caja reductora (formada por engranajes dentados) y un circuito de control. Este tipo de motores son sumamente útiles en el campo de la robótica, debido a la gran potencia que ofrecen en relación a su reducido tamaño.

Habitualmente, su margen de actuación no llega a una vuelta completa. Sin embargo, es posible modificar un servomotor para obtener un motor de corriente continua. Este motor modificado es capaz de conservar la fuerza, velocidad y baja inercia del dispositivo original, a costa de perder la capacidad de control de la posición.

En la Figura B.1 se observan tres cables que salen de la cubierta. El cable rojo se corresponde con el voltaje de alimentación (habitualmente +5V). El cable negro es la referencia o tierra (GND) mientras que el cable restante se utiliza para transmitir la señal de control. La tarjeta controladora transmite al motor la información procedente de la señal de control para que realice el giro necesario. El potenciómetro sirve como referencia de la posición del motor. Una vez determinada la posición, el movimiento del motor se transmite a través de los engranajes hacia el exterior.

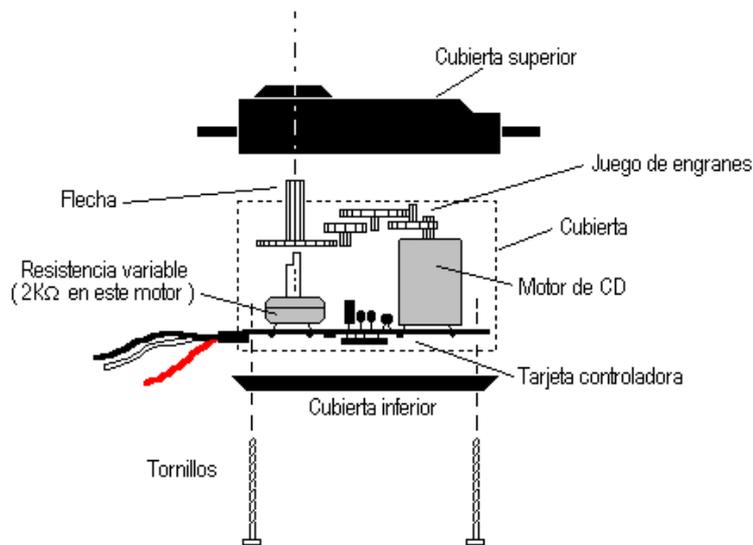


Figura B.1. Estructura de un servomotor.

### Funcionamiento

Inicialmente, un amplificador de error calcula el valor del error de posición (diferencia entre la referencia y la posición en que se encuentra el motor). Un error de posición mayor significa que hay una diferencia mayor entre el valor deseado y el existente, de modo que el motor deberá rotar más ángulo para alcanzarlo; uno menor, significa que la posición del motor está cerca de la deseada por el usuario, así que el motor tendrá que rotar menos. Si el servo se encuentra en la posición deseada, el error será cero, y no habrá movimiento. Este flujo de funcionamiento se representa gráficamente en la Figura B.2.

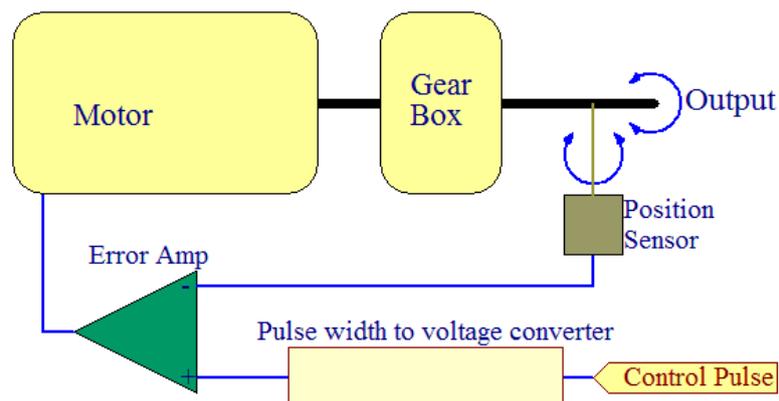


Figura B.2. Esquema de funcionamiento de un servomotor.

Para que el amplificador de error pueda calcular el error de posición, debe restar dos valores de voltaje analógicos. La señal de control PWM (Pulse-Width Modulation) se convierte entonces en un valor analógico, mediante un convertidor de ancho de pulso a voltaje. El valor de la posición del motor se obtiene usando un potenciómetro de realimentación acoplado

mecánicamente a la caja reductora del eje del motor: cuando el motor rote, el potenciómetro también lo hará, variando el voltaje que se introduce al amplificador de error. Una vez que se ha obtenido el error de posición, se aplica a los terminales del motor previa amplificación de ganancia.

## Control

El control de un servomotor se limita a indicar en qué posición se debe situar. La posición viene determinada por la señal de control introducida, consistente en una señal de pulsos cuadrados. En función de la anchura de los pulsos de dicha señal, el motor se desplazará en mayor o menor medida.

Cada servo tiene sus márgenes de operación, que se corresponden con el ancho del pulso máximo y mínimo, como se muestra en la Figura B.3. Generalmente se trabaja con valores entre 1 ms y 2 ms, que dejarían al motor en ambos extremos. El valor 1,5 ms indicaría la posición central, mientras que otros valores del pulso lo dejan en posiciones intermedias. Es importante destacar que para que un servo se mantenga en la misma posición durante un cierto tiempo, es necesario enviarle continuamente el pulso correspondiente. De este modo, si existe alguna fuerza que le obligue a abandonar esta posición, intentará resistirse. Si se deja de enviar pulsos (o el intervalo entre pulsos es mayor del máximo) entonces el servo perderá fuerza y dejará de intentar mantener su posición, de modo que cualquier fuerza externa podría desplazarlo.

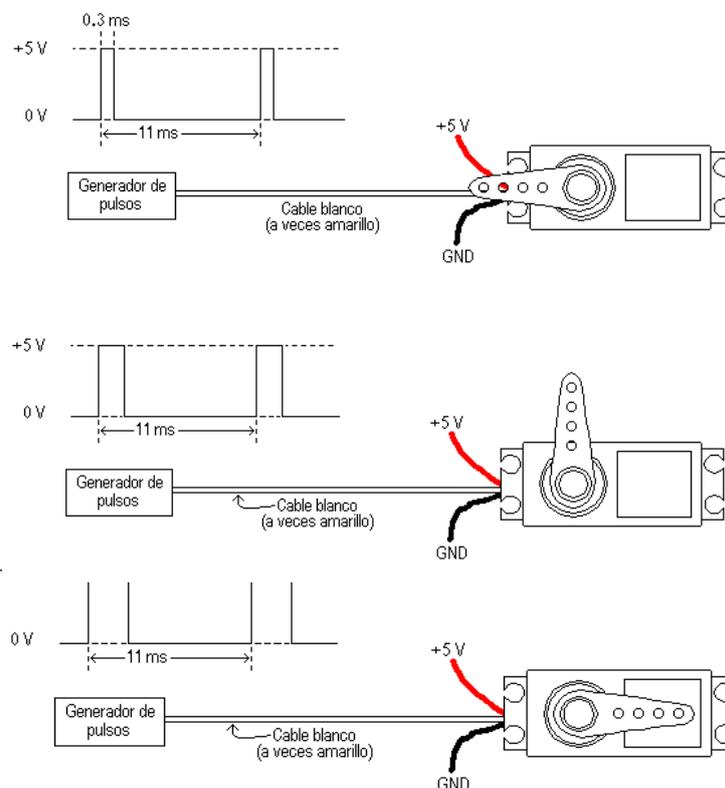


Figura B.3. Posiciones del servomotor en función del ancho de pulso.

### **Analógico vs digital**

La diferencia entre los dos tipos se encuentra en la placa de control. En los servomotores digitales existe un microprocesador que se hace cargo de analizar la señal, procesarla y controlar el motor. La diferencia más grande de rendimiento está en la velocidad a la que reacciona el servo a un cambio en la señal. En un mismo espacio de tiempo, el servomotor digital puede recibir cinco o seis veces más pulsos de control que uno analógico. Como resultado, la respuesta del servomotor a un cambio en la orden de posición es mucho más veloz. Este ritmo mayor de pulsos también produce mejoras en el rendimiento electromecánico del motor (mayor velocidad y más fuerza). La ventaja de los digitales se reduce un poco cuando se habla de consumo (algo a tener en cuenta en este proyecto), ya que el consumo del circuito y de los ajustes más continuados produce un gasto mayor de energía, y también un mayor desgaste del motor.

Los servomotores digitales son capaces de memorizar parámetros de programación. Estos valores son fijados con instrumentos característicos de cada marca. Los parámetros más importantes que se pueden fijar son:

- Se puede programar el sentido de giro como "normal" o "inverso".
- Se puede variar la velocidad de respuesta del servo.
- Se pueden determinar diferentes topes de recorrido para cada lado.
- Es posible programar qué debe hacer el servo en caso de sufrir una pérdida de señal.

### **Estudio de mercado**

Para este proyecto, se ha decidido emplear servomotores digitales. Dentro de las posibilidades existentes en el mercado, a continuación se exponen en la Tabla B.1 y la Tabla B.2 las opciones que presentan unas características más acordes al objetivo del proyecto:

	Dynamixel		Hitec		Futaba	
Modelo	AX-12A	AX-18A	HS-5755MG	HS-5625MG	S3305	S9405
Voltaje (V)	12	12	5-7	5-7	4,8-7,2	4,8-7,2
Consumo max. (A)	1,5	2,2	2	1,4	1,6	1,6
Torque (kg/cm)	16,5	18	20	11	7,1-8,9	5,8-7,2
Velocidad (seg/60º)	0,17	0,1	0,17	0,22	0,23	0,12
Dimensiones (mm)	32x50x40	32x50x40	58x29x51	41x19x38	40x20x38	40x20x38
Peso (g)	54,6	54,5	172	55	60	45
Precio	43 €	45 €	90 €	35 €	37 €	90 €

Tabla B.1. Características y precio de los servomotores candidatos.

	UPTECH		TowerPro			
Modelo	CDS5516	CDS5506	MG-995	MG-996R	MG-945R	SG90
Voltaje (V)	6-7,5	6-7,5	4,8-7,2	4,8-7,2	4,8-7,2	4,8-6
Consumo max. (A)	1,5	1,2	1,5	1,5	1,5	0,18
Torque (kg/cm)	16	6	13-15	9,4-11	10-12	2,5
Velocidad (seg/60°)	0,18	0,16	0,15	0,16	0,21	0,1
Dimensiones (mm)	40X20X40	40X20X40	40x20x37	41x19x43	41x19x43	22,8X24X12
Peso (g)	48	55	48	55	55	9
Precio	63 €	39 €	36 €	6 €	26 €	3,50 €

Tabla B.2. Características y precio de los servomotores candidatos.

Dentro de las opciones estudiadas, se busca aquella que presente la mejor relación torque/consumo. Sin embargo, existe cierta limitación presupuestaria que ha impedido el uso de los modelos de mayor calidad. Por ello, para la articulación de las patas se ha elegido finalmente el modelo **TowerPro MG-996R**. En otros trabajos desarrollados por el HCTLab se empleó el modelo **TowerPro SG90**. Debido a su buen resultado, y a encontrarse disponibles en el laboratorio, se ha decidido que la antena del robot incluya estos actuadores.



## C. Programación del robot

---

Como complemento a lo desarrollado en la sección 5.2, a continuación se detalla el funcionamiento del paquete software implementado para el control del robot. Para cada archivo, se incluyen las cabeceras de cada método con una breve descripción de su funcionamiento.

### Hexapodo I2C.py

```
#=====#
#
#           Driver Bus I2C           #
#       Marcos Aguero Carnerero     #
#           PFC Artropodo           #
#       HCTLab-EPS-UAM              #
#           Junio 2015              #
#
#=====#
import smbus
class Hexapodo_I2C :

#Inicializa I2C en el bus y la direccion indicada
    def __init__(self, address, busnum = 1, debug=False):

#Invierte el orden de registros int (16-bit) o long (32-bit)
    def reverseByteOrder(self, data):

#Escribe value de 8 bits en la direccion/registro especificado
    def write8(self, reg, value):
        self.bus.write_byte_data(self.address, reg, value)
```

```

#Escribe array de bytes usando formato I2C
def writeList(self, reg, list):
    self.bus.write_i2c_block_data(self.address, reg, list)

#Lee lista de bytes desde el dispositivo I2C
def readList(self, reg, length):
    results = []
    results = self.bus.read_i2c_block_data(self.address, reg,
length)

#Lee byte unsigned desde el dispositivo I2C
def readU8(self, reg):
    result = self.bus.read_byte_data(self.address, reg)

#Lee byte signed desde el dispositivo I2C
def readS8(self, reg):
    result = self.bus.read_byte_data(self.address, reg)
#Lee unsigned 16-bit desde el dispositivo I2C
def readU16(self, reg):
    self.bus.read_byte_data(self.address, reg+1)

#Lee signed 16-bit desde el dispositivo I2C
def readS16(self, reg):
    hibyte = self.bus.read_byte_data(self.address, reg)
    self.bus.read_byte_data(self.address, reg+1)

```

### **PWM Servo Driver.py**

```

#=====#
#
#           Driver Bus I2C           #
#       Marcos Aguero Carnerero      #
#           PFC Artropodo            #
#           HCTLab-EPS-UAM           #
#           Junio 2015               #
#                                     #
#=====#
import time
import math
from Hexapodo_I2C import Hexapodo_I2C
class PWM :

#Inicializa I2C en el bus y la direccion indicada. Resetea el modo
1 y 2 de funcionamiento.
def __init__(self, address=0x40, debug=False):
    self.i2c.write8(self.__MODE2, self.__OUTDRV)
    self.i2c.write8(self.__MODE1, self.__ALLCALL)

```

```
#Determina la frecuencia de funcionamiento del PWM. Actualiza el
modo de funcionamiento del dispositivo.
```

```
def setPWMFreq(self, freq):
    oldmode = self.i2c.readU8(self.__MODE1);
    newmode = (oldmode & 0x7F) | 0x10 # sleep
```

```
#Determina el pulso PWM para el canal seleccionado. Escribe los
valores on y off en el registro correspondiente a cada canal.
```

```
def setPWM(self, channel, on, off):
```

```
#Establece un pulso PWM común para todos los canales. Escribe los
valores on y off en los registros correspondientes a todos los
canales.
```

```
def setAllPWM(self, on, off):
```

### **BMP085.py**

```
#####
#
#     Driver sensor temperatura BMP085
#     Marcos Agüero Carnerero
#         PFC Artropodo
#         HCTLab-EPS-UAM
#         Junio 2015
#
#
#####
```

```
import time
from Hexapodo_I2C import Hexapodo_I2C
import smbus
```

```
class BMP085 :
```

```
#Inicializa I2C en el bus, modo y direccion indicada. Estos
valores se pasan como parámetros al gestor Hexapodo_I2C.
```

```
def __init__(self, address=0x77, mode=1, debug=False, busnum =
1):
```

```
    self.i2c = Hexapodo_I2C(address, busnum = busnum)
```

```
#Lee los datos de calibracion del sensor. Estos datos son
variables locales de la clase.
```

```
def readCalibrationData(self):
```

```
#Imprime por pantalla datos de calibracion (para posible
depuracion)
```

```

def showCalibrationData(self):

#Lee los valores de temperatura (sin escalar) del sensor
def readRawTemp(self):
    raw = self.i2c.readU16(self.__BMP085_TEMPDATA)

#Lee los valores de presion (sin escalar) del sensor
def readRawPressure(self):
    self.i2c.write8(self.__BMP085_CONTROL,
    self.__BMP085_READPRESSURECMD + (self.mode << 6))

#Obtiene el valor real de temperatura en Grados Celsius. Este
valor de determina tras la calibración de los datos leídos por el
sensor.
def readTemperature(self):

#Obtiene el valor real de presion en Pascales. Aplica el método
indicado en la hoja de datos del componente para determinar este
valor.
def readPressure(self):

#Obtiene el valor de la altitud en Metros. Se calcula a partir de
la presión, y con una valor de la presión a nivel del mar
determinado
def readAltitude(self, seaLevelPressure=101325):
    pressure = float(self.readPressure())
    altitude = 44330.0 * (1.0 - pow(pressure /seaLevelPressure,
    0.1903))

```

### **MPU6050.py**

```

#=====#
#
#   Driver Acelerometro+giroscopo MPU6050   #
#       Marcos Aguero Carnerero           #
#           PFC Artropodo                 #
#           HCTLab-EPS-UAM                #
#           Junio 2015                    #
#                                           #
#=====#

from Hexapodo_I2C import Hexapodo_I2C
from time import sleep
import math

class Acelerometro:

# Inicializa conexion I2C en la direccion 0x68 y desactiva sleep
mode

```

```

i2c = Hexapodo_I2C(0x68)
i2c.write8(0x6B, 0)

#Determina aceleración y giro para el eje x. Lee de los registros
correspondientes y aplica el escalado indicado en la hoja de datos
del componente.
high_giro_x = i2c.readS8(0x43)
low_giro_x = i2c.readU8(0x44)
raw_giro_x = (high_giro_x << 8) + low_giro_x
g_giro_x = raw_giro_x / 131.

high_acel_x = i2c.readS8(0x3b)
low_acel_x = i2c.readU8(0x3c)
raw_acel_x = (high_acel_x << 8) + low_acel_x
g_acel_x = raw_acel_x / 16384

#Funcion matematica auxiliares para el calculo de la posicion
def get_x_rotation(x, y, z):
    dist=math.sqrt((x*x)+(z*z))
    radians = math.atan2(y,dist)
    return math.degrees(radians)

```

### HC SR04.py

```

#=====#
#
#     Driver sensor distancia HC-SR04      #
#     Marcos Aguero Carnerero             #
#         PFC Artropodo                   #
#         HCTLab-EPS-UAM                  #
#         Junio 2015                      #
#
#=====#

import Adafruit_BBIO.GPIO as GPIO
import time

class Sensor_distancia:

#Calcula la distancia en funcion del tiempo entre senal y su eco
def calcula_distancia():

    #Configura pines de emisor y receptor
    GPIO.setup("P8_11", GPIO.IN)
    GPIO.setup("P8_15", GPIO.OUT)

    #Genera pulso de 10 microsegundos
    GPIO.output("P8_15", True)
    time.sleep(0.00001)
    GPIO.output("P8_15", False)

    #Calcula la distancia en funcion de vel. sonido/2

```

```
distance = round(pulse_duration * 17150,2)
```

### Infrarrojos.py

```
#=====#
#
#     Driver sensor infrarrojos
#     Marcos Aguero Carnerero
#         PFC Artropodo
#         HCTLab-EPS-UAM
#         Junio 2015
#
#=====#

import Adafruit_BBIO.GPIO as GPIO

class Infrarrojos:

# Configura como entrada los pines de conexión del sensor con la
BeagleBone
    def __init__(self):
        self.GPIO=GPIO
        self.GPIO.setup("P8_14", GPIO.IN)

#Para la pata introducida como parámetro p, devuelve un booleano
informando si existe superficie donde apoyar
    def contacto_pata(self,p):
        self.p=p;

        if p==1:
            if self.GPIO.input("P8_28"):
                self.estado_P1=False;
            else:
                self.estado_P1=True;
```

### Articulación.py

```
#=====#
#
#     Driver movimiento articulacion
#     Marcos Aguero Carnerero
#         PFC Artropodo
#         HCTLab-EPS-UAM
#         Junio 2015
#
#=====#

from PWM_Servo_Driver import PWM
import time
```

```

class Mueve_Articulacion:

#En esta clase, se pasan como variables locales los canales del
generador PWM correspondientes a cada articulación y los pulsos
relativos de PWM (a 60Hz) para angulos de las patas

#Inicializa I2C las direcciones y con la frecuencia indicadas.
Estos valores se pasan como parámetros al gestor Hexapodo_I2C.
    def __init__(self, address1=0x40,address2=0x41,freq=60):
        self.pwm1 = PWM(address1)
        self.pwm2 = PWM(address2)
        self.address1 = address1
        self.address2 = address2
        self.freq=freq

#Mueve la articulacion hacia la posicion final con la velocidad
indicada. Se le indica si la articulación pertenece a la zona
derecha o izquierda del robot.
    def moverArticulacion(self,zona,idArticulacion,pos_final,
        velocidad):

        #Abre tabla posiciones zona derecha
        archivo=open("Tabla_posicion_derecha.txt", "r")

        #La posicion final requiere un PWM mas ancho que la
        posicion inicial
        if self.pos_actual<pos_final:
            while i<=velocidad:
                self.desplazamiento=pos_final-self.pos_actual;
                self.paso=(self.pos_actual+(i*(self.desplazamiento/
                    velocidad)))

                self.pwm.setPWM(idArticulacion,0,self.paso)

        #La posicion final requiere un PWM mas estrecho que la
        posicion inicial
        if self.pos_actual>pos_final:
            while i<=velocidad:
                self.desplazamiento=self.pos_actual-pos_final;
                self.paso=(self.pos_actual-(i*(self.desplazamiento/
                    velocidad)))

                self.pwm.setPWM(idArticulacion,0,self.paso)

        #Actualiza tabla de posiciones derecha
        archivo=open("Tabla_posicion_derecha.txt", "w")
        for elemento in lines:
            archivo.write(elemento)
        archivo.close()

```

**Antena.py**

```
#=====#
#
#         Driver direccion antena           #
#         Marcos Aguero Carnerero          #
#         PFC Artropodo                    #
#         HCTLab-EPS-UAM                  #
#         Junio 2015                      #
#
#=====#

from PWM_Servo_Driver import PWM
import time

class Antena:

#Inicializa I2C las direcciones y con la frecuencia indicadas.
#Estos valores se pasan como parámetros al gestor Hexapodo_I2C.
    def __init__(self, address=0x41,freq=60):
        self.pwm2 = PWM(address)
        self.address = address
        self.freq=60

#Posiciona las dos articulaciones de la antena en el lugar deseado
    def dirigir_antena(self,x,y):
        self.pwm2.setPWMFreq(self.freq)
        self.pwm2.setPWM(1,0,x)
        self.pwm2.setPWM(0,0,y)
```

# PRESUPUESTO

## 1) Ejecución Material

- Compra de ordenador personal (Software incluido)..... 2.000,00 €
- Compra impresora Ultimaker 2..... 1.900,00 €
- Compra material ABS..... 30,00 €
- Compra BeagleBone Black..... 46,16 €
  
- Compra Servomotores
  - TowerPro MG 996R (35 unidades)..... 210,00 €
  - TowerPro SG90 (4 unidades)..... 14,00 €
  
- Compra Sensores
  - Acelerómetro..... 11,90 €
  - Sensor temperatura..... 2,70 €
  - Sensor distancia..... 2,50 €
  - Sensor infrarrojos..... 6,69 €
  
- Compra componentes electrónicos
  - Chips PWM..... 4,40 €
  - Resistencias..... 1,20 €
  - Condensadores desacoplo..... 2,70 €
  - Headers..... 2,20 €
  - Jack Alimentación..... 5,22 €
  - Leds..... 0,74 €
  - Buffers y Regulador..... 1,82 €
  
- Compra conectores y cables extensores..... 13,70 €
- Compra PCB..... 14,00 €
- Compra placas aluminio..... 30,00 €
- Compra material ferretería..... 8,40 €
- Alquiler de impresora láser durante 6 meses ..... 50,00 €
- Material de oficina ..... 150,00 €
  
- Total de ejecución material..... **4.508,33 €**

## 2) Gastos generales

- 16 % sobre Ejecución Material..... 721,33 €

## 3) Beneficio Industrial

- 6 % sobre Ejecución Material..... 270,50 €

<b>4)</b>	<b>Honorarios Proyecto</b>	
	■ 1.100 horas a 15 € / hora.....	16.500,00 €
<b>5)</b>	<b>Material fungible</b>	
	■ Gastos de impresión y encuadernación .....	35,00 €
<b>6)</b>	<b>Subtotal del presupuesto</b>	
	• Subtotal Presupuesto.....	22.035,00 €
<b>7)</b>	<b>I.V.A. aplicable</b>	
	• 21 % Subtotal Presupuesto.....	4627,40 €
<b>8)</b>	<b>Total presupuesto</b>	
	• Total Presupuesto .....	<b>26.662,32 €</b>

Madrid, Julio de 2015

El Ingeniero Jefe de Proyecto

Fdo.: Marcos Agüero Carnerero  
Ingeniero de Telecomunicación

## PLIEGO DE CONDICIONES

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de un *DESARROLLO DE ROBOT ARTRÓPODO*. En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho sistema. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparada por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulará por las siguientes:

### Condiciones generales

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.

2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.

3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.

4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.

5. Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.

6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.

7. Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.

8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.

9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.

10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.

11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.

12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partida alzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.

13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.

14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.

15. La garantía definitiva será del 4% del presupuesto y la provisional del 2%.

16. La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.

17. La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales del replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al año de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.

18. Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.

19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que éste designe, para todo relacionado

con ella. Al ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.

20. Durante la realización de la obra, se girarán visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la misma, por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.

21. El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que éste no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.

22. Hecha la recepción provisional, se certificará al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.

23. Las tarifas para la determinación de honorarios, reguladas por orden de la Presidencia del Gobierno el 19 de Octubre de 1961, se aplicarán sobre el denominado en la actualidad "Presupuesto de Ejecución de Contrata" y anteriormente llamado "Presupuesto de Ejecución Material" que hoy designa otro concepto.

### **Condiciones particulares**

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregará a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares:

1. La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.

2. La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.

3. Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contará con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuará en representación de la empresa consultora.

4. En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.

5. En todas las reproducciones se indicará su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.

6. Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de éste, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.

7. Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.

8. Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinará toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.

9. Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.

10. La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.

11. La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial, siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.

12. El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegará en él las responsabilidades que ostente.