

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID**

**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**DESARROLLO DE UN BRAZO MECÁNICO ARTICULADO  
ELECTRO-NEUMÁTICO**

**Javier Del Sol Rodríguez**

**FEBRERO 2015**



# **DESARROLLO DE UN BRAZO MECÁNICO ARTICULADO ELECTRO-NEUMÁTICO**

**AUTOR: Javier Del Sol Rodríguez**

**TUTOR: Fernando López Colino**

**PONENTE: Javier Garrido Salas**

**Human Computer Technology Laboratory (HCTLab)**

**Escuela Politécnica Superior**

**Universidad Autónoma de Madrid**

**Febrero 2015**



## **Resumen**

Este documento presenta el diseño, desarrollo y montaje de un brazo antropomórfico articulado electro-neumático. El brazo humano es una estructura muy compleja compuesta por tres articulaciones, cada una de ellas con sus respectivos grados de libertad. Cada articulación requiere una solución particular y la necesidad de usar diferentes actuadores, así como la implementación de un diseño de control adaptado. Tales circunstancias enriquecen el proyecto ante la necesidad de abordar distintas disciplinas, como mecánica, electrónica y programación.

Para llevar a cabo un proyecto eficiente, se comienza el mismo con un diseño de CAD del sistema. El diseño se basó en un estudio inicial de la anatomía del brazo, permitiendo así acercarse lo máximo posible a la fisionomía que presenta un brazo humano. Una vez validado el diseño, se procede al montaje de los diferentes elementos del sistema tal como se plantea en el diseño inicial, de manera a desarrollar un proyecto con alto grado de antropomorfismo. Tras el montaje, se lleva a cabo del control de los diferentes elementos a través de la placa BeagleBone que permite un sencillo control de todos los actuadores y dispositivos.

Habiendo realizado el control, se realizan las pruebas que validan el diseño, montaje y control de manera efectiva. Se consigue finalmente un sistema funcional capaz de realizar movimientos con siete grados de libertad similares a los que podría realizar un brazo humano.

Palabras clave:

Brazo robótico, Antropomorfismo, Neumática, Sistemas empotrados

## ***Abstract***

This paper presents the design, assembly and development of an anthropomorphic articulated electro-pneumatic arm. The human arm is a very complex structure composed by three joints, each of them with their own degrees of freedom. Each joint requires its own solution, including the usage of several actuators, as well as the implementation of a design of adapted control. Such circumstances enhance the project since it will be necessary to deal with disciplines such as mechanics, electronics and programming

To perform an efficient project, it begins with a CAD design of the system. The design was based on an initial study of the anatomy of the arm, allowing it to relate as closely as possible to the physiognomy of a human arm. Once the design is validated, it proceeds to assemble the different elements of the system as proposed in the initial design, so as to develop a project with a high degree of anthropomorphism. After the construction is carried out, the control of the different elements through the BeagleBoneboard allows an easy control of all actuators and devices.

Having performed the control, tests are conducted validating the design, assembly and control of the project. A functional system is achieved, capable of performing movements with seven degrees of freedom similar to those who could make a human arm.

Keywords:

Robotic Arm, Anthropomorphism, Pneumatics, Embedded systems

## ***Agradecimientos***

Con la finalización de este proyecto se cierra una de las etapas más importantes y más bonitas que he tenido la suerte de poder vivir hasta ahora. Esta carrera, exigente e interesante como pocas, te demuestra que con trabajo, tesón y buena compañía se saca todo adelante.

Dicho esto, me gustaría agradecer en primer lugar a mi tutor, Fernando López Colino, que me permitiera realizar este proyecto donde he podido cacharrear durante muchas horas, aprendiendo cosas nuevas en cada una de ellas. Gracias a su exigencia e implicación, hemos conseguido hacer de este proyecto un pequeño éxito en la carrera de ambos.

Antes mencioné la importancia de la compañía, por eso quiero agradecer con todo mi corazón a la gente que me ha acompañado a lo largo de este viaje, por buenas o malas que fueran las circunstancias. Pablo SB, Sergio CJ, Jesús VR, Guillermo MM, Luis RM, David AR, Marcos AC, Pedro LG, Alejandro AU y Adrián CG, que aunque no haya estado conmigo en la carrera, siempre ha estado ahí. A vosotros, os doy las gracias por hacer de esta experiencia algo que siempre recordaré con cariño.

Y como lo bueno se hace esperar, he dejado para el final a las personas que más me han apoyado hasta ahora y que sé que seguirán haciéndolo allá donde vaya, mi familia. Papá, Mamá, Irene, gracias por darme vuestro apoyo y ayuda constante durante toda la vida, y es gracias a esto que he llegado donde estoy hoy en día. Sentíos orgullosos de este proyecto, porque mucho de lo que hay aquí es gracias a vosotros.

¡Gracias de veras a todos!



## **Índice de contenidos**

Resumen.....	I
Abstract.....	II
Agradecimientos .....	III
Índice de contenidos .....	V
Índice de figuras.....	VIII
Índice de tablas .....	XI
Glosario.....	XIII
1 Introducción .....	1
1.1 Motivación .....	1
1.2 Objetivos .....	1
1.3 Organización de la memoria .....	2
2 Fundamentos teóricos .....	3
2.1 Teoría anatómica.....	3
2.2 Hombro .....	4
2.3 Codo.....	6
2.4 Muñeca.....	8
2.5 Brazo y antebrazo.....	10
2.6 Resumen.....	11
3 Estado del arte.....	12
3.1 Introducción .....	12
3.2 Brazos mecánicos orientados a la medicina.....	12
3.2.1 Robot exoesquelético de apoyo al hombro .....	12
3.2.2 Robot portátil para la rehabilitación de hombro y codo.....	14
3.3 Brazos antropomórficos funcionales.....	15
3.3.1 Articulación del hombro basada en tendones .....	15
3.3.2 Sistema antropomórfico para brazos robóticos musculoesqueléticos.....	17
3.4 Sistemas con fines educativos.....	19
3.4.1 Brazo robótico de 6GDL y software de control.....	19
3.4.2 Desarrollo de un brazo mecánico realista de siete grados de libertad .....	21
4 Diseño .....	24
4.1 Hombro .....	26
4.2 Codo.....	28
4.3 Muñeca.....	30

4.4 Brazo y antebrazo.....	30
4.5 Resumen.....	34
5 Montaje .....	37
5.1 Hombro .....	37
5.1.1 Flexión – Extensión .....	37
5.1.2 Abducción – Aducción.....	41
5.2 Codo.....	44
5.3 Muñeca.....	47
5.4 Brazo y antebrazo.....	48
5.5 Circuito de válvulas.....	50
5.6 Soporte .....	53
5.7 Brazo completo .....	55
6 Control del sistema.....	57
6.1 Circuito de control.....	57
6.1.1 Puentes H .....	57
6.1.2 PWM.....	58
6.1.3 MOSFET .....	59
6.1.4 Elementos de seguridad.....	60
6.1.5 Circuito completo.....	60
6.2 Control de la placa .....	63
BeagleBone .....	63
6.2.1 Comunicación con la BeagleBone .....	64
6.2.2 Programación .....	64
7 Pruebas .....	67
7.1 Pruebas electromecánicas.....	67
7.2 Pruebas electrónicas .....	70
7.3 Pruebas conjuntas.....	72
8 Conclusiones .....	75
8.1 Trabajo futuro.....	76
Referencias.....	77
Anexos .....	79
A.Anexo de piezas .....	79
Piezas compradas .....	79
Piezas fabricadas .....	83
B.Anexo de programación .....	85

Instalación librerías necesarias .....	85
Control del servomotor .....	91
Control de la válvula .....	92
Control del motor de continua .....	93
Publicación.....	95
Presupuesto .....	103
Pliego de condiciones .....	105

## **Índice de figuras**

Figura 1: Diferentes huesos y partes de un brazo. ....	3
Figura 2: Grados de libertad.....	4
Figura 3: Rangos de movimiento del hombro.....	5
Figura 4: Morfología del hombro. (Fte: Kapandji) .....	5
Figura 5: Grupos musculares del hombro .....	6
Figura 6: Huesos que conforman la estructura del hombro .....	6
Figura 7: Rango de movimiento del codo .....	7
Figura 8: Músculos actores del codo.....	7
Figura 9: Huesos que componen la articulación del codo.....	8
Figura 10: Grados de libertad de la muñeca.....	8
Figura 11: Músculos responsables del movimiento de la muñeca.....	9
Figura 12: Huesos de la articulación de la muñeca.....	9
Figura 14: Manguitos rotadores del húmero .....	10
Figura 15: Rotación longitudinal del antebrazo .....	11
Figura 16: Imagen del exoesqueleto y modo de uso del brazo desarrollado. ....	13
Figura 17: Rangos de movimiento del exoesqueleto. ....	13
Figura 18: Ejes de rotación del exoesqueleto.....	14
Figura 19: Diseño del robot desarrollado.(a): Soporte de la rotación interna/externa del hombro; (b): Soporte sin cobertura superior; (c): Mecanismo actuador de la rotación del hombro; (d) Soporte del movimiento del codo .....	14
Figura 20: Modelo de la articulación basado en un hombro humano .....	16
Figura 21: Esquema del sistema completo de poleas.....	16
Figura 22: Ilustración del miembro superior de un ser humano (Los letreros grises indican los huesos y los letreros blancos muestran las articulaciones).....	17
Figura 23: Sistema funcional completo y todos su grados de libertad.....	18
Figura 24: Sistema anticolidión del hombro .....	18
Figura 25: Secuencia de fotogramas del lanzamiento de una pelota .....	19
Figura 26: Diseño real (dcha) y diseño virtual de control (izqda) .....	20
Figura 27: Diseño virtual de un brazo con 6 GDL.....	20
Figura 28: Diseño del brazo robótico previo.....	21
Figura 29: Nuevo diseño revisado del brazo robotico .....	22
Figura 30: Esquema de la mano implantada en el brazo.....	22
Figura 31: Detalle del hombro montado .....	23
Figura 32: Esquema del sistema completo.....	25



Figura 68: Válvulas responsables del control del pistón del hombro .....	52
Figura 69: Circuito de aire del hombro .....	53
Figura 70: Base cónica de hormigón.....	54
Figura 71: Terminación del listón tallado insertado en la barra hueca metálica.....	54
Figura 72: Montaje final completo.....	55
Figura 73: Circuito de un puente H.....	58
Figura 74: Circuitos que controlan el sentido de giro del motor.....	58
Figura 75: Ejemplo de ciclo de trabajo de un PWM.....	59
Figura 76: Terminales de un dispositivo MOSFET (En corte).....	60
Figura 77: Circuito electrónico de la placa de control del sistema .....	61
Figura 78: Esquemático del circuito de la placa de control .....	62
Figura 79: Cara inferior de la placa de control fabricada.....	63
Figura 80: Cara superior de la placa de control fabricada .....	63
Figura 81: Placa BeagleBone con anotaciones de los principales componentes. ....	64
Figura 82: Prueba de los pistones neumáticos .....	68
Figura 83: Prueba del correcto funcionamiento de los motores de corriente continua...	69
Figura 84: Prueba de funcionamiento de las válvulas neumáticas.....	69
Figura 85: Prueba de conexión de la placa al ordenador a través del cable Ethernet .....	70
Figura 86: Prueba de conexión de la placa auxiliar a la placa BeagleBone.....	71
Figura 87: Prueba de funcionamiento del servomotor a través de la placa Beaglebone.	72
Figura 88: Prueba de la conexión completa del sistema .....	74

## ***Índice de tablas***

Tabla 1: Tabla resumen de los movimientos presentes en un brazo.....	11
Tabla 2: Rango de movimiento alcanzado por el exoesqueleto.....	15
Tabla 3: Estados de las válvulas en apertura y cierre del pistón.....	51
Tabla 4. Consumo de los componentes.....	70
Tabla 5: Características de los movimientos.....	73



**BeagleBone:** Ordenador de bajo consumo montado en una única placa, diseñado para ser programado en código abierto

**CAD:** Diseño asistido por ordenador (*ComputerAssistedDesign*)

**Debian:** Sistema operativo que usa el núcleo Linux y las herramientas de GNU

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

**eMMC:** Controlador de memoria embebida (*embeddedMultiMediaController*)

**GDL:** Grado de libertad

**GNU:** Sistema operativo (*GNU NotUNIX*)

**GPIO:** Entrada/salida de propósito general (*General PurposeInput Output*)

**MOSFET:** Transistor de efecto de campo metal-óxido semiconductor (*Metal Oxide Semiconductor Field EffectTransistor*)

**PAM:** Módulo de autenticación flexible (*PluggableAuthenticationModule*)

**PCB:** Placa de circuito impreso (*PrintedCircuitBoard*)

**PUMA:** Brazo robot industrial desarrollado en la empresa pionera en robótica Unimation (*ProgrammableUniversal Machine forAssembly*)

**PWM:** Modulación por ancho de pulsos (*Pulse WidthModulation*)

**Python:** Lenguaje de programación funcional orientada a objetos

**SSH:** Interprete de órdenes seguras (*SecureShell*)



# 1

## Introducción

---

### **1.1 Motivación**

En este proyecto se construye un brazo mecánico antropomórfico mediante un diseño simplificado y el uso de elementos de bajo coste (actuadores, sensores y elementos de control).

Con ello, se continúa la línea de trabajo e investigación iniciada anteriormente en el HCTLab (Human ComputerTechnologyLaboratory) en el que se desarrolló una mano mecánica articulada.

### **1.2 Objetivos**

El objetivo de este proyecto es la construcción y control de un brazo antropomórfico mecánico articulado. Tal como se comenta en el apartado anterior, se continúa la línea de desarrollo que se inició hace seis años en el HCTLab con el proyecto de una mano antropomórfica que representaba las letras de la Lengua de Signos Española [1]. Este proyecto permite seguir desarrollando la línea de robótica antropomórfica, con vistas a poder construir diferentes modelos de sistemas que imiten el comportamiento humano.

En este caso, se enfoca el proyecto en la construcción de un sistema funcional de un brazo mecánico articulado y su control. El brazo se diseña de manera que presente la máxima similitud posible a un brazo humano, tanto en aspecto como en rango de movimiento. Esto se ha tenido en cuenta para el diseño de la mecánica, electrónica y neumática, lo que implica el uso de varias disciplinas en el proyecto.

Para poder realizar los movimientos del brazo, se utilizan diferentes actuadores dependiendo del tipo de movimiento. En el proyecto se han incluido pistones neumáticos, y las válvulas neumáticas que los controlan, motores DC y servomotores. La placa es una plataforma de control BeagleBone[2], que junto a una placa de expansión que lleva los componentes propios de control de cada actuador, permite controlar desde un mismo punto todos los actuadores. Esta placa de expansión se ha desarrollado durante el proyecto.

Con todos estos aspectos, se consigue realizar el desarrollo funcional de un sistema completo de un brazo articulado electro-neumático con capacidad de movimiento similar a un brazo humano.

### **1.3 Organización de la memoria**

Para llevar a cabo el desarrollo completo del proyecto se implementan diferentes etapas que permiten obtener finalmente un sistema funcional de un brazo completo. Este documento presenta los pasos seguidos y está distribuido de la siguiente manera:

En el capítulo dos, se introducen conceptos teóricos acerca de la anatomía del brazo, que han ayudado a definir los actuadores y el diseño de cara a reflejar con el máximo realismo posible el aspecto y rango de movimiento de un brazo humano. En el capítulo tres, se presentan los proyectos relacionados a la temática del proyecto aquí presentado y que han permitido la adquisición de los conocimientos necesarios para poder empezar el diseño del sistema. El capítulo cuatro de la memoria muestra el diseño llevado a cabo en CAD (*ComputerAssistedDesign*), que ha facilitado la comprobación de la viabilidad de los esquemas iniciales, así como ayudar a la elección de los actuadores del sistema. El capítulo siguiente, el cinco, detalla los pasos seguidos para construir las piezas y ensamblarlas para obtener el montaje final completo. En el capítulo seis se exponen los elementos del control del sistema, así como las configuraciones necesarias para poner en funcionamiento la placa de control del sistema. El capítulo siete detalla las pruebas realizadas para comprobar el correcto funcionamiento del sistema y su control. En el capítulo ocho se muestra las conclusiones del proyecto y el trabajo futuro que se podrá llevar a cabo sobre el sistema.

# 2

## Fundamentos teóricos

---

En esta sección se presentan los conceptos anatómicos que se consideran relevantes y necesarios de cara a poder exponer el funcionamiento de las articulaciones [3]. Se muestran, empezando por el hombro y en sentido descendente, las articulaciones que componen el brazo y que serán la parte central del desarrollo de este proyecto.

### 2.1 Teoría anatómica

A la hora de realizar un brazo mecánico articulado que tendrá tanta similitud con un brazo real como sea posible. Una buena aproximación al problema es a través del estudio de un brazo humano. El brazo se compone de seis elementos con diferente estructura cada uno de ellos. Estos elementos son: hombro, húmero, codo, antebrazo, muñeca y mano. Se pueden observar con mayor detalle en la figura 1.

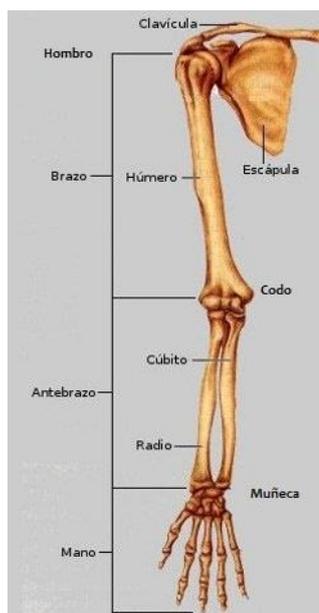


Figura 1: Diferentes huesos y partes de un brazo.

Para definir el capacidad de movimiento de las diferentes estructuras del brazo, se recurrirá a un concepto llamado grados de libertad (GDL) (*degrees of freedom* (DOF) en inglés). Dicho concepto, en mecánica y robótica, explica sobre cuántos ejes virtuales puede realizar un movimiento una estructura. Cada GDL simboliza un eje sobre el cual la estructura puede rotar. Se puede observar en la figura 2 los ejes sobre los cuales se realizan las rotaciones, marcados con los números 1, 2 y 3. Y las rotaciones que se efectúan, con los números 4, 5 y 6.

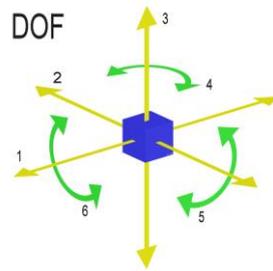


Figura 2: Grados de libertad.

A continuación, con las diferentes subsecciones, ampliaremos la descripción de cada uno de ellos.

## 2.2 Hombro

El hombro es la articulación más compleja y con más movimientos del brazo, dispone de dos GDL a la hora de realizar un movimiento. Los tres movimientos que puede realizar un hombro son abducción y aducción (figura 3.a), extensión y flexión (figura 3.b) y por último rotación, tanto lateral como medial (figura 3.c).

El hombro tiene unos movimientos muy amplios tales como 180° de flexión, 60° de extensión, 180° de abducción y 75° de aducción. En este proyecto, el hombro se simplifica a un rango de 90° para la abducción/aducción y 90° para la rotación lateral/medial.

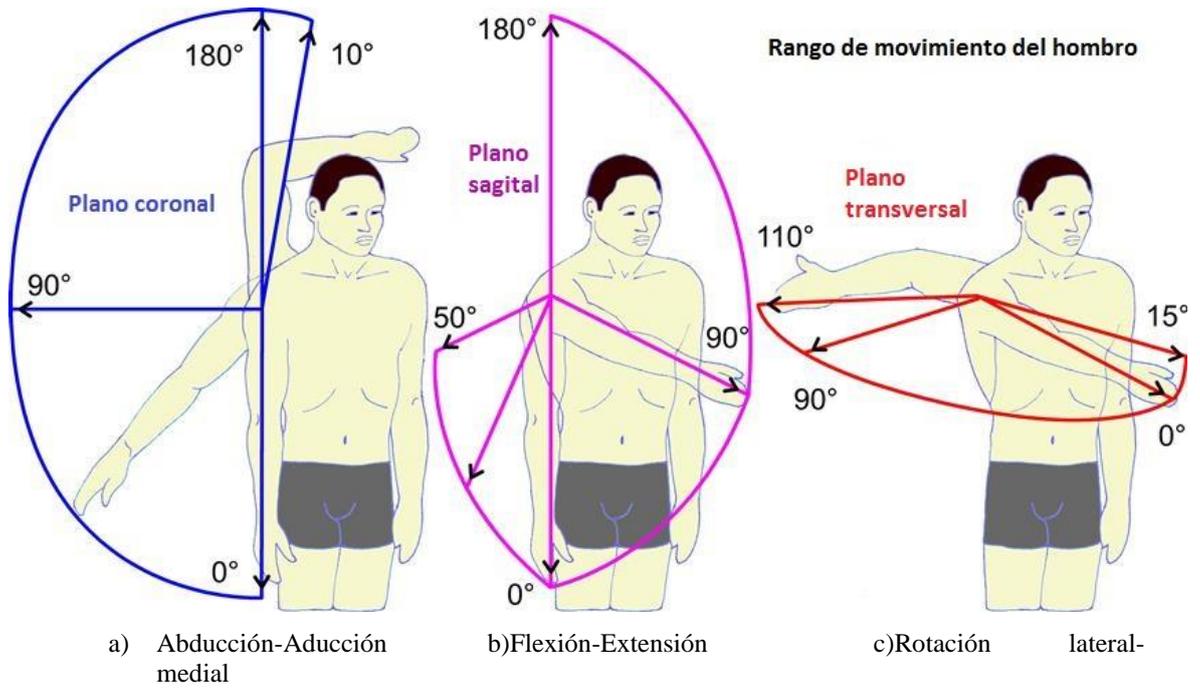


Figura 3: Rangos de movimiento del hombro

Estos tres movimientos se pueden realizar ya que la articulación del hombro es una articulación esférica que lleva a cabo sus movimientos a través de músculos y tendones ligados a la clavícula, al omoplato y al esternón. Hay tres tipos de músculos: externos (deltoides), anteriores (pectoral mayor, pectoral menor y subclavio) y posteriores (supraespinoso, infraespinoso, redondo mayor, redondo menor y subescapular). Estos tres tipos de músculos se pueden observar en las figuras 4 y 5.

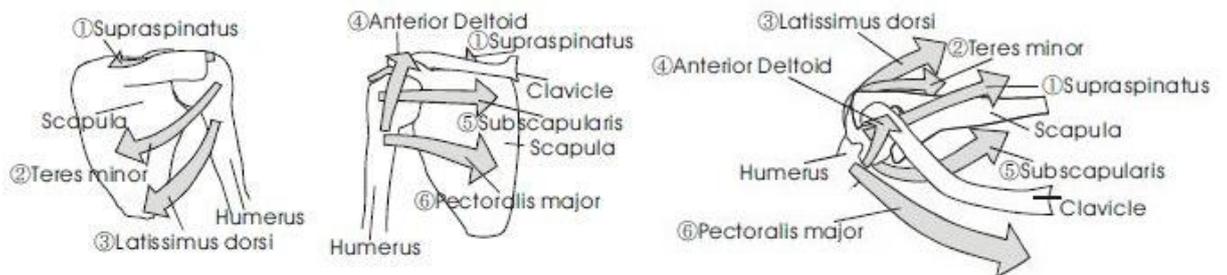


Figura 4: Morfología del hombro. (Fte: Kapandji)

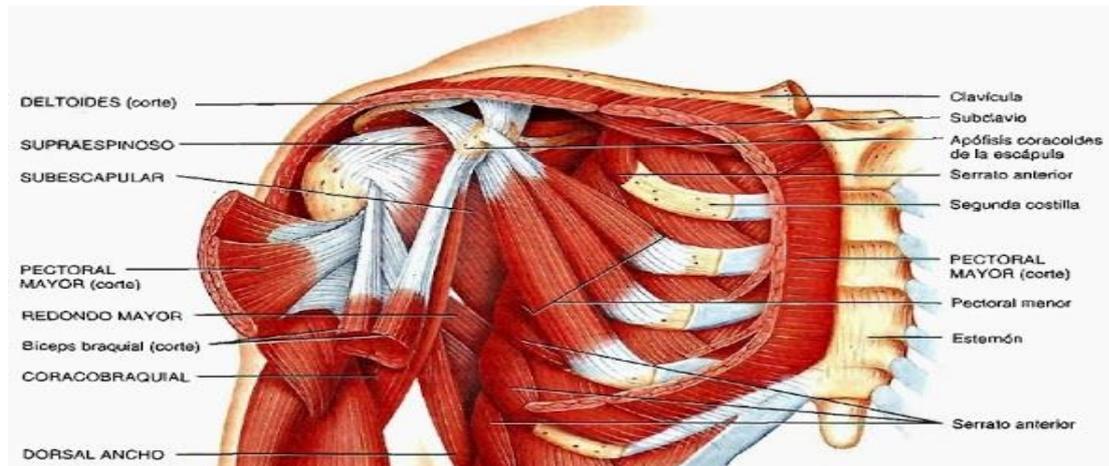


Figura 5: Grupos musculares del hombro

Los huesos que soportan la fuerza ejercida por los músculos y le dan el amplio rango de movimiento al hombro son el húmero, la clavícula, la escápula y el esternón. Estos huesos se muestran en la figura 4 junto a los músculos y con más detalle en la figura 6.

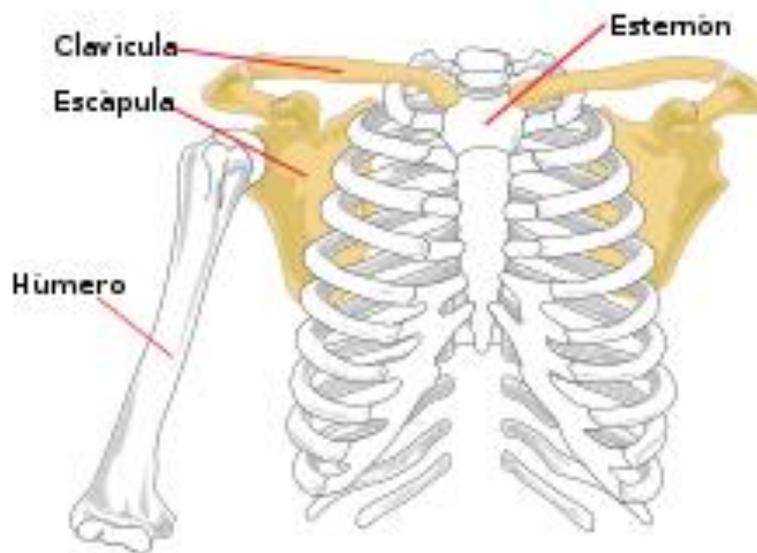


Figura 6: Huesos que conforman la estructura del hombro.

### 2.3 Codo

La segunda articulación presente en el brazo es el codo, ésta es la más sencilla, pues sólo tiene un GDL. Se puede observar en la figura 7, que a pesar de tener sólo un GDL, posee un rango de movimiento amplio. El codo permite hacer un movimiento normal de flexión de 150° y unos 10° de sobreextensión, que se pueden alcanzar en algunos casos.

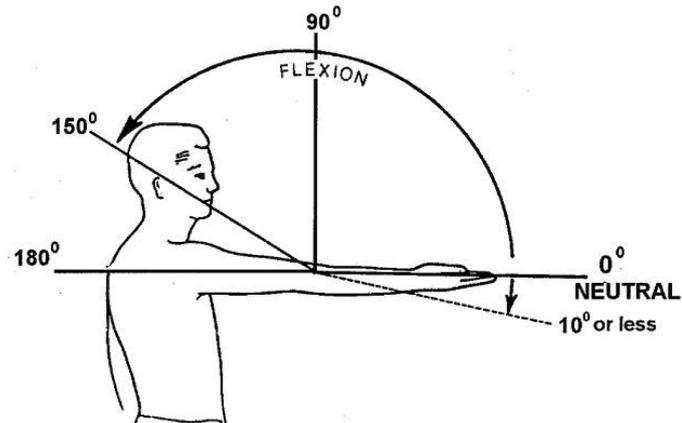


Figura 7: Rango de movimiento del codo

Los músculos responsables de la flexión y extensión del codo son el bíceps y tríceps respectivamente. La disposición de los músculos se puede observar en la figura 8.

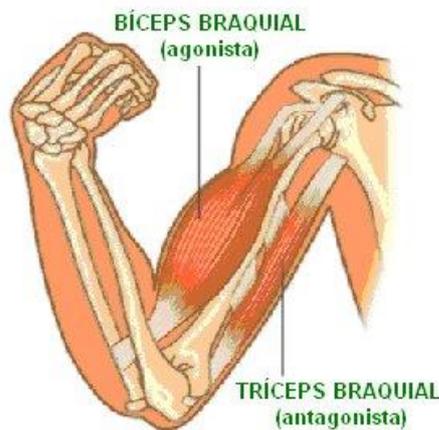


Figura 8: Músculos actores del codo

Los huesos que forman parte del codo se muestran en la figura 9. En dicha figura, se pueden observar los huesos principales, que son el húmero, el cúbito y el radio. El húmero presenta dos protuberancias al final del mismo y el cúbito tiene una terminación en forma de gancho, llamada olecranon. La unión de estos tres elementos, permite al codo hacer una unión perfecta y mantener un movimiento en un solo plano.

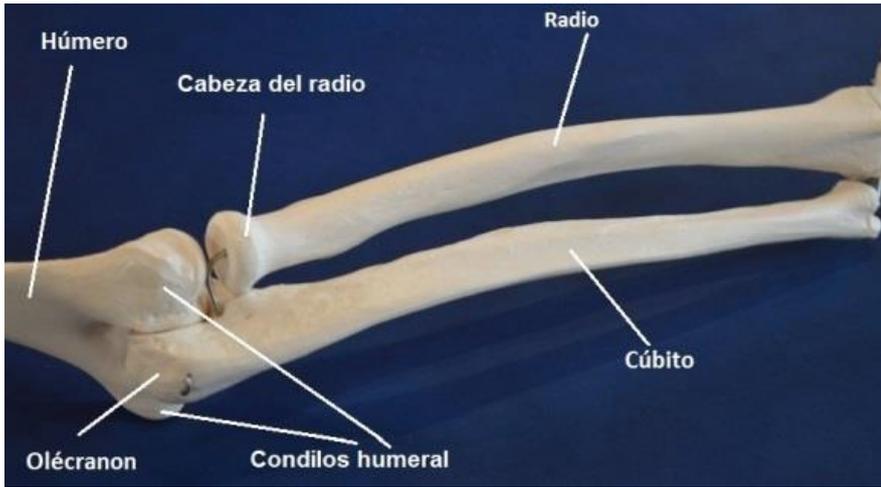
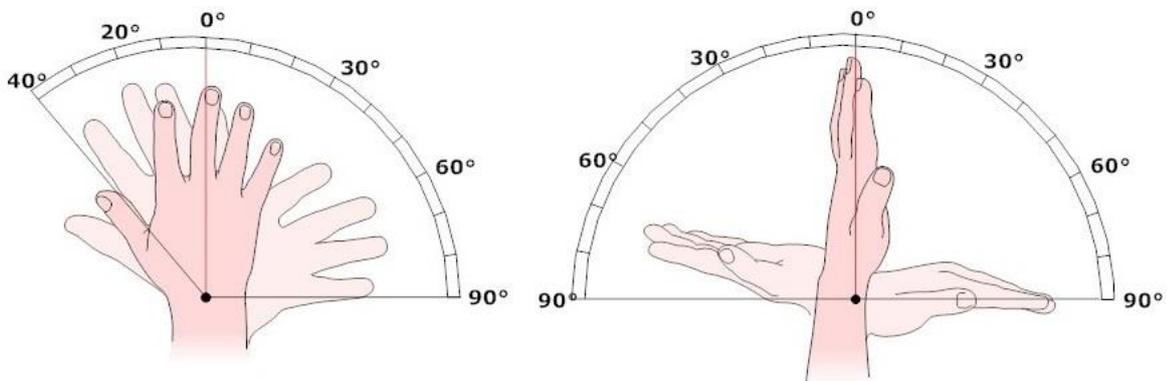


Figura 9: Huesos que componen la articulación del codo.

## 2.4 Muñeca

La muñeca es la articulación que une el antebrazo con la mano y presenta dos GDL, tal como se observa en la figura 10. De cara a la utilidad de las manos, la muñeca presenta una gran importancia en la capacidad de movimiento de las manos y su versatilidad.



a) Rango de movimiento de la desviación radio-cubital b) Rango de movimiento de la flexión-extensión

Figura 10: Grados de libertad de la muñeca

Los músculos que permiten a la muñeca tener sus dos GDL son: palmar mayor, cubital anterior/ cubital posterior, primer y segundo radial (flexión/extensión) y extensor corto del pulgar, abductor largo del pulgar/cubital anterior (desviación radial/cubital, visibles en la figura 11).

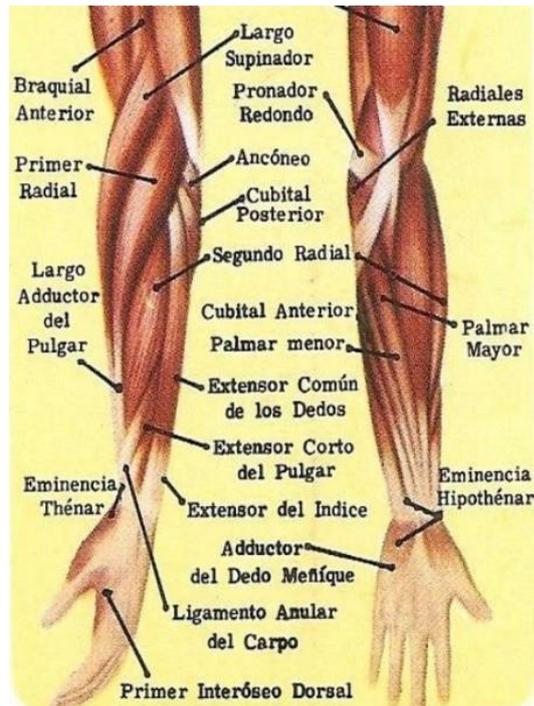


Figura 11: Músculos responsables del movimiento de la muñeca

La unión entre los huesos del antebrazo, el radio y el cubito, y la muñeca es muy compleja ya que está formada por un conjunto de pequeños huesos llamados carpos. Se puede observar con detalle su disposición en la figura 12.

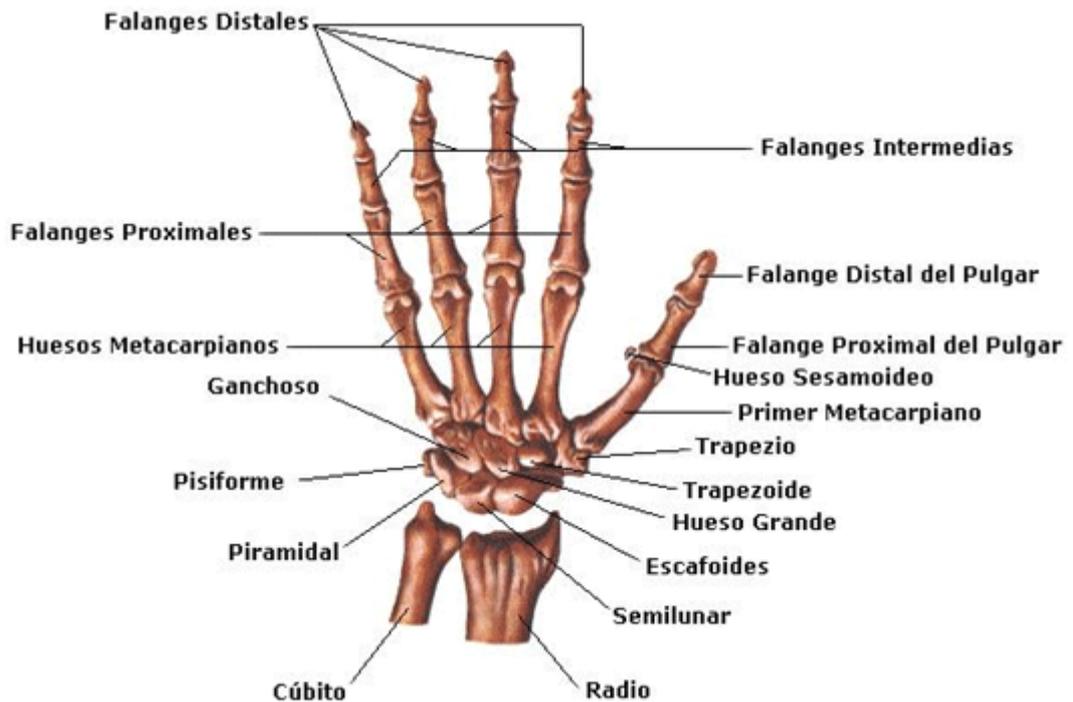


Figura 12: Huesos de la articulación de la muñeca

## 2.5 Brazo y antebrazo

Estos dos últimos componentes del brazo no son articulaciones, pero presentan un GDL cada uno, haciendo de ellos actores del movimiento del brazo. Ambas secciones del brazo tienen una estructura cilíndrica similar con un eje principal (hueso) y los actuadores (músculos). Con esta disposición, el movimiento que se da en estos casos es una rotación longitudinal.

El húmero puede realizar su rotación, tal como se ve en la figura 13, gracias a dos manguitos rotadores (tendones gruesos) situados en la cabeza del húmero, como se puede observar en la figura 14.

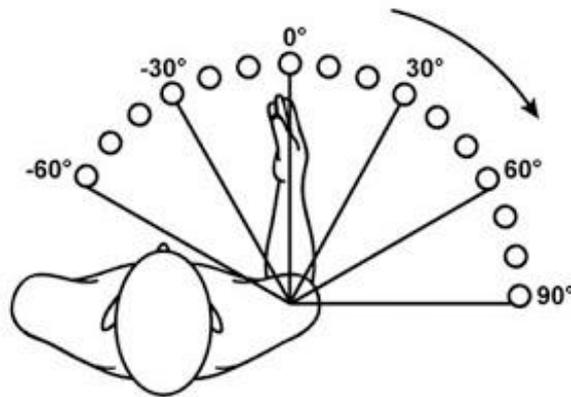


Figura 13: Rango de rotación del húmero



Figura 14: Manguitos rotadores del húmero

La rotación que puede realizar el antebrazo, así como los músculos responsables de tal movimiento se observan en la figura 13. La particularidad de esta rotación es que el eje virtual está entre los dos huesos que forman el antebrazo, el cubito y el radio. Al realizar la pronación, los huesos se cruzan formando una X entre ellos, tal como se ve en la figura 15.

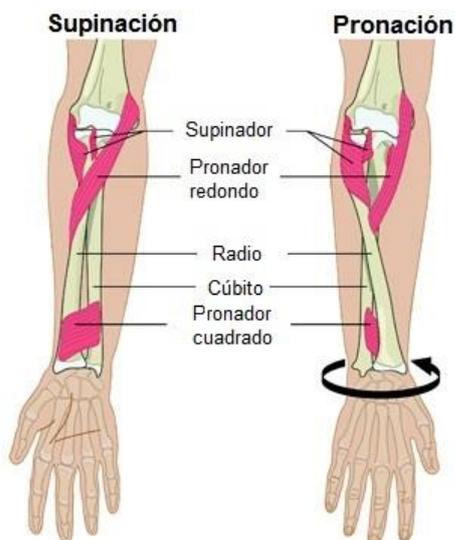


Figura 15: Rotación longitudinal del antebrazo

## 2.6 Resumen

La tabla 1 resume los datos expuestos anteriormente para facilitar su comprensión y consulta.

Tabla 1: Tabla resumen de los movimientos presentes en un brazo

Componente	Grados de libertad	Rango de movimiento	Huesos	Músculos
<b>Hombro</b> (figuras 3, 4, 5 y 6)	Abducción-Aducción	0° a 180°	Húmero, clavícula, escápula y esternón	Externos, anteriores y posteriores
	Flexión-Extensión	-50° a 180°		
	Plano transversal	-15° a 110°		
<b>Codo</b> (figuras 7, 8 y 9)	Flexión – Extensión	-10° a 150°	Húmero, radio y cúbito	Bíceps y tríceps
<b>Muñeca</b> (figuras 10, 11 y 12)	Plano radio cubital	-40° a 90°	Carpós	Palmares, radiales, cubitales y del pulgar
	Flexión – Extensión	-90° a 90°		
<b>Brazo</b> (figuras 13 y 14)	Rotación longitudinal	-60° a 90°	Húmero	Manguitos rotadores
<b>Antebrazo</b> (figura 15)	Rotación longitudinal	-10° a 150°	Radio y cúbito	Supinador y pronadores

# 3

## Estado del arte

---

### **3.1 Introducción**

Un brazo humano presenta siete GDLs (dos del hombro, uno del codo, dos de la muñeca y dos de las rotaciones longitudinales). Estos GDLs son los principales retos que se afrontan en este proyecto y para lo cual se estudian proyectos previos en los cuales ya se han resuelto dichos problemas con éxito.

A la hora de comenzar a diseñar el brazo se han estudiado diferentes artículos que dependiendo de la finalidad del mismo se han tenido más en cuenta que el resto. Durante la consulta previa de artículos, principalmente se han estudiado los artículos que desarrollaban brazos antropomórficos o con aplicación médica o educativa.

De cara a establecer un orden en el estudio de los trabajos previos para poder desarrollar el proyecto, se estudiarán las tres áreas sobre las cuales están basados los diferentes artículos, medicina, investigación y educación.

### **3.2 Brazos mecánicos orientados a la medicina**

En esta sección se analizarán algunos proyectos que han tenido como objetivo el desarrollo de estructuras protésicas o motrices que ayudan a realizar movimientos naturales que el paciente no puede llevar a cabo.

#### **3.2.1 Robot exoesquelético de apoyo al hombro**

Este proyecto, desarrollado por las universidades de Saga y Nagoya en Japón [4], lleva a cabo el diseño de una estructura exoesquelética destinada a realizar el movimiento completo del hombro para personas que tengan movilidad reducida por motivos de la edad o por enfermedad. El principal objetivo del proyecto es el uso del prototipo como ayudante en la rehabilitación de los pacientes con los problemas comentados anteriormente. Para ello, el paciente se sitúa de pie en una plataforma que le

permite meter el brazo en la estructura y el robot le ayudará a realizar los movimientos correspondientes del hombro. La figura 16 muestra una prueba de este prototipo.

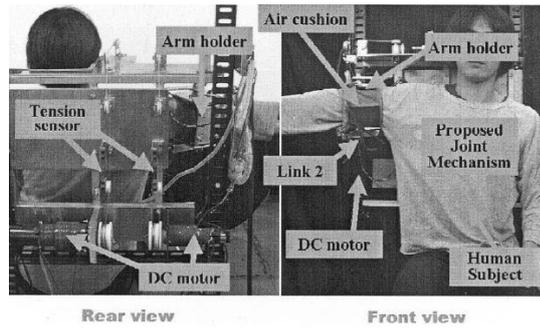


Figura 16: Imagen del exoesqueleto y modo de uso del brazo desarrollado.

Tal como se comenta en el apartado 2.2, el hombro tiene unos rangos de movimiento muy amplios, estos rangos de movimiento se pueden observar en la figura 17.

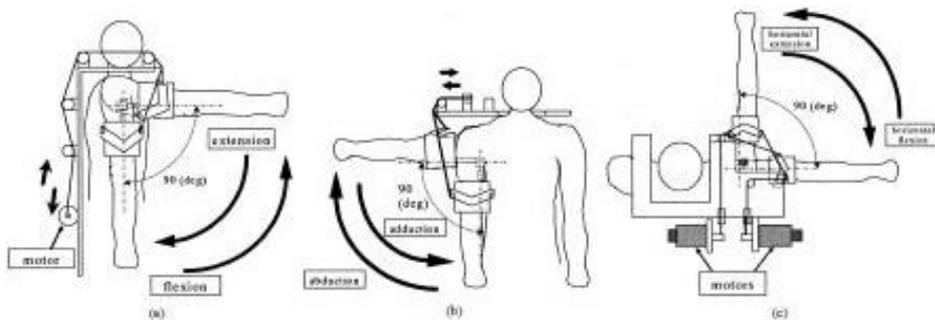
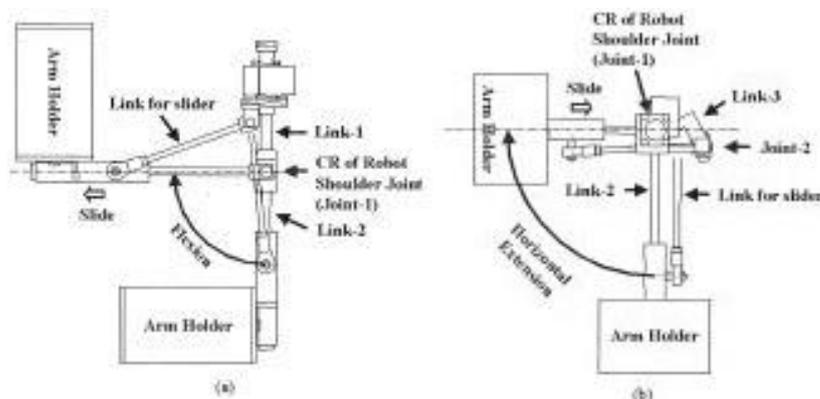


Figura 17: Rangos de movimiento del exoesqueleto.

Aunque la articulación del hombro es una articulación esférica, en este proyecto los autores crean un mecanismo de movimiento con dos ejes al ser mucho más asequible que una articulación esférica. Tal como se puede comprobar en la figura 18 (a y b), se llevan a cabo los movimientos variando el centro de rotación (CR) en uno de los movimientos.





En la tabla 2 se puede observar el rango de movimiento alcanzado por el diseño realizado en el citado trabajo.

Tabla 2: Rango de movimiento alcanzado por el exoesqueleto

Tipos de movimiento	Rango anatómico			Rango de ExoRob
	Fuente 1	Fuente 2	Fuente 3	
<b>Articulación del codo</b>				
<b>Rotación interna</b>	90°	90°	90	-85°
<b>Rotación externa</b>	90°	90°	60-90°	+45°
<b>Articulación del codo</b>				
<b>Flexión</b>	140°	140	145°	120°
<b>Extensión</b>	0°	0°	5-15°	0°

### 3.3 Brazos antropomórficos funcionales

En este apartado se estudiarán diferentes proyectos que han desarrollado brazos mecánicos respetando las dimensiones y limitaciones de un brazo humano y han conseguido un rango de movimiento con gran similitud al de un brazo real. Estos proyectos tienen como motivación el reto de construir un brazo funcional antropomórfico, compartiendo así finalidad con el proyecto actualmente desarrollado.

#### 3.3.1 Articulación del hombro basada en tendones

El principal objetivo de este artículo [6] es la construcción de una articulación del hombro lo más fidedigna posible. Los autores se basan en la morfología anatómica de un brazo humano para recrear un modelo de articulación esférico que permitirá realizar los mismos movimientos de los que dispondría un hombro humano funcional.

Toman como referencia que la cabeza del húmero es una esfera que encaja perfectamente en el hueco creado entre la clavícula y el omoplato, creando una unión muy sólida y con mucha capacidad de recorrido. A partir de esto diseñan un sistema en el cual los músculos responsables del movimiento serán representados por tendones que serán accionados por motores.

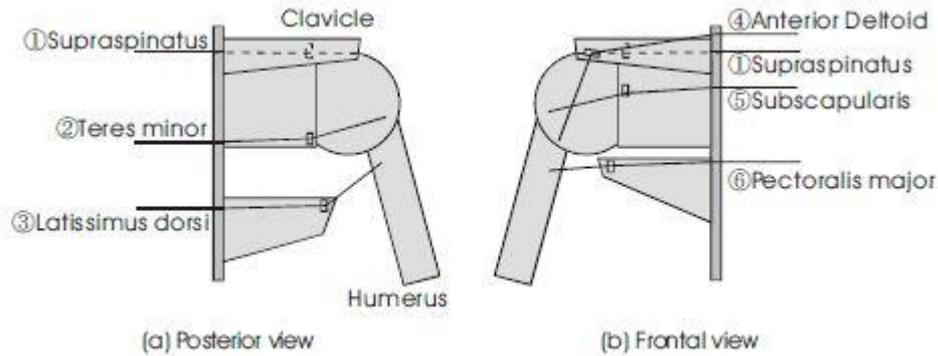


Figura 20: Modelo de la articulación basado en un hombro humano

En la figura 20 se puede observar la correspondencia entre los diferentes músculos y tendones del hombro y los anclajes y cuerdas que se usan para llevar a cabo los movimientos del sistema. En la figura 21 se puede observar el sistema completo.

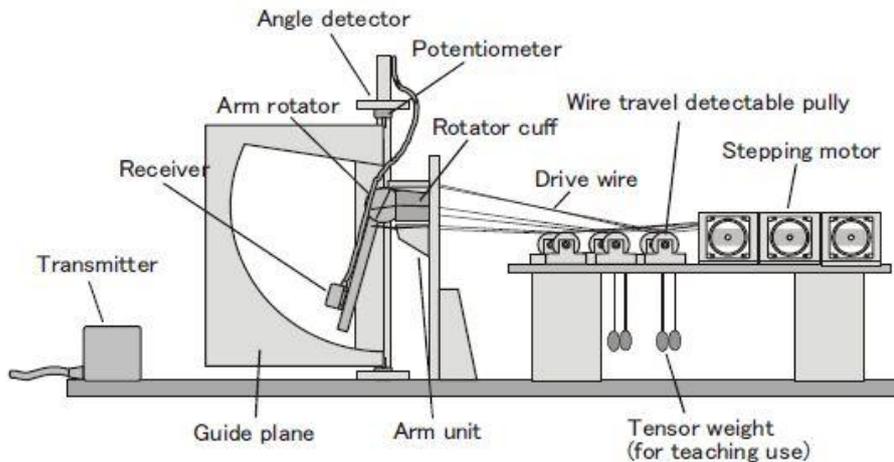


Figura 21: Esquema del sistema completo de poleas

Se puede observar también que tiene un receptor en la punta del bloque que semeja ser el húmero, esto permite al sistema monitorizar los movimientos de cables necesarios para alcanzar una posición del espacio. Gracias al plano guía se controla el ángulo en todo momento y se pueden obtener las coordenadas de posición.

En el artículo se describe que el proyecto está principalmente construido con madera, de manera que el soporte aguantara la mayoría de los movimientos a realizar durante las pruebas de los posibles gestos disponibles por el brazo. En cuanto a la articulación, tuvieron algunos aspectos en cuenta de cara a elegir el material ya que tenían que minimizar el rozamiento entre el soporte y la esfera que hace de cabeza de húmero. Para paliar los posibles efectos del rozamiento, escogieron como material UHMWPE (*Ultra High Molecular Weight Polyethylene*). Tal como describen en el artículo, la elección de este material se debe a que en el cuerpo humano, las articulaciones sinoviales tienen una fricción prácticamente nula, y con ese material querían poder simular ese grado de fricción.

El control del sistema se lleva a cabo gracias a una red neuronal, que gracias a su capacidad de aprendizaje, pudo procesar los datos obtenidos en las pruebas realizadas y aprender a controlar la posición midiendo la tensión de los cables.

Con un sistema de feedback el aprendizaje se simplifica y permite al complejo llevar a cabo una tarea que requería precisión como es echar azúcar a una taza, que fue la prueba que se realizó al final el proyecto.

### 3.3.2 Sistema antropomórfico para brazos robóticos musculoesqueléticos

Este sistema es el proyecto más completo analizado y el que ha logrado construir un brazo totalmente funcional con un rango de movimiento muy cercano al del brazo humano así como su capacidad de realizar tareas con alta carga cinética.

El proyecto [7] presenta varias diferencias con respecto a los anteriores proyectos que le dan gran estabilidad y robustez al complejo. El brazo presenta también omoplato y esternón, lo que le da un total de tres articulaciones más a implementar y sus correspondientes grados de libertad. En la figura 22 se pueden observar las articulaciones desarrolladas por este proyecto, como añadido a los proyectos anteriores, incluyen un base de soporte para el hombro más completa.

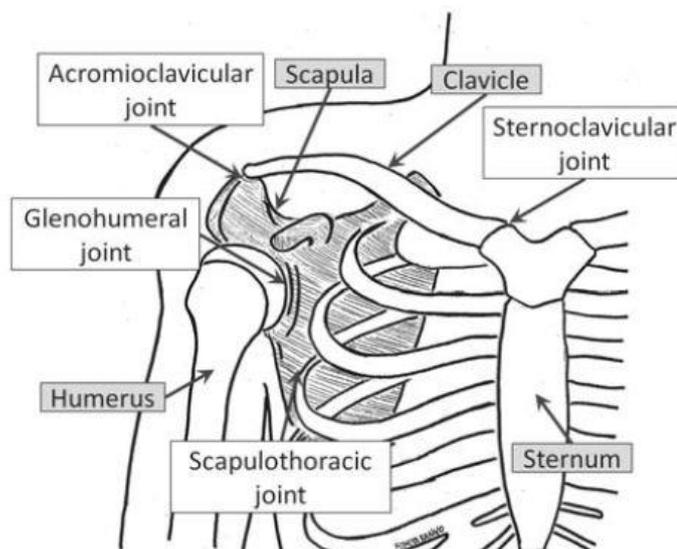


Figura 22: Ilustración del miembro superior de un ser humano (Los letreros grises indican los huesos y los letreros blancos muestran las articulaciones)

Tal como sugieren los autores, al introducir las nuevas articulaciones en el sistema, éste obtiene mucha más rigidez y nueva capacidad de movimiento. Pero conlleva una gran dificultad de cara a implementar estas articulaciones ya que presentan cinco nuevos GDLs a desarrollar. Los autores simplifican el modelo evitando construir la articulación escapulotorácica ya que sólo ofrecía un GDL y su implementación resultaría muy compleja. Se pueden observar la totalidad de los grados de libertad presentes en el sistema final en la figura 23.

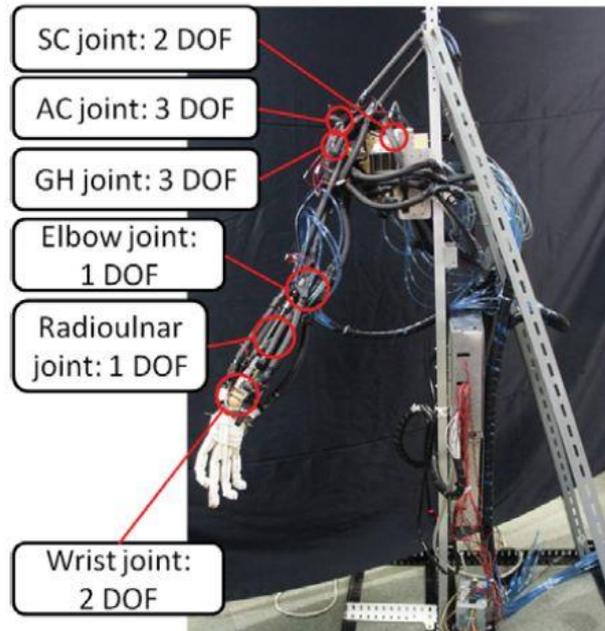


Figura 23: Sistema funcional completo y todos su grados de libertad

Lo que hace este brazo único es el diseño realizado para desarrollar la articulación del hombro. Al ser una articulación esférica y no estar sujeta desde la parte trasera, el anillo de sujeción es algo más alto que la mitad de la esfera de la articulación y tiene cuatro protuberancias que ayudan a la sujeción del hombro. Estos cuatro salientes podrían provocar que a la hora de realizar ciertos movimientos, hubiera problemas de colisión, pero los autores desarrollaron una particularidad que les permite girar la sujeción con los cuatro salientes al prever una colisión. Esto se puede observar en la figura 24.

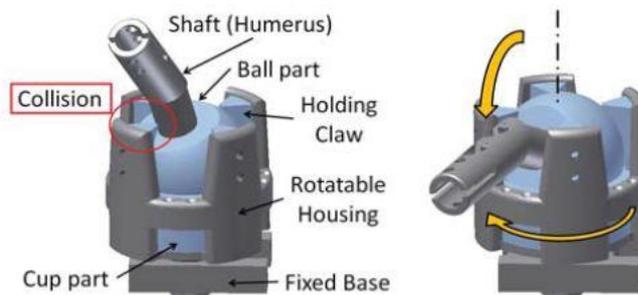


Figura 24: Sistema anticollisión del hombro

Otra de las grandes bazas de este proyecto es el uso de músculos neumáticos. Al utilizar esta tecnología, le permite al brazo tener un movimiento más natural y acorde con el brazo humano.

El final del proyecto se puede comprobar que el brazo tiene un rango de movimiento muy amplio, mucho mayor de los que se han explicado anteriormente. El sistema es capaz de lanzar una pelota manteniendo una misma cadencia durante todo el recorrido y realizando un movimiento muy amplio, tal como se puede observar en la figura 25.

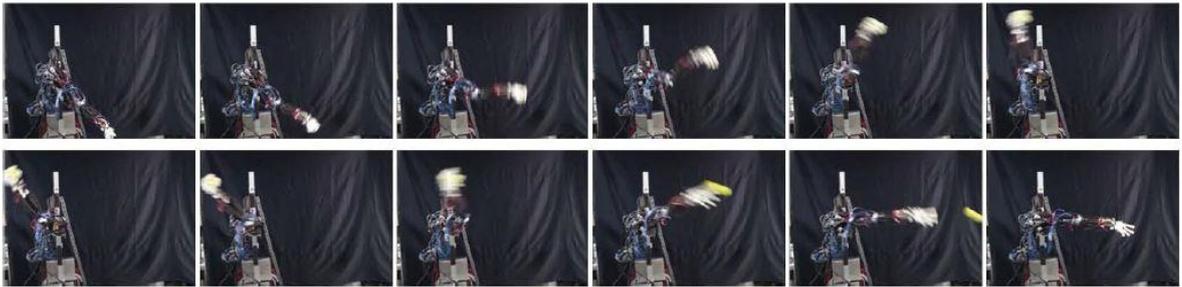


Figura 25: Secuencia de fotogramas del lanzamiento de una pelota

En este proyecto los materiales que se usan en el desarrollo del proyecto no se detallan, pero a través de las fotos presentes en el artículo se pueden intuir ciertos materiales. Para el soporte y los componentes que simulan los huesos, parece ser que se usa metal con alto grado de resistencia, visto que soporta mucha energía cinética a lo largo del movimiento del lanzamiento de la pelota. Otra parte importante del proyecto, y que le confiere una característica distintiva, son los músculos neumáticos. Estos músculos suelen estar fabricados en caucho y reforzados con fibra de vidrio.

El control del brazo se lleva a cabo a través de PAMs (Pluggable Authentication Module), sensores de presión interna y de presión axial en los músculos, lo que permite manejar el brazo con precisión.

### **3.4 Sistemas con fines educativos**

En este apartado se estudian algunos casos de brazos o sistemas que tiene como finalidad la muestra de comportamiento y componentes de cara a la enseñanza. Dichos sistemas permiten al usuario ver sus partes internas o aprender a diseñar trayectorias de movimiento.

#### **3.4.1 Brazo robótico de 6GDL y software de control**

Este trabajo [8] describe el diseño y desarrollo de un brazo robótico (PC-ROBOARM) y su software de gestión (SMART ARM) con 6 GDLs, que se modela en tres ejes, en la que en cada unión tiene un servomotor correspondiente.

Se propone la idea de usar software de diseño específico para un brazo robótico (SMART ARM) con el objetivo de diseñar un brazo robótico virtual y controlar un brazo robótico real. El PC-ROBOARM es un brazo robótico real desarrollado para probar los resultados de la simulación. Se puede ver en la figura 26 la relación entre el diseño real terminado y el diseño virtual que lo controla.

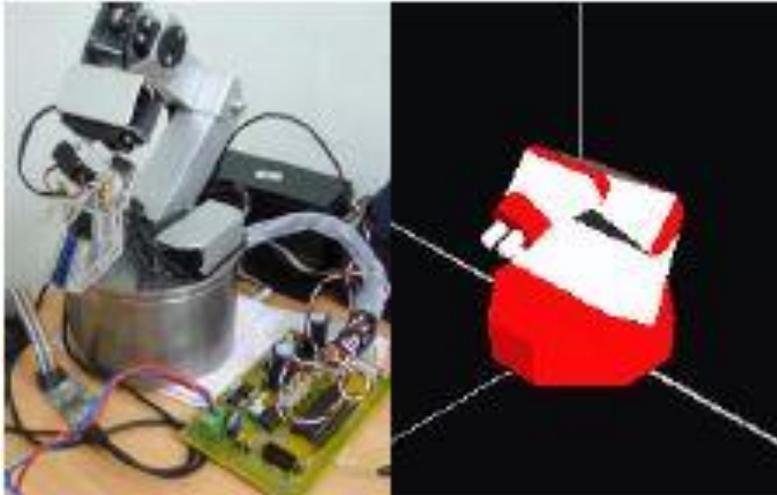


Figura 26: Diseño real (dcha) y diseño virtual de control (izqda)

El software SMART ARM facilita enormemente el diseño, desarrollo y solución de control del brazo robótico. Se trata de un proceso asistido por ordenador tanto para el diseño como la solución de la parte de control de un brazo robótico 6-GDL. Dispone además de una interfaz de uso de fácil manejo que permite al usuario modelar y diseñar un brazo robótico virtual como paso previo a construir uno real, tal como se observa en la figura 27.

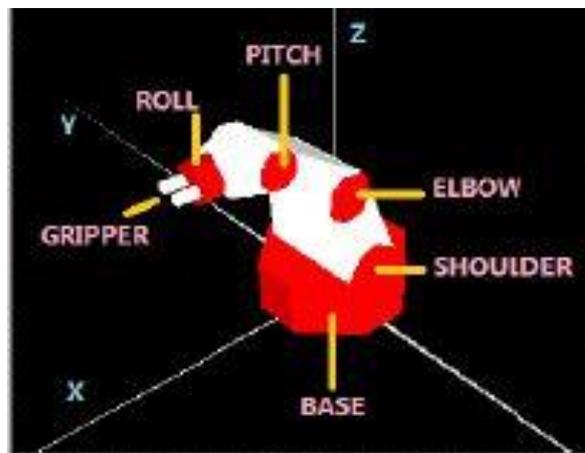


Figura 27: Diseño virtual de un brazo con 6 GDL

De esta manera, desde el primer momento, el usuario puede estimar el tamaño más adecuado del brazo robótico real. Así de esta manera poder minimizar los costes de construcción y definir el escenario práctico más adecuado. Con el objetivo de ayudar a los diseñadores a obtener los parámetros robóticos característicos del brazo, en la aplicación se llevan a cabo los complejos cálculos de cinemática directa e inversa.

Adicionalmente, una vez el brazo robótico se ha construido, el usuario puede reutilizar el software para controlar el brazo robótico real, sin más trabajo adicional y pérdida de tiempo correspondiente, y sin la necesidad de tener que construir un nuevo sistema de control de la solución. A través de la funcionalidad de simulación en la interfaz gráfica de usuario, el software facilita enormemente la visualización de la planificación de la trayectoria del brazo robótico.

El diseño del brazo robótico 6-DOF es un brazo articulado basado en PUMA (*Programmable Universal Machine for Assembly*).

Tanto el movimiento punto a punto como el movimiento continuo se prueban ambos en simulación como con controles reales.

Con este proyecto los autores desarrollan una herramienta profesional y didáctica que permite abordar la construcción de un brazo robótico con 6 GDL. A través del diseño virtual, se pueden observar con detalle las limitaciones físicas que puede presentar el sistema en sus movimientos. Una vez validado el diseño y realizado el montaje, el propio software permite controlar el brazo y estudiar los retos que presenta la cinemática inversa en este brazo.

Como posibles metas futuras, los autores presentan la posibilidad de ampliar el control de varios brazos robóticos a través de un único software de SMART ARM.

### **3.4.2 Desarrollo de un brazo mecánico realista de siete grados de libertad**

El proyecto [9] de diseño está dirigido a modificar un prototipo de brazo robótico previo [10]. Las modificaciones al prototipo en cuestión incluyen añadir tres nuevos GDLs, una pinza sensible a la presión y una mejora a la estabilidad general del brazo.

El nuevo diseño, mostrado en la figura 28, tiene en cuenta todas las especificaciones necesarias por lo que se va a desarrollar un prototipo de segunda generación desde su concepción. La construcción del nuevo prototipo incluye fabricación, programación y pruebas. Hasta su finalización, el nuevo prototipo incluirá siete GDLs y será capaz de coger tanto una taza de plástico como una taza de cerámica.

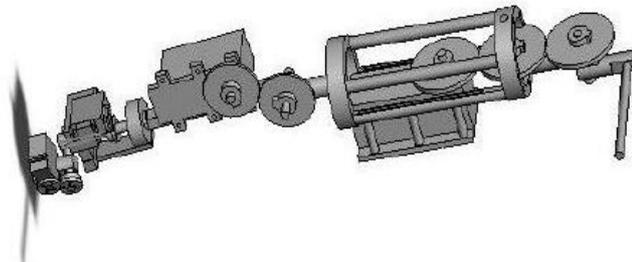


Figura 28: Diseño del brazo robótico previo.

Los tres nuevos GDLs son el giro de la parte superior del brazo, y el giro y movimiento de la muñeca, algunos de ellos observables en la figura 29.

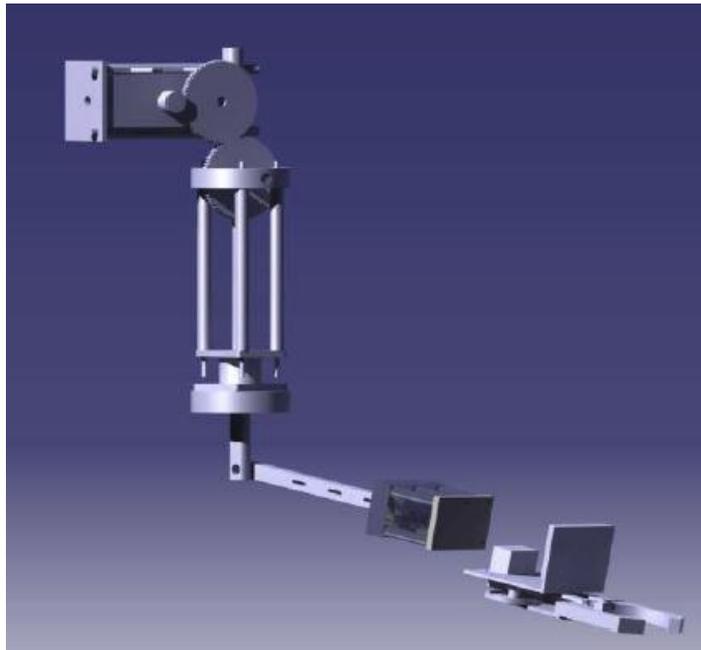


Figura 29: Nuevo diseño revisado del brazo robotico

También se va a incorporar al nuevo prototipo una pinza sensible a la presión, tal como se ve en la figura 30. La pinza tiene dos dedos para coger objetos, y un sensor de presión conectado a cada uno de los dedos de la pinza, para que el brazo pueda distinguir entre agarrar una taza de plástico frente a una de cerámica.

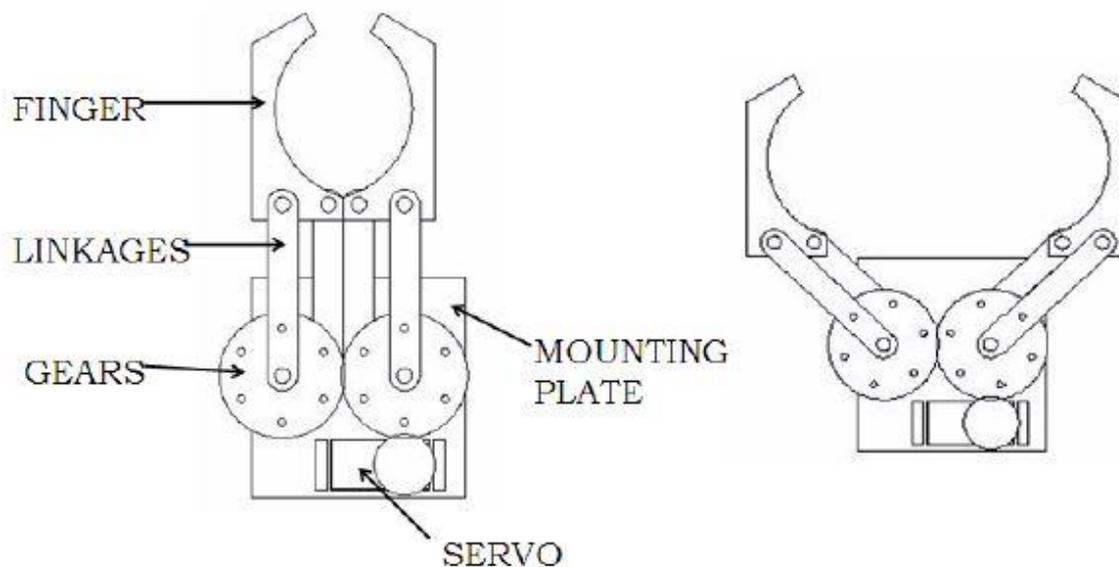


Figura 30: Esquema de la mano implantada en el brazo

Para reducir movimientos no deseados y vibraciones del brazo, se van a añadir unas piezas estabilizadoras a las articulaciones del brazo, así como soportes adicionales a la base del mismo. Se puede observar el montaje del hombro en la figura 31.

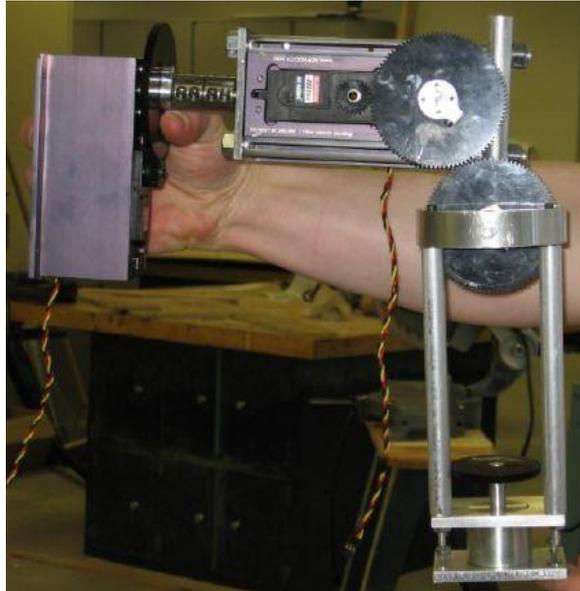


Figura 31: Detalle del hombro montado

Los autores plantean la posibilidad de añadir un control remoto al brazo de manera que sienta precedente de cara a poder enfocar el diseño a la ayuda industrial o médica.

# 4

## Diseño

---

Siendo el proyecto la construcción de un brazo antropomórfico, a la hora de realizar el diseño del brazo, se ha intentado respetar el diseño humano. Este apartado abordará los diseños a través de programas de CAD que han permitido evaluar la viabilidad de los montajes, así como los esquemas de dichos diseños, lo que servirá de ayuda en la comprobación del correcto montaje del sistema.

Desde el principio, se basó el diseño del brazo partiendo de la idea de respetar lo más fielmente posible que el brazo debía tener unas proporciones humanas de cara a poder continuar con la línea empezada años atrás con la construcción de la mano robótica. A partir de esta resolución, se ideó un primer esquema que permitiera realizar todos los movimientos que un brazo humano, todos ellos listados en el segundocapítulo de la memoria (Fundamentos teóricos).

En la figura 32, se puede observar un esquema del sistema completo tal como se ha ideado para su total funcionalidad. Las siguientes secciones detallan cómo se ha diseñado cada una de las partes del brazo.

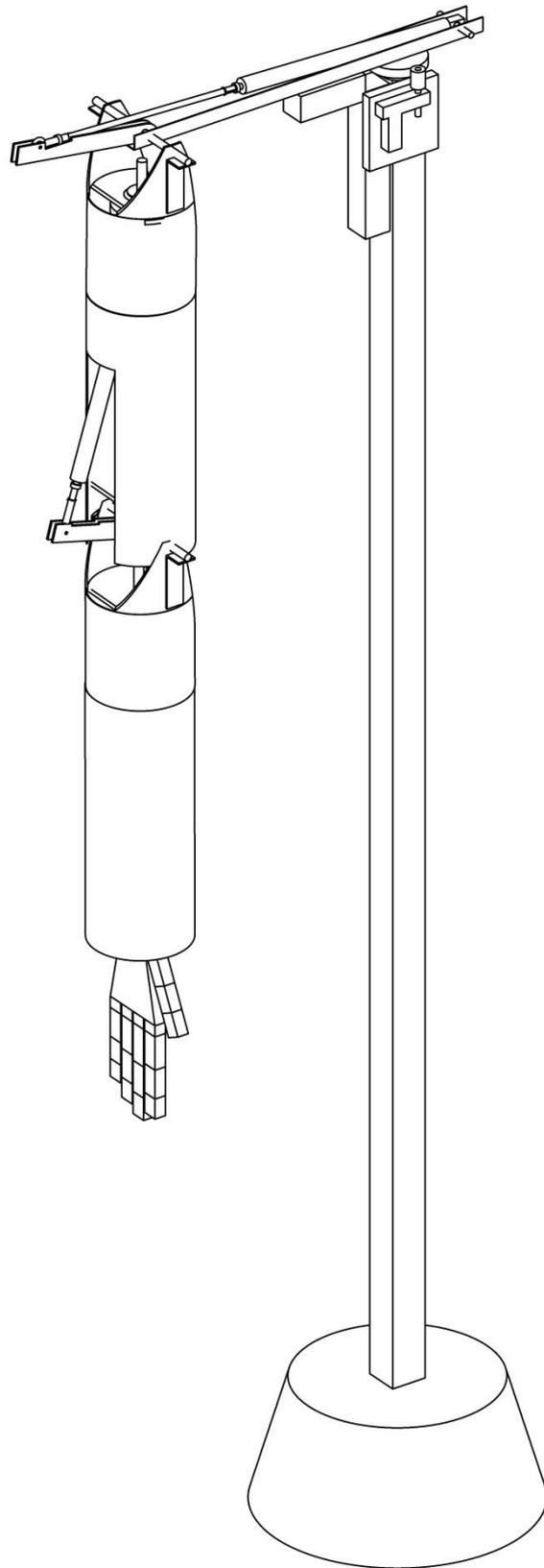


Figura 32: Esquema del sistema completo

## 4.1 Hombro

Sabiendo que el hombro es una articulación esférica, tal como se ha explicado en la sección de 2.2, se dividen sus GDLs para poder evaluar cada uno en solitario y posteriormente volver a considerarlos conjuntamente. Esto se debe a que no se consideró disponer de una articulación esférica ya que supondría aumentar de manera drástica la complejidad del proyecto así como los costes del mismo. Se recurre a un diseño basado en dos ejes y una rotación que permiten realizar cualquier movimiento que podría realizar una articulación esférica, solo que requiere más movimientos para alcanzar el mismo punto.

Puesto que el proyecto está basado en la mecánica y neumática, al usar tanto pistones neumáticos activados por un compresor de aire, como motores mecánicos que mueven engranajes, para realizar los movimientos, se ha comenzado el diseño por crear los GDLs de las articulaciones a través de dichos motores, pistones y sus diferentes posibles posiciones.

Tal como se puede observar en la figura 33, el hombro consta de dos ejes, uno que le permite realizar un movimiento vertical y otro que le permite llevar a cabo una rotación horizontal. Debido a que no se ha diseñado el hombro como una articulación esférica, los ejes de los que dispone la articulación, se han separado. Esto se debe a que no se podía realizar ambos giros desde un mismo punto por falta de espacio a la hora de colocar los actuadores de los movimientos.

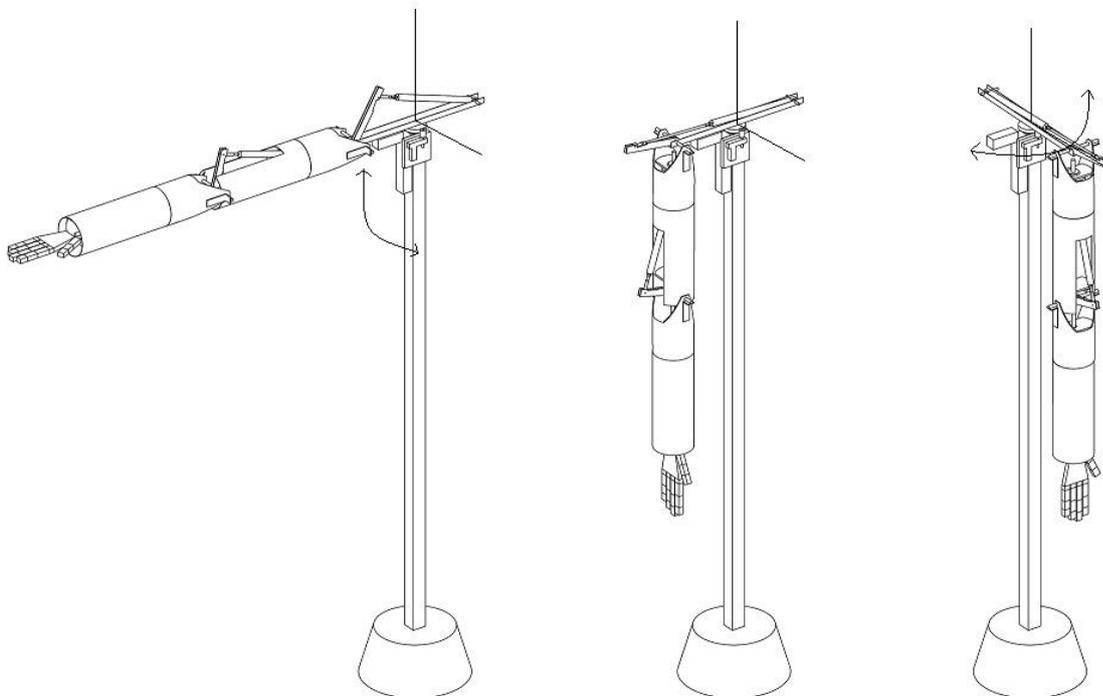
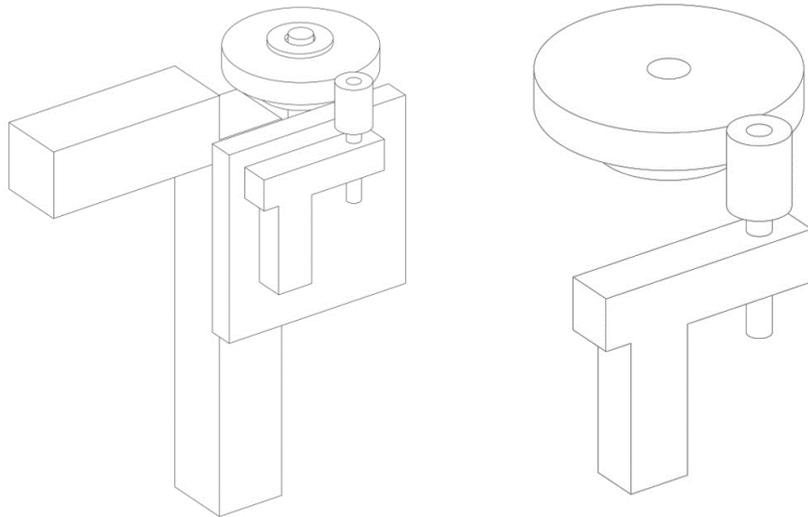


Figura 33: Posiciones que muestran los ejes disponibles en la articulación del hombro.

El movimiento horizontal se realiza gracias a un motor colocado en el lateral de la barra metálica que hace de soporte de toda la estructura, desde donde hace rotar un engranaje colocado sobre el soporte metálico. El centro de rotación del engranaje es una pequeña varilla, y éste reposa sobre un rodamiento de cilindros que reduce casi completamente la fricción que produciría el giro del engranaje al rozar con metal de la barra que hace de soporte.



a) Conjunto completo de elementos de rotación

b) Motor y engranaje

Figura 34: Conjunto de elementos de la rotación horizontal del hombro.

En la figura 34.a, se observa la situación del motor y del engranaje respecto de la barra de soporte así como del pistón comparándola con la figura 32. En la figura 34.b, se muestra el eje sobre el cual rota el engranaje y la sujeción que le permite al motor acoplarse a la barra de soporte y efectuar la rotación lo más eficientemente posible.

El segundo eje, el que permite realizar el movimiento de abducción-aducción, consta de un pistón neumático que al contraerse sube la posición del brazo hasta los  $90^\circ$  desde la posición vertical de  $0^\circ$ . El pistón reposa encima de esta estructura, pero sin llegar a efectuar contacto, ya que supondría un problema grave de fricción al desarrollar el movimiento horizontal. Para la correcta colocación del pistón que pueda efectuar el movimiento deseado, se hicieron cálculos previos que ayudaron a determinar la posición que mejor convendría al sistema, siguiendo el esquema de la figura 35.

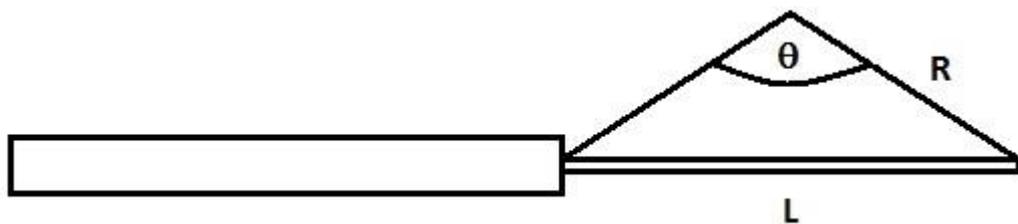


Figura 35: Cálculo del radio de giro y colocación del pistón.

Con la formula (1) se puede calcular el radio que se necesita teniendo una longitud de varilla fija y eligiendo el ángulo de giro que quiere alcanzar.

$$L = 2R \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (1)$$

En este caso, se tenía una varilla de 20cm y se quería llegar a un ángulo de 90°, así pues la fórmula (2) da un radio de giro de:

$$R = \frac{L}{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} = 14,14 \text{ cm} \quad (2)$$

En la figura 36 se observa con más detalle los diferentes componentes que forman la articulación del hombro.

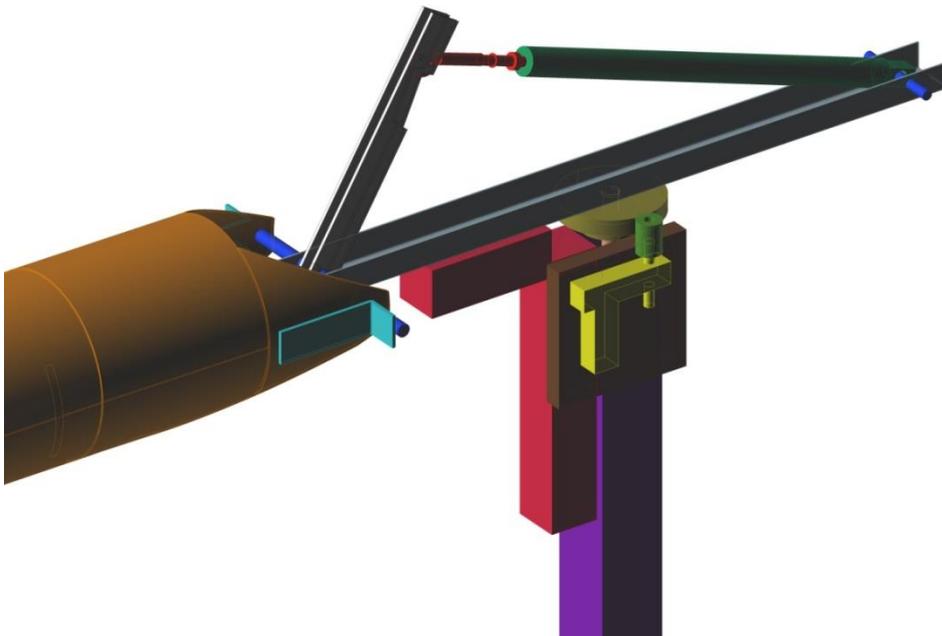


Figura 36: Detalle de la articulación del hombro en 3D

En la figura 36 se observa una pieza intermedia que une el pistón de doble acción y el brazo. Esta pieza imita el saliente que muestra el brazo de retroexcavadora, que tiene el mismo funcionamiento que se quiere conseguir en este proyecto.

## 4.2 Codo

El codo es la articulación más sencilla recreada en este proyecto. Dicha articulación presenta únicamente un GDL. Este movimiento se realiza a través de un pistón neumático de doble acción que se contrae y se extiende realizando la flexión y extensión del codo.

Tal como se comentó en la sección anterior, para diseñar esta articulación se recurre al sistema que presentan las retroexcavadoras. Se crea una pieza intermedia que permite ampliar el ángulo de giro del movimiento.

Para la creación de esta articulación se tuvieron en cuenta varios diseños ya que el procedimiento no era claro a la hora de instalar el pistón. En un primer lugar se ideó la articulación con el pistón en el exterior del cuerpo del brazo. Este primer diseño presentaba algunos problemas puesto que mermaba mucho el movimiento a partir de cierto ángulo de giro. El segundo diseño, el definitivo y que más adelante se refinó algo más, consistía en colocar el pistón en el interior del tubo que hace de cuerpo del brazo de forma que cuando estuviera completamente estirado, éste presentara una posición paralela a la varilla interna que tiene función de eje rotacional. Dichas situaciones del segundo diseño se presentan en la figura 37.

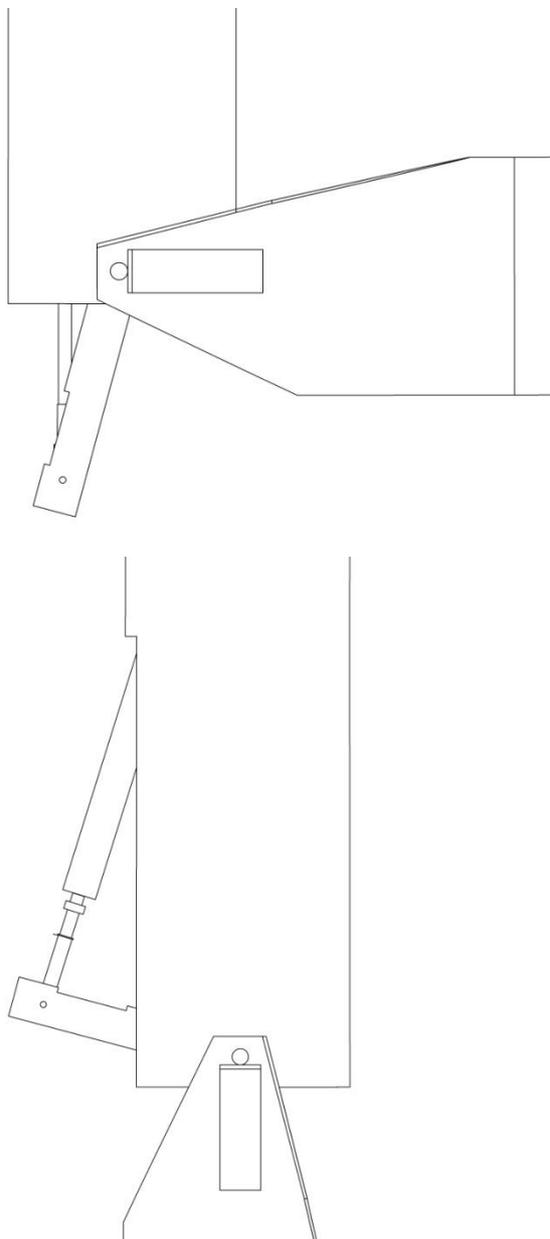


Figura 37: Posición del pistón del codo extendido y recogido

### 4.3 Muñeca

Esta articulación presenta dos GDLs, que tal como muestra la figura 10 son la flexión/extensión y la desviación cubital/radial. A diferencia de la muñeca real, para poder diseñar esta articulación, se ha tenido que separar los ejes, tal como se hizo para el hombro. En la articulación humana, ambos movimientos se hacen desde la unión de múltiples huesos presentes en la muñeca. En cambio se transponen dos servomotores que irán unidos por una estructura que los alinea de forma que con el movimiento de ambos se pueda recrear el rango de una muñeca real. La estructura anteriormente descrita se muestra en la figura 38.

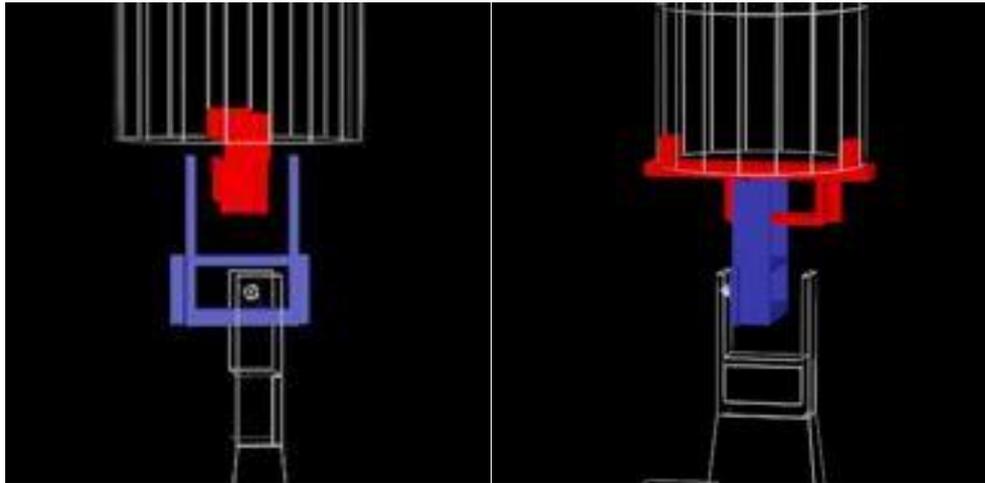


Figura 38: Vistas en 3D de la estructura de la muñeca

### 4.4 Brazo y antebrazo

Cada uno de estos dos tramos del brazo presenta un único grado de libertad, tal como se comentó en la sección 2.5, que se lleva a cabo a través de una rotación longitudinal. En las siguientes imágenes se puede observar la estructura que forma el esqueleto del brazo. Tanto el humero como el antebrazo presentan un eje y cuatro piezas transversales que le otorgan un alto grado de resistencia y estabilidad.

Este primer diseño se basaba principalmente en la incorporación de dos tubos que soportarían las estructuras del humero y del antebrazo. En un principio, se pensó que los motores que realizarían las rotaciones longitudinales del humero y del antebrazo podrían estar situados en el exterior del brazo, tal como se puede observar en la figura 19.a y 19.c, que muestran un motor externo al tubo que le permite rotar sobre sí mismo. Más tarde se desechó esta opción puesto que sería muy complicado encontrar e instalar un engranaje exterior al tubo.

El siguiente diseño que se consideró para los motores de rotación, fue el diseño actual, la instalación interna de los mismos.

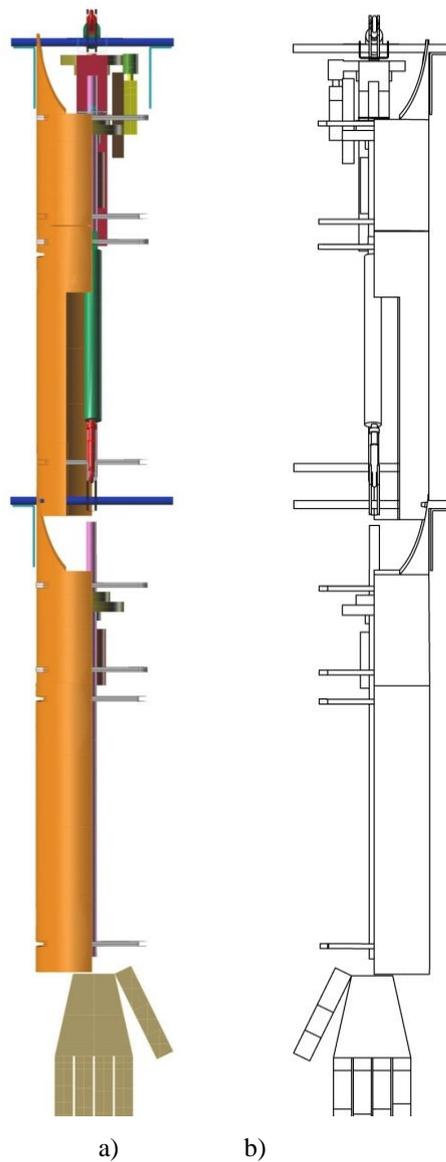


Figura 39: Corte longitudinal del sistema

En la figura 39 se puede observar los dos motores que permiten llevar a cabo la rotación longitudinal del húmero y del hombro. En la figura 39.b, se observa un esquema del brazo con un corte longitudinal que permite observar los componentes internos que le dan rigidez al brazo. Estos componentes se observan mejor en la figura 40.

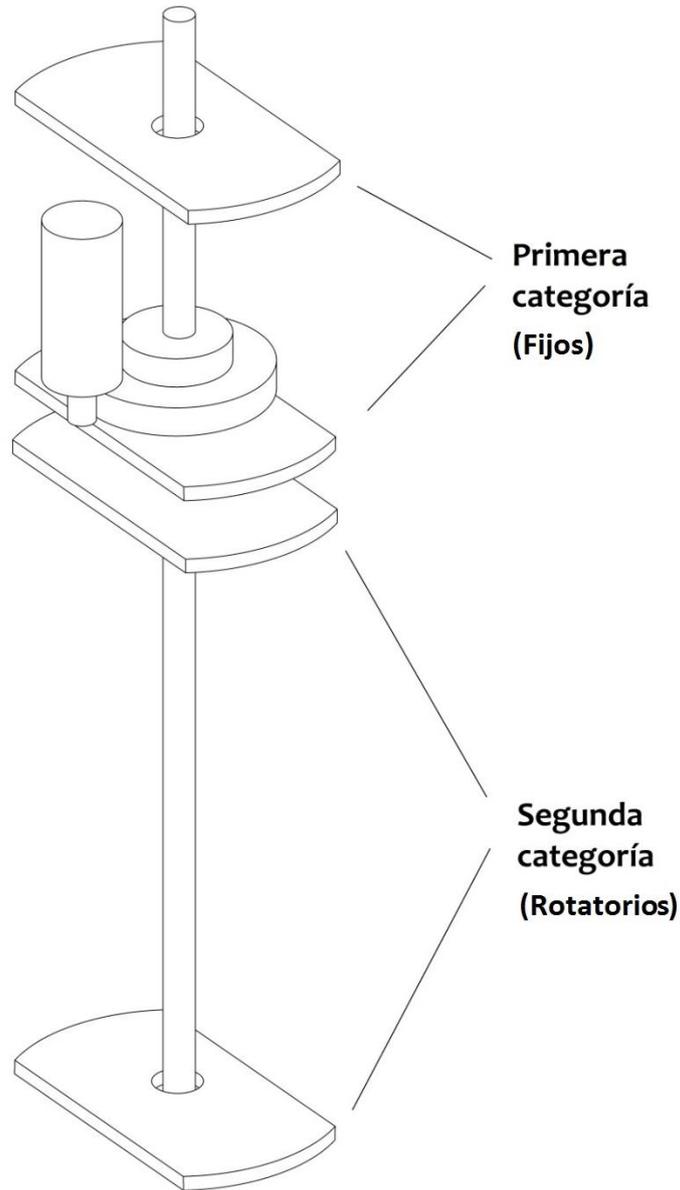


Figura 40: Detalle del motor y los refuerzos transversales del cuerpo

Esta disposición es la misma para los dos tramos del brazo que presentan rotación longitudinal, el brazo y el antebrazo. Los refuerzos están separados en dos bloques, el primero son los refuerzos que unen la varilla y el tubo, y el segundo bloque son los refuerzos que están únicamente unidos al tubo y permiten a la varilla rotar a través de ellos. De esta forma, al estar el engranaje unido por tornillos a la varilla, toda la rotación generada por el motor, se transmite al engranaje y desde ésta a la varilla. Al estar la varilla unida a los refuerzos de segunda categoría, la parte inferior del segmento puede girar a la par que el engranaje, que es el ritmo impuesto por el motor. Esto describe un movimiento parecido al que presentan el húmero y el antebrazo humanos.

Para ambos tramos del brazo, las terminaciones del tubo que forma el cuerpo del brazo presentan diseños en los que se han recortado algunos lados con el fin de permitir la realización del movimiento completo requerido. Esto se observa con más detalle en la figura 41.

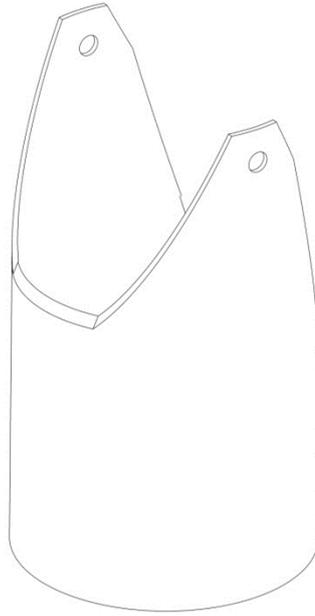


Figura 41: Terminaciones de las partes centrales del brazo

## 4.5 Resumen

Las cuatro figuras (42-45) muestran la analogía entre el diseño del brazo, que incorpora la estructura de soporte, así como los actuadores, con los huesos y los músculos presentes en el brazo humano.

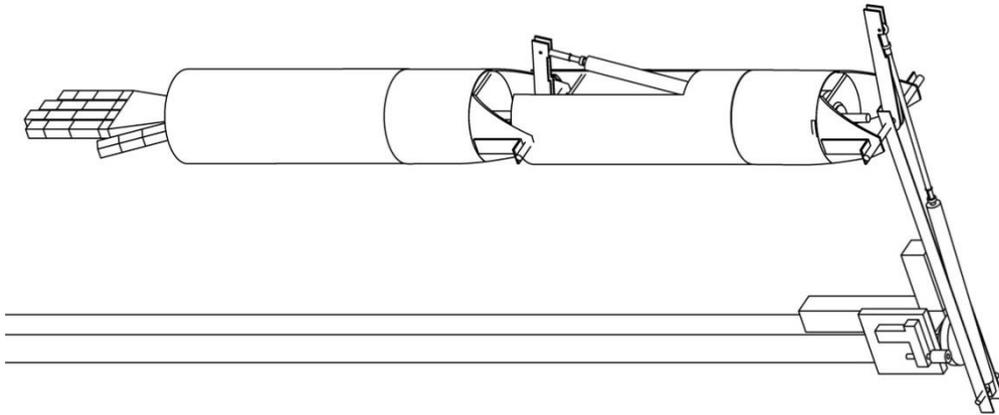


Figura 42: Diseño CAD completo del brazo

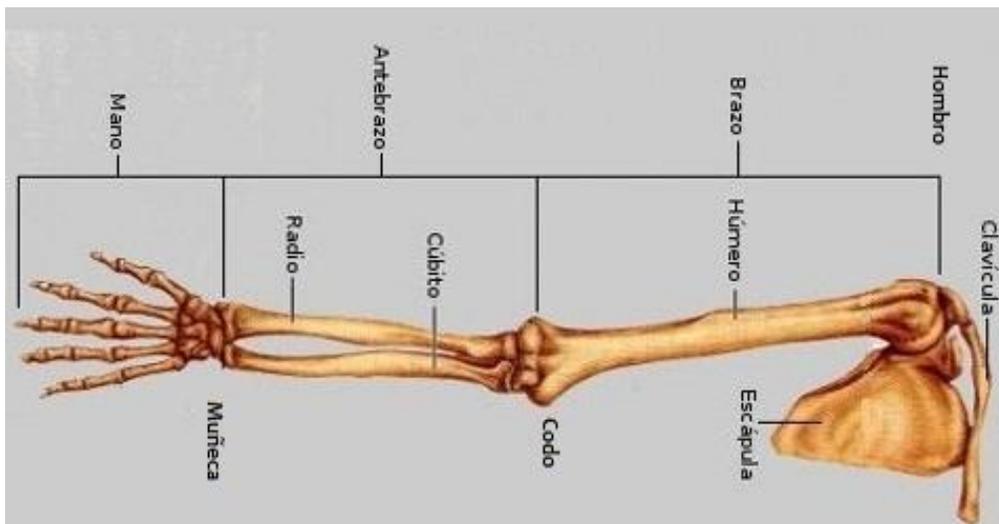


Figura 43: Esqueleto del brazo

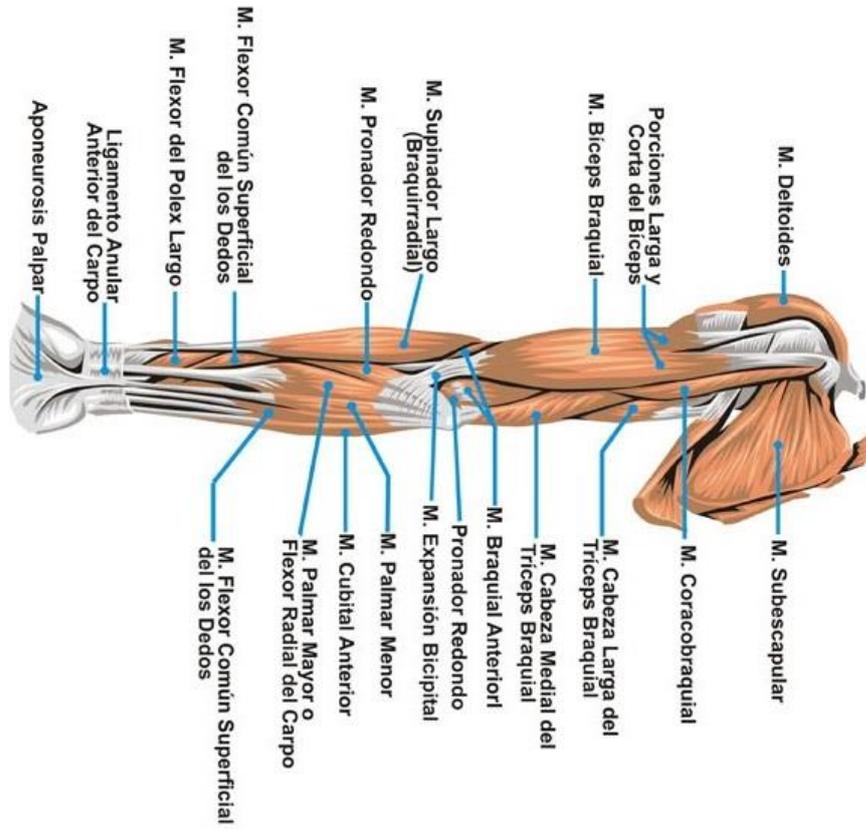


Figura 44: Vista anterior de los músculos del brazo

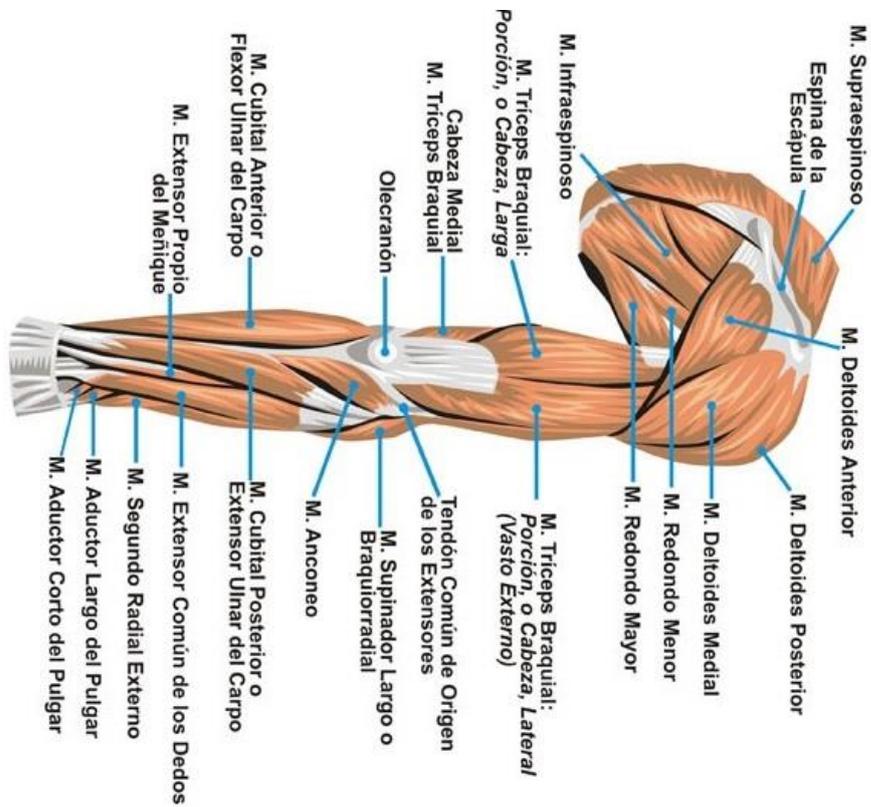


Figura 45: Vista posterior de los músculos del brazo



# 5

## Montaje

---

Esta sección presentará las soluciones tomadas para llevar a cabo los diseños expuestos en la sección anterior y los pasos que se siguieron para poder llegar a un sistema funcional. Se seguirá la misma estructura que en la cuarta sección, de manera que se pueda comparar más fácilmente los pasos seguidos.

### 5.1 Hombro

En la construcción del hombro, la principal preocupación es el desarrollo de los ejes que va a permitir a la articulación moverse lo más eficientemente posible. Tal como se presenta en la sección 4.1, los ejes están implementados a través de un motor situado en el lateral de la barra de soporte y un pistón neumático anclado a una barra transversal a la anteriormente mencionada barra de soporte.

#### 5.1.1 Flexión – Extensión

El primer GDL tratado es el movimiento de la flexión-extensión como se indicó en la sección 4.1, se ha resuelto mediante un motor DC. Al motor con reducción, mostrado en la figura 46, con un torque de 2 kpm, se le añade un engranaje de latón del mismo módulo que el engranaje de acero que sirve de base en la rotación horizontal, tal como se ve en la figura 47.

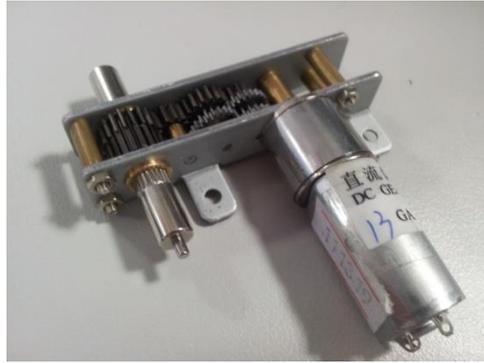


Figura 46: Motor con reductora utilizado en la articulación del hombro

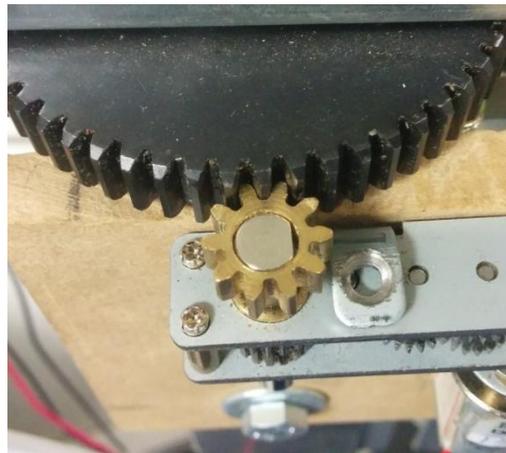


Figura 47: Engranajes de latón y de acero con el mismo módulo para el hombro

Tras tener un motor que es capaz de actuar sobre el engranaje del eje de la rotación horizontal, se acopla el motor a una base de madera DM (Densidad Media) y esta base se acopla a su vez a la barra metálica. De esta manera, al estar el motor unido a la base, la rotación se efectúa transmitiendo toda la fuerza hacia el engranaje de acero. Esto se puede observar en la figura 48.

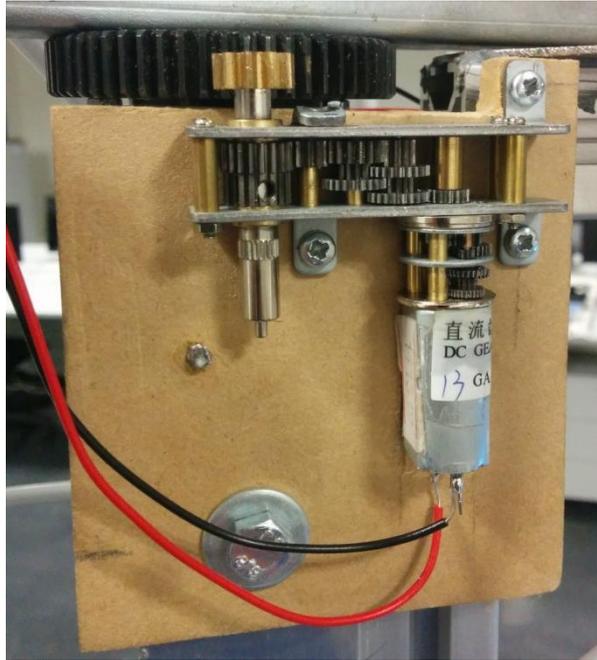


Figura 48: Motor con reductora fijado a una base de madera DM y a la barra metálica

Este es el actuador que permite al hombro realizar la rotación horizontal. Para ello se ha fijado el eje de la rotación en el centro de la barra metálica. El eje, a su vez, pasa por el centro del engranaje de acero.

En el extremo superior de la barra metálica se ha instalado una estructura que permite insertar una varilla de 1cm de diámetro, que hace de eje, tal como se ve en la figura 49.

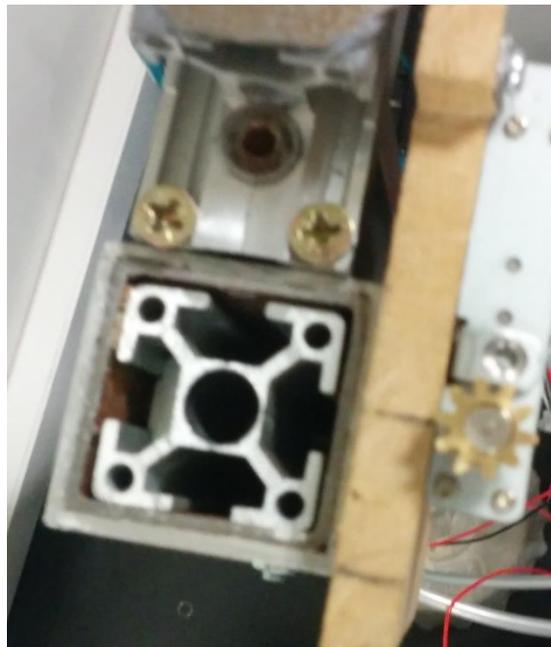


Figura 49: Estructura insertada en la barra metálica como sujeción del eje de rotación

Sobre el extremo de la barra metálica se colocan dos arandelas y un rodamiento de manera que el rozamiento se minimiza. Esto se puede ver en la figura 50.



Figura 50: Rodamiento en el eje de rotación horizontal

Además de añadir un rodamiento, se instala una placa plana con un arco de  $90^\circ$ , de manera que la barra que soporta el pistón se desplace sobre una bola de acero, y ésta sobre la placa metálica como si de un rodamiento en arco se tratara. El conjunto completo de componentes que reducen la fricción del eje de rotación horizontal se pueden ver en la figura 51.



Figura 51: Conjunto de componentes del eje de rotación horizontal

Así pues, el brazo puede realizar el movimiento de rotación horizontal correctamente y minimizando los efectos del rozamiento en gran medida. El rango de movimiento horizontal del hombro se limita al arco definido por la placa metálica de aproximadamente  $90^\circ$ , y se muestra en la figura 52.



Figura 52: Rango de movimiento del eje de rotación horizontal del hombro.

### 5.1.2 Abducción – Aducción

El segundo GDL presente en el hombro es el de la abducción-aducción. Éste se efectúa gracias a un pistón neumático instalado sobre una barra en forma de U, perpendicular a la estructura que hace de soporte. El engranaje de acero está acoplado a esta placa y forma una sola estructura. A su vez el pistón está instalado, anclando su extremo cerrado en esta estructura de manera que puede rotar respecto a ese extremo.

En el otro extremo de la placa en U, se instala una varilla de 0,8cm de diámetro que es la que permite al pistón ejercer su fuerza sobre el brazo a través de una pieza intermedia. Dicha pieza intermedia es la que imita el saliente que se puede encontrar en la estructura de una retroexcavadora.

Esta pieza intermedia es uno de los componentes más importantes del movimiento de abducción y aducción. Está formada por dos placas paralelas de aluminio de 2mm de grosor y 18cm de longitud que le dan un amplio rango de movimiento al hombro, tal como se observa en la figura 53.



Figura 53: Pieza intermedia de unión entre varilla y eje de rotación

Tal como se puede ver en la figura 54, el eje de rotación está unido a la estructura del brazo a través de dos piezas en forma de L, para a maximizar la fijación de la varilla a lo largo de la rotación.

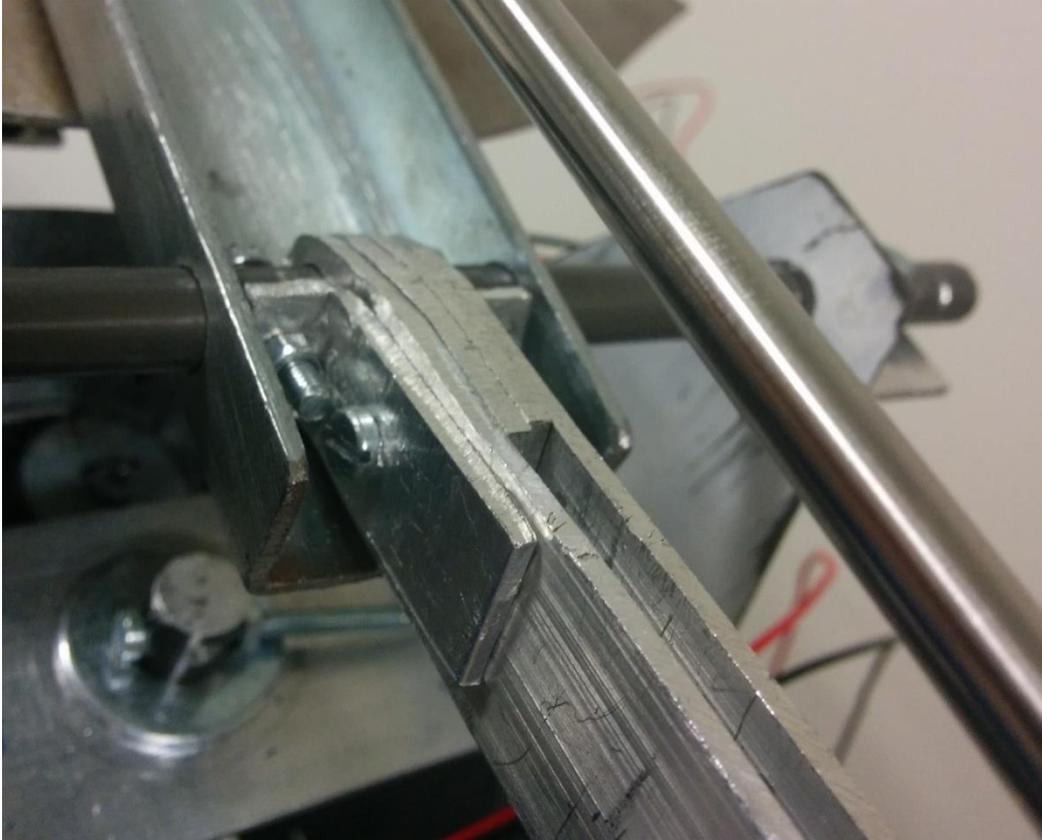


Figura 54: Piezas de unión entre la pieza intermedia y la varilla de rotación.

La unión entre la pieza intermedia y la varilla del pistón se realiza mediante una pieza fabricada con una tuerca de unión y una alcayata modificada. Con estos dos componentes, se tiene en un extremo una tuerca de diámetro 6 mm y en el otro un bucle cerrado por el cual pasa un tornillo que se une a la pieza intermedia. Tal como se muestra en la figura 55.



Figura 55: Pieza de unión entre la varilla y la pieza intermedia.

El conjunto del eje de rotación vertical se puede observar en la figura 56.

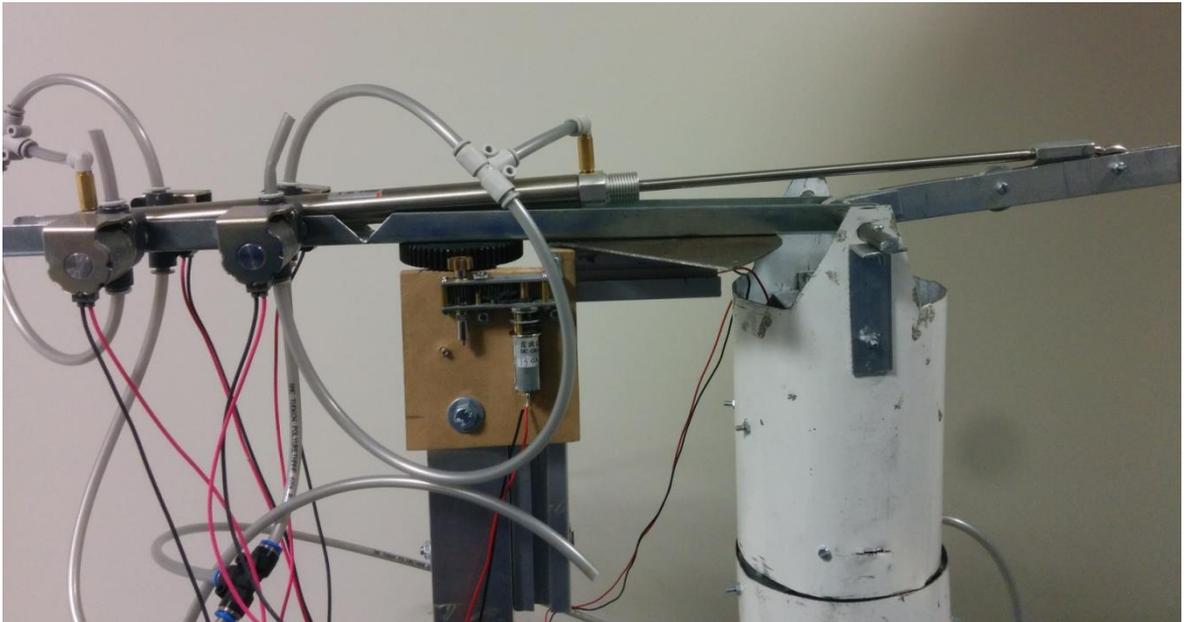


Figura 56: Conjunto de componentes de las rotaciones del hombro.

A su vez se ha conseguido un eje de rotación funcional que presenta un amplio rango de movimiento, limitado por la longitud de la varilla del pistón y de la pieza intermedia. Este rango de  $80^\circ$  de movimiento se puede observar en la figura 57.



Figura 57: Rango de movimiento de la rotación vertical del hombro.

Tal como se calculó en la sección 4.1, para una correcta colocación del pistón y que el movimiento que haga sea lo más amplio y estable posible, el centro de la varilla del pistón debe situarse sobre el eje de rotación. De esta manera tanto en las posiciones de extensión y compresión máxima, el extremo de la varilla está siempre a la misma distancia del eje de rotación. Esta disposición se puede observar en la figura 58.



Figura 58: Posición de la varilla sobre el eje de rotación

La ejecución de la abducción y aducción del hombro se ejecuta a través del pistón cuando este extiende o retrae la varilla. Pero la fuerza que el pistón necesita para poder ejecutar tanto la extensión como la contracción, se obtiene del compresor de aire y es regulada por las válvulas neumáticas al controlar el paso del aire. Las válvulas del hombro y su disposición se puede observar en la figura 68.

## 5.2 Codo

La articulación del codo, tal como se presenta en la sección 2.3, dispone únicamente de un GDL, el movimiento de flexión y extensión. Este movimiento se lleva a cabo gracias a un pistón de varilla de 16cm instalado en la sección del brazo.

Tal como se presenta en el capítulo anterior, en la figura 37, la apertura del tubo permite que el pistón se extienda y contraiga a través de ella. De manera análoga a como se situó el pistón en la sección 5.1, el centro de la varilla del pistón se sitúa sobre el eje de rotación. En la figura 59, se puede observar con detalle cómo esta acoplado el pistón a la placa transversal.

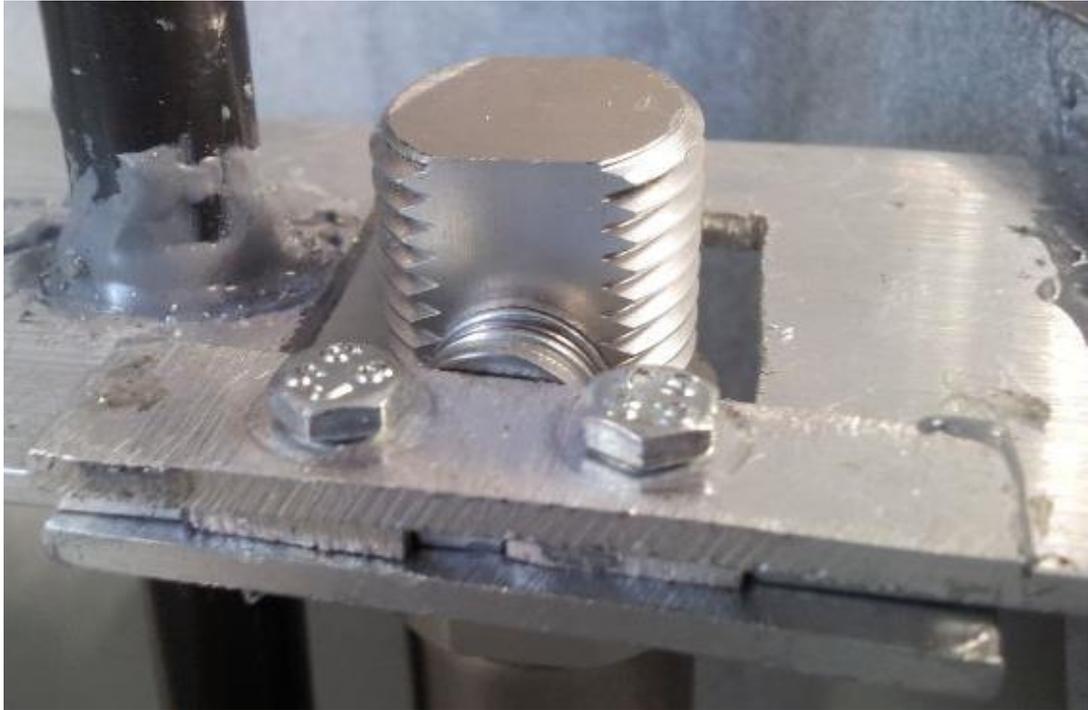


Figura 59: Acoplamiento del pistón del codo a la placa transversal

Esta articulación también presenta una pieza intermedia que une la varilla del pistón con el eje de rotación y que permite transmitir la potencia ejercida por el compresor del aire al sistema del antebrazo. Esto se puede observar en la figura 60.

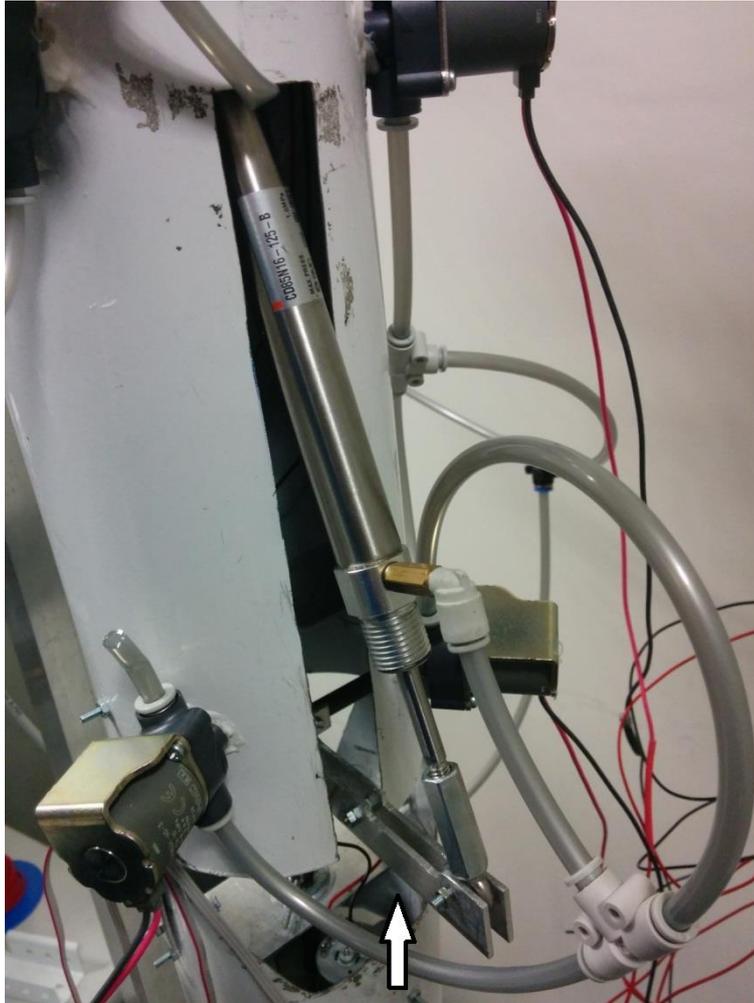


Figura 60: Disposicion de la pieza intermedia entre la varilla y el eje de rotacion, marcada con la flecha

Gracias a la inserción del pistón dentro de la estructura, se consigue un rango de movimiento de  $110^\circ$  que permite simular el movimiento real de un codo humano. Esto se puede observar en la figura 61.

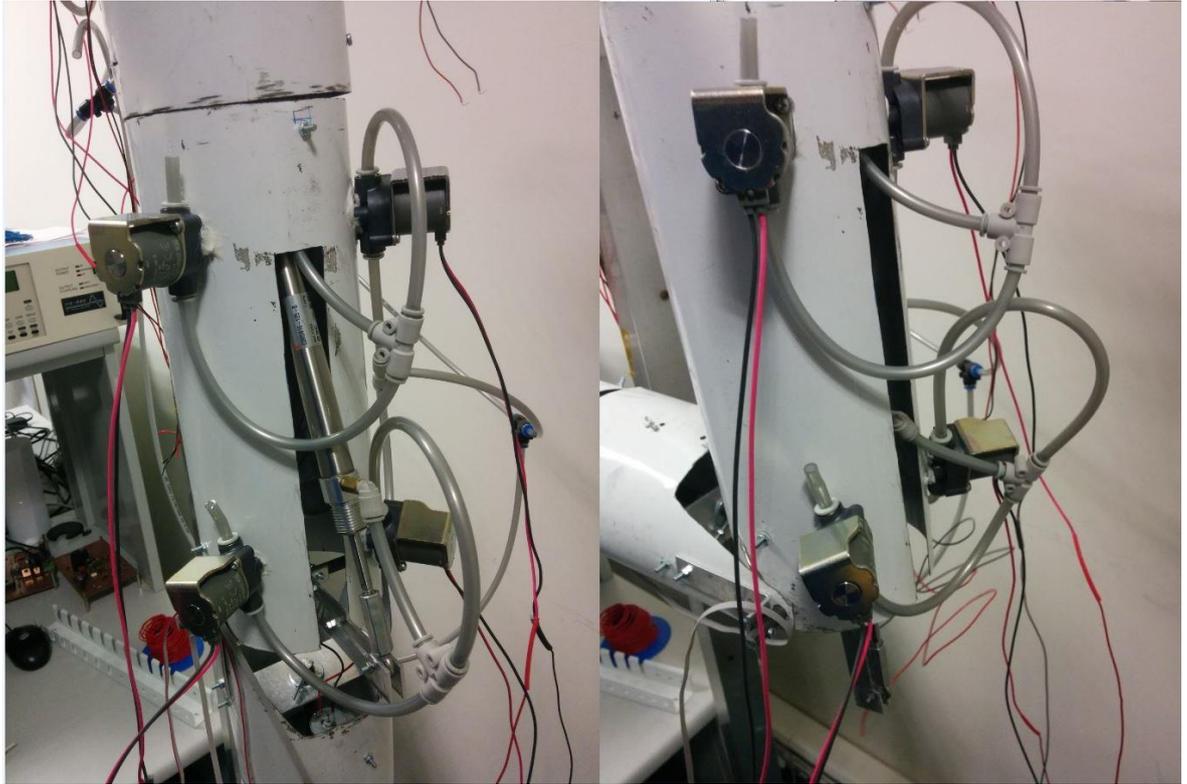


Figura 61: Rango de movimiento del codo

### 5.3 Muñeca

La construcción de esta articulación se resolvió con la ayuda de una impresora 3D, modelo *Ultimaker 2*, que permitió la fabricación de las piezas de acuerdo a los esquemas en 3D presentados en la figura 38.

Una vez impresas las piezas, se taladraron los orificios para el acoplamiento en el extremo inferior del tubo y se colocaron los servomotores responsables del movimiento de la muñeca. Dicha disposición se puede ver en la figura 62.

También se sustituyeron los cables que venían por defecto en los servomotores por unos cables más largos que permitieran la conexión a la placa de control del sistema.



Figura 62: Piezas impresas 3D de la muñeca

#### **5.4 Brazo y antebrazo**

Tanto el brazo como el antebrazo, están formados por dos secciones de estructura cilíndrica, en la cual se diferencia una sección superior pequeña y otra inferior más grande. La sección pequeña es la que integra el motor y la que se conecta a la articulación anterior (hombro o codo). La sección de mayor tamaño rota con respecto a la de menor longitud.

En la figura 63 se pueden observar todos los componentes distribuidos en los lugares en los que más adelante son instalados. En ella se pueden apreciar las secciones de los tubos, las placas transversales y los engranajes.

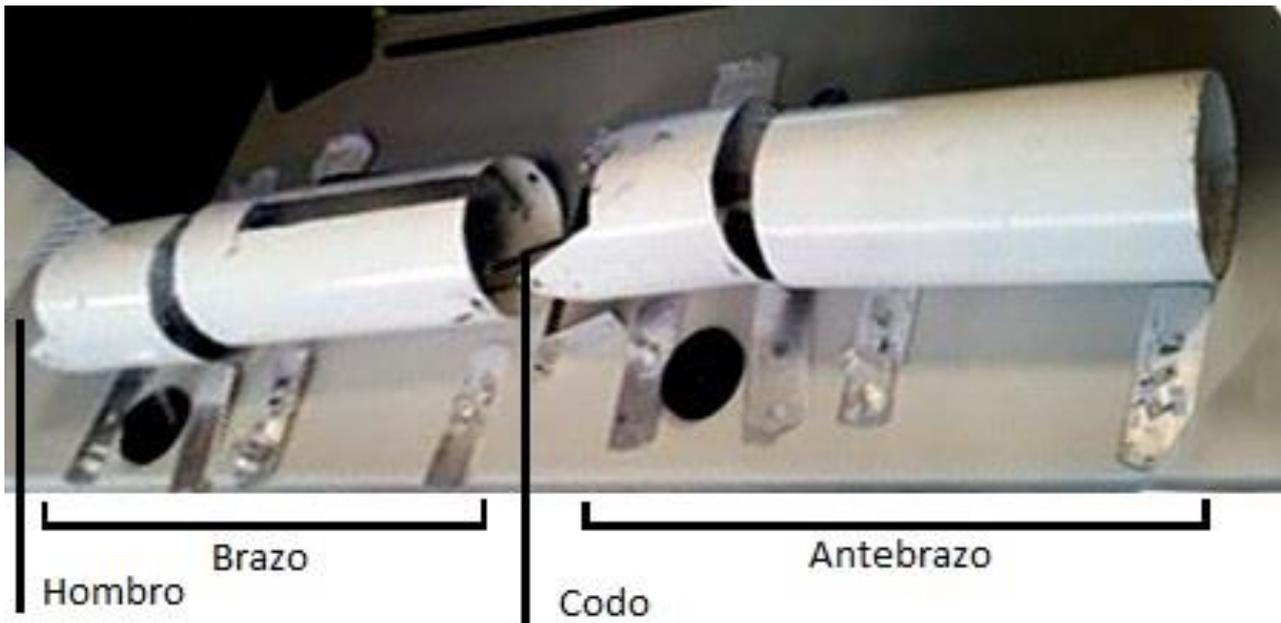


Figura 63: Distribución de componentes del brazo y del antebrazo

Las placas transversales, junto con las varillas centrales, son el esqueleto del brazo y del antebrazo. Éstas permiten que la rotación que se efectúa esté totalmente centrada sobre un eje estable y que sufra muy poca vibración a pesar de los movimientos del hombro y del codo.

Se puede ver que la sección de mayor tamaño del brazo tiene una apertura. Ésta es el hueco a través del cual el pistón del codo podrá realizar su movimiento. En cambio la otra sección del mismo tamaño no presenta ninguna apertura pues la muñeca no requiere actuadores dentro de la propia sección del tubo.

Dentro de ambos tubos se puede encontrar la misma disposición de varilla central y placas transversales. Dicha estructura consta de cuatro placas transversales, dispuestas en diferentes ángulos para reforzar la resistencia del sistema. Esto se puede observar en la figura 64, así como el pistón instalado en dicha estructura.



Figura 64: Estructura de varillas para la roación longitudinal del brazo

La sección pequeña presenta dos placas transversales, entre las cuales se instala el engranaje de acero, el cual recibirá la potencia de transmisión del motor interno del tubo. Estas dos placas no están unidas a la varilla central, están rodeadas de dos arandelas que permiten que la varilla rote, pero sin que arrastre a las placas de la sección pequeña. En cambio, las otras dos placas sí que están unidas a las varillas de manera que al rotar la varilla, ésta provoque una rotación de la sección inferior, la de mayor tamaño. El engranaje está anclado a la varilla central a través de un tornillo pasante que permite que toda la rotación del motor se transmita al resto del sistema. El motor lleva una placa de aluminio en forma de  $\Omega$ , que permite una fijación consistente del mismo a la pared del tubo para evitar desplazamientos indeseados al ejercer la fuerza necesaria para rotar el sistema. Se puede ver la unión entre el engranaje y la varilla y a su vez al motor en la figura 65.



Figura 65: Unión del engranaje a la varilla y acoplamiento con el motor interno

### **5.5 Circuito de válvulas**

Para controlar los pistones, se diseña un circuito de válvulas neumáticas que permite controlar el movimiento de los pistones para que el sistema pueda realizar ciertos movimientos.

Las válvulas, mostrada en la figura 66, que se usan en dicho circuito son de dos vías, lo cual requiere colocar dos válvulas por entrada por pistón, lo que hacen cuatro válvulas para cada pistón. Las válvulas se pueden controlar eléctricamente conectándoles 12V a los bornes y abriendo así el paso al aire para que pueda accionar la

extensión o contracción del pistón. A continuación, en la figura 67, se muestra el circuito necesario para controlar un pistón.

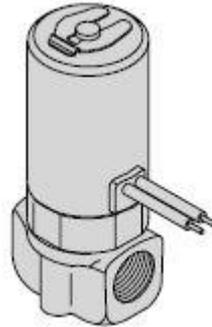


Figura 66: Esquema de una válvula neumática

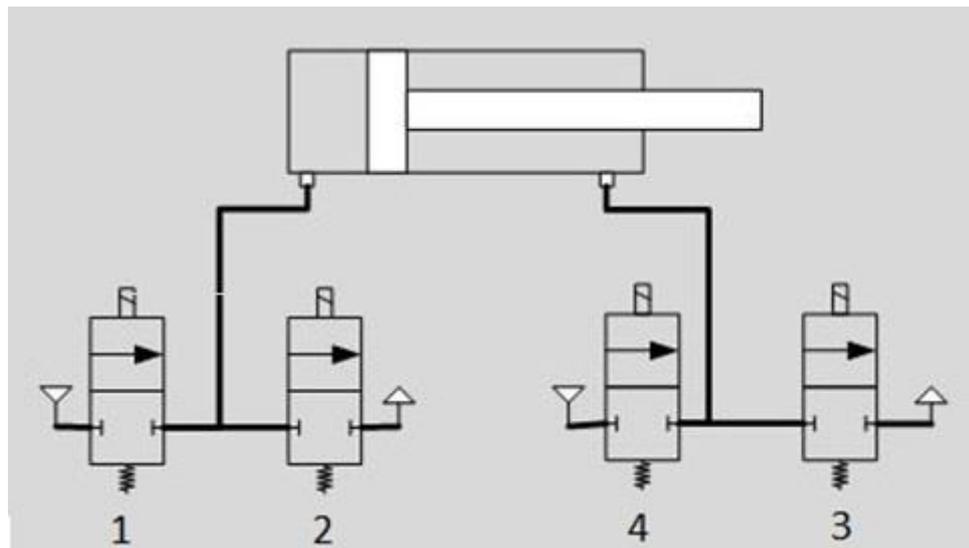


Figura 67: Circuito de válvulas

Para extender o contraer la varilla del pistón, hay que secuenciar la apertura o cierre de las válvulas correspondientes para que el aire circule en una dirección o en otra. Esto lo mostramos a continuación, en la tabla 3, haciendo la casuística de aperturas y cierres de las válvulas

Tabla 3: Estados de las válvulas en apertura y cierre del pistón

	Extender pistón	Contraer pistón
Válvulas abiertas	1 y 3	2 y 4
Válvulas cerradas	2 y 4	1 y 3

En las figuras 68 y 69 se muestra el montaje del circuito mostrado en la figura 67.

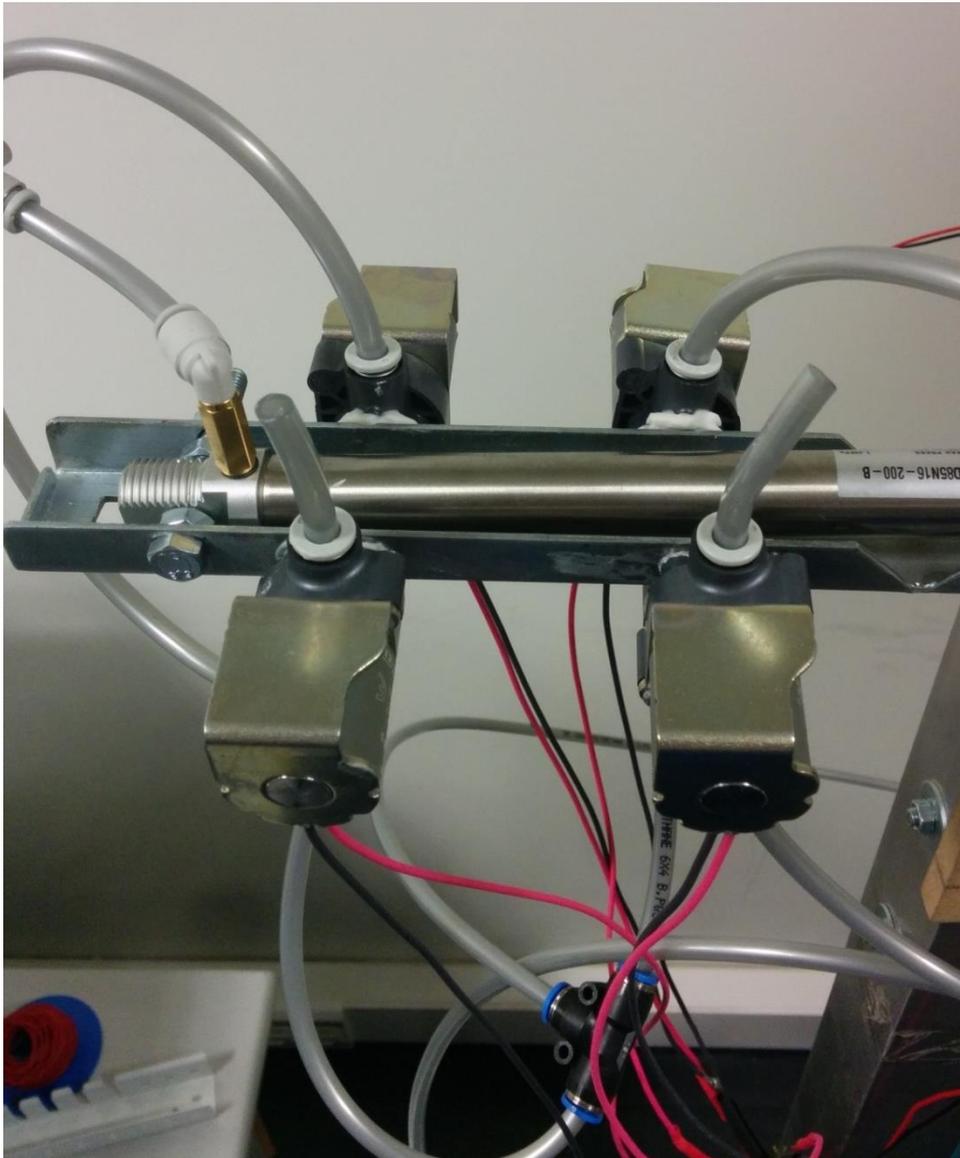


Figura 68: Válvulas responsables del control del pistón del hombro

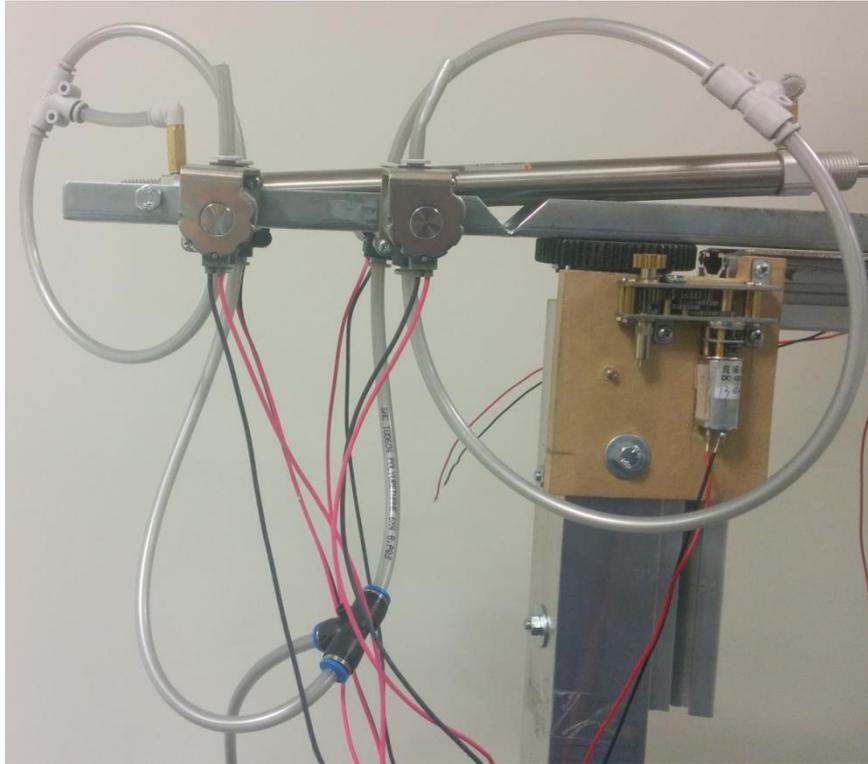


Figura 69: Circuito de aire del hombro

El aire fluye desde el compresor de aire hasta una T que divide el aire entre el pistón del hombro y el del codo. Dentro del subcircuito del hombro, otra T separa el flujo de aire de tal manera que las válvulas 1 y 3 reciben el aire del compresor. A la salida de éstas, se vuelve a separar la corriente de aire de manera que tanto el pistón como las válvulas parejas de las primeras reciben la salida de las válvulas impares.

## 5.6 Soporte

El brazo reposa sobre una base de hormigón, visible en la figura 70, que hace de contrapeso para soportar el peso del brazo, así como los cambios del centro de equilibrio efectuados al realizar los movimientos del brazo.

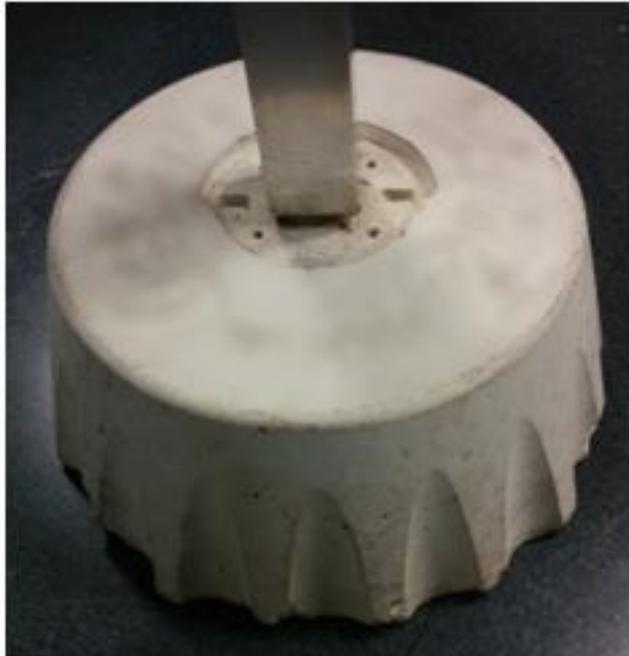


Figura 70: Base cónica de hormigón

La barra metálica hueca que soporta el peso del brazo está unida a la base de hormigón a través de un bloque de madera. El diámetro del listón de madera es prácticamente igual que el diámetro interno de la barra metálica. El listón está tallado de tal manera que acabe con la forma del agujero central de la base cónica. De esta manera se acoplan firmemente a la base el bloque de madera y la barra metálica. Este acople se puede observar en la figura 71. Sobre esta barra metálica van instalados todos los componentes del hombro y a partir de ellos, el resto de articulaciones.



Figura 71: Terminación del listón tallado insertado en la barra hueca metálica.

### **5.7 Brazo completo**

A continuación, en la figura 72, se muestra el montaje final del brazo completo.

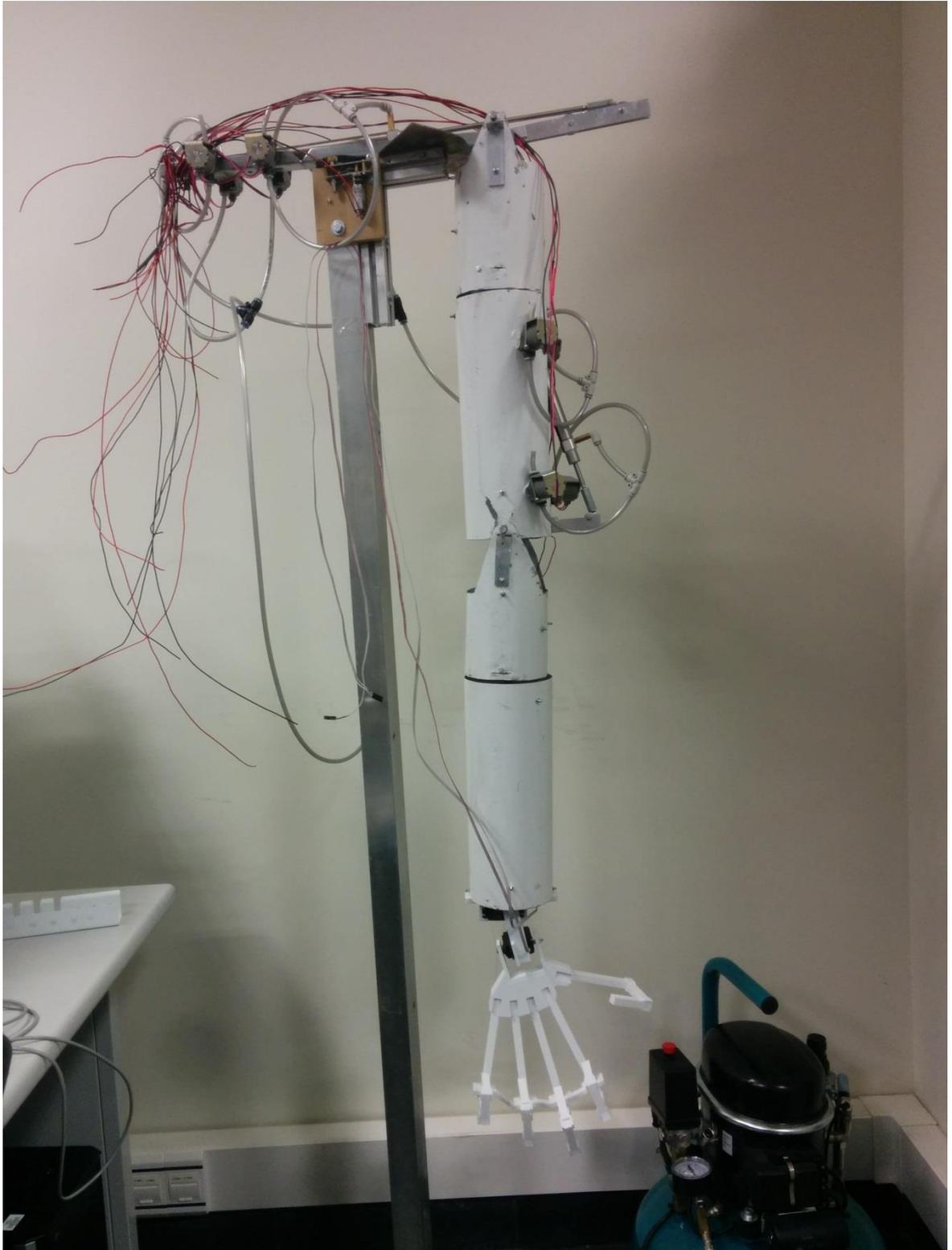


Figura 72: Montaje final completo



# 6

## Control del sistema

---

### 6.1 Circuito de control

El control del brazo robótico requiere el manejo de tres tipos de actuadores distintos: Motores de corriente continua en el hombro y en las rotaciones longitudinales, que requieren el control del sentido de la rotación de los motores a través del sentido de la corriente. Válvulas neumáticas de dos vías que requieren el control binario de su alimentación; Servomotores en la muñeca que requieren de una señal PWM (*Pulse Width Modulation*) para definir su grado de giro.

Dado que la BeagleBone no dispone de los componentes necesarios para el control de estos actuadores, se ha desarrollado una placa de control con los componentes necesarios: Puentes H, buffers de protección, MOSFET, elementos de protección y atenuación de ruido.

#### 6.1.1 Puentes H

El puente H es un dispositivo que permite el control bidireccional de los motores de continua. Está diseñado de tal manera que se conecta a VCC y a través de una entrada de control, se puede elegir el sentido de la corriente. Esto se puede observar en la figura 73.

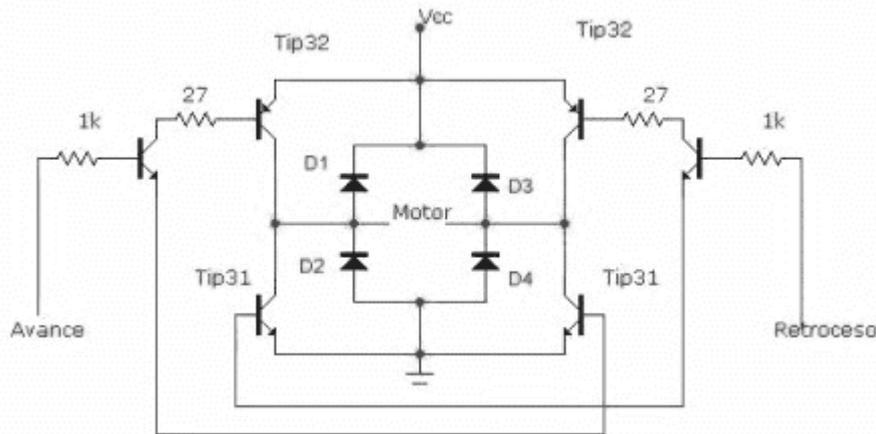


Figura 73: Circuito de un puente H

A través de este circuito, se pueden formar varios circuitos dependiendo de los transistores que se cierran, permitiendo ciertas acciones con las salidas. Dos de los circuitos posibles permiten transmisión de corriente a través del motor, permitiendo variar el sentido de giro del mismo. Estos dos circuitos son los que se pueden ver en la figura 74.

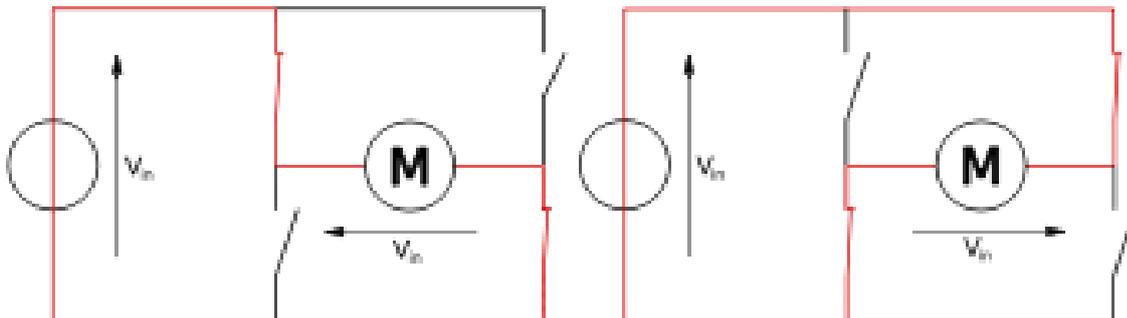


Figura 74: Circuitos que controlan el sentido de giro del motor.

Gracias a los puentes H se controla el sentido de giro de los motores de continua instalados en el sistema. De esta manera se puede realizar la rotación hacia cualquiera de los dos sentidos de la rotación longitudinal disponibles en las articulaciones de brazo y del antebrazo. En este proyecto se ha usado el modelo SI9986DY-E3 del fabricante Vishay.

### 6.1.2 PWM

El PWM es modulación por ancho de pulso. Se trata de una señal digital periódica en la que se modifica el porcentaje de tiempo activa. Este porcentaje se denomina ciclo de trabajo.

Este sistema tiene dos utilidades: El control del puente H, permitiendo regular la velocidad del giro. En esta función, se utiliza todo el rango posible del ciclo de trabajo. La segunda utilidad es el control de giro de los servomotores. Dado que la BeagleBone

incluye salidas PWM, sólo ha sido necesario añadir una serie de buffers de protección (Modelo HC4050).

Se puede observar un cambio de proporción del ciclo activo de la señal respecto al periodo de la misma en la figura 75.

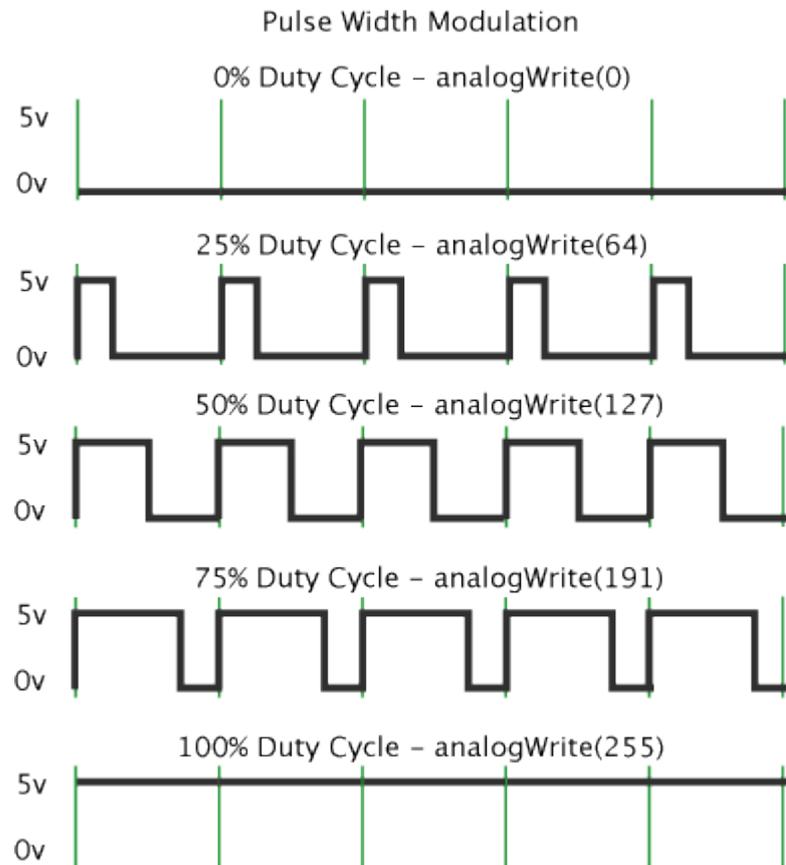


Figura 75: Ejemplo de ciclo de trabajo de un PWM

Variando el ciclo de trabajo que generan a la salida los PWM, se puede cambiar la manera en la que el aire llegara a los pistones y así poder controlar de manera más precisa el movimiento que va a realizar el brazo completo.

### 6.1.3 MOSFET

El MOSFET (en inglés *Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*) es un dispositivo de cuatro terminales llamados surtidor (S), drenador (D), compuerta (G) y sustrato (B). La disposición de los terminales se puede ver en la figura 76.

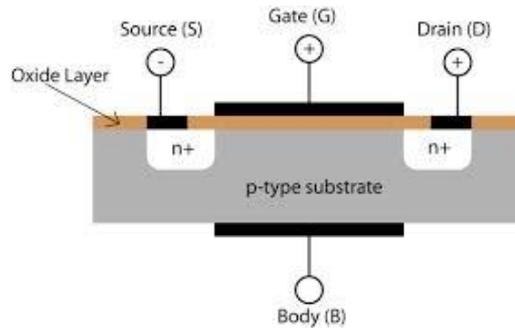


Figura 76: Terminales de un dispositivo MOSFET (En corte).

Su función es la de permitir o bloquear el paso de corriente entre el surtidor y el ordenador en función de la tensión en la puerta. Son por lo tanto interruptores. Su principal uso en la placa es el de abrir o cerrar el circuito de alimentación de las válvulas neumáticas. El componente utilizado en este proyecto es NTMD5838NLR2G de On Semiconductor.

#### 6.1.4 Elementos de seguridad

Entre los elementos que se pueden encontrar en el circuito para afianzar la seguridad del mismo, se pueden encontrar los condensadores de desacoplo. Estos dispositivos permiten que todas las interferencias electromagnéticas que genera la corriente que se crea en la fuente sean absorbidas por ellos para que no afecte al resto del circuito. Para ello se colocan los condensadores de desacoplo lo más cerca posible de los puntos donde hay conexión directa con alguna fuente.

#### 6.1.5 Circuito completo

La placa que permitirá realizar el control sobre el sistema completo es la placa BeagleBone. Se ha creado un circuito que se acopla a la placa de control de BeagleBone gracias a los pines laterales, tal como se puede ver en la figura 78. En ella se pueden observar los diferentes elementos que se han creado para poder conectar todos los elementos entre si y resolver los retos que se han presentado en la creación de la placa de control del sistema.

En el cuadrante superior izquierdo de la figura 77, se pueden observar las dos filas de pines que permiten la inserción del circuito sobre la plataforma de control BeagleBone. Cada una de ellas tiene 46 pines que permiten conectar cada uno de los pines que la placa BeagleBone presenta.

En la sección inferior de la figura se muestran los cuatro buffers que se han incluido en el diseño del circuito, cada uno de ellos etiquetado con B\_1, B\_2, B\_3 y B\_4.

En la parte central de la figura están situados los MOSFET que permiten el control de las válvulas encargadas de la extensión y compresión de los pistones neumáticos. Cada uno de los MOSFET lleva una etiqueta que permite ver que función desempeñan en el sistema. Se pueden encontrar las siguientes etiquetas: HEE, HEP, HCE, HCP, CEE, CEP, CCE, CCP. La primera de las siglas corresponde a la articulación que se controlará con esa válvula, hombro (H) o codo (C). La siguiente sigla

corresponde a compresión (C) o extensión (E), que indica la acción que llevará a cabo el pistón neumático. La tercera, y última sigla, corresponde a escape (E) o presión (P), que define la válvula que entrará en acción, la de salida o la de entrada. De esta manera tenemos ocho casos que permiten controlar todas las válvulas de forma que se puede controlar el brazo de maneras precisa.

En la esquina inferior derecha se pueden encontrar los puentes H, que tal como se comentó en la sección 6.1.1, permiten variar el sentido de la rotación de los motores.

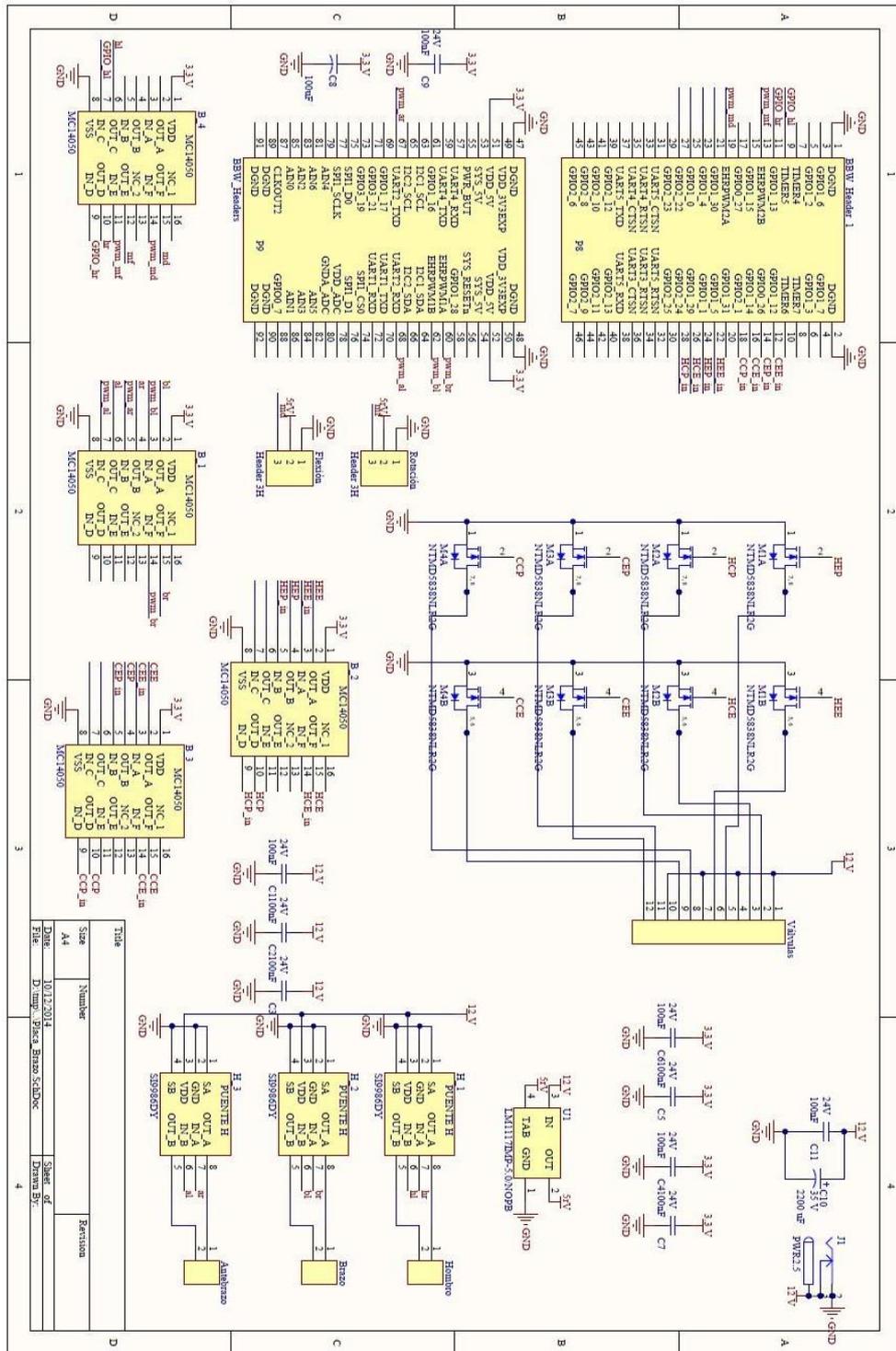


Figura 77: Circuito electrónico de la placa de control del sistema

En la figura 78 se muestran el diseño de la PCB de la placa de control.

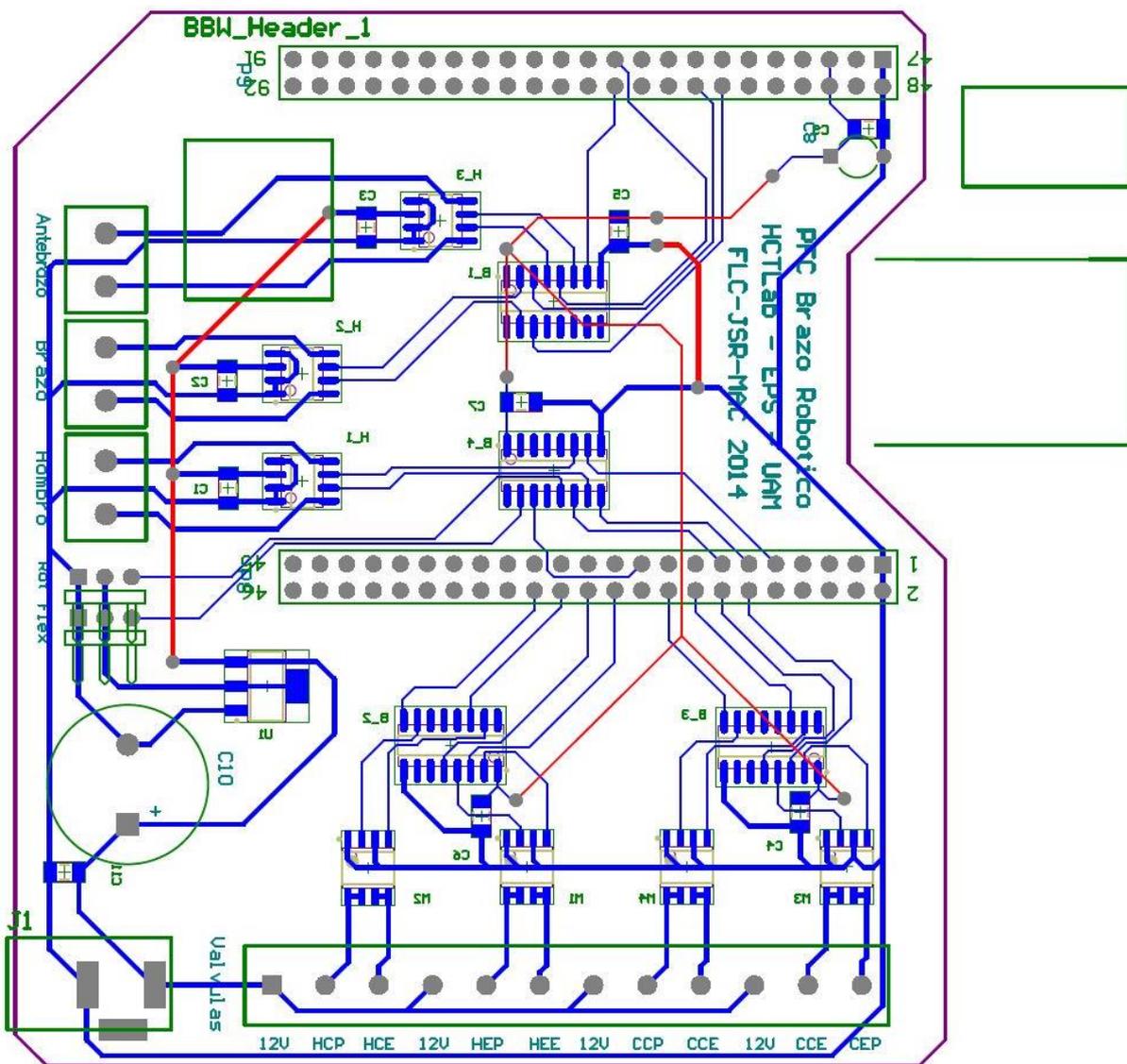


Figura78: Esquemático del circuito de la placa de control

En las figuras 79 y 80 se muestra la placa de control fabricada de acuerdo con el esquemático mostrado en la figura 78.

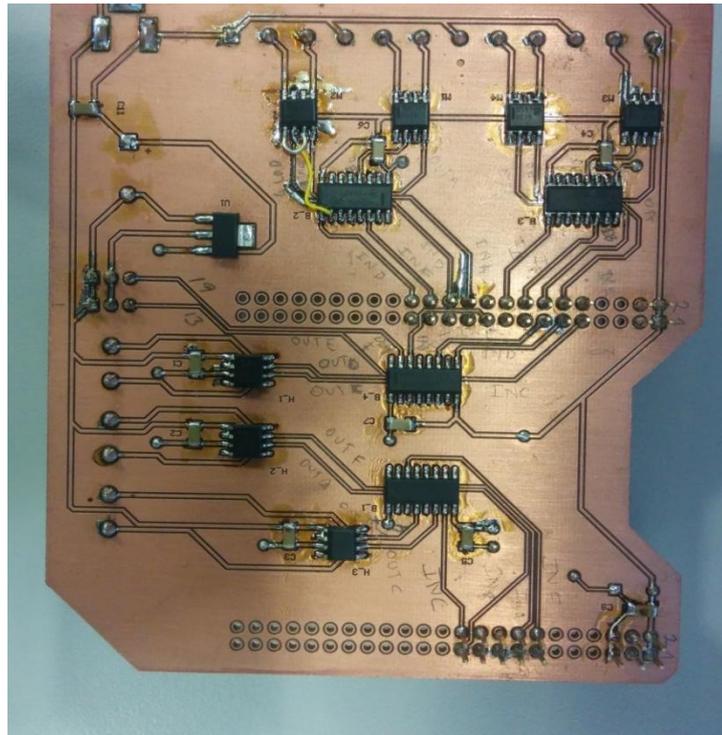


Figura 79: Cara inferior de la placa de control fabricada

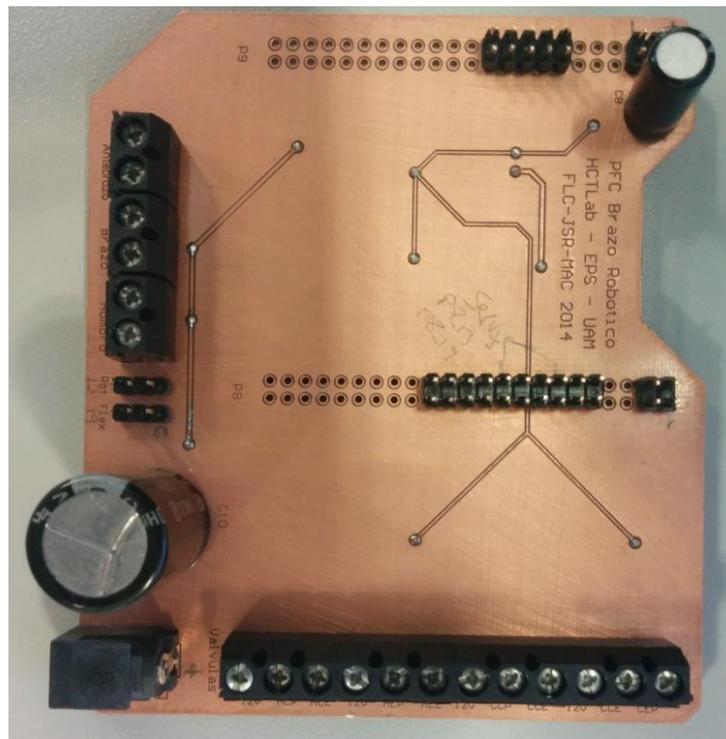


Figura 80: Cara superior de la placa de control fabricada

## 6.2 Control de la placa

### BeagleBone

La placa de control BeagleBone [11] es una versión posterior de la iniciativa inicial BeagleBoard. La BeagleBone salió al mercado en 2011 con un procesador de

ARM-A8 a 720 MHz, 256MB de RAM y dos conectores de 46 pines. La siguiente versión que salió fue la BeagleBone Black (2013) y presentaba unas mejoras tales que 512 MB de RAM, el mismo procesador pero a 1 GHz, una memoria eMMC de 2 GHz y un puerto HDMI.

La BeagleBone Black permite instalar el SO de control de la placa en la memoria eMMC y además poder acceder a un segundo SO a través de la tarjeta de memoria micro SD. En cambio la placa BeagleBone debe obtener el sistema operativo a través de la tarjeta de memoria micro SD.

La placa que se usa en este proyecto es la BeagleBone y esta versión tiene como sistema operativo Debian, que se coordina gracias a una comunidad de desarrolladores y usuarios que mantiene el sistema operativo GNU y que está basado en software libre. Se puede observar la placa en la figura 81.a y los principales componentes en la figura 81.b.

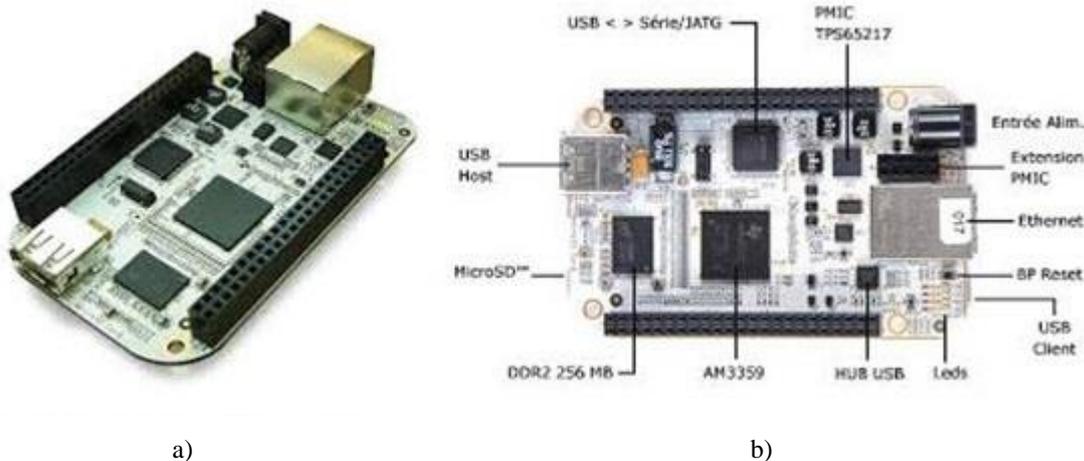


Figura 81: Placa BeagleBone con anotaciones de los principales componentes.

### 6.2.1 Comunicación con la BeagleBone

Para conectar la BeagleBone al ordenador, hay dos opciones disponibles, conexión a través del cable micro-USB o conexión a través del cable Ethernet y una alimentación de 5V externa. En este proyecto se ha elegido la segunda opción, pues facilita los ajustes de conexión.

En este proyecto se ha optado por la comunicación con la BeagleBone mediante una conexión SSH en la red local creada entre el ordenador y la propia BeagleBone.

### 6.2.2 Programación

Tras configurar correctamente la conexión a la placa, se deben instalar ciertas librerías que permiten ejecutar comandos de configuración y de control en Python. Para este proyecto se ha instalado la librería de Adafruit\_BBIO, tal como se muestra en su

página web [11]. También se ha añadido una serie de archivos que permiten controlar los PWM y otros puertos de la placa [12].

Se puede encontrar la información más detallada acerca de los pasos seguidos para la configuración del sistema en el Anexo de programación.

Los comandos principales que se usan para el control de los diferentes componentes que se encuentran en el sistema son:

- Servomotores

Teniendo las librerías necesarias instaladas, los principales comandos que permiten llevar a cabo el control del servomotor. Con el primer comando se selecciona el pin que hará de PWM para controlar a través de los pulsos al servomotor.

```
pwm.attach("P8_13")
pwm.write(X)
pwm.writeMicroseconds(Y)
```

Siendo X, los grados de giro deseados e Y, los microsegundos que corresponden a esos grados. Los comandos son equivalentes, por lo cual cualquiera de los dos puede realizar el movimiento correctamente. Se puede encontrar mucha más información acerca del control de los servomotores en el anexo de programación, en el apartado de Control del servomotor, al final del documento.

- Motores de continua

Los motores DC están conectados en puentes H. Dos de ellos se controlan con PWM, su funcionamiento es equivalente al apartado anterior. El tercero se ha conectado a un GPIO. Los siguientes comandos permiten el manejo de los mismos. Cada motor de continua tiene asociados dos PWMs a dos GPIOs. Se puede consultar algún aspecto más de los puentes H y del control de las válvulas en el Anexo de programación, en el apartado de Control de la válvula.

```
GPIO.setup("P8_12", GPIO.OUT)
GPIO.output("P8_12", GPIO.HIGH)
GPIO.output("P8_12", GPIO.LOW)
```

- Válvulas neumáticas

Las válvulas requieren únicamente del control de los MOSFET. Estos dispositivos permiten el paso de corriente según la entrada de control que le llegue. Así pues, con la

simple activación del pin asociado a cada válvula se regula el paso de aire que sale o entra del pistón. Los principales comandos que permiten esto son los siguientes:

```
GPIO.setup("P8_12", GPIO.OUT)
GPIO.output("P8_12", GPIO.HIGH)
GPIO.output("P8_12", GPIO.LOW)
```

Tal como se comentó para los dos apartados anteriores, se puede encontrar más información disponible en el Anexo de programación, en el apartado de Control de la válvula.

# 7

## Pruebas

---

En esta sección se detallan las pruebas realizadas una vez terminado el montaje y la configuración de la placa de control.

Para realizar correctamente las pruebas del sistema, se ha realizado una casuística sobre los diferentes dispositivos y actuadores presentes en el brazo y así poder probar con efectividad los diferentes elementos. La casuística seguida se ha dividido en tres secciones, la primera que comprueba el correcto funcionamiento mecánico de los elementos del brazo, la segunda que lleva a cabo las pruebas electrónicas del circuito de la placa auxiliar y de la BeagleBone y la tercera que consiste en las pruebas del brazo completo.

### **7.1 Pruebas electromecánicas**

Esta primera tanda de pruebas se lleva a cabo verificando la resistencia y viabilidad mecánica del montaje de los elementos del sistema, la medición del consumo de los componentes, así como la velocidad de los elementos con capacidad de rotación. Para ello se prueban los diferentes actuadores presentes:

- Pistones:

Para comprobar el correcto montaje y la capacidad de apertura y cierre de los mismos, se conecta el compresor de aire a cada pistón y se regula la entrada de aire de manera que el pistón se extiende y se comprime.

Para el pistón del hombro, se le conecta aire a presión, de manera que éste se extiende, levantando así todo el brazo correctamente. Se deja salir el aire lentamente del pistón comprobando que el pistón y los enganches al cuerpo aguantan el peso del brazo.

Se repite la operación con el pistón del codo, extendiéndose éste y provocando que el antebrazo pase de la posición vertical a una posición de 90° paralela al suelo. A su vez se regula la salida de aire comprobando la bajada controlada del antebrazo.

Se puede observar la combinación de ambas pruebas en la figura 82.



Figura 82: Prueba de los pistones neumáticos

Para ambos pistones se prueba a bloquear la entrada de aire a máxima presión y liberando de golpe el aire forzando a los pistones a realizar el movimiento bruscamemente y comprobando el aguante de los enganches.

- Motores de corriente continua

Para realizar esta prueba se conectan los motores a las fuentes de alimentación disponibles en el laboratorio, comprobando que los motores son capaces de mover sus respectivos segmentos del brazo. La prueba anterior junto con la prueba de los pistones se puede observar en la figura 83.



Figura 83: Prueba del correcto funcionamiento de los motores de corriente continua

- Válvulas

Se comprueba que las válvulas tienen un correcto funcionamiento conectándolas a las fuentes de la alimentación con un voltaje de 12V, que resulta en un cierre de la válvula al recibir el voltaje tal como se esperaba, como se puede observar en la figura 84.

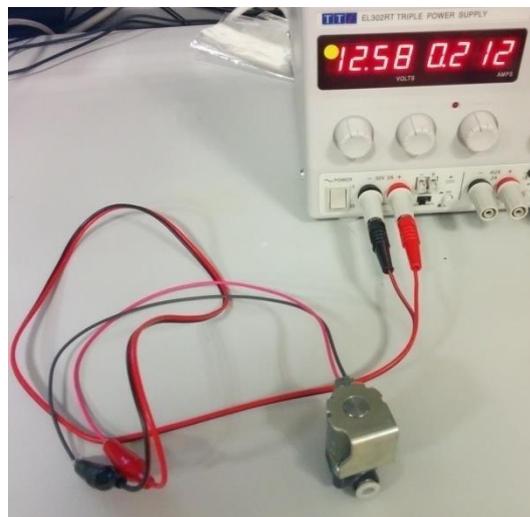


Figura 84: Prueba de funcionamiento de las válvulas neumáticas.

- Pruebas de consumo

Para medir el consumo, se ha conectado el elemento a la fuente de corriente, intercalando en el circuito el amperímetro, en el cuál se reflejaba la corriente que circulaba por el circuito. En cuanto a mediciones de velocidad, se tienen en cuenta tres tomas de datos, obteniendo así un resultado medio más realista. Ambas mediciones se pueden consultar en la tabla 4.

Tabla 4. Consumo de los componentes.

ELEMENTO	CORRIENTE (mA)	CONSUMO (W)	VELOCIDAD (s/vuelta)
Válvula (12V)	250	3	N/A
Servomotor (5V)	5,85	0,029	1,8
Motor antebrazo(12V)	100	1,2	6
Motor brazo(12V)	100	1,2	7
Motor con reductora (12V)	150	1,8	36

## 7.2 Pruebas electrónicas

En este apartado se prueban los servomotores, la placa BeagleBone y la placa auxiliar.

- BeagleBone

Se conecta la placa BeagleBone al ordenador, a través del cable de Ethernet, tal como muestra la figura 85, y se comprueba que hay una correcta conexión SSH. También se comprueban que los pines necesarios para el funcionamiento de la placa auxiliar funcionan correctamente y están en el modo de funcionamiento adecuado.

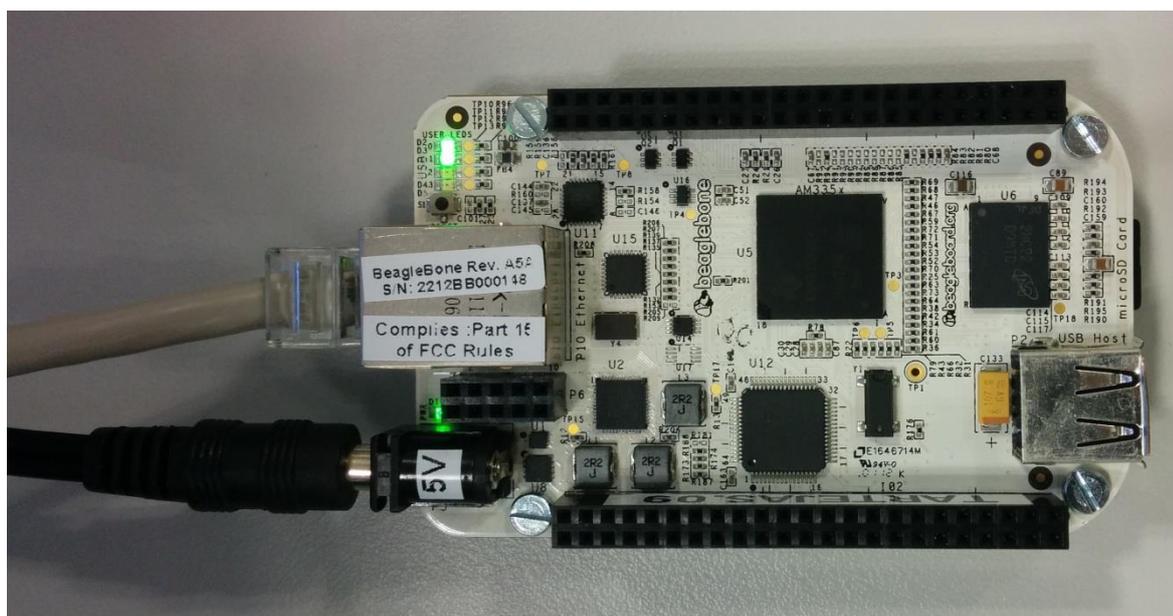


Figura 85: Prueba de conexión de la placa al ordenador a través del cable Ethernet

- Placa auxiliar

Se comprueba con un multímetro que las vías están correctamente soldadas y no hay cortocircuitos presentes en el sistema.

La siguiente prueba que se realiza es la conexión de la placa auxiliar a la placa BeagleBone, tal como muestra la figura 86, y se comprueba que las conexiones salientes de la placa auxiliar (conexión de los servomotores y clemas de las válvulas y de los motores de continua) responden a los estímulos de la placa BeagleBone.

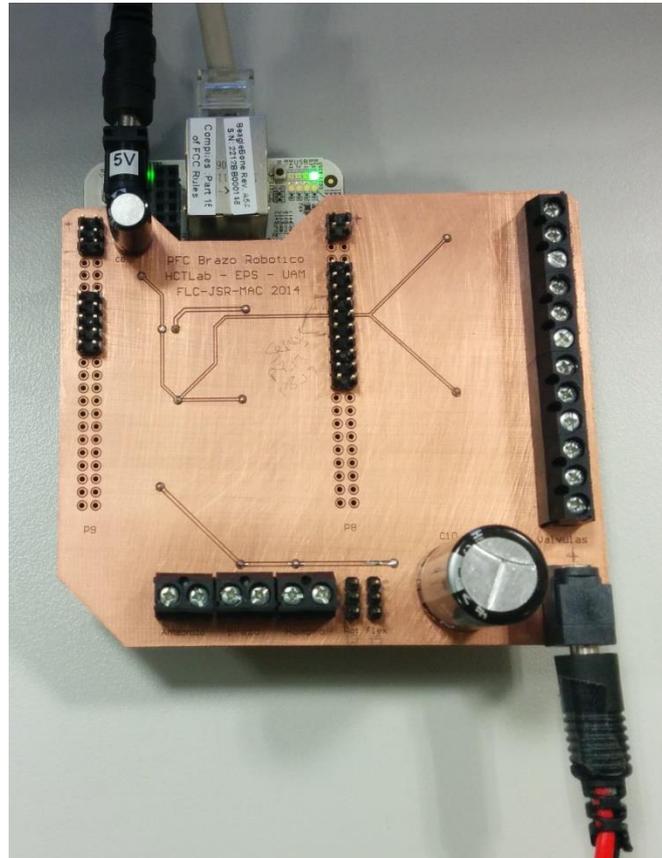


Figura 86: Prueba de conexión de la placa auxiliar a la placa BeagleBone

- Servomotores

Para realizar esta última prueba, se conectan los servomotores a los pines de VCC de 3,3V y GND de la placa BeagleBone, como se observa en la figura 87, y la señal de control a un pin PWM de la placa BeagleBone y se comprueba que se efectúa el giro del servomotor.

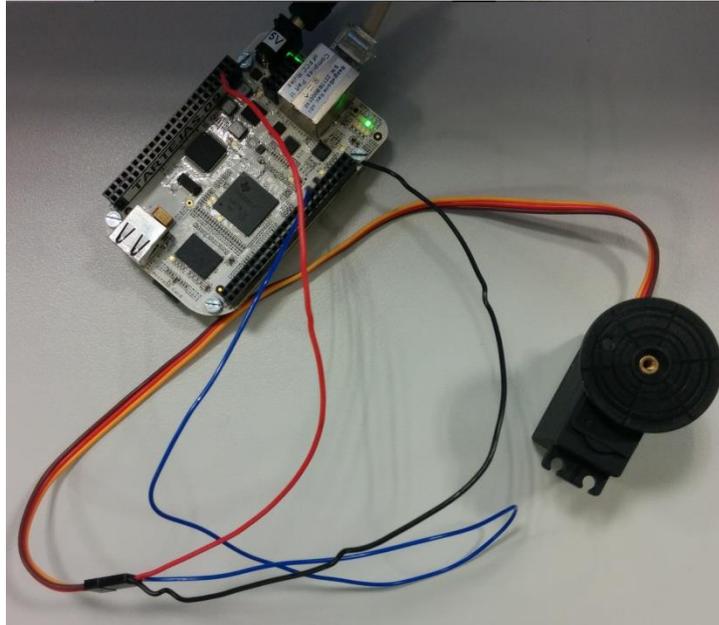


Figura 87: Prueba de funcionamiento del servomotor a través de la placa Beaglebone

### **7.3 Pruebas conjuntas**

Estas pruebas consisten en la suma de las pruebas efectuadas anteriormente por separado. Para llevarlas a cabo se deben interconectar todos los sistemas de cara a poder solapar varias pruebas a la vez.

Se conecta la placa BeagleBone al ordenador, la placa auxiliar a la placa BeagleBone y todas las conexiones de los actuadores a la placa auxiliar, la conexión completa se puede observar en la figura 88. Una vez esta todo conectado, se prueba a abrir las válvulas al tiempo que se giran los motores de continua y se giran los servomotores, comprobando que se realiza correctamente el conjunto de movimientos conjuntamente.

De la misma manera que se hizo para las pruebas electromecánicas, se mide el consumo en vacío de todos los elementos conectados a la placa de control BeagleBone, dando como resultado 270mA. En la tabla 5 se lista la velocidad de los movimientos realizados en las pruebas.

Tabla 5: Características de los movimientos.

MOVIMIENTO	ACTUADOR	CORRIENTE (mA)	CONSUMO (W)	TIEMPO DE EJECUCIÓN (s)
Abducción/Aducción del hombro	Pistón neumático	515/491	6,18/5,89	1,6/1,1
Flexión/Extensión del hombro	Motor DC	612	7,34	9,2
Flexión/Extensión del codo	Pistón neumático	502/497	6,02/5,96	0,8/0,9
Rotación longitudinal del brazo	Motor DC	593	7,11	3,6
Rotación longitudinal antebrazo	Motor DC	582	6,98	3,2
Flexión-extensión muñeca	Servomotor	320	3,84	0,9
Desviación radiocubital muñeca	Servomotor	316	3,79	0,7

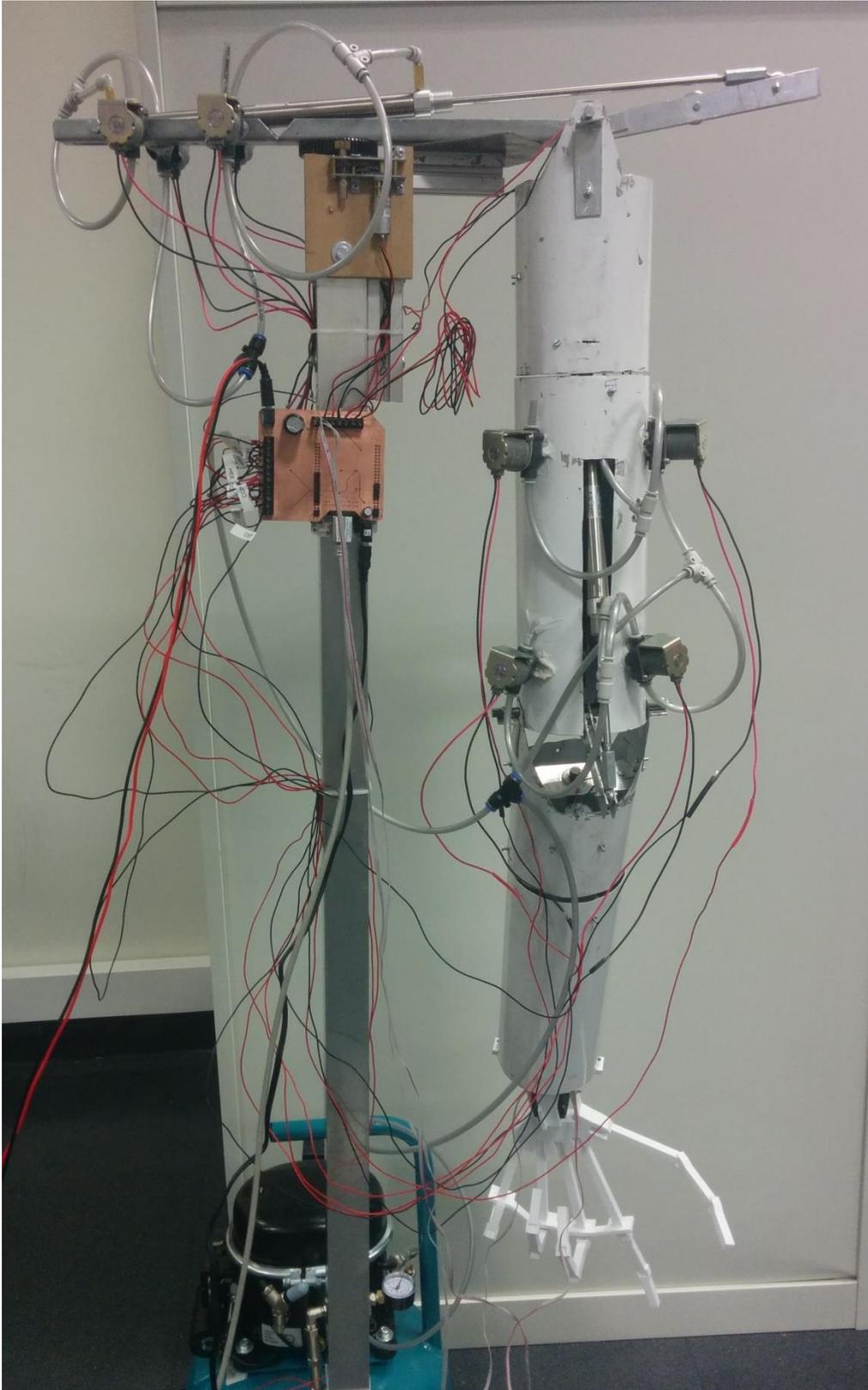


Figura 88: Prueba de la conexión completa del sistema

# 8

## Conclusiones

---

Este proyecto desarrolla la construcción de un brazo antropomórfico articulado, que tal como se muestra en los capítulos 2 y 3 puede resultar muy complejo de imitar y llevar a la práctica. En el desarrollo de las diferentes etapas de del proyecto se tratan diversas áreas haciendo de este proyecto un reto multidisciplinar, completo y muy enriquecedor.

Tras estudiar los diferentes antecedentes de la misma materia, ya sea la anatomía del brazo, como los proyectos acerca de la misma temática, se diseñó con ayuda de programas de CAD, un modelo que permite comprobar la viabilidad del sistema, así como ayudar a su posterior comprensión gracias a los esquemas realizados. Se ha implementado un montaje basado en dispositivos y actuadores de bajo coste que permiten tener un sistema con un amplio rango de movimiento que permite imitar el comportamiento de un brazo humano.

Una vez validado el diseño, se realizó el montaje del sistema, dando como resultado un brazo articulado funcional que prácticamente es capaz de llevar a cabo los mismos movimientos que podría realizar un brazo humano.

Tras comprobar que el montaje responde al diseño inicial, se comenzó el diseño del control del sistema para poder centralizar todas las órdenes del brazo en un solo punto, tal como ocurriría en el cuerpo humano.

Con el montaje y el control terminado, se pasó a realizar las pruebas de los diferentes elementos que entran en juego en el sistema y se validó la funcionalidad completa del proyecto.

## 8.1 Trabajo futuro

Como aspectos a destacar dentro de la posible mejora del proyecto se contemplan casos obvios y otro que no lo son tanto, pero que podrían mejorar sustancialmente el proyecto.

- Mano

Al observar el brazo, la primera idea que se viene a la mente es el desarrollo de una mano robótica que permitiera tener un sistema completo capaz de realizar tareas como poder coger objetos firmemente. Habiendo desarrollado algo de control de servomotores y teniendo como precedente en este mismo grupo el proyecto de Víctor Vaquero sobre la construcción de una mano robótica basada en servomotores, la idea de integrar la mano a continuación se hace más que evidente.

- Sensores

Aprovechando la posibilidad de implementar una mano robótica, se plantea la idea de insertar sensores en el sistema que permitan un control mucho más exacto de los movimientos disponibles. Se pueden agregar sensores en los pistones de manera que se conozca la posición exacta de la varilla en todo momento.

Otro tipo de sensor serían acelerómetros que permitieran conocer con exactitud el movimiento realizado por el brazo así como la fuerza generada en él. También se podría implementar la inserción de sensores de proximidad que permitan conocer el entorno que rodea al brazo.

Si se llega a implementar la mano robótica a continuación del brazo, ésta estaría más completa con sensores de presión que le permitieran coger objetos delicados que necesitaran mucha presión.

- Interfaz

Una interfaz que permitiera controlar todos los elementos desde un mismo punto sin tener que recurrir a la pantalla del cliente SSH de PuTTY, así como para conocer todos los datos que pudieran proporcionar los sensores.

- Control electrónico de la presión

Durante las pruebas se comprueba en ocasiones que la presión necesitaría ser diferente según el momento de la ejecución. Esto se puede observar cuando se lleva a cabo la compresión del pistón del hombro, ya que para alcanzar una posición cercana a los 90°, hace falta una presión superior a los 5 bar. En cambio si se alcanza dicha presión al subir, las válvulas no se abren y la bajada no es posible y hay que reducir la presión manualmente.

Con un regulador electrónico de la presión, se podrían alcanzar los puntos máximos de los movimientos y a su vez poder manejar las válvulas correctamente.

## Referencias

---

- [1] Víctor Vaquero Gómez: *Desarrollo de una mano mecánica para la representación del alfabeto de deletreo de la lengua de signos española*, Proyecto Fin de Carrera, 2010. [Fecha de consulta: 15 Enero 2015]. Disponible en <http://arantxa.ii.uam.es/~jms/pfcsteleco/lecturas/20101215VictorVaquero.pdf>
- [2] Beagleboard.org, *BeagleBone* [en línea], [Fecha de consulta: 15 Enero 2015]. Disponible en: <<http://beagleboard.org/bone>>
- [3] Pamela K. Levangie, Cynthia C. Norkin: *Joint Structure and Function: A Comprehensive Analysis*, 2001 Third Edition, F. A. Davis Company, ISBN: 803607105.
- [4] Kazuo Kiguchi, KoyaIwami, Makoto Yasuda, Keigo Watanabe, Toshio Fukuda: *An Exoskeletal Robot for Human Shoulder Joint. Motion Assist*, 2003 IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, VOL. 8, NO. 1, ISBN: 1083-4435/03.
- [5] M.H. Rahman, T.K. Ouimet, M. Saad, J.P. Kenné, P.S. Archambault, *Development and Control of a Wearable Robot for Rehabilitation of Elbow and Shoulder Joint Movements*, 2010 IEEE/ASME, ISBN: 978-1-4244-5226-2/10
- [6] Nobuo Sakai, Yoshinori Sawae, Teruo Murakami, *The Development of A New Joint Mechanism Based on Human Shoulder Morphology*, Dept. of Intelligent Machinery and Systems Kyushu University.
- [7] ShuheiIkemoto, Fumiya Kannou, KohHosoda, *Humanlike Shoulder Complex for Musculoskeletal Robot Arms*, 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems October 7-12, 2012. Vilamoura, Algarve, Portugal, pp 4892-4897, ISBN: 978-1-4673-1736-8/12.
- [8] Wong Guan Hao, Yap Yee Leck, Lim Chot Hun, *6-DOF PC-Based Robotic Arm (PC-ROBOARM) With Efficient Trajectory Planning And Speed Control*, 2011 4th International Conference on Mechatronics (ICOM), 17-19 May 2011, Kuala Lumpur, Malaysia, ISBN: 978-1-61284-437-4/11.
- [9] Craig Crosswait, Steven Roell, Nicole Stack, Joel Tice, Brian P. DeJong: *A Seven Degree of Freedom Lifelike Robotic Arm*, Pittsburgh, PA March 26 - 27, 2010. ASEE North Central Sectional Conference, Section 4C.
- [10] Carter Chris, Brian Dwyer, Rachel Lutsic, Sarah Mills, Dr. Brian DeJong.: *Wireless User Controlled Robotic Arm*. Rep. 2009. Print.

- [11] Adafruit, *Setting up IO Python Library on BeagleBone Black*[en línea]. [fecha de consulta: 15 Enero 2015]. Disponible en: <<https://learn.adafruit.com/setting-up-io-python-library-on-BeagleBone-black/>>
- [12] Con G de GNU (Maxpowell), *PWM en BeagleBone (servos)* [en línea]. [Fecha de consulta: 15 Enero 2015]. Disponible en: <<http://www.congdegnu.es/2012/05/27/pwm-en-BeagleBone-servos/>>

## Anexos

---

### A. Anexo de piezas

#### *Piezas compradas*

- Pistón neumático de 200 mm

Fabricante: SMC CD85N16-200-B

Distribuidor: RS (Cod. 624-0204)

Descripcion: Varilla de longitud de 200mm y calibre de 6mm. Presion máxima de 1 MPa.

Precio: 45,84€



- Pistón neumático de 125 mm

Fabricante: SMC CD85N16-200-B

Distribuidor: RS (Cod. 624-0204)

Descripcion: Varilla de longitud de 125mm y calibre de 6mm. Presion máxima de 1 MPa.

Precio: 45,84€

- Motor reductor

Fabricante: DealExtreme

Distribuidor: DealExtreme (Cód.111321)

## DESARROLLO DE UN BRAZO MECÁNICO ARTICULADO ELECTRO-NEUMÁTICO

Descripción: Varilla de 13mm. Voltaje de 12V. Amperaje de 120mA.  
Torque de 2kg. Velocidad máxima 42rpm.  
Precio: 13,72€



### - Engranaje central

Fabricante: RS (Amidata S.A.)

Distribuidor: RS (Cód. 5216373)

Descripción: Engranaje de acero de módulo 1, diámetro 60 mm, 60 dientes y diámetro del calibre 10 mm.

Precio: 23,69 €



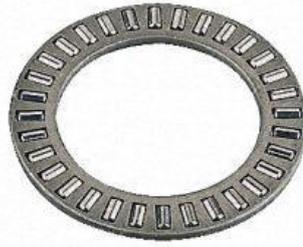
### - Rodamientos

Fabricante: SKF (Cód.AXK 1024)

Distribuidor: RS (Cod.513-761)

Descripción: Rodamiento de rodillos. Diámetro de entrada de 10 mm. Diámetro de salida de 24 mm. Anchura de 2 mm.

Precio: 2,57€



- Varilla de aluminio anodizado de 10 mm

Varilla de aluminio anodizado de 10 mm de diámetro y 10 cm de longitud.  
Fabricante: Igus (Cód.AWMP-10-600)  
Distribuidor: RS (Cod.747-2594)  
Descripción: Varilla de aluminio anodizado de 10 mm de diámetro y de 600 mm de longitud.  
Precio: 23,80 €



- Varilla de aluminio anodizado de 8 mm

Fabricante: Igus (Cód.AWMP-08-400)  
Distribuidor: RS (Cód.747-2590)  
Descripción: Varilla de aluminio anodizado de 8 mm de diámetro y de 400 mm de longitud.  
Precio: 17,86 €

- Tubo de 110mm de diámetro y una longitud de 100 cm.

Fabricante: AKI (Ref. 9606768)  
Distribuidor: AKI  
Descripción: Tubo de aluminio vitrificado de 100 cm de longitud y 110 mm de diámetro.  
Precio: 19,95 €



Este tubo se dividirá en cuatro fragmentos más pequeños que servirán para imitar las secciones del brazo y del antebrazo. Dos fragmentos son de un tamaño mayor que serán las partes fijas de la estructura. Las secciones más pequeñas llevan el mecanismo de rotación.

- Motor

Fabricante: DealExtreme

Distribuidor: DealExtreme (Cód. 91623)

Descripción: Motor de 12 V y 15rpm. Varilla de rotación de 4 mm de diámetro.

Precio: 7,41 €



- Engranaje de latón

Fabricante: Microlog (Ref. 61)

Distribuidor: Microlog

Descripción: Engranaje de latón de módulo 1, diámetro de entrada de 4 mm y 10 dientes.

Precio: 1,36 €

- Perfil de aluminio

Fabricante: AKI (Ref. 9785531)

Distribuidor: AKI

Descripción: Perfil de aluminio bruto de 40 mm de anchura, 2 mm de grosor y 1 m de longitud.

Precio: 4,15 €

- Perfil de aluminio en ángulo desigual

Fabricante: AKI (Ref. 9785620)

Distribuidor: AKI

Descripción: Perfil de aluminio bruto en ángulo desigual de 10x15 mm de anchura, 1 mm de grosor y 1 m de longitud.

Precio: 2,45 €

- Válvulas neumáticas

Fabricante: SMC Pneumatics(Ref. 9785620)

Distribuidor: SMC España

Descripción: Válvula neumática eléctrica de dos vías. Modelo VDW31-6G-3-C6-XF. Calibre de entrada de 6 mm con bloqueo por presión. Rango de presión soportada: 0-0,1MPa. Voltaje de alimentación: 12V.

Precio: 20,50 €

### ***Piezas fabricadas***

- Varilla de rotación del hombro  
Se corta la varilla de 8 mm de diámetro para que tenga una longitud de 10 cm.
  
- Placa de metal  
Cuarto de circunferencia de hierro que permite a la pieza en U desplazarse gracias a una pequeña esfera de acero que hace de rodamiento.
  
- Perfil de soporte de pistón del hombro  
Pieza en U adaptada para poder reposar el pistón responsable del movimiento de abducción-aducción del hombro.
  
- Pieza unión pistón húmero  
Se cortan dos perfiles de aluminio de 2 cm de ancho y 18 cm de longitud. Se deja una separación de 1 cm para que el cabezal que une la varilla del pistón y esta pieza pueda rotar con cierta soltura.
  
- Refuerzos interiores



Estos refuerzos son placas fabricadas a mano a partir de un perfil liso de aluminio de 4cm de ancho y 2mm de grosor. Estas placas presentan dos enganches en los extremos que servirán para sujetarse a través de tornillos al armazón exterior del brazo. Dependiendo de si son de fijos o de

móviles(véase la sección 4.5), presentarán otros dos enganches en el centro. Estos enganches centrales unirán la varilla central

- Pieza unión codo antebrazo

Esta pieza es la misma que une el pistón neumático del hombro al húmero sólo que de una longitud algo menor.

- Pieza de sujeción del pistón

El pistón del codo, al ir dentro del armazón que forma el tubo, ha tenido que ser fijado a través de una pieza diseñada especialmente para tal fin. Esto se debe a que el pistón debía mantener una posición paralela a la varilla central en el momento en el que este tenga la varilla completamente extraída.

## **B. Anexo de programación**

### ***Instalación librerías necesarias***

En la página de Adafruit, se pueden encontrar muchas aplicaciones de la BeagleBone y sus detalladas explicaciones. En este caso se ha seguido el apartado en el cual muestran como instalar la librería Adafruit\_BBIO (<https://learn.adafruit.com/setting-up-io-python-library-on-BeagleBone-black/>).

Se siguen los pasos mostrados en el tutorial y se completa la instalación de los paquetes que permiten ejecutar comandos en Python dentro del SO de la BeagleBone.

También se siguen los pasos del siguiente tutorial de manera que se pueden controlar los servos de manera efectiva (<http://www.congdegnu.es/2012/05/27/pwm-en-BeagleBone-servos/>). En esta página, se muestran además un paquete de archivos que permiten el control de los servos. Estos archivos se pueden añadir a la BeagleBone gracias al programa WinSCP que permite acceder a través de FTP a la BeagleBone. Este paquete, llamado BeagleBone-Tools, se pone en el directorio *root* de la BeagleBone.

Una vez añadidos los archivos, se añade un paquete de instalación más gracias al comando:

```
sudo apt-get install python-nmap
```

Tras esto ya se pueden controlar los servos.

Después de haber instalado las librerías necesarias, hay que adaptar los pines al uso correspondiente que se les quiera dar cambiando su modo de funcionamiento. Cada pin tiene varias funciones dependiendo del modo en el que se encuentren.

En las siguientes tablas se puede ver las funciones que los pines traen por defecto.

**Table 8. Expansion Header P8 Pinout**

SIGNAL NAME	PROC	CONN	CONN	PROC	SIGNAL NAME
	GND	1	2	GND	
GPIO1_6	R9	3	4	T9	GPIO1_7
GPIO1_2	R8	5	6	T8	GPIO1_3
TIMER4	R7	7	8	T7	TIMER7
TIMER5	T6	9	10	U6	TIMER6
GPIO1_13	R12	11	12	T12	GPIO1_12
EHRPWM2B	T10	13	14	T11	GPIO0_26
GPIO1_15	U13	15	16	V13	GPIO1_14
GPIO0_27	U12	17	18	V12	GPIO2_1
EHRPWM2A	U10	19	20	V9	GPIO1_31
GPIO1_30	U9	21	22	V8	GPIO1_5
GPIO1_4	U8	23	24	V7	GPIO1_1
GPIO1_0	U7	25	26	V6	GPIO1_29
GPIO2_22	U5	27	28	V5	GPIO2_24
GPIO2_23	R5	29	30	R6	GPIO2_25
UART5_CTSN	V4	31	32	T5	UART5_RTSN
UART4_RTSN	V3	33	34	U4	UART3_RTSN
UART4_CTSN	V2	35	36	U3	UART3_CTSN
UART5_TXD	U1	37	38	U2	UART5_RXD
GPIO2_12	T3	39	40	T4	GPIO2_13
GPIO2_10	T1	41	42	T2	GPIO2_11
GPIO2_8	R3	43	44	R4	GPIO2_9
GPIO2_6	R1	45	46	R2	GPIO2_7

**Table 11. Expansion Header P9 Pinout**

SIGNAL NAME	PIN	CONN	CONN	PIN	SIGNAL NAME
	GND	1	2	GND	
	VDD_3V3EXP	3	4	VDD_3V3EXP	
	VDD_5V	5	6	VDD_5V	
	SYS_5V	7	8	SYS_5V	
PWR_BUTTON*		9	10	A10	SYS_RESETh
UART4_RXD	T17	11	12	U18	GPIO1_28
UART4_TXD	U17	13	14	U14	EHRPWM1A
GPIO1_16	R13	15	16	T14	EHRPWM1B
I2C1_SCL	A16	17	18	B16	I2C1_SDA
I2C2_SCL	D17	19	20	D18	I2C2_SDA
UART2_TXD	B17	21	22	A17	UART2_RXD
GPIO1_17	V14	23	24	D15	UART1_TXD
GPIO3_21	A14	25	26	D16	UART1_RXD
GPIO3_19	C13	27	28	C12	SPI1_CS0
SPI1_D0	B13	29	30	D12	SPI1_D1
SPI1_SCLK	A13	31	32	VDD_ADC(1.8V)	
AIN4	C8	33	34	GND_ADC	
AIN6	A5	35	36	A5	AIN5
AIN2	B7	37	38	A7	AIN3
AIN0	B6	39	40	C7	AIN1
CLKOUT2	D14	41	42	C18	GPIO0_7
	GND	43	44	GND	
	GND	45	46	GND	

En cambio los pines pueden tener diferentes modos a los que vienen definidos por defecto y se pueden cambiar consultando las siguientes tablas.

Table 9. P8 Mux Options Modes 0-3

PIN	PROC	NAME	MODE0	MODE1	MODE2	MODE3
1		GND				
2		GND				
3	R9	GPIO1_6	gpmc_ad6	mmc1_dat6		
4	T9	GPIO1_7	gpmc_ad7	mmc1_dat7		
5	R8	GPIO1_2	gpmc_ad2	mmc1_dat2		
6	T8	GPIO1_3	gpmc_ad3	mmc1_dat3		
7	R7	TIMER4	gpmc_advn_ale		timer4	
8	T7	TIMER7	gpmc_oen_ren		timer7	
9	T6	TIMER5	gpmc_be0n_cle		timer5	
10	U6	TIMER6	gpmc_wen		timer6	
11	R12	GPIO1_13	gpmc_ad13	lcd_data18	mmc1_dat5	mmc2_dat1
12	T12	GPIO1_12	GPMC_AD12	LCD_DATA19	MMC1_DAT4	MMC2_DAT0
13	T10	EHRPWM2B	gpmc_ad9	lcd_data22	mmc1_dat1	mmc2_dat5
14	T11	GPIO0_26	gpmc_ad10	lcd_data21	mmc1_dat2	mmc2_dat6
15	U13	GPIO1_15	gpmc_ad15	lcd_data16	mmc1_dat7	mmc2_dat3
16	V13	GPIO1_14	gpmc_ad14	lcd_data17	mmc1_dat6	mmc2_dat2
17	U12	GPIO0_27	gpmc_ad11	lcd_data20	mmc1_dat3	mmc2_dat7
18	V12	GPIO2_1	gpmc_clk_mux0	lcd_memory_clk	gpmc_wait1	mmc2_clk
19	U10	EHRPWM2A	gpmc_ad8	lcd_data23	mmc1_dat0	mmc2_dat4
20	V9	GPIO1_31	gpmc_csn2	gpmc_be1n	mmc1_cmd	
21	U9	GPIO1_30	gpmc_csn1	gpmc_clk	mmc1_clk	
22	V8	GPIO1_5	gpmc_ad5	mmc1_dat3		
23	U8	GPIO1_4	gpmc_ad4	mmc1_dat4		
24	V7	GPIO1_1	gpmc_ad1	mmc1_dat1		
25	U7	GPIO1_0	gpmc_ad0	mmc1_dat0		
26	V6	GPIO1_29	gpmc_csn0			
27	U5	GPIO2_22	lcd_vsync	gpmc_a8		
28	V5	GPIO2_24	lcd_pclk	gpmc_a10		
29	R5	GPIO2_23	lcd_hsync	gpmc_a9		
30	R6	GPIO2_25	lcd_ac_bias_en	gpmc_a11		
31	V4	UART5_CTSN	lcd_data14	gpmc_a18	eQEP1_index	mcasp0_axr1
32	T5	UART5_RTSN	lcd_data15	gpmc_a19	eQEP1_strobe	mcasp0_ahclkx
33	V3	UART4_RTSN	lcd_data13	gpmc_a17	eQEP1B_in	mcasp0_fsr
34	U4	UART3_RTSN	lcd_data11	gpmc_a15	ehrpwm1B	mcasp0_ahclkr
35	V2	UART4_CTSN	lcd_data12	gpmc_a16	eQEP1A_in	mcasp0_aclkr

PIN	PROC	NAME	MODE0	MODE1	MODE2	MODE3
36	U3	UART3_CTSN	lcd_data10	gpmc_a14	ehrpwm1A	mcasp0_axr0
37	U1	UART5_TXD	lcd_data8	gpmc_a12	ehrpwm1_tripzone_in	mcasp0_aclkx
38	U2	UART5_RXD	lcd_data9	gpmc_a13	ehrpwm0_synco	mcasp0_fsx
39	T3	GPIO2_12	lcd_data6	gpmc_a6		eQEP2_index
40	T4	GPIO2_13	lcd_data7	gpmc_a7		eQEP2_strobe
41	T1	GPIO2_10	lcd_data4	gpmc_a4		eQEP2A_in
42	T2	GPIO2_11	lcd_data5	gpmc_a5		eQEP2B_in
43	R3	GPIO2_8	lcd_data2	gpmc_a2		ehrpwm2_tripzone_in
44	R4	GPIO2_9	lcd_data3	gpmc_a3		ehrpwm0_synco
45	R1	GPIO2_6	lcd_data0	gpmc_a0		ehrpwm2A
46	R2	GPIO2_7	lcd_data1	gpmc_a1		ehrpwm2B

Table 10. P8 Mux Options Modes 4-7

PIN	PROC	NAME	MODE4	MODE5	MODE6	MODE7
1		GND				
2		GND				
3	R9	GPIO1_6				gpio1[6]
4	T9	GPIO1_7				gpio1[7]
5	R8	GPIO1_2				gpio1[2]
6	T8	GPIO1_3				gpio1[3]
7	R7	TIMER4				gpio2[2]
8	T7	TIMER7				gpio2[3]
9	T6	TIMER5				gpio2[5]
10	U6	TIMER6				gpio2[4]
11	R12	GPIO1_13	eQEP2B_in			gpio1[13]
12	T12	GPIO1_12	EQEP2A_IN			gpio1[12]
13	T10	EHRPWM2B	ehrpwm2B			gpio0[23]
14	T11	GPIO0_26	ehrpwm2_tripzone_in			gpio0[26]
15	U13	GPIO1_15	eQEP2_strobe			gpio1[15]
16	V13	GPIO1_14	eQEP2_index			gpio1[14]
17	U12	GPIO0_27	ehrpwm0_synco			gpio0[27]
18	V12	GPIO2_1			mcasp0_fsr	gpio2[1]
19	U10	EHRPWM2A	ehrpwm2A			gpio0[22]
20	V9	GPIO1_31				gpio1[31]
21	U9	GPIO1_30				gpio1[30]
22	V8	GPIO1_5				gpio1[5]
23	U8	GPIO1_4				gpio1[4]
24	V7	GPIO1_1				gpio1[1]
25	U7	GPIO1_0				gpio1[0]
26	V6	GPIO1_29				gpio1[29]
27	U5	GPIO2_22				gpio2[22]
28	V5	GPIO2_24				gpio2[24]
29	R5	GPIO2_23				gpio2[23]
30	R6	GPIO2_25				gpio2[25]
31	V4	UART5_CTSN	uart5_rxd		uart5_ctsn	gpio0[10]
32	T5	UART5_RTSN	mcasp0_axr3		uart5_rtsn	gpio0[11]
33	V3	UART4_RTSN	mcasp0_axr3		uart4_rtsn	gpio0[9]
34	U4	UART3_RTSN	mcasp0_axr2		uart3_rtsn	gpio2[17]
35	V2	UART4_CTSN	mcasp0_axr2		uart4_ctsn	gpio0[8]
36	U3	UART3_CTSN			uart3_ctsn	gpio2[16]
37	U1	UART5_TXD	uart5_txd		uart2_ctsn	gpio2[14]

PIN	PROC	NAME	MODE4	MODE5	MODE6	MODE7
38	U2	UART5_RXD	uart5_rxd		uart2_rtsn	gpio2[15]
39	T3	GPIO2_12				gpio2[12]
40	T4	GPIO2_13	pr1_edio_data_out7			gpio2[13]
41	T1	GPIO2_10				gpio2[10]
42	T2	GPIO2_11				gpio2[11]
43	R3	GPIO2_8				gpio2[8]
44	R4	GPIO2_9				gpio2[9]
45	R1	GPIO2_6				gpio2[6]
46	R2	GPIO2_7				gpio2[7]

Table 12. P9 Mux Options Modes 0-3

PIN	PROC	SIGNAL NAME	MODE0	MODE1	MODE2	MODE3
1		GND				
2		GND				
3		DC_3.3V				
4		DC_3.3V				
5		VDD_5V				
6		VDD_5V				
7		SYS_5V				
8		SYS_5V				
9		PWR_BUTTON				
10	A10	SYS_RESETn	RESET_OUT			
11	T17	UART4_RXD	gpmc_wait0	mii2_crs	gpmc_csn4	mii2_crs_dv
12	U18	GPIO1_28	gpmc_be1n	mii2_col	gpmc_csn6	mmc2_dat3
13	U17	UART4_TXD	gpmc_wpn	mii2_rxerr	gpmc_csn5	mii2_rxerr
14	U14	EHRPWM1A	gpmc_a2	mii2_bxd3	rgmii2_td3	mmc2_dat1
15	R13	GPIO1_16	gpmc_a0	gmi2_bxen	mii2_tcll	mii2_bxen
16	T14	EHRPWM1B	gpmc_a3	mii2_bxd2	rgmii2_td2	mmc2_dat2
17	A16	I2C1_SCL	spi0_cs0	mmc2_sdwp	I2C1_SCL	ehrpwm0_synci
18	B16	I2C1_SDA	spi0_d1	mmc1_sdwp	I2C1_SDA	ehrpwm0_tripzone
19	D17	I2C2_SCL	uart1_rtsn	timer5	dcan0_rx	I2C2_SCL
20	D18	I2C2_SDA	uart1_ctsn	timer6	dcan0_tx	I2C2_SDA
21	B17	UART2_TXD	spi0_d0	uart2_txd	I2C2_SCL	ehrpwm0B
22	A17	UART2_RXD	spi0_sclk	uart2_rxd	I2C2_SDA	ehrpwm0A
23	V14	GPIO1_17	gpmc_a1	gmi2_rxdv	rgmii2_rxdv	mmc2_dat0
24	D15	UART1_TXD	uart1_bxd	mmc2_sdwp	dcan1_rx	I2C1_SCL
25	A14	GPIO3_21	mcasp0_ahclkx	eQEP0_strobe	mcasp0_axr3	mcasp1_axr1
26	D16	UART1_RXD	uart1_rxd	mmc1_sdwp	dcan1_tx	I2C1_SDA
27	C13	GPIO3_19	mcasp0_fsr	eQEP0B_in	mcasp0_axr3	mcasp1_fsx
28	C12	SPI1_CS0	mcasp0_ahclk	ehrpwm0_synci	mcasp0_axr2	spi1_cs0
29	B13	SPI1_D0	mcasp0_fsx	ehrpwm0B		spi1_d0
30	D12	SPI1_D1	mcasp0_axr0	ehrpwm0_tripzone		spi1_d1
31	A13	SPI1_SCLK	mcasp0_aclkx	ehrpwm0A		spi1_sdk
32		VADC				
33	C8	AIN4				
34		AGND				
35	A8	AIN6				

PIN	PROC	SIGNAL NAME	MODE0	MODE1	MODE2	MODE3
36	B8	AIN5				
37	B7	AIN2				
38	A7	AIN3				
39	B6	AIN0				
40	C7	AIN1				
41	D14	CLKOUT2	xdma_event_intr1		tcikn	clkout2
42	C18	GPIO0_7	eCAP0_in_PWM0_out	uart3_txd	spi1_cs1	pr1_ecap0_ecap_cap_in_apwm_o
43		GND				
44		GND				
45		GND				
46		GND				

Table 13. P9 Mux Options Modes 4-7

PIN	PROC	SIGNAL NAME	MODE4	MODE5	MODE6	MODE7
1		GND				
2		GND				
3		DC_3.3V				
4		DC_3.3V				
5		VDD_5V				
6		VDD_5V				
7		SYS_5V				
8		SYS_5V				
9		PWR_BUTTON				
10	A10	SYS_RESETn				
11	T17	UART4_RXD	mmc1_sdcd		uar4_rxd_mux2	gpio0[30]
12	U18	GPIO1_28	gpmc_dir		mcasp0_aclkr_mux3	gpio1[28]
13	U17	UART4_TXD	mmc2_sdcd		uar4_txd_mux2	gpio0[31]
14	U14	EHRPWM1A	gpmc_a18		ehrpwm1A_mux1	gpio1[18]
15	R13	GPIO1_16	gpmc_a16		ehrpwm1_tripzone_input	gpio1[16]
16	T14	EHRPWM1B	gpmc_a19		ehrpwm1B_mux1	gpio1[19]
17	A16	I2C1_SCL				gpio0[5]
18	B16	I2C1_SDA				gpio0[4]
19	D17	I2C2_SCL	spl1_cs1			gpio0[13]
20	D18	I2C2_SDA	spl1_cs0			gpio0[12]
21	B17	UART2_TXD			EMU3_mux1	gpio0[3]
22	A17	UART2_RXD			EMU2_mux1	gpio0[2]
23	V14	GPIO1_17	gpmc_a17		ehrpwm0_async	gpio1[17]
24	D15	UART1_TXD				gpio0[15]
25	A14	GPIO3_21	EMU4_mux2			gpio3[21]
26	D16	UART1_RXD				gpio0[14]
27	C13	GPIO3_19	EMU2_mux2			gpio3[19]
28	C12	SPI1_CS0	eCAP2_in_PWM2_out			gpio3[17]
29	B13	SPI1_D0	mmc1_sdcd_mux1			gpio3[15]
30	D12	SPI1_D1	mmc2_sdcd_mux1			gpio3[16]
31	A13	SPI1_SCLK	mmc0_sdcd_mux1			gpio3[14]
32		VDD_ADC (1.8V)				
33	C8	AIN4				
34		GND_ADC				
35	A5	AIN6				

PIN	PROC	SIGNAL NAME	MODE4	MODE5	MODE6	MODE7
36	A5	AIN5				
37	B7	AIN2				
38	A7	AIN3				
39	B6	AIN0				
40	C7	AIN1				
41	D14	CLKOUT2	timer7_mux1		EMU3_mux0	gpio0[20]
42	C18	GPIO0_7	spl1_sclk	mmc0_sdwp	xdma_event_intr2	gpio0_7
43		GND				
44		GND				
45		GND				
46		GND				

En estas tablas se puede observar el número del pin y el nombre que tienen los pines. Para cambiar el modo en el que se encuentra el pin, hay que ejecutar el siguiente comando.

```
echo X > /sys/kernel/debug/omap_mux/Y
```

Siendo X, el modo al que se quiere cambiar e Y, la carpeta que lleva el nombre del pino a cambiar. Este nombre es el modo 0 de cada pino.

Por ejemplo, si se quisiera cambiar el pino 13 del P8 del modo 0 al modo 4 (PWM), se haría el siguiente comando.

```
echo 4 > /sys/kernel/debug/omap_mux/gpmc_ad9
```

La información del resto de pines se puede encontrar en el SRM (System Reference Manual) de la BeagleBone (Disponible en [http://beagleboard.org/static/beaglebone/latest/Docs/Hardware/BONE\\_SRM.pdf](http://beagleboard.org/static/beaglebone/latest/Docs/Hardware/BONE_SRM.pdf))

### **Control del servomotor**

Después de haber añadido la carpeta BeagleBone-Tools al directorio *root* de la BeagleBone, se accede a la carpeta *servo* del conjunto:

```
cd root
cd BeagleBone-Tools/servo
python
import pwm
from servo import Servo
pwm.enable()
servo=Servo()
pwm.attach("P8_13")
```

Este comando puede variar dependiendo del puerto que queramos activar. Puede que falle y de cómo error: `Operationnotpermitted`, pero se ha realizado correctamente.

```
pwm.write(30)
pwm.writeMicroseconds(1370)
```

Con esto se hace una prueba de rotación de 30° del cabezal del servo.

Una vez se haya terminado de mover el motor y se vaya a cerrar el programa, se ha de ejecutar el siguiente comando para desenlazar los pines que se habían asignado para el movimiento del servomotor.

```
servo.detach()
```

### **Control de la válvula**

Las válvulas van conectados a MOSFET que permiten la apertura y el cierre de las mismas, dejando algunos microsegundos entre la apertura y el cierre de las válvulas se regula la entrada gradual de aire. Esta regulación permite controlar el movimiento de los pistones de manera precisa.

Gracias a la figura 79, se puede hacer el mapeo de los pines que están conectados a las válvulas, obteniendo la siguiente distribución.

Válvula	Pin	Válvula	Pin
HCP	P8_28	CCP	P8_18
HCE	P8_26	CCE	P8_16
HEP	P8_24	CEP	P8_14
HEE	P8_22	CEE	P8_12

De esta manera y comprobando que los pines seleccionados son GPIO en el modo 0, se puede proceder a realizar los comandos necesarios para activar o desactivar el paso de corriente a través de los MOSFET poniendo a nivel alto (1) la señal de la puerta.

Se ponen los siguientes comandos en la consola de PuTTY para poder manejar los pines GPIO.

```
python

importAdafruit_BBIO.GPIOas GPIO

GPIO.setup("P8_12", GPIO.OUT)
GPIO.output("P8_12", GPIO.HIGH)
GPIO.output("P8_12", GPIO.LOW)
GPIO.cleanup()
```

De esta forma se le ha asignado al pin P8\_12 la condición de GPIO de salida, se le da un valor alto y más tarde se le baja el valor de salida.

Para controlar el tiempo que está abierta la válvula, se puede usar el comando

```
import time
time.sleep(X)
```

Siendo X el número de segundos que se deja el programa en espera antes de ejecutar la siguiente instrucción.

### **Control del motor de continua**

El control de los motores se realiza gracias a los puentes H presentes en el circuito. Dichos dispositivos tienen dos entradas de control que permiten cambiar el sentido de giro de los motores así como crear un circuito abierto que desconecte los motores y pare el movimiento de los mismos.

Tal como se hizo para el apartado anterior de este anexo, gracias a la figura 79, se mapean los pines asociados a cada puente H responsable del sentido de giro de los motores de continua, obteniendo los siguiente.

Parte del sistema	Entrada	Pin
Hombro	IN_A	P8_11
	IN_B	P8_9
Brazo	IN_A	P9_14
	IN_B	P9_16
Antebrazo	IN_A	P9_21
	IN_B	P9_22

Tan solo el pin P8\_11 es un GPIO en el modo 0, el resto de pines de la tabla necesitan cambiar a modo 7 para poder ser GPIO.

El siguiente aspecto a tener en cuenta para los puentes H es la tabla de la verdad asociada a sus entradas y salidas.

IN_A	IN_B	OUT_A	OUT_B
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	HiZ	HiZ

Así pues tal como se hizo en el apartado anterior también, basta con poner a nivel alto o bajo los pines adecuados para cambiar el sentido de giro del motor.

```
python
```

```
import Adafruit_BBIO.GPIO as GPIO
import time
GPIO.setup("P8_11", GPIO.OUT)
GPIO.setup("P8_9", GPIO.OUT)
GPIO.output("P8_11", GPIO.HIGH)
GPIO.output("P8_9", GPIO.LOW)

time.sleep(3)

GPIO.output("P8_11", GPIO.LOW)

Time.sleep(0.2)

GPIO.output("P8_9", GPIO.HIGH)

time.sleep(3)

GPIO.output("P8_9", GPIO.LOW)

GPIO.cleanup()
```

Estos comandos permiten que el motor gire en una dirección durante 3 segundos y después cambie de sentido y gire otros tres segundos para después pararse.

## Publicación

---

En este anexo se presenta la publicación, con ISBN 978-1-4799-5743-9/14, que se realizó sobre este proyecto y que fue admitida para presentación en la conferencia de DCIS (Design of Circuits and Integrated Systems), que se celebró en Noviembre de 2014 en Madrid (España).

Referencia: J. Del Sol Rodriguez, F. Lopez-Colino, G. Gonzalez de Rivera & J. Garrido, "Design and Development of an Anthropomorphic Robotic Arm for Educational Purposes", *XXIX Conference on Design of Circuits and Integrated Systems*, Madrid, Spain, nov 2014



# Design and Development of an Anthropomorphic Robotic Arm for Educational Purposes

Javier del Sol Rodríguez, Fernando López-Colino, Guillermo González de Rivera, Javier Garrido  
HCTLab, Dpto de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones  
Universidad Autónoma de Madrid  
(Spain)

email: fj.lopez@uam.es, javier.sol@estudiante.uam.es

**Abstract**—This paper presents the design and construction of an anthropomorphic robotic arm for educational purposes. The human arm is a complex structure comprising three different joints, each with unique degrees of freedom. Each articulation requires a different solution allowing us to include different actuators, using different sensing techniques and control approaches. Also, the positioning of the hand with a defined orientation requires solving an inverse kinematic system.

This paper focuses on the design, construction and open loop control of the arm. The use of these different actuators will allow students to experiment with the control techniques of each of them while comparing the movements of the robotic arm with their own.

**Keywords**—Educational Electronics; Robotic Arm; Anthropomorphism; Embedded Systems

## I. INTRODUCTION

THE construction of anthropomorphic robots has been exploited since Leonardo DaVinci's first ideas of an armoured humanoid robot in 1495 operated with pulleys and cables. The development through the history has allowed humankind to create robotic systems simulating anthropomorphism; robots that look like humans with similar motion range and precision to the human body. The first aims of the construction of humanoid robots were to help within the industry sector or to substitute men in tough work.

The first robots were based on mechanisms such as cables, pulleys and gears. Later on, the development of electronics and the digitalization of the technology improved the control of the robots allowing controlling them digitally. The first digitally and programmable, but non-humanoid, robot appeared in 1961 developed by General Motors. The industry developed fast and followed several different paths. The robot construction lines acquired a great relevance in the industry. Nonetheless, the humanoid robot still had its own magnitude in the robot market. The development has sign and construction of a robotic arm as an approach to

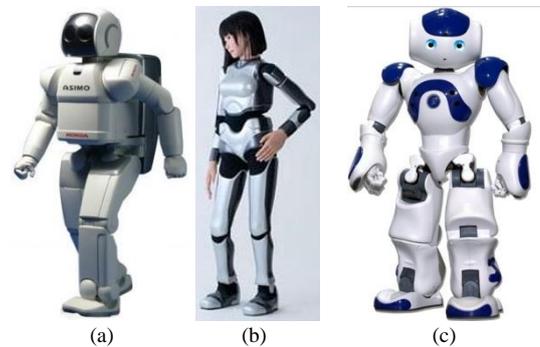


Fig. 1. Examples of anthropomorphic robots: ASIMO (a), HRP-4C (b) and Nao robots (c).

the study of different kinds of actuators, sensors and control techniques. This paper describes the design and construction of the robotic arm focusing on the different actuators and an open loop control approach. This will allow the students willing to learn about pneumatics and mechanics to work with an interactive device and to experiment different control techniques.

The paper is structured as follows: section II present the state of the art related to the design and applications of robotic arms. Section III describes the design, actuators and construction of the proposed anthropomorphic robotic arm. Finally, section IV summarizes this work and section V proposes the new development steps of the robotic arm.

## II. STATE OF THE ART

The construction of an anthropomorphic arm is not a cutting-edge project but rather a well exploited area within engineering. Being so usual the imitation of the human body or any of its parts, the resources available on this matter are very extent and of any kind. Several applications can be found in the bibliography. The main applications are presented next.

The first application is to serve as an aid for people who had suffered physical problems or due to an advanced age resulting in reduced mobility. A second

application is the development of partial or complete structures of an anthropomorphic arm in order to study the different joints and to improve their resemblance with the human arm. The last application, the one developed in this paper also, is the elaboration of an anthropomorphic arm for educational purposes.

For the first application, the assistive approach, the projects were focused on the development of exoskeletal structures. One example is the development of a project aiming to strengthen the shoulder joint for people with motion problems. This project uses electromyographic signals generated while performing the movements of the shoulder. The system requires an adaptation to the signals obtained from each patient. These measures lead to a better configuration when the structure is used on the real person with motion problems. The system can also predict the movements done by the patient and make it easier to them [1][2]. A different project involving an exoskeletal structure, describes a structure that helps with the motion of the shoulder and the elbow. The purpose of the construction of this structure is the rehabilitation of the patients that have suffered a stroke. The structure is composed of a base, where the patient sits, and a fastening block. This one is powered by two motors that will rotate simulating the normal movement of an arm. [4]. A third project covering the medical purpose introduces an implantable prosthesis. The prosthesis is designed to replace the elbow joint and help on the movement of the forearm. It incorporates also a new system called T-Mechanism that helps fulfilling the rotation of the forearm [5].

For the second application considered, the achievement of a functional arm with similar range of motion as the human arm, projects simulate the motion range of a real arm in different ways. A first project presents a shoulder joint that performs its movement by a "tendon-driven architecture" through cables, weights and motors. The three main muscles of the shoulder are represented by cables [6]. Another example showing the application of the simulation of the human joint describes an elbow joint made by air cushions. The joint describes one degree of freedom, but the air cushions help to improve the realism of the movement of the joint [7]. A third example of this application presents a fully functional robotic arm. Apart from developing the three main joints of the arm (shoulder, elbow and wrist) and the hand, it also considers the construction of the sternum and the clavicle. It adds stability and precision in the movement of the system. The main advance that proposes this project is an anti-collision mechanism for the joint of the shoulder that allows a wide range of movement for the arm with a high degree of stability. The arm performs a movement with a high degree of resemblance with a real arm using pneumatic muscles. These simulate the reaction that a muscle would have



Fig. 2. Image of the developed robotic hand

when contracted and increasing the fluidity of movement of the system. In the paper presenting the project, an example of the arm throwing a ball can be found demonstrating the high fluency of the arm [8].

The last objective of the construction of an arm that has been contemplated is the educational application of the development. This is the purpose sought by this paper and project. Even though the projects that have been consulted do not develop an anthropomorphic arm, they share the same aim, the educational robotics. They present a structure with three joints and a clip allowing them to grab objects. One of them is made of transparent material so the students can observe all the components composing the arm [9]. The other project presents also a software program used to describe trajectories of the arm and encouraging the students to learn about them [10]. An equivalent design implemented a seven Degrees of Freedom (DoF) robotic arm, using DC motors and servomotors [11].

Authors developed, two years ago, an educational robotic hand [12]. That project initiated a research line focused on educational anthropomorphic robotics. In that development of the hand, authors carried on the construction of a limb with electric and mechanical components. The actuators were exclusively low-cost servomotors and a basic microcontroller. The servomotors allowed it to perform precise movements simulating the movements of real fingers. As it did not have to lift objects, the choice was to install low torque servomotors that could be more precise than a motor. This decision was taken so the students could observe the operation of the servomotors and how the hand would act as a complex system (Fig. 2).

### III. DESIGN OF THE ROBOTIC ARM

This section will focus on the design of the robotic arm and describe how each of the relevant parts of the arm has been created. The main focus of the design is to serve as a teaching tool. Secondly, the anthropomorphism of its design is to be maximized. For this reason, the design has been based on specialized anatomy reference [13].

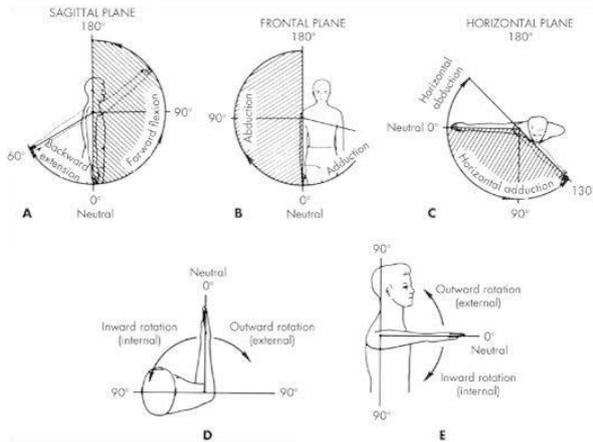


Fig. 3. Degrees of Freedom of the shoulder

However, some modifications to the design, which decrease the similarity to the real arm, have been included to simplify the construction and joint control. The following sections describe the main parts of the robotic arm.

#### A Shoulder complex

Human's shoulder complex comprises the joints between the humerus, the clavicle and the shoulder blade. These joints allow a wide range of movements, which defines three rotation axes or three DoF. The humerus may point in any direction in a semi-sphere and rotate along itself.

The design of the robotic arm has simplified the shoulder, considering only the humerus joint. This defines the abduction-adduction and the flexion-extension movements shown in Fig. 3 and the pronation-supination, i.e. the rotation along itself. A second simplification of the design compared to the human shoulder is to avoid using of a spherical, and more complex, joint. The axes of the abduction-adduction and the flexion-extension motions have been separated to ease placing the actuators. The third one, the pronation-supination motion, has been displaced to the humerus. However, the final design still has three DoF with the same range of motion.

The adduction-abduction motion (Fig. 3b) is managed with a double action pneumatic piston (SMC CD85N16-200-B). The position of the piston is controlled with four two-way normally closed valves (VDW31-6G-3-C6-XF). Each movement of the piston is controlled with two valves, allowing it to control the pressure in each section of the piston independently. The piston has been positioned to allow the 90° range movement of this motion. The horizontal flexion-extension motion (Fig. 3c) is achieved by means of a DC motor geared-connected to the arm. This DC motor has been selected with a high torque as it moves the whole arm structure. For the sake of clarity, the CAD design of this structure

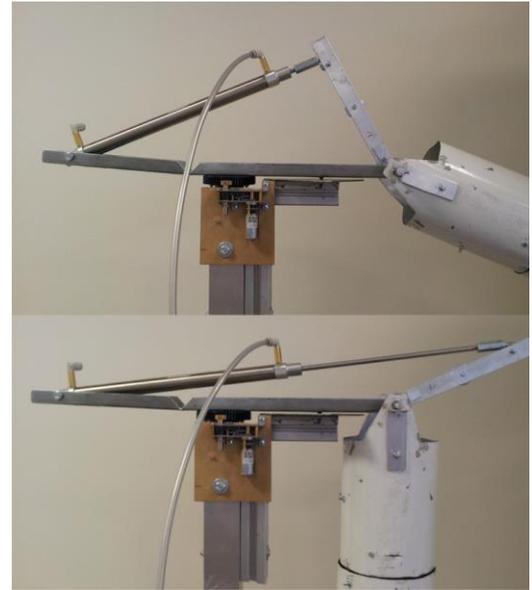
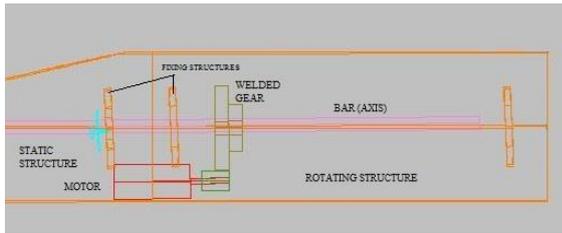


Fig. 4. Implementation of the adduction-abduction motion using the pneumatic piston

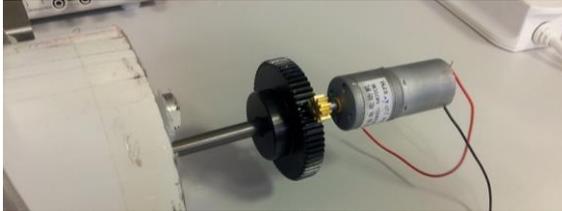


Fig. 5. Implementation of the horizontal flexion-extension motion by means of a DC motor

has been included. Fig. 4 shows the adduction-abduction motion and the horizontal flexion extension of the shoulder is depicted in Fig. 5. It can be observed that the shoulder is connected to a clavicle-like structure, which holds the whole structure.



(a) CAD diagram of the structure.

(b) Partial view of the rotational structure  
Fig.6. Longitudinal rotational structure

The pronation-supination has been solved dividing the upper-arm structure in two different sections. The upper section, connected to the shoulder and the piston, includes a second DC motor connected to a gear fixed to the lower section of the humerus. The actuation of the motor makes the lower section to rotate around the internal axis (resembling the humerus bone), see Fig. 6.

### B Elbow

The elbow joint comprises two different DoF. In this subsection the solutions for managing these two DoF are presented.

The first one is the flexion extension of the arm in relation to the upper-arm. The range of motion of this motion is about  $150^\circ$  from the complete extension to the complete flexion (Fig. 7). This motion, like the shoulder's adduction-abduction motion, has to consider high torque arm postures. Therefore, a similar solution has been used for this joint. A pneumatic piston (SMC CD85N16-125-B) placed in the lower part of the upper-arm and connected to the lower arm, generates the flexion-extension movement. Fig. 8 shows this joint in the arm.

The second DoF related to the elbow is the pronation-supination of the arm. This movement is generated by the twist of the two bones of the arm, the radius and the cubitus. This motion has almost a  $180^\circ$  range. Although the structures of the upper-arm and the arm are different, the resulting motion is equivalent. Therefore, the approach of the upper-arm can be used in the arm: Dividing the arm in two parts and rotating the lower in relation to the upper part. The main difference with the upper-arm design is the lower maximum torque to be considered. This allows us to include a different actuator: the use of a stepper motor for the arm, instead of a DC motor. Hence, the students have to handle a different actuator.

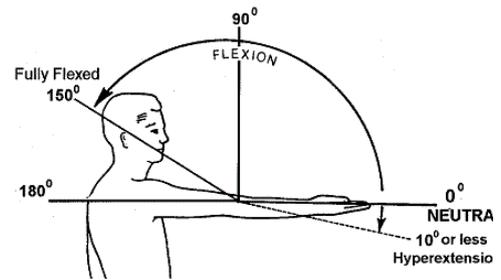


Fig. 7.Movement range of the elbow

(a) Flexed elbow (b) Extended elbow  
Fig. 8.Detailed view of the elbow joint.

### C Wrist

The last joint considered in this project is the wrist. This joint has two DoF (Fig. 9), the flexion-extension motion, with a wider rotation range, and the radio-ulnar deviation, which provides a lower rotation range.

The motions of the wrist are similar to the finger's first joint, which connects the finger with the palm. Therefore, the proposed solution in [10] and shown in Fig. 10 provides a valid solution. The wrist motion is controlled using two low-cost servomotors TowerPro SG90. Therefore, a new kind of actuator is included in the last joint of the arm.

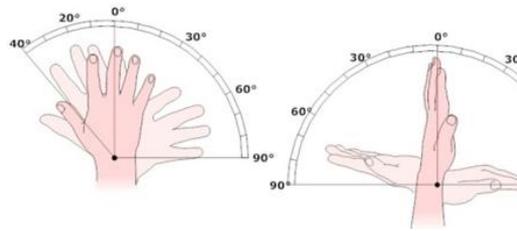
### D Hand

Considering that the main focus of the project is the design and creation of a robotic arm, the design of a fully-functional robotic hand has been omitted. To keep the anthropomorphism of the design, a basic structure, resembling the hand, has been connected to the wrist. This hand has been created keeping the same scale of the whole arm.

### E Sensors

Although the robotic arm presented in this paper does not include sensors, relying only in open loop control, these have been considered in the design of the robot.

Both the servomotors and the stepper-motors allow



(a) Radio-ulnar deviation (b) Flexion-extension  
Fig. 9. Movements of the wrist

precise control of their position. The DC motors and the pneumatic pistons may be substituted by versions which include an encoder to obtain their position. However, to avoid using these variations, several gyroscopes and accelerometers will be used. A gyroscope and an accelerometer will be installed in the upper part of the arm and the forearm. These will provide the orientation of each part of the limb. To increase the precision of the pronation-supination movements, a second gyroscope can be included in the lower section of the forearm. Finally, the hand will include the last gyroscope to measure its orientation.

#### IV. DIGITAL CONTROL

To manage all actuators and to handle the sensor signals a BeagleBone rev A6 has been selected as the main platform (<http://beagleboard.org/bone>). This is a small Linux-based computer which includes an AM335x 720 MHz ARM processor, 256 DDR2 RAM, up to 66 GPIO and eight PWM outputs, seven ADC inputs and I2C ports. The configuration of the BeagleBone allows the design of an expansion cape to adapt to the specific application. We have developed a simple expansion cape including the required H-bridges, motor and valve drivers and future sensor interface.

The BeagleBone runs a Linux Debian operating system, which provides uniform interface to every input, output and communications ports by means of files. This feature allows the students to focus on the actuators, sensors and control algorithms avoiding low level software management. The BeagleBone includes an Ethernet connection and the operating system allows a remote terminal connection to simplify the management even more.

Current software controls joint position using direct kinematics. A console application has been implemented to set the flexion for any joint. This application verifies that the input data fulfils the joint restrictions and will not produce a collision. If any of these conditions fail the application provides an error message and will not perform the movement.

#### V. RESULTS AND FUTUREWORK

The result of this work is a fully functional robotic arm. The final size of the robot, when fully extended, is 155 cm (comprising the clavicle, 33 cm; the arm, 46 cm; the forearm, 46 cm; and the hand, 30 cm). The rotation range for each joint and the full movement time are

presented in Table 1. These times have been measured in different positions.

The robotic arm uses different actuator systems: pneumatic pistons, DC motors, stepper motors and servo motors. The main objective of using these different actuators is to make the students to learn the use of these different kinds of actuators and practice their control.

The anthropomorphic design allows an easy comparison with a real example easing the

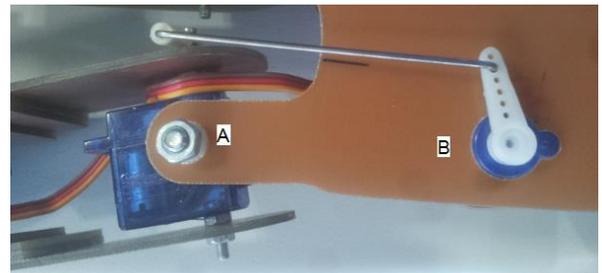


TABLE I  
JOINT ROTATION ANGLE AND MOVEMENT TIME. THE DIFFERENT TIMES CORRESPOND TO THE MIN-MAX TORQUE MOVEMENT.

Joint: motion	Angle range	Full movement time
Shoulder: flexion/extension	180°	4 s
Shoulder adduction/abduction	90°	5 s
Shoulder: pronation/supination	180°	7 s
Elbow: flexion/extension	145°	5 s
Elbow: pronation/supination	180°	4 s
Wrist: flexion/extension	135°	4 s
Wrist: radioulnar deviation	30°	1 s

understanding of the robot operation.

##### A FutureWork

Although the design of the arm includes a set of sensors to obtain the orientation of the three main elements of the robot (arm, forearm and hand), they are not included in the software development. A next step in the improvement of the robotic arm is the use of this sensor information within the software. This will allow a closed loop control of the position of each part of the limb.

A second planned improvement to the software is the management of the robot's position by means of an inverse kinematics solution. The robotic arm defines a seven DoF kinematic chain that has to be controlled to place the final effector (i.e., end part of the hand) in a defined position while avoiding any kind of collision with the environment.

## REFERENCES

- [1] K. Kiguchi, M. Yasuda, K. Iwami, K. Watanabe and T. Fukuda. (2012) Design Of An Exoskeletal Robot For Human Shoulder Motion Support Considering A Center Of Rotation Of The Shoulder Joint. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems
- [2] K. Kiguchi, K. Iwami, M. Yasuda, K. Watanabe and T. Fukuda. (2003). An exoskeletal robot for human shoulder joint motion assist, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics
- [3] M.H.Rahman, T. K. Ouimet, M. Saad, J.-P. Kenne and P. S. Archambault. (2010). Development And Control Of A Wearable Robot For Rehabilitation Of Elbow And Shoulder Joint Movements, IECON 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society
- [4] K. Kumar Kundu and K. Kiguchi. (2007). EMG Controlled Robotic Elbow Prosthesis as an Inner Skeleton Power Assist System. ICM2007 4th IEEE International Conference on Mechatronics
- [5] N. Sakai, Y. Sawae and T. Murakami. (2006) A Development of Joint Mechanism of Robot Arm Based on Human Shoulder Morphology, The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, BioRob 2006
- [6] S. Kajikawa, M. Nasuno and K. Hayasaka. (2010). Development of Human-Friendly Robot Arm with Adjustable Joint Compliance. 11th International Conference on Control Automation Robotics Vision (ICARCV)
- [7] S. Ikemoto, F. Kannou, K. Hosoda. (2012). Humanlike shoulder complex for musculoskeletal robot arms. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)
- [8] P. Krasňanský, F. Tóth, V. Villaverde Huertas, B. Rohal'-Ilkiv. (June, 2013). Basic Laboratory Experiments with an Educational Robotic Arm. International conference on Process Control (PC). Štrbské Pleso, Slovakia
- [9] W. Guan Hao, Y. Yee Leck and L. Chot Hun. (May, 2011). 6-DOF PC-Based Robotic Arm (PC-ROBOARM) With Efficient Trajectory Planning and Speed Control. 4th International Conference on Mechatronics (ICOM). Kuala Lumpur, Malaysia
- [10] C. Crosswait, S. Roell, N. Stack, J. Tice and B. P. DeJong. (March, 2010) A Seven Degree of Freedom Lifelike Robotic Arm, ASEE North Central Sectional Conference
- [11] V. Vaquero, F. López-Colino, G. González de Rivera and J. Garrido (November, 2011). Design of a Robotic Hand Applied to the Representation of the Spanish Sign Language Fingerspelling Dictionary. Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS), vol. 1, no. 1, pp. 137-142, Albufeira, Portugal
- [12] P.K. LeVangie, C. C. Norkin. (2001). Joint Structure and Function: A Comprehensive Analysis. Third Edition, F. A. Davis Company, ISBN: 803607105

## Presupuesto

---

1) Ejecución de Material	
• PC (Incluyendo Software)	2.000,00 €
• Fabricación piezas ABS impresora 3D	50,00 €
• Material de oficina	150,00 €
• Material electrónico	41,36 €
• Material de fabricación	632,18 €
Total Ejecución de Material	2.873,54 €
2) Gastos generales	
• 16% sobre Ejecución de material	459,77 €
3) Beneficios Industrial	
• 6% sobre Ejecución de material	172,41 €
4) Honorarios Proyecto	
• 900 horas a 23 €/hora	20.700,00 €
5) Material fungible	
• Gastos de impresión	80,00 €
• Encuadernación	200,00 €
Subtotal	24.485,72 €
IVA 21%	5.142,00 €
<b>Total Presupuesto</b>	<b>29.627,72 €</b>

Madrid, Febrero de 2015

El Ingeniero Jefe de Proyecto  
 Fdo.: Javier del Sol Rodríguez  
 Ingeniero de Telecomunicación



## Pliego de condiciones

---

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de un *Desarrollo de un brazo mecánico articulado electro-neumático*. 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 partidaalzada 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.