

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



PROYECTO FIN DE CARRERA

**DESARROLLO DE UNA MANO
MECÁNICA PARA LA
REPRESENTACIÓN DEL
ALFABETO DE DELETREO DE LA
LENGUA DE SIGNOS ESPAÑOLA**

Ingeniería de Telecomunicación

Victor Vaquero Gómez

Noviembre 2010

**DESARROLLO DE UNA MANO
MECÁNICA PARA LA
REPRESENTACIÓN DEL
ALFABETO DE DELETREO DE LA
LENGUA DE SIGNOS ESPAÑOLA**

AUTOR: Victor Vaquero Gómez

TUTOR: Fernando J. López Colino

PONENTE: Guillermo González de Rivera Peces

HCTLab

Dpto. de Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones

Escuela Politécnica Superior

Universidad Autónoma de Madrid

Noviembre 2010

Resumen

En este proyecto se presenta el proceso de creación y construcción de una mano mecánica de bajo coste para representar el alfabeto dactilológico de la lengua de signos española (LSE).

Se comenzó con un estudio anatómico de la mano humana para conocer las distintas partes y sus capacidades de movimiento, así como de las lenguas de signos (LS) para conocer los movimientos que se necesitarán realizar. Se presenta también el estudio realizado sobre el estado del arte actual en cuanto a manos mecánicas se refiere, centrado en los elementos actuadores que generan los movimientos.

Tras la parte introductoria, se describen y detallan todas las fases atravesadas durante este proyecto, desde el planteamiento inicial hasta el control final de la mano mecánica. Se han ideado e implementado soluciones de bajo coste para problemas mecánicos complejos. Se ha creado un primer modelo en 3D, a partir del cual se han realizado los diseños 2D necesarios para la fabricación de las piezas. Se ha construido la mano mecánica con todas las capacidades de movimiento necesarias a la hora de representar las letras del alfabeto dactilológico de la LSE. Se ha realizado el diseño, construcción y programación de toda la electrónica de control y de los algoritmos utilizados para manipular la mano al completo a través del PC.

Como pruebas finales se ha representado con la mano mecánica las letras del alfabeto dactilológico, así como diversas configuraciones usuales de la mano en la LSE, obteniendo una tasa de aciertos del 95,7%.

Palabras Clave

Mano robótica, mano mecánica, bajo coste, LSE, dactilología, servomotor.

Abstract

In this project we present the process of creating and building a low-cost mechanical hand to represent the finger spelling of the Spanish Sign Language (LSE).

It began with an anatomical study of the human hand to learn its different parts and their movement capabilities. In addition, we study the sign languages (LS) to learn the movements required. We also review the state of art in terms of mechanical hands, focused on actuator items that generate movements.

After the introductory section, we describe and detail all stages of this project, from the initial planning to the final control of the mechanical hand. Low-cost solutions for complex mechanical problems have been developed and implemented. A 3D preliminar model has been created from where the necessary 2D design for the components has been developed.

It has been built the mechanical hand with all the necessary movements needed for representing the letters of the alphabet fingerspelling of the LSE. The design, construction and programming of all control electronics and algorithms used to manipulate the hand completely through the PC have been carried out as well.

As a final test, we show finger spelling alphabet letters and several configurations of the LSE with the mechanical hand, getting a hit rate of 95,7%.

Key words

Robotic hand, mechanical hand, low cost, SSL, finger spelling, servomotor.

A todos los que han confiado en mí; por fin, una realidad...

Agradecimientos

Me gustaría agradecer la disponibilidad de todos los que me han apoyado a lo largo de este año de dedicación al proyecto.

Quiero dar las gracias a todos los integrantes del HCTLab, por las experiencias que he vivido en este tiempo, tanto a nivel profesional como personal. A Guillermo, por haberme orientado en un principio, incluso antes de elegir el PFC, y durante la ejecución del mismo, dándome el apoyo teórico y práctico que he necesitado. A Fernando, mi tutor durante el proyecto, que aunque no tuviera más remedio ha estado siempre a menos de cinco metros de mí, soportando mis continuas preguntas, aportándome ideas y supervisando todo el proceso de desarrollo de la mano mecánica. A Alberto, por haber sido mi guía siempre que lo he necesitado y haber encontrado constantemente momentos para enseñarme, ayudarme y aportarme ideas; sin él, habría sido todo difícilísimo.

No quiero olvidarme de todo el mundo que, aunque no lo sepa, me ha dado ánimos preocupándose por la evolución del proyecto. Toda la cúpula y población del HCTLab, todos mis amigos de la universidad, de deportes y de toda la vida... Vosotros sabéis quienes sois... A todos, ¡GRACIAS!

Por último, y con más ganas aún, me gustaría agradecer a toda mi familia el constante apoyo, preocupación y libertad que me han ofrecido durante todo este tiempo, no solo durante el proyecto, sino también durante los 5 años previos de carrera.

Índice general

Índice de Figuras	XII
Índice de Tablas	XVI
1. Introducción	1
1.1. Motivación del proyecto	1
1.2. Objetivos y enfoque	2
1.3. Estructura del documento	2
2. Fundamentos teóricos	5
2.1. Anatomía de la mano humana	5
2.1.1. Introducción	5
2.1.2. Estructura ósea: piezas móviles	5
2.1.3. Articulaciones: ejes de movimiento	7
2.1.4. Músculos y tendones: generadores de movimiento	8
2.1.5. El pulgar: la excepción	8
2.1.6. Tamaño y medidas naturales	9
2.2. Lenguas de Signos	10
3. Estado del Arte	13
3.1. Introducción	13
3.2. Manos con motores eléctricos internos	14
3.2.1. DLR-HIT Hand	14
3.2.2. Mano MA-I	15
3.2.3. Mano NaIST	16

3.2.4.	SKKU Hand	17
3.3.	Manos con motores eléctricos y tendones	18
3.3.1.	Mano Shadow	19
3.3.2.	UB Hand 3	19
3.3.3.	CyberHand	20
3.4.	Manos con tendones	21
3.4.1.	Mano Shadow C6	22
3.4.2.	Pneumatic Hand	23
3.4.3.	Manos con SMA	23
4.	Desarrollo de la mano mecánica	25
4.1.	Condiciones y decisiones aplicadas	25
4.1.1.	Elección de los actuadores	26
4.2.	Diseño mecánico	28
4.2.1.	Articulación MP	28
4.2.2.	Articulación PIP	30
4.2.3.	Articulación DIP	30
4.3.	Prototipo inicial	32
4.4.	Diseño final	32
4.4.1.	Esquema cinemático	33
4.4.2.	Diseño final en 3D	34
4.4.3.	Diagramas de construcción de los dedos. Diseños CAD	35
4.4.4.	Diseño de la palma	36
4.5.	Construcción de la mano	37
5.	Control de la mano mecánica	39
5.1.	Hardware de control	39
5.1.1.	El microcontrolador	39
5.1.2.	La tarjeta controladora de servomotores	40
5.2.	Programación del Hardware	41
5.2.1.	Algoritmo de control para un servomotor	42

5.2.2. Algoritmo de control para varios servomotores	43
5.2.3. Control de velocidad de los servomotores	46
5.3. Control de la mano mecánica	47
5.3.1. Control por ordenador desde un terminal serie	47
5.3.2. Control mediante la aplicación JAVA	48
6. Pruebas y experimentos	49
7. Conclusiones y trabajo futuro	55
7.1. Trabajo futuro.	55
Glosario de acrónimos	57
Bibliografía	58
A. Diseño de las piezas	61
B. Evolución de la palma	63
C. Construcción de la mano mecánica	65
C.1. Elección de los materiales	65
C.2. Preparación de los servomotores	66
C.3. Fresado de las piezas	66
C.4. Soporte de la mano	67
C.5. Ensamblaje del conjunto	68
D. Control de la mano mecánica desde el terminal	73
E. Control de la mano desde la aplicación Java	75
F. Publicación	77
G. Pliego de condiciones	81
H. Presupuesto	87

Índice de Figuras

2.1. Huesos de la mano izquierda, vista posterior (dorsal)	6
2.2. Músculos y tendones extensores. Parte posterior de la mano izquierda	9
2.3. Distintas configuraciones existentes en LS	11
2.4. Diccionario dactilológico de la LSE	12
3.1. Mano DLR/HIT	15
3.2. Mano mecánica MA-I	16
3.3. Detalles mecánicos de la mano MA-I	16
3.4. Vista general de la mano NaIST	17
3.5. Detalles de la mano Naist	17
3.6. Ejemplos de las manos SKKU	18
3.7. Mano Shadow C6M, creada con motores y tendones	19
3.8. Comparación entre el esqueleto de la mano UB 3 y una mano real	20
3.9. Mano CyberHand, vista completa	21
3.10. Experimento de un músculo neumático doblando un clavo	22
3.11. Mano Shadow C6, con músculos neumáticos	22
3.12. Mano con músculos neumáticos	23
3.13. Ejemplos de manos desarrolladas con SMA	24
4.1. Posicionamiento de un servomotor estándar según el ancho de pulso recibido	27
4.2. Servomotor Tower Pro SG90	28
4.3. Flexión/extensión de la articulación MP	29
4.4. Abducción/aducción de la articulación MP	29
4.5. Flexión de la articulación PIP	30

4.6. Mecanismo para el movimiento de la articulación DIP	31
4.7. Esquema de funcionamiento de la articulación DIP	31
4.8. Diseño en 3D del prototipo de un dedo de la mano mecánica	32
4.9. Prototipo construido de un dedo de la mano mecánica	32
4.10. Esquema cinemático de la mano mecánica desarrollada	33
4.11. Modelo en 3D de la mano mecánica	34
4.12. Diseño CAD 2D de los dedos corazón y meñique	35
4.13. Diseño final de la palma de la mano	36
4.14. Mano mecánica completa	38
5.1. Tarjeta controladora de servomotores contruida	42
5.2. Pulso PWM para el funcionamiento de un servomotor	43
5.3. Control de cinco servomotores en un mismo periodo	44
5.4. Diagrama de flujo del algoritmo utilizado	44
5.5. Señales de control de cuatro servomotores en el osciloscopio	45
5.6. Método de control de la velocidad de un servomotor, para un valor «velocidad»=4. El bloque coloreado es el pulso inicial. El pulso en línea punteada es el objetivo. El pulso en línea continua, es el pulso en el paso <i>i</i>	47
5.7. Aplicación utilizada para el control de la mano mecánica	48
6.1. Representación del diccionario dactilológico español	50
A.1. Diseño de las piezas necesarias para construir el dedo anular	61
B.1. Evolución de la palma de la mano	63
C.1. Detalle del segundo eje del servomotor	66
C.2. Fabricación de las piezas de la mano mecánica	67
C.3. Modelo 3D del soporte de la mano	67
C.4. Diseño en 3D del montaje de un dedo de la mano mecánica	68
C.5. Aplicación del movimiento de los servomotores a las piezas	69
C.6. Sujeción de los servomotores en la articulación PIP	69
C.7. Detalles mecánicos para el movimiento de abducción/aducción	70

C.8. Interior de la palma de la mano mecánica	71
C.9. Mano mecánica completa	72
E.1. Aplicación utilizada para el control de la mano mecánica	76

Índice de Tablas

2.1. Resumen del rango de movimiento de las distintas articulaciones	8
4.1. Principales características del servomotor Tower Pro SG90	28
4.2. Longitudes de las falanges y dedos creados	35
6.1. Resultados del experimento	52
6.2. Resultados del experimento aplicando tolerancia	53

1

Introducción

1.1. Motivación del proyecto

Según estimaciones de la Federación Mundial de Sordos, en el mundo hay cerca de 70 millones de personas con discapacidad auditiva. En nuestro país hay aproximadamente un millón de personas sordas. Observando el ritmo al que avanzan actualmente las tecnologías, existe el peligro de que estas personas puedan llegar a sentirse excluidas al no ser capaces de relacionarse con un entorno tecnológico basado en la interacción acústica. En este sentido, se pretende utilizar la tecnología en su ayuda, comenzando el desarrollo de un intérprete robótico de lengua de signos española (LSE).

El objetivo de este proyecto de fin de carrera (PFC) es el desarrollo de una mano mecánica antropomórfica capaz de representar letras del diccionario dactilológico de la LSE. La motivación se convierte por tanto en triple:

1. Iniciar una línea de investigación dentro del grupo Human Computer Technology Laboratory (HCTLab) en la que hardware y software encuentran un punto de unión, pues el objetivo final es crear un androide mecánico que represente todos los gestos que puede realizar un avatar tridimensional existente.
2. Realizar un proyecto dirigido hacia grupos de gente con minusvalía.
3. Profundizar en distintas áreas tratadas durante la carrera, desarrollando conocimientos más amplios sobre mecánica, electrónica y hardware en general.

1.2. Objetivos y enfoque

Como se ha indicado anteriormente, este PFC es el inicio de un proyecto mucho mas amplio, que consiste en desarrollar la parte superior de un robot humanoide de bajo coste con amplias capacidades de movimiento y expresión facial, la LSE. Se presenta en este documento el diseño, construcción y control por ordenador de una mano robótica de bajo coste, basada en servomotores, capaz de realizar movimientos similares a los de la mano humana.

El trabajo desarrollado durante este proyecto pertenece a numerosas ramas de la ingeniería, y ha tenido fases claramente diferenciadas, como pueden ser: investigación, diseño, ingeniería mecánica, desarrollo electrónico, programación hardware, programación software, etc.

Durante el desarrollo de este proyecto, se envió una comunicación al XI Congreso Internacional de Interacción Persona-Ordenador. El texto publicado en las actas de dicho congreso y una imagen del póster creado pueden consultarse en el anexo F.

1.3. Estructura del documento

A continuación se detalla la estructura de este documento, organizada por capítulos.

Como punto inicial, en el capítulo 2, se realiza un breve estudio anatómico de la mano humana, aplicado al proyecto; extrayendo información sobre capacidades de movimiento, dimensiones, etc. En dicho capítulo también se realiza un breve estudio fonológico de las lenguas de signos (LS).

En el capítulo 3, se realiza una revisión del estado del arte de las manos mecánicas. Incluyendo también, un análisis de los distintos elementos generadores de movimiento (actuadores) que tienen algunas de las manos mecánicas existentes.

El capítulo 4 detalla todas las etapas que llevaron a la consecución del proyecto. En él se muestra la fase de diseño, desde un inicio en 3D hasta el diseño de las piezas finales para ensamblar. Se expone también la fase de fabricación y montaje de las piezas de la mano.

En el capítulo 5, se detalla el diseño y fabricación de la electrónica de control, los algoritmos creados para los movimientos de los actuadores y el software Java creado para el control de la mano a través del ordenador.

En el capítulo 6, se muestran las pruebas y experimentos realizadas con la mano mecánica finalizada. En éstas. se representaron tanto configuraciones de las LS como letras del diccionario dactilológico de la LSE.

Las conclusiones obtenidas tras la realización de este PFC, así como el posible trabajo futuro de dicha investigación, se encuentran en el capítulo 7.

Para completar el proyecto, se han añadido al documento una serie de anexos entre los que figuran los diseños y modelos de piezas (anexos A y B), manuales de montaje y control

(anexos C, D y E), la publicación realizada en congreso internacional producto de la investigación de este proyecto (anexo F), el presupuesto (anexo H) y el pliego de condiciones (anexo G).

Nota sobre el copyright ®

Los derechos de cualquier marca registrada nombrada en el presente documento, son propiedad de sus respectivos titulares.

2

Fundamentos teóricos

2.1. Anatomía de la mano humana

2.1.1. Introducción

Para realizar un proyecto como éste, consistente en diseñar y construir un elemento mecánico con proporciones y movimientos similares a las de un componente biológico, se tiene que tener un conocimiento previo de su anatomía. En el caso que se expone en este PFC, para crear una mano mecánica, se comenzó con un estudio de la anatomía humana. Se ha estudiado la estructura ósea, que define en gran parte el rango y posibilidad de movimientos de las articulaciones. También se han estudiado las articulaciones que unen los huesos de la mano permitiendo sus movimientos, así como los principales músculos y tendones.

2.1.2. Estructura ósea: piezas móviles

Para comprender más fácilmente la descripción de la estructura ósea de la mano humana, conviene tener en cuenta la Figura 2.1, en la que se puede observar el esqueleto de la mano humana, con los huesos que forman las falanges y la muñeca. Los dedos representados son: pulgar (I), índice (II), corazón (III), anular (IV) y meñique (V).

En la mano humana existen tres partes principales: la muñeca, la palma y los dedos. Cuatro de estos dedos (índice, corazón, anular y meñique) están alineados con la palma, mientras que el pulgar se encuentra opuesto a ella (siendo ésta la principal característica de la mano humana).

La muñeca, que es la base de la mano y la une con el antebrazo, está formada por ocho pequeños huesos llamados carpianos (escafoides, semilunar, piramidal, pisiforme, ganchoso, grande, trapezoide y trapecio).

La palma está formada por cinco huesos llamados metacarpianos, que son los más largos de la mano. Estos huesos se unen por un lado con la muñeca, y por otro, unen la palma con los dedos a través de la articulación metacarpofalángica (MP). Los huesos metacarpianos están unidos entre ellos por el ligamento metacarpiano transversal (un encapsulado muscular), que los entrelaza proporcionándoles firmeza, a la vez que les permite una ligera movilidad (de ahí el ligero arco que puede formar la palma). El metacarpo del pulgar es el que más separado se encuentra de los demás y el que mayor movilidad tiene.

Los dedos están formados por 14 huesos llamados falanges. Cada dedo consta de tres falanges (proximal, media, y distal), menos el pulgar que tiene dos (proximal y distal). Como puede observarse en la Figura 2.1, a excepción del pulgar, las falanges distal y media de los dedos se unen en la articulación interfalángica distal (DIP), la media y proximal lo hacen en la articulación interfalángica próxima (PIP), y la falange proximal se une con la palma en la articulación metacarpofalángica (MP). El pulgar, que sólo dispone de dos falanges, sitúa su articulación MP en la muñeca en la unión de su metacarpo con el hueso trapecio, su articulación PIP entre el metacarpo y la falange proximal, y la articulación DIP entre las falanges proximal y distal.

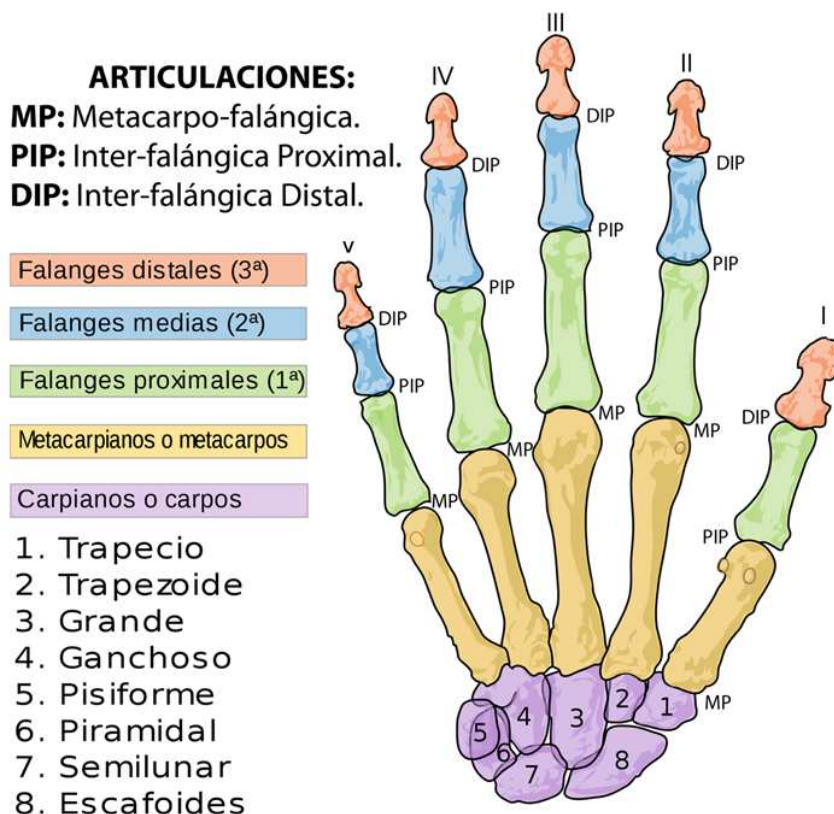


Figura 2.1: Huesos de la mano izquierda, vista posterior (dorsal)

2.1.3. Articulaciones: ejes de movimiento

En la mano humana existen 15 articulaciones que son ejes de movimiento. Cada dedo consta de tres articulaciones (MP, PIP y DIP), que pueden observarse en la Figura 2.1.

Cada articulación de la mano humana, debido a su forma, a los músculos que la rodean y a los huesos que la componen, permitirá cierta clase y rango de movimientos a las partes que conecta. Generalizando, en la mano existen principalmente dos tipos de articulaciones y movimientos:

- Las articulaciones «tipo bisagra»: permiten el movimiento de flexión/extensión, como las PIP y DIP.
- Las articulaciones «tipo rótula»: tienen además del movimiento de flexión/extensión, el de abducción/aducción. De este tipo son las articulaciones MP.

Las articulaciones MP son capaces de realizar movimientos de flexión/extensión y abducción/aducción. La flexión de esta articulación varía de dedo a dedo, desde unos 90° en el dedo índice, creciendo a unos 105° en el dedo meñique. La extensión activa (por acción de los músculos asociados) es de entre 30° y 40° en cada dedo, mientras que la extensión pasiva (límite físico de la articulación) es de algo menos de 90° . El movimiento lateral de abducción/aducción es máximo con los dedos extendidos; en los dedos externos (índice y meñique) puede alcanzar más de 30° , mientras que los internos (corazón y anular), el rango se sitúa en unos 20° . Combinando la flexión/extensión y la abducción/aducción de las articulaciones MP, los dedos pueden realizar movimientos circulares, describiendo una forma conoidal cuyo vértice se sitúa en la propia articulación [1].

Las articulaciones interfalángicas (PIP y DIP), al ser de «tipo bisagra», permiten el movimiento de flexión/extensión. El rango de movimientos aumenta, una vez más, desde el dedo índice al meñique. En la articulación PIP, aumenta de unos 90° de flexión en el dedo índice a unos 115° en el meñique, existiendo unos 5° de extensión para todos. Sin embargo, en la articulación DIP se tiene un aumento de unos 80° de flexión en el índice, a unos 90° en el meñique y apenas extensión activa. Los movimientos de abducción/aducción son casi nulos en estas articulaciones [1].

El estudio de estos rangos de movimiento, así como las diferencias en el rango de flexión/extensión de cada articulación, ha dado lugar a que muchos útiles y herramientas diseñados para manipularse con las manos (martillos, botellas, etc) se adapten mejor a ellas siendo más gruesos por zonas en contacto con los últimos dedos.

En la Tabla 2.1, se muestra un resumen con los rangos de movimiento de las articulaciones.

Dedo	MP (flexión)	MP (abducción)	PIP (flexión)	DIP (flexión)
índice	90°/40°	30°/20°	90°	80°
corazón	95°/30°	15°/15°	95°	83°
anular	100°/30°	15°/15°	100°	87°
meñique	105°/35°	30°/20°	110°	90°

Tabla 2.1: Resumen del rango de movimiento de las distintas articulaciones

2.1.4. Músculos y tendones: generadores de movimiento

Todas las articulaciones de la mano humana se encuentran envueltas por un encapsulado fibroso que centra y sostiene la articulación y sus tendones, proporcionando estabilidad. Existen además tendones laterales en cada articulación, que ofrecen mayor sujeción.

Los elementos creadores de movimiento en la mano, son los músculos extensores y flexores. Estos músculos, al contraerse generan movimientos sobre los tendones presentes en la mano. Los tendones están por un extremo unidos a los músculos y por el otro anclados a los huesos, a los que trasladan los movimientos. Existen tendones tanto en la cara posterior (que trasladan los movimientos de extensión), como en la anterior (trasladando los movimientos de flexión), de la mano, y están agrupados en vainas protectoras.

En la Figura 2.2 se puede observar los tendones extensores, situados en la cara posterior de la mano. Se puede observar cómo por ejemplo, el pulgar tiene vainas protectoras independientes, por lo que sus tendones son capaces de moverlo independientemente. Por el contrario, los tendones de los dedos anular y corazón provienen del mismo músculo extensor y en la palma se encuentran en la misma vaina, por lo que, aunque sus anclajes sobre los dedos están divididos, sus movimientos no serán totalmente independientes. Es por esto que, cuando se mueve el dedo corazón, se introduce un ligero movimiento en el dedo anular y viceversa.

Cabe destacar que al realizar el movimiento de flexión/extensión de las articulaciones PIP y DIP es un único tendón el que actúa para ambas. Esta condición anatómica, hace que los movimientos de ambas articulaciones sean solidarios, es decir, cuando se mueve la articulación PIP, lo hace la articulación DIP con el mismo ángulo.

2.1.5. El pulgar: la excepción

El dedo pulgar de la mano humana es distinto a los demás. Se encuentra opuesto a la palma, formando un ángulo de 45° en posición relajada. Puede realizar movimientos que implican importantes labores para el ser humano, como la pinza con el resto de los dedos, o conferir fuerza de agarre a la mano.

El pulgar humano consta sólo de dos falanges, pero es el dedo que mayor movilidad tiene. Además, su metacarpo se ancla al hueso trapecio de la muñeca con una articulación «tipo

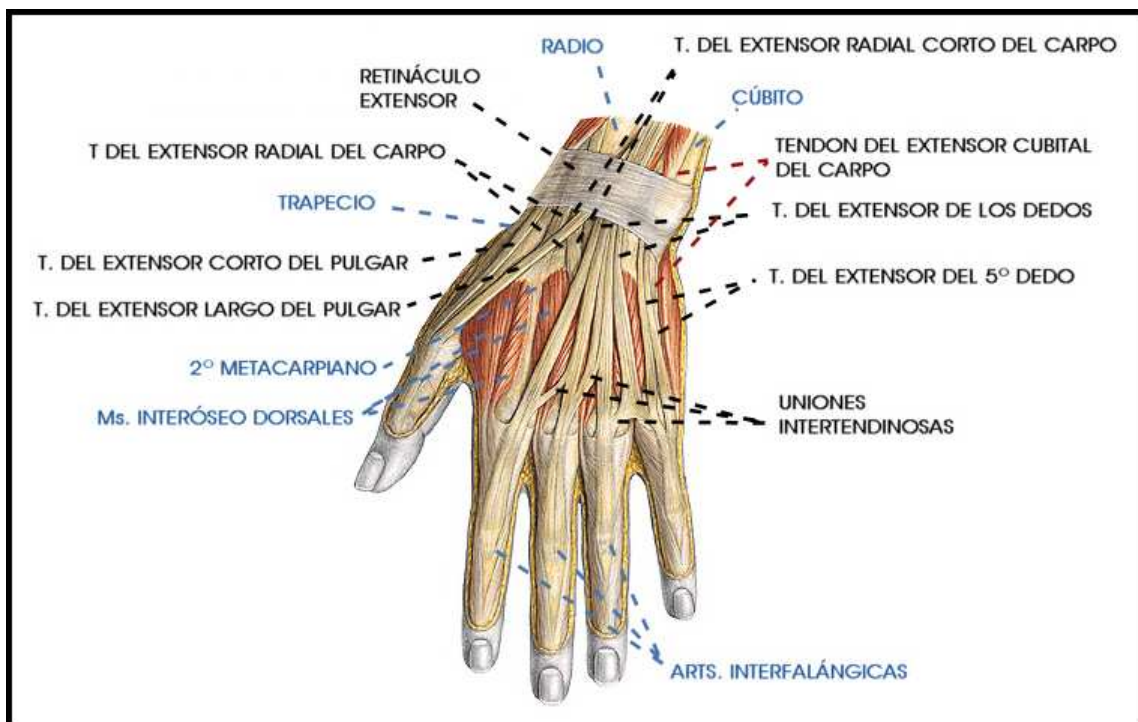


Figura 2.2: Músculos y tendones extensores. Parte posterior de la mano izquierda

rótula», confiriéndole gran libertad de movimiento. Como se puede observar en la Figura 2.1, su articulación MP, se sitúa entre la muñeca y el primer metacarpo. Las articulaciones PIP y DIP (de «tipo bisagra») se sitúan uniendo el metacarpo con la primera falange, y ésta con la segunda respectivamente. Los tendones que llegan a las falanges del pulgar, son independientes, confiriendo en este caso, el total control independiente de las mismas sin trasladar las falanges vecinas.

2.1.6. Tamaño y medidas naturales

La mano humana puede ser de muy diversos tamaños dependiendo de factores como el sexo o la profesión. Los hombres, en general, tienen la mano más larga, los dedos son más gruesos y los nudillos y tendones son más notorios. Por el contrario en una mujer, las manos son un poco más cortas, los dedos más delgados y se notan menos los nudillos y los tendones. En los hombres, el dedo índice es de menor tamaño que el anular, mientras que en las mujeres ambos son del mismo tamaño [1].

Existen diversas teorías, basadas en fundamentos matemáticos, que establecen las proporciones entre los tamaños de las falanges de los dedos. Según estas teorías, el tamaño del metacarpo es igual a la suma de longitudes de las falanges proximal y media, y de la misma forma, el tamaño de la falange media es igual a la suma de las longitudes de las falanges media y distal. Esta serie de sumas, se aproxima a la conocida serie de Fibonacci (1,1,2,3,5,8,13...) en la que el número en la posición n , se obtiene sumando los números en las posiciones $n - 1$ y $n - 2$. En dicha serie,

el cociente entre un número y su anterior, tiende al número áureo (aproximadamente 1,618). Por tanto, para obtener un modelo matemático, se puede establecer que la relación entre las longitudes de falanges contiguas en las manos humanas, es el número aureo. De esta forma dada la medida del metacarpo, se puede conseguir la longitud de la primera falange multiplicando por el inverso del número áureo ($1/1,618 = 0,618$). La fórmula para calcular la longitud de un dedo sería:

$$y = x \bullet \sum_{n=0}^n 0,618^n$$

que resuelta y aproximada queda:

$$y = 2x$$

donde y es la longitud del dedo y x el tamaño de la falange proximal.

2.2. Lenguas de Signos

Un breve estudio de las lenguas de signos (LS) es necesario para este proyecto, pues debe conocerse este tipo de lenguas si lo que se pretende es imitar los movimientos que realizan las manos a la hora de ejecutarlas. Con este estudio se podrá conocer si algunos de los movimientos naturales de la mano, descritos en la sección 2.1, no son estrictamente necesarios para el objetivo del proyecto.

Existe la suposición errónea de que las LS no son lenguas en sí mismas sino meras codificaciones de la lengua oral, lo cual es falso. Las LS no son simple mímica, ni tampoco una reproducción visual de una versión simplificada de alguna lengua oral. Tienen gramática compleja y productiva como la de cualquier otra lengua natural. Así, las LS son lenguas naturales con estructuras gramaticales perfectamente definidas que pueden incluso diferir gramaticalmente en muy diversos parámetros respecto a la lengua oral de una determinada zona. Por tanto, debemos considerar las LS como un lenguaje en sí mismo y, como tal, están formadas por diversos parámetros fonológicos, que son los elementos articulatorios que forman el gesto del signo. Existen siete de estos parámetros [2]:

- Queirema, que define la forma o configuración de la mano o manos que intervienen en la formación del signo, indicada por la flexión de cada articulación de la mano. En la Figura 2.3 se pueden ver distintas configuraciones existentes en LS.
- Queirotronema, u orientación de la mano o manos que intervienen en la articulación del signo.
- Toponema, localización o lugar referido a la posición donde se articula el signo.
- Esquedema, o plano, que hace referencia a la distancia del punto de articulación al cuerpo del signante.

- Haptonema, o punto de contacto entre la parte dominante de la mano y otras partes del cuerpo.
- Kinema, o movimiento de las manos del intérprete en la realización del signo.
- Componente no manual, que hace referencia al movimiento de cabeza, hombros, tronco, expresiones faciales, etc.

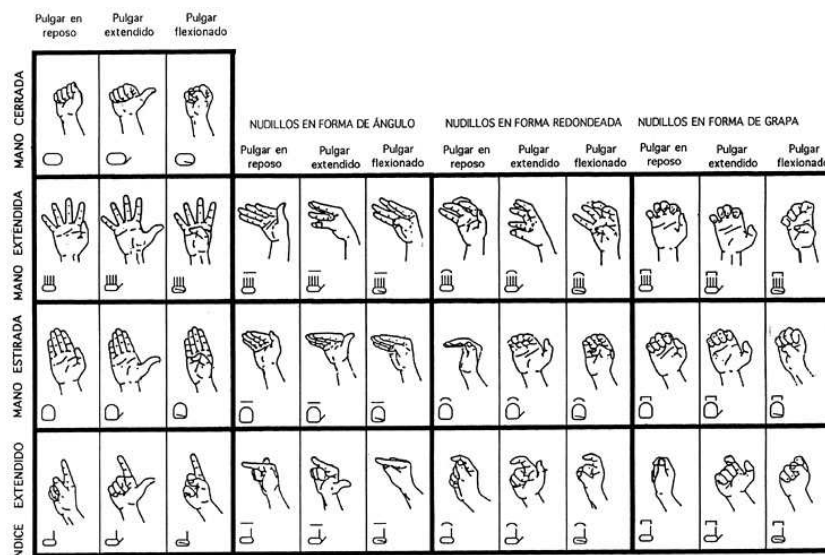


Figura 2.3: Distintas configuraciones existentes en LS

El mensaje en la LS está compuesto por varias unidades sintácticas, entre las que destacan:

1. El diccionario dactilológico, en el que cada símbolo representa una letra. En la Figura 2.4, se puede observar el diccionario dactilológico de la LSE.
2. Signos establecidos, que se utilizan para la representación de conceptos.
3. Clasificadores, que son elementos de mucha mayor complejidad, y que añaden significado y riqueza extra a la frase.

ALFABETO DACTILOLÓGICO



Figura 2.4: Diccionario dactilológico de la LSE

3

Estado del Arte

3.1. Introducción

Cabe destacar que una mano humana tiene más de veinte «grados de libertad» (DoF) en sus distintas articulaciones. La definición de DoF, puede ser ambigua, pues depende de la ciencia bajo estudio. En anatomía, DoF se define como un eje en el que se realiza movimiento, aunque hay quien restringe esa definición imponiendo que debe de ser eje de movimiento activo. En ingeniería mecánica, por el contrario, se define como el número mínimo de velocidades independientes necesarias para definir el estado cinemático de un mecanismo. En este documento, la definición de DoF hará referencia a cada eje rotatorio independiente y activo que tiene un sistema. Según esta definición, al decir que la mano humana tiene más de 20 DoF, se está diciendo que existen más de 20 ejes de movimiento independientes unos de otros. Puesto que además, esta cantidad de DoF se da en un espacio reducido, el construir una mano robótica es un gran reto mecánico a implementar.

El objetivo final de este proyecto es la representación del diccionario dactilológico de la LSE y, por tanto, durante el desarrollo se ha prestado especial atención a la capacidad, cantidad y precisión de los movimientos, más que a la inclusión de sensores o al desarrollo de algoritmos de agarre. Por ese motivo, el estudio del estado del arte se centra en el análisis de manos robóticas en función de su mecánica y de los elementos actuadores que proporcionan el movimiento a sus partes; y no tanto en los sistemas de control o en los algoritmos empleados.

A continuación se mostrarán diversas manos robóticas existentes, clasificadas según los elementos actuadores (o generadores de los distintos movimientos) que poseen.

3.2. Manos con motores eléctricos internos

En una primera aproximación a cómo se pueden realizar los movimientos de una mano mecánica, la respuesta que surge es, con motores eléctricos. Estos motores, generalmente suelen ser paso a paso (que realizan pequeñas rotaciones con cada orden de avance que reciben) o motores de corriente continua con reductora (que se mueven continuamente al aplicarles corriente).

El principal problema al utilizar motores eléctricos para la construcción de manos robóticas antropomórficas, es el tamaño de los mismos; ya que los motores suelen ser siempre más grandes y pesados de lo deseable al aplicarlos sobre una estructura de tamaño similar a la de una mano humana real. Por esta razón, buscarles una ubicación para que comuniquen los movimientos directamente sobre las articulaciones es laborioso. Además, hay que tener en cuenta que las articulaciones MP (vistas en la sección 2.1.3) tienen dos DoF, proporcionando movimientos tanto de flexión/extensión como de abducción/aducción sobre un mismo punto, por lo que complica aún más la generación del movimiento con dichos motores.

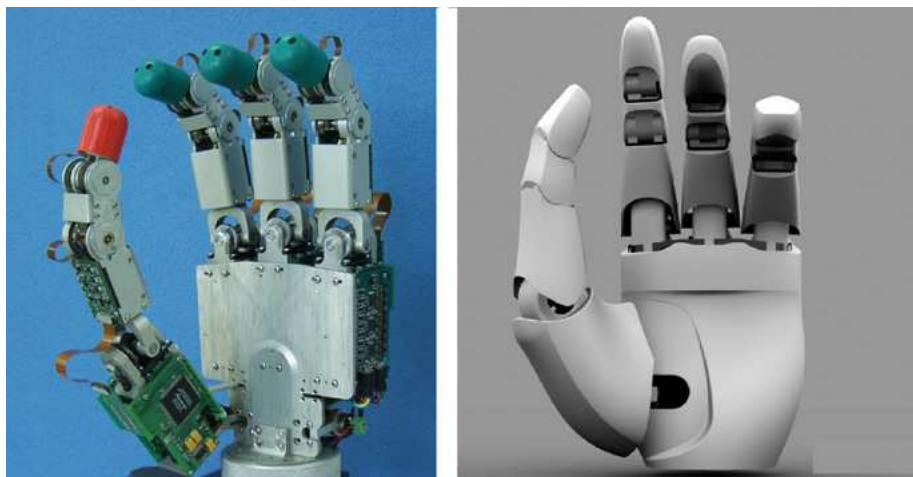
Algunos ejemplos de manos desarrolladas con motores eléctricos se presentan a continuación.

3.2.1. DLR-HIT Hand

El Centro Aeroespacial Alemán (DLR) y el Instituto de Tecnología Harbin (HIT), comenzaron hace tiempo el desarrollo de una mano mecánica antropomórfica multisensorial, cuyo objetivo era el desarrollo de nuevos algoritmos y estrategias de agarre [3, 4]. Este proyecto recibe el nombre de DLR-HIT Hand. Su primera versión puede verse en la Figura 3.1(a). La DLR-HIT Hand, evolucionó y dio paso a la DLR-HIT II, en la Figura 3.1(b). Ambas creaciones son ejemplos de manos autocontenidas, en las que todos los motores, sensores, electrónica y comunicación se encuentran en el interior de los dedos y la palma, por lo que se puede acoplar a cualquier brazo robótico con facilidad.

La mano DLR-HIT II, a diferencia de su predecesora tiene cinco dedos, cada uno de ellos con cuatro articulaciones y tres DoF. El movimiento lo proporcionan directamente sobre las articulaciones 15 motores sin escobillas¹ situados en la palma. Contiene, por cada articulación, sensores de presión, de temperatura, de ángulo, etc. El control en tiempo real de esta mano se hace a través de una FPGA.

¹Más información sobre los motores sin escobillas puede encontrarse en la siguiente dirección: http://www.e-radiocontrol.com.ar/?Motores_Brushless



(a) Mano DLR/HIT, sin carcasa y con carcasa



(b) Mano DLR/HIT II

Figura 3.1: Mano DLR/HIT

3.2.2. Mano MA-I

La mano MA-I [5] es un proyecto que desarrolló el Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales (IOC) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Como se observa en la Figura 3.2, esta mano consta de cuatro dedos (eliminando el meñique) y es un ejemplo de mano robótica basada en actuadores mecánicos, pues logra sus movimientos a través de diversos motores y engranajes. Cada dedo tiene tres DoF, dos para la articulación MP y uno para la PIP. La articulación DIP es solidaria con la PIP, ambas unidas mediante un engranaje.

Los elementos actuadores se encuentran situados en la propia mano, haciendo que ésta sea autocontenida y, por tanto, pueda adaptarse a cualquier brazo robótico como un módulo más. Dos motores situados en la palma controlan mediante engranajes diferenciales los ejes de movimiento de la articulación MP. Un tercer motor situado en la primera falange controla el movimiento de las articulaciones PIP y DIP a través de una rueda dentada y un tornillo sin fin, como puede observarse en la Figura 3.3(a).



Figura 3.2: Mano mecánica MA-I

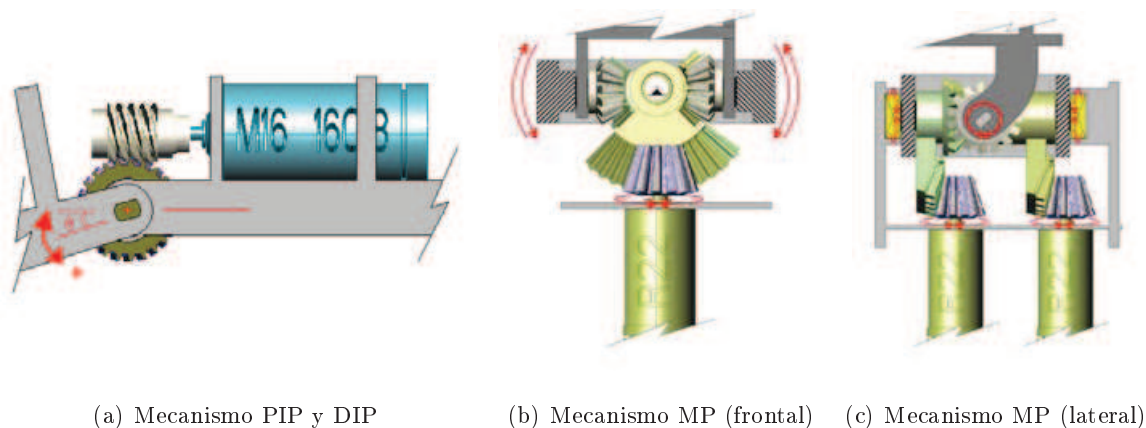


Figura 3.3: Detalles mecánicos de la mano MA-I

La característica más destacable de este diseño es la solución [6, 7] utilizada para realizar los movimientos de la articulación MP. Esta articulación tiene dos DoF, lo que significa que ha de permitir el movimiento a dos ejes distintos. Para cumplir estos requisitos se ha utilizado una serie de engranajes diferenciales que son la base de la articulación. En la Figura 3.3(b) y 3.3(c) pueden observarse los mecanismos de movimiento de la articulación MP. Si los giros de los motores son en sentidos iguales producen el movimiento de abducción/adducción, como se aprecia en la Figura 3.3(b), mientras que si son en sentidos contrarios se crea el movimientos de flexión/extensión, como muestra la Figura 3.3(c).

3.2.3. Mano NaIST

Esta mano se diseñó en el Nara Institute of Science and Technology de Japón en 2002, y de ahí su nombre NaIST [8, 9]. Tiene bastantes similitudes con la mano MA-I, descrita anteriormente, con la salvedad de que ésta tiene todos los actuadores ubicados en la propia palma, y que no

tiene una forma propiamente antropomórfica como se puede observar en la Figura 3.4. Las yemas de los dedos incorporan sensores táctiles compuestos por sensores de presión y microcámaras; logrando así, un mayor control táctil para agarre y desplazamiento de objetos.



Figura 3.4: Vista general de la mano NaIST

En la Figura 3.5(a), puede observarse el mecanismo diferencial utilizado para conseguir los ejes de movimiento de la articulación MP, muy similar al de la mano MA-I, accionado por dos motores situados en la palma. La flexión de la articulación PIP (solidaria con DIP), se consigue a través de otro motor en la palma, que acciona una varilla trasladando el movimiento hasta la propia articulación, como puede observarse en la Figura 3.5(b).

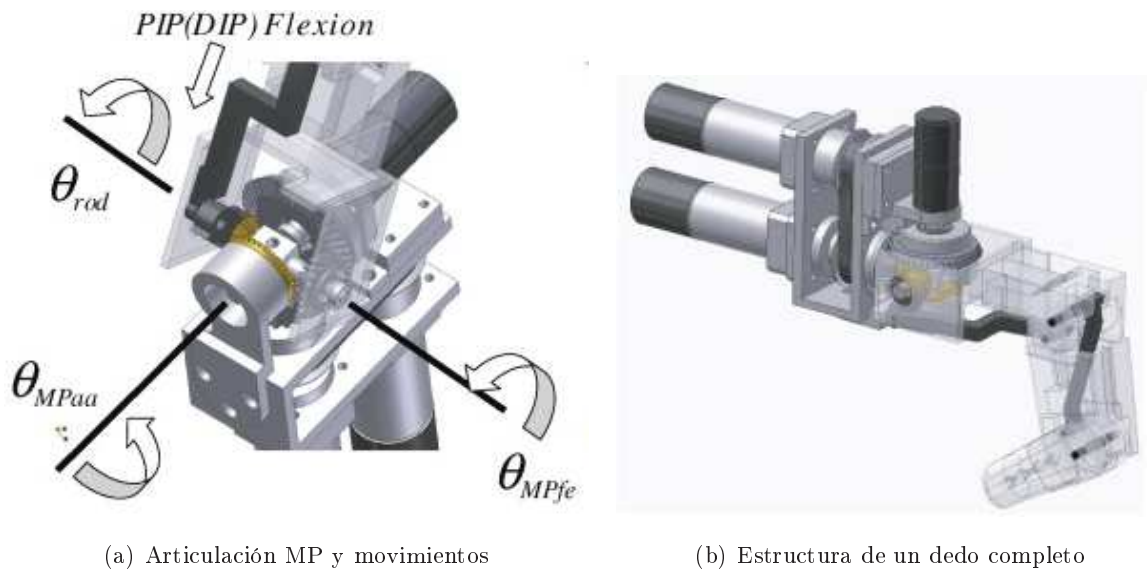


Figura 3.5: Detalles de la mecánica de la mano NaIST

3.2.4. SKKU Hand

El IRMS Lab (Intelligent Robotics and Mechatronics Systems Laboratory) de Korea, ha creado la serie evolutiva de manos SKKU [10] diseñadas para experimentar con estrategias de agarre, y que introducen detalles mecánicos relevantes. Un ejemplo de la versión inicial, que

constaba de tres dedos, se puede encontrar en la Figura 3.6(a), mientras que la versión más actual, con cuatro dedos y distinto mecanismo para la articulación MP, se puede ver en la Figura 3.6(b).



Figura 3.6: Manos SKKU

Para el estudio mecánico en el que se centra este estado del arte, cabe destacar las articulaciones MP utilizadas en las primeras versiones de estas manos. Estas articulaciones se componen de una junta de rótula con doble actividad, capaz de crear los movimientos en los dos ejes necesarios para la flexión/extensión y la abducción/aducción de los dedos. La rótula que sustenta dicha articulación MP está dividida en dos mitades y mediante engranajes internos, puede variar las posiciones de sus partes generando los movimientos [11]. En el resto de la mano, la mecánica es parecida a las manos estudiadas con anterioridad, ya que las articulaciones PIP se mueven con un motor situado en la primera falange y comunican el movimiento a la falange distal a través de un engranaje, aunque en este caso de poleas y correas.

3.3. Manos con motores eléctricos y tendones

Las manos mecánicas descritas en la sección anterior colocan los actuadores en su interior creando una mano autocontenida, que se puede adaptar como módulo a distintos brazos robóticos. Sin embargo, esto hace que estas manos sean muchas veces más grandes de lo deseable.

Otras aproximaciones hacia una solución más similar a la mano humana, consisten en situar los motores en zonas más libres, como el antebrazo, y comunicar sus movimientos a los dedos y falanges a través de hilos tensores. Estos hilos imitan a los tendones humanos, ya que los motores los tensan cuando es necesario, creando así los movimientos. De esta forma, se logra una aproximación similar al funcionamiento de la mano humana y se reduce el tamaño, pudiéndose ajustar más a las medidas reales. Algunos desarrollos con esta tecnología, se muestran a continuación.

3.3.1. Mano Shadow

La empresa Shadow Robot Company, ubicada en Londres, tiene varios modelos de manos mecánicas en venta. Este modelo en concreto, que se puede observar en la Figura 3.7, cuesta £115,000 (actualmente unos 139.500€).



Figura 3.7: Mano Shadow C6M, creada con motores y tendones

Esta mano está controlada por unos actuadores llamados «Smart Motors» creados por la propia empresa y situados en el antebrazo. Los «Smart Motors» son un encapsulado que contiene en su interior toda la mecánica de motor y engranajes reductores, así como toda la electrónica de control de fuerza, precisión, temperatura...

La mano es completamente antropomorfa y realiza movimientos muy naturales gracias a la distribución e inserción de sus tendones en las falanges, similar a la distribución anatómica real. Consta de 20 «Smart Motors» situados en el antebrazo, y cada uno acciona dos tendones (para flexión/extensión o abducción/aducción). La mano tiene 20 DoF y puede realizar un total de 24 movimientos distintos combinando las acciones de varios de sus actuadores².

3.3.2. UB Hand 3

La universidad de Bologna, Italia, ha desarrollado un proyecto que tiene dos partes diferenciadas: por un lado está el desarrollo del esqueleto y las partes móviles, y por otro la inclusión de los actuadores para crear el movimiento.

El esqueleto, como se puede ver en la Figura 3.8, es una réplica del esqueleto humano, y permite la mayor parte de los movimientos del mismo, incluido el ligero movimiento de los

²Para más información sobre esta mano comercial, se puede consultar la página web de la empresa Shadow Robotics: <http://www.shadowrobot.com/>

metacarpos visto en la sección 2.1. Además, tiene la capacidad de poder acoplar movimientos y reducir DoF, según los actuadores que se le incorporen o la aplicación destino.

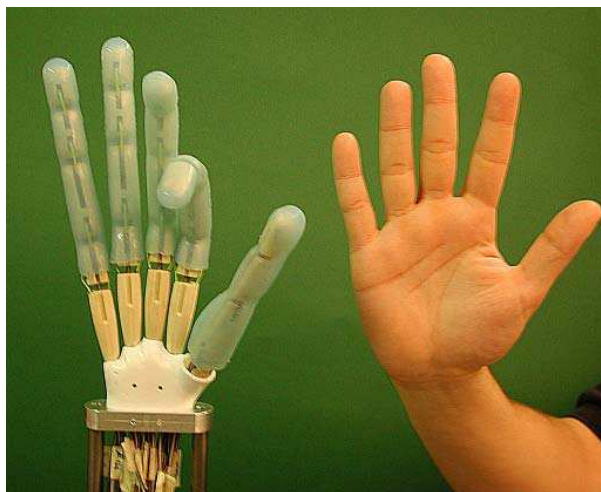


Figura 3.8: Comparación entre el esqueleto de la mano UB 3 y una mano real

En la Figura 3.8, podemos ver la «UB Hand 3» [12], creada a partir del esqueleto desarrollado y motores eléctricos como actuadores que transmiten el movimiento. Consta de 16 servomotores ubicados en el antebrazo, que proporcionan 16 DoF distintos. Sin embargo como se ha comentado anteriormente, y dada la modularidad del esqueleto, estos actuadores pueden ser actualizados con el paso del tiempo, o incluso incrementarse para generar nuevos movimientos que cubran el rango de posibilidades que tiene el esqueleto (por ejemplo, el movimiento independiente de las falanges distales).

3.3.3. CyberHand

La mano robótica CyberHand [13, 14], que puede observarse en la Figura 3.9, ha sido creada por el «Advanced Robotics Technology and Systems Laboratory» (ARTS Lab), en Pisa, Italia. Su tamaño y forma se aproximan bastante al de una mano humana real, ya que además de mantener las proporciones y medidas antropomórficas tanto en la palma como en los dedos, sus dedos son cilíndricos con un diámetro de 16 mm.

Esta mano está movida por seis motores de corriente continua con encoders, situados en el antebrazo (uno para cada dedo y dos para el pulgar). El funcionamiento es muy similar a la del resto de manos analizadas en esta sección, pues los motores actúan sobre distintos tendones conectados a los dedos generando los movimientos. Las capacidades de movimiento son limitadas, pues solo es capaz de flexionar los dedos y rotar el pulgar. Aún así, de este desarrollo cabe destacar el número y tipo de sensores utilizados, pues consta de 21 sensores de posición, 8 sensores de fuerza y 15 sensores de presión³.

³Más información sobre esta mano mecánica puede encontrarse en la página <http://www-arts.sssup.it/Cyberhand/introduction/biomechand.htm#hand>



Figura 3.9: Mano CyberHand, vista completa

3.4. Manos con tendones

Las manos descritas en la sección anterior se aproximan bastante a las manos reales, pues consiguen formas antropomórficas y sus movimientos se realizan de forma similar a través de tendones accionados por motores. Una aproximación aún más real, se puede conseguir con elementos actuadores que realicen las acciones de contracción de los músculos sobre los tendones humanos sin necesidad de motores.

Los dos tipos de tecnologías de actuadores más utilizados actualmente para desarrollar tendones son: los actuadores SMA (Shape Memory Alloy) y los músculos neumáticos.

Los actuadores SMA están formados por una aleación con memoria de forma. Dentro de estos actuadores, están los alambres de Nitinol [15, 16], que son alambres termocontraíbles al paso de corriente eléctrica. Se componen de una aleación de Níquel y Titanio (NITI). Este tipo de alambres está siendo recientemente muy utilizados como músculos en robótica, aunque son elementos que encarecen significativamente el conjunto final⁴.

Los músculos neumáticos [17] son actuadores compuestos de una bolsa de aire forrada por una malla de diversos materiales elásticos, con sus extremos preparados para la inserción en distintos elementos. Están controlados por aire comprimido, que llena o vacía la bolsa interna del músculo haciendo que se infle o desinfe, generando así movimientos por contracción y relajación de sus extremos. De esta forma actúan al igual que los músculos humanos, contrayendo los tendones. Son elementos bastante utilizados en robótica últimamente, pese a ser caros y necesitar de un sistema compresor de aire. En la Figura 3.10 se puede observar un experimento llevado a cabo por los laboratorios Shadow en el que la fuerza del músculo al contraerse es capaz de doblar un clavo.

⁴Información completa de los alambres SMA dada por Eduardo J. Carletti, puede encontrarse en la siguiente dirección web: http://axxon.com.ar/rob/Actuadores_musculosalambre.htm

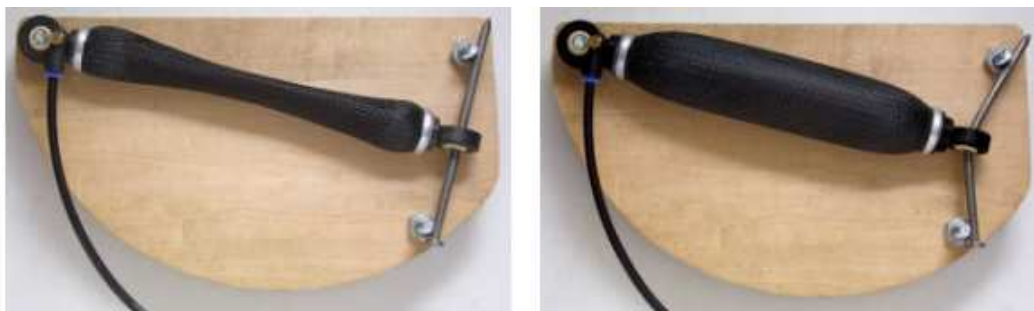


Figura 3.10: Experimento de un músculo neumático doblando un clavo

A continuación se muestran algunas manos creadas con estas dos tecnologías.

3.4.1. Mano Shadow C6

Los laboratorios de la anterior mano Shadow C6M, comentada en el punto 3.3.1, tienen también una versión de mano controlada con músculos neumáticos, llamada Shadow C6 y que se muestra en la Figura 3.11. Esta mano consta de 40 de estos músculos ubicados en el antebrazo siguiendo la anatomía humana, que proporcionan el movimiento a los distintos tendones insertados en las falanges. El conjunto, es capaz de imitar movimientos complejos de la mano humana, pues ofrece 24 movimientos distintos. Actualmente, es una de las manos mecánicas más completas que existe junto con su homóloga C6M, y su precio es de £75.000 (aproximadamente 90.330€)⁵.



Figura 3.11: Mano Shadow C6, con músculos neumáticos

⁵Para más información sobre esta mano comercial, se puede consultar la página web de la empresa Shadow Robotics: <http://www.shadowrobot.com/>

3.4.2. Pneumatic Hand

El departamento de ingeniería mecánica de la universidad de Curtin, en Australia, ha desarrollado la mano mecánica de bajo coste basada en músculos neumáticos que puede observarse en la Figura 3.12. Esta mano dispone de 10 DoF creados por 10 músculos neumáticos, distribuidos desde el codo hasta los dedos. La mano es controlada a través de una interfaz gráfica en el ordenador y es capaz de realizar con éxito una serie de sencillas tareas, como agarrar y trasladar objetos.

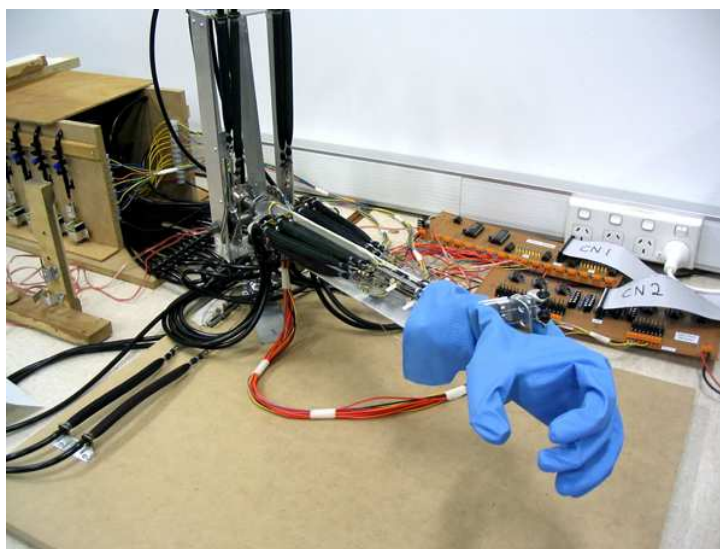


Figura 3.12: Mano con músculos neumáticos

3.4.3. Manos con SMA

Como se ha explicado al inicio de esta sección, los actuadores SMA (generalmente alambres de nitinol), tienen la propiedad de contraerse al sufrir calentamiento con el paso de corriente eléctrica y recuperar posteriormente su forma al enfriarse. Por este motivo, son actuadores bastante utilizados en robótica como músculos artificiales.

Desde hace algunos años, se están desarrollando diversas manos con esta tecnología. Son manos similares en estructura a las anteriores descritas en la sección 3.4.1 pues contienen el mismo sistema de tendones, solo que ahora accionados por los actuadores SMA. Algunas manos desarrolladas con actuadores de este tipo, se muestran en la Figura 3.13.

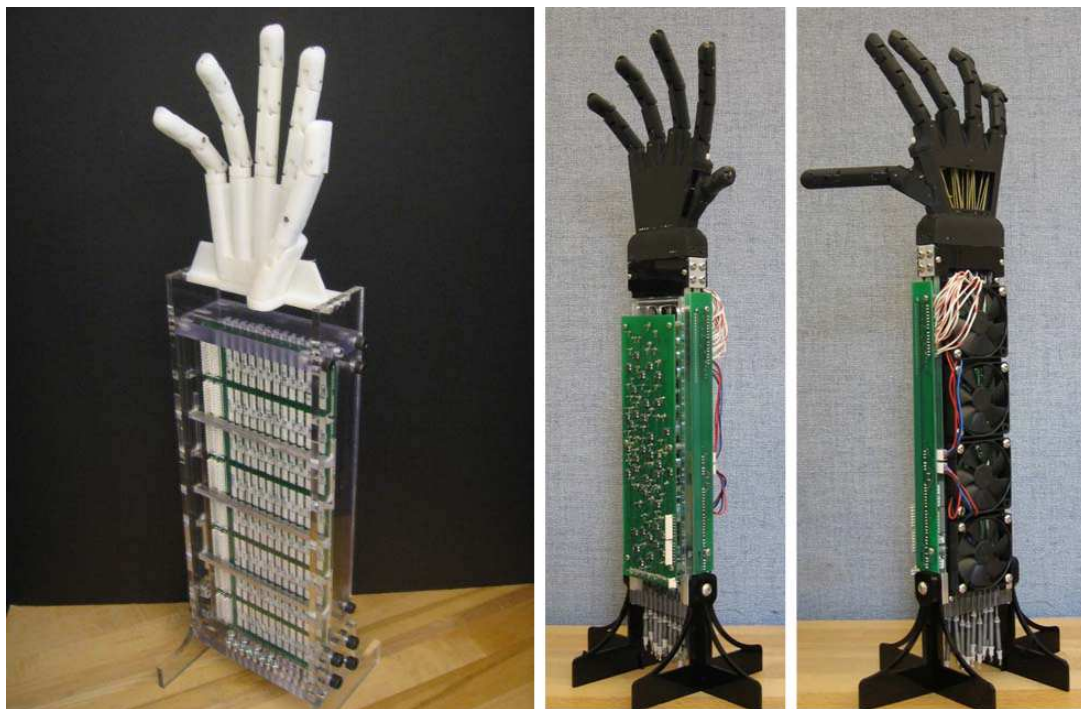


Figura 3.13: Ejemplos de manos desarrolladas con SMA

Esta tecnología tiene diversos problemas, como pueden ser el gran consumo de corriente asociado o la lentitud del actuador en recuperar su forma (que obliga a incorporar elementos refrigerantes). Sin embargo, el principal inconveniente que se encuentra a la hora de introducir estos actuadores en el diseño de una mano mecánica, es la dificultad de control del movimiento de contracción, que no es lineal con el paso de corriente. En un intento de obtener mayor control, las investigaciones realizadas se orientan a utilizar arrays de actuadores SMA [18, 19, 20]. Mediante el diseño específico de estos arrays se consiguen movimientos más precisos y controlados, pues se activan sólo ciertas partes del hilo SMA empleado dependiendo del grado de contracción requerido.

4

Desarrollo de la mano mecánica

4.1. Condiciones y decisiones aplicadas

Al inicio de la fase de desarrollo de este proyecto se han fijado las condiciones que debe cumplir la mano mecánica, y se han tomado las primeras decisiones. Las más relevantes son:

- *Mano antropomórfica:* Las formas de la mano mecánica deben imitar la morfología humana. Debido a esto, en el diseño se han de seguir las proporciones descritas en la sección 2.1.6 para las medidas de las falanges, dedos y palma.
- *Movimientos:* En la sección 2.1, se realizó un estudio anatómico de la mano humana atendiendo a los movimientos que ésta puede realizar. Se sabe que un humano cuenta en su mano con más de 20 DoF, distribuidos por los dedos y la palma. Éstos últimos permiten la curvatura en arco de la base de los dedos (nudillos), sin embargo, dada la complejidad mecánica que introducen, no serán implementados. La mano mecánica contará por tanto con 16 DoF, tres para cada dedo, y cuatro para el pulgar. Los dedos índice, corazón, anular y meñique, podrán realizar el movimiento activo de flexión/extensión de las articulaciones MP y PIP, y el movimiento de abducción/aducción de la articulación MP. Las articulaciones DIP de estos dedos realizarán el movimiento de flexión/extensión pasivo, que irá solidario con el de su articulación PIP (tal y como se estudió en la sección 2.2). El dedo pulgar podrá realizar el movimiento de flexión/extensión de sus articulaciones MP, PIP y DIP, así como el de abducción/aducción sobre su anclaje a la palma.

- *Sensibilidad:* La mano humana está llena de terminaciones nerviosas, que proveen información de presión, temperatura, humedad, etc. Para el propósito de este proyecto se necesita control y precisión sobre los movimientos, por lo que no se incluirán sensores que proporcionen sensibilidad.
- *Modularidad:* Se realizará un diseño modular, es decir, que permita desarrollar independientemente las distintas partes así como favorecer un fácil ensamblaje y desensamblaje de todas sobre el conjunto. Ésto será útil a la hora de realizar cualquier mejora en una de las partes, así como para solucionar cualquier posible problema. Además, el diseño modular de la mano permitirá adaptarla a futuros proyectos que desarrollen brazos u otras estructuras robóticas.
- *Autocontenida:* Este proyecto es el inicio de una investigación que se ampliará más adelante con las estructuras de muñeca, brazo, torso, etc. con el objetivo final de completar un androide mecánico. Por este motivo, se ha de realizar un diseño autocontenido sin elementos funcionales externos, es decir, una estructura totalmente independiente. Esto restringe el tipo de actuadores a utilizar que, junto con la electrónica de control, han de situarse en el interior de la mano, como por ejemplo los analizados en las secciones 3.3 y 3.4.
- *Control:* Dada la necesidad de control y precisión de los movimientos de la mano mecánica, se debe incluir algún sistema que permita conocer en todo momento la posición de los elementos móviles. Esto se puede realizar de varias formas, como por ejemplo con encoders (elementos capaces de emitir pulsos cada ciertos grados de giro de un motor o pieza), o potenciómetros (que modifican el valor de su resistencia interna según el ángulo girado, provocando un valor distinto de voltaje a su salida) situados en las articulaciones. Sin embargo, estas soluciones aumentan la complejidad mecánica del diseño, por lo que no se descartan otras alternativas. Por otro lado, para controlar la mano y los actuadores que la componen, se ha de utilizar un microcontrolador de bajo coste capaz de recibir, interpretar y ejecutar las distintas órdenes enviadas desde un PC.

4.1.1. Elección de los actuadores

Como se ha comentado anteriormente, los actuadores adecuados para este desarrollo han de poder situarse en el interior de las articulaciones de los dedos y la palma de la mano. Así, además de cumplir el requisito de crear una mano autocontenida, se podrá aplicar el movimiento directamente a las piezas. Por otro lado, se necesita también tener control sobre los movimientos de forma sencilla y ocupando el menor espacio posible. Con estas dos importantes condiciones, sumando la de que ha de ser de bajo coste, el mejor actuador encontrado para construir la mano, es el servomotor analógico.

Un servomotor es un encapsulado de varios componentes mecánicos y electrónicos, que consigue un control exacto de posición, normalmente entre 0° y 180° . Su interior está compuesto por

un motor eléctrico de corriente continua, un juego de engranajes para la reducción de velocidad, un potenciómetro ubicado sobre el eje final de salida (que se usa para conocer la posición) y un circuito electrónico de control. La forma de controlar un servomotor es enviando una señal de tren de pulsos PWM con un periodo de aproximadamente 20 ms. La electrónica interior del servomotor se encarga de posicionar el eje de salida en un ángulo proporcional al ancho del pulso PWM recibido, que suele ser de entre 1 y 2 ms. El estándar de la señal PWM elegido para facilitar el uso en radiocontrol de los servomotores analógicos, es un pulso de onda cuadrada de 1,5 ms que se repite a un ritmo de entre 10 y 30 ms. Mientras el pulso se mantenga en ese ancho, el servomotor se ubicará en la posición central de su recorrido. Si el ancho de pulso disminuye, el servomotor se mueve de manera proporcional hacia un lado. Si el ancho de pulso aumenta, el servomotor gira hacia el otro lado¹. En la Figura 4.1, se puede observar un ejemplo de posicionamiento de un servomotor dependiendo del ancho de pulso enviado.

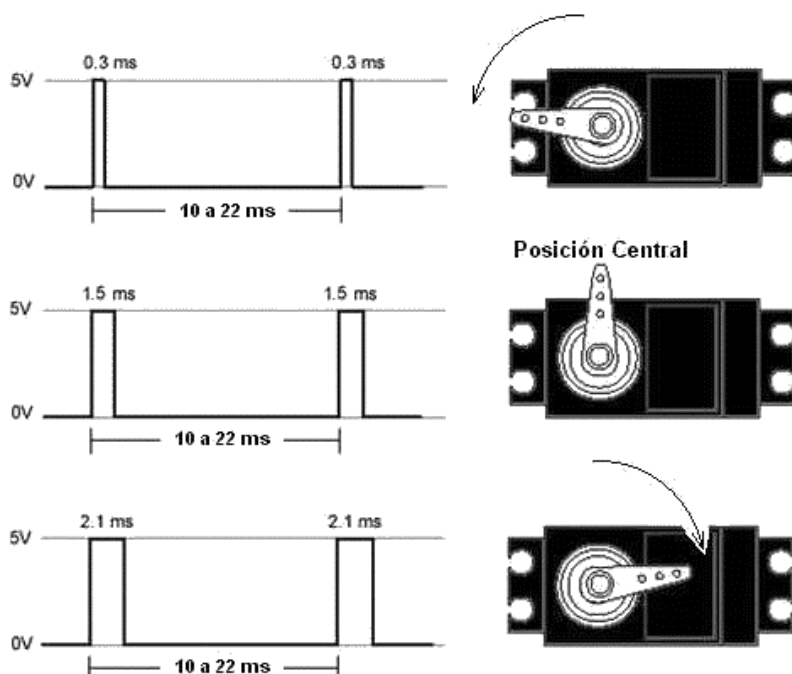


Figura 4.1: Posicionamiento de un servomotor estándar según el ancho de pulso recibido

Tras hacer un análisis de los distintos tipos de servomotores de bajo coste que ofrece el mercado, se han elegido para este proyecto unos microservomotores de la marca Tower Pro, concretamente el modelo SG90, un microservo de 9 gramos, que puede observarse en la Figura 4.2. Las características generales de éste encapsulado se definen en la Tabla 4.1.

Tras hacer pruebas reales sobre este modelo de servomotor, se ha observado que el ancho de pulso PWM válido está entre 0,5 y 2,4 ms (cubriéndose un rango de aproximadamente 200° de rotación), así como que el periodo adecuado para enviarle cada pulso PWM es de 20 ms. Más

¹Para más información sobre los servomotores, se puede consultar la siguiente página web: http://axxon.com.ar/rob/MotorServo_basico.htm



Figura 4.2: Servomotor Tower Pro SG90

Modelo Servo	SG90
Rango de Voltaje	4.8 - 6 (V)
Ancho de Pulso PWM	1 - 2 (ms)
Torque en movimiento	2.5 (Kg × cm)
Torque en pausa	2.1 (Kg × cm)
Consumo de corriente en movimiento	180 (mA)
Consumo de Corriente en pausa	4 (mA)
Velocidad	0.1 (Sec/60°)
Dimensiones	22.8 × 24.4 × 12 (mm)
Peso	9 (g)
Ratio de reducción	400:1
Precio	3,5€

Tabla 4.1: Principales características del servomotor Tower Pro SG90

pruebas experimentales muestran que la respuesta mínima apreciable del servomotor se produce con una variación de pulso de 0,1 ms, girando un ángulo de 7,5°.

4.2. Diseño mecánico

Una vez establecidas las condiciones iniciales dadas en la sección 4.1, ha de idearse toda la mecánica que cumpla los requisitos planteados y proporcione la libertad de movimientos deseada. Las soluciones mecánicas implementadas en este proyecto para los movimientos de las distintas articulaciones se muestran a continuación.

4.2.1. Articulación MP

Como se expuso en el capítulo 3, el diseño de las articulaciones MP es especialmente complicado, pues deben posibilitar movimientos en dos ejes desde un mismo punto. Las soluciones mecánicas adoptadas por manos con motores eléctricos como las presentadas en 3.2.2, no son

válidas para el propósito de bajo coste de este proyecto, pues utilizan engranajes costosos y de difícil control. La solución ideada en este desarrollo consiste en separar los actuadores que controlan los movimientos en ambos ejes, simplificando así la mecánica. De esta forma, se puede generar el movimiento en los dos ejes desde diferentes puntos, y aplicarlos sobre la articulación MP. El servomotor que proporciona el movimiento de flexión/extensión al dedo, se sitúa en el interior de la articulación MP comunicando directamente su movimiento a las piezas, como puede observarse en las Figuras 4.3(a) y 4.3(b). Este servomotor, además, se sujeta a la palma mediante dos tornillos que lleva pegados formando un eje perpendicular a su eje de rotación, que permitirá el movimiento de abducción/aducción del conjunto. La abducción/aducción, es creada por un segundo servomotor situado en la palma que a través de una varilla de acero, traslada su rotación al dedo, como puede observarse en las Figuras 4.4(a) y 4.4(b).

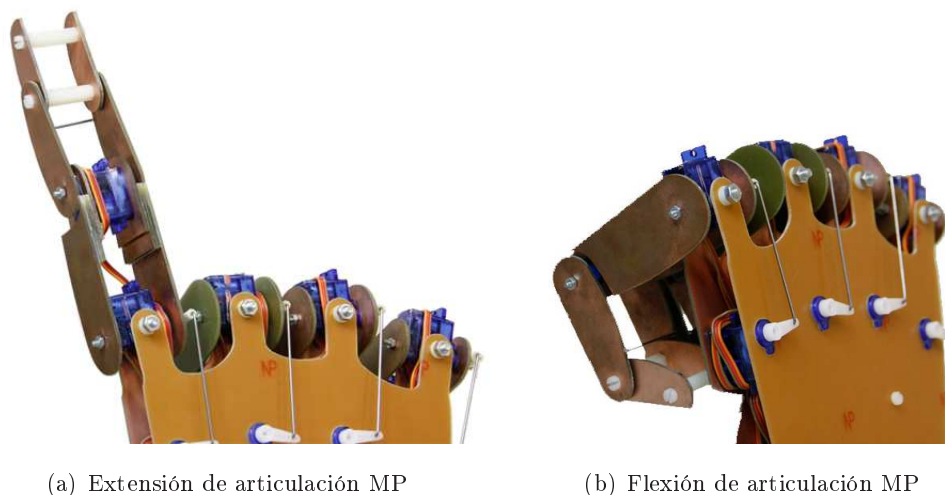


Figura 4.3: Flexión/extensión de la articulación MP

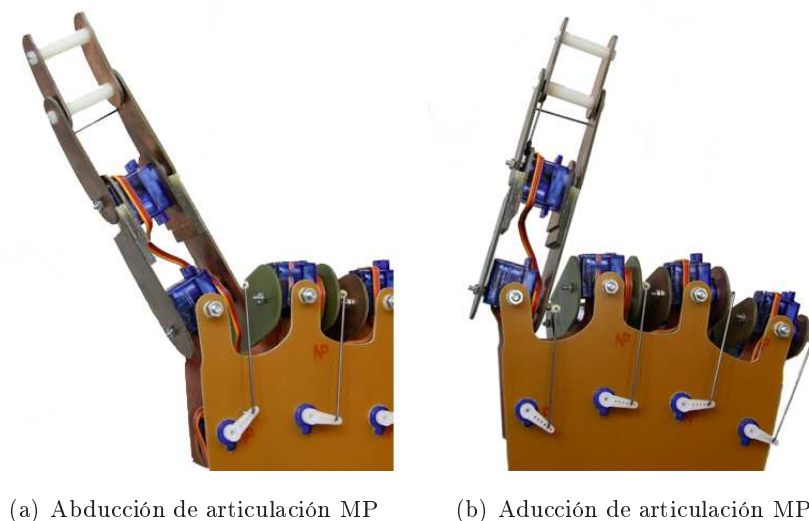


Figura 4.4: Abducción/aducción de la articulación MP

4.2.2. Articulación PIP

El movimiento de flexión/extensión de la articulación PIP se realiza por aplicación directa del actuador sobre las piezas de la falange media. El servomotor se sitúa en el interior de la propia articulación PIP, uniendo las piezas de la falange proximal y media. Como puede observarse en la Figura 4.5, las piezas de la falange proximal encajan a presión sobre el encapsulado del servomotor, sosteniéndolo a su vez. Las piezas de la falange media se unen al eje activo rotatorio del servomotor y al eje pasivo creado en la cara opuesta, generando así directamente el movimiento de flexión/extensión sobre esta parte del dedo. En las Figuras C.5 y C.5 del anexo C, se pueden observar mejor los sistemas de sujeción comentados.



Figura 4.5: Flexión de la articulación PIP

4.2.3. Articulación DIP

Como se ha indicado en la sección 4.1 de este capítulo, el movimiento de flexión/extensión de la falange distal es solidario al de la falange PIP.

Para poder solidarizar ambos movimientos, se ha creado una solución de bajo coste basada en un mecanismo de biela-manivela². Este mecanismo, como puede observarse en la Figura 4.6, consta de una varilla de acero con dos pequeñas articulaciones con rótula de acero en sus extremos. Uno de los extremos se sitúa fijo en la articulación PIP, mientras que el otro se ancla a la parte baja de la falange distal haciendo que cuando la falange media gira, la distal lo haga también.

En la Figura 4.7, se muestra un esquema de los movimientos de este mecanismo, utilizado para comprobar que la solución presentada es viable. En dicho esquema se puede observar la circunferencia que genera la varilla al rotar sobre su anclaje en la falange proximal por acción del

²Más información sobre este mecanismo puede encontrarse en la siguiente dirección web: http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material107/mecanismos/mec_biela-manivela.htm

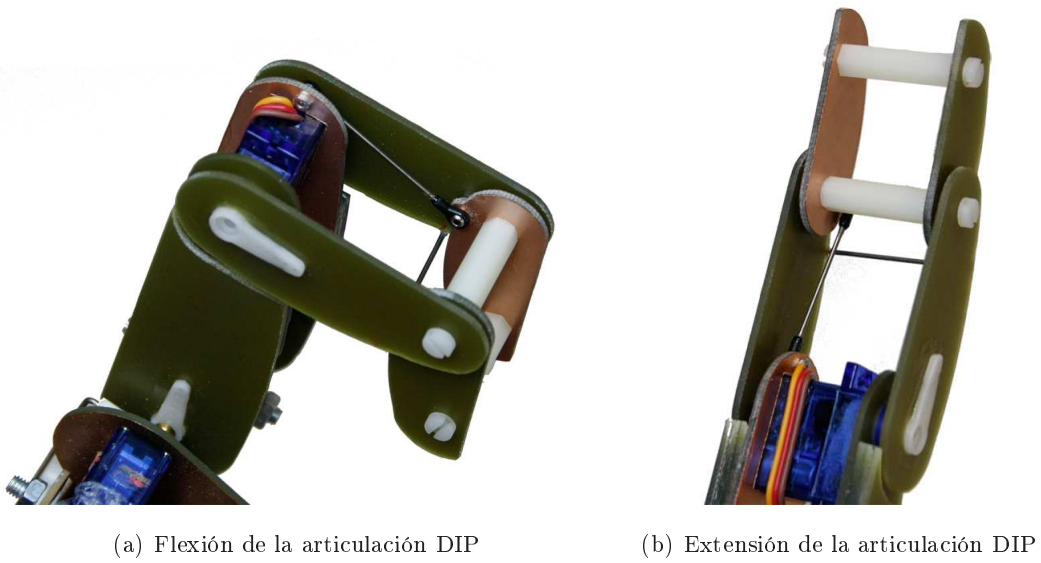


Figura 4.6: Mecanismo para el movimiento de la articulación DIP

movimiento de la falange media. Dicha circunferencia representa los puntos por los que pasará el extremo de la varilla anclado en la falange distal, el cual provoca el movimiento solidario de la articulación DIP con la PIP. Gracias a dicho estudio gráfico, se pudo corregir algunos errores de diseño, pues la solución no es correcta si la distancia de los ejes de las articulaciones a los anclajes de la varilla no es la misma en ambos extremos (razón por la cuál en la falange distal el anclaje se hace en un saliente de la pieza).

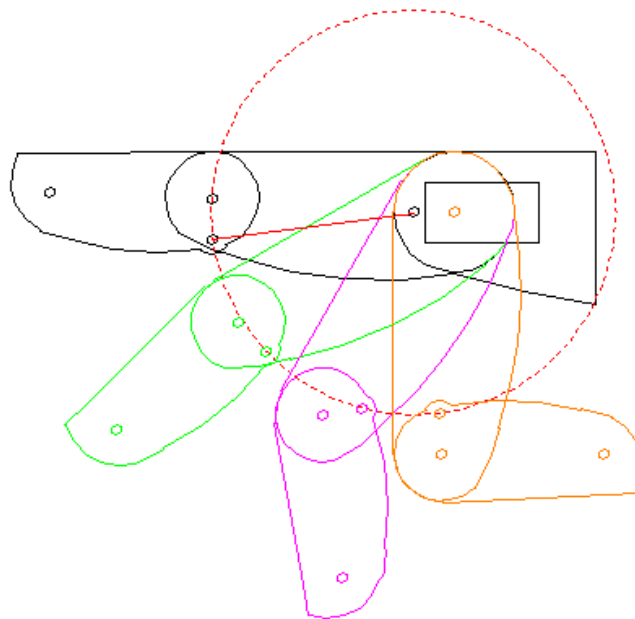


Figura 4.7: Esquema de funcionamiento de la articulación DIP

4.3. Prototipo inicial

Tras plantear las soluciones mecánicas descritas, se pasa a la fase de diseño estructural y desarrollo. Primero ha de crearse un prototipo inicial que demuestre la viabilidad del proyecto y sirva de toma de contacto con todos los elementos que habrá que manejar. Se comenzó por construir un prototipo de dedo, pues es una estructura modular completa que puede realizar todos los movimientos necesarios. Además, es una estructura que puede replicarse a distinta escala para componer el resto de la mano.

Primero, se ha creado el diseño en 3D que puede observarse en la Figura 4.8, en el que se han utilizado medidas reales de los servomotores y las piezas a utilizar. Basándose en este diseño, se han tallado las piezas necesarias y se ha construido el prototipo que se muestra en la Figura 4.9. Para controlar los movimientos de este dedo prototipo, se ha utilizado un circuito impreso basado en un microcontrolador ATmega 16, para el que se diseñó un programa modular capaz de controlar diversos servos, que sirvió de base al programa final.

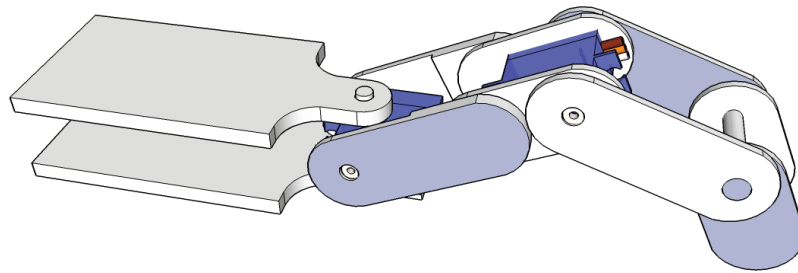


Figura 4.8: Diseño en 3D del prototipo de un dedo de la mano mecánica



Figura 4.9: Prototipo construido de un dedo de la mano mecánica

4.4. Diseño final

Con el prototipo inicial se pudo demostrar que el funcionamiento mecánico conjunto de las distintas partes era válido. Así, sabiendo que el proyecto es realizable a bajo coste con dichos

componentes mecánicos, se procedió a realizar el diseño final. Las siguientes secciones muestran los pasos seguidos.

4.4.1. Esquema cinemático

Para afrontar un proyecto mecánico que contiene partes móviles, hay que definir desde un principio los distintos movimientos que se van a poder realizar. La forma de visualizar dichos movimientos, así como su punto de aplicación, es a través de un esquema cinemático. Para el desarrollo de la mano mecánica que se presenta, los movimientos necesarios se han definido en la sección 4.1 y el esquema cinemático derivado se puede observar en la Figura 4.10. En este esquema, los distintos cilindros representan ejes en los que se realizan movimientos, ya sean activos o pasivos. No representan los DoF existentes, pues como se indicó en la sección 3.1, en este proyecto se asocia DoF sólo a movimientos activos. En el esquema, los cilindros simples representan el movimiento de flexión/extensión de las articulaciones, mientras que los cilindros que forman una cruz, indican movimientos en dos ejes (flexión/extensión y abducción/aducción que realizan las articulaciones MP). Por otro lado, puede observarse como la articulación MP del pulgar se ha dividido en dos cilindros simples, lo que significa que el punto de aplicación del movimiento no es el mismo. Esto ha sido diseñado así para evitar choques con la estructura de la palma cuando se lleve el pulgar hacia el centro de ésta.

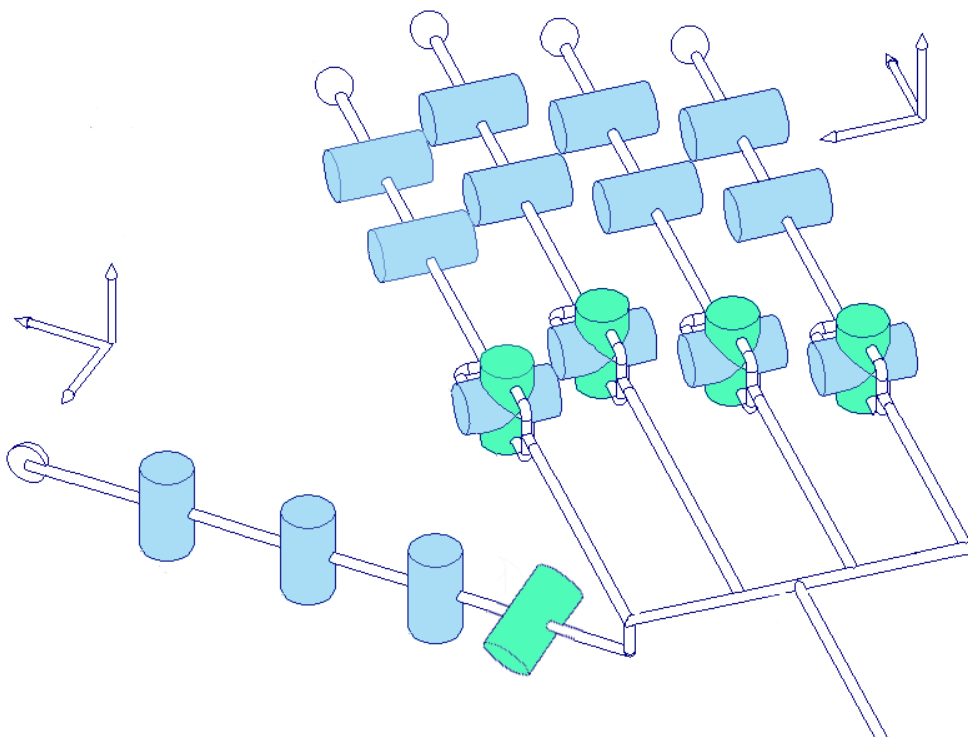


Figura 4.10: Esquema cinemático de la mano mecánica desarrollada

4.4.2. Diseño final en 3D

Al igual que con el prototipo inicial, para realizar el diseño final de la mano mecánica, primero se ha creado un modelo en 3D del conjunto, que puede observarse en la Figura 4.11. El diseño ha sido realizado modularmente, creando primero los dedos de forma independiente a partir del prototipo. Por otro lado se ha desarrollado el modelo del pulgar y la palma, y, finalmente, se ha ensamblado todo el conjunto. Este diseño en 3D proporciona una visión global de lo que será el desarrollo a realizar, permitiendo comprobar que la estructura puede ejecutar todos los movimientos necesarios sin colisiones de ningún tipo.

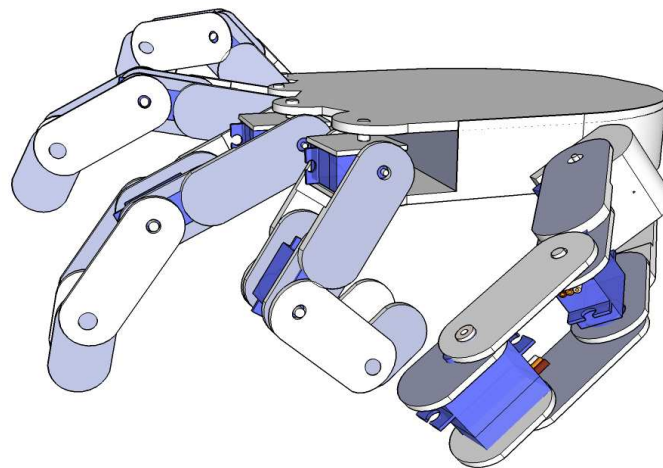


Figura 4.11: Modelo en 3D de la mano mecánica

Como puede observarse en el modelo 3D de la Figura 4.11, el ancho de los servomotores es un importante factor que limita el tamaño de la mano mecánica haciendo que ésta sea más grande que una mano humana. El modelo de servomotores utilizado, pese a ser uno de los más pequeños que ofrece el mercado, tiene una altura de 27 mm, por lo que el grosor mínimo de un dedo, sumando los grosores de las piezas que lo forman, será de 3 cm. Este grosor condiciona las dimensiones de la mano, ya que habrá que crear dedos más largos para mantener la proporcionalidad con la mano humana. Las teorías de las proporciones naturales de los dedos humanos, se mostraron en el apartado 2.1.6, en el que se obtuvo un modelo matemático basado en el número áureo como constante de proporcionalidad para obtener las longitudes de las falanges. Sin embargo, teniendo en cuenta que se deben crear los dedos con una longitud mayor que la natural, se ha de modificar dicha constante. El nuevo modelo matemático creado para el desarrollo, utiliza como razón entre falanges consecutivas el valor 0,66. Por tanto, ahora la ecuación para obtener el tamaño final del dedo es:

$$y = x \cdot \sum_{n=0}^2 0,66^n$$

Que resuelta queda:

$$y = 2,1x$$

Donde y es la longitud del dedo, y x el tamaño de la falange proximal. Con esta ecuación se obtiene un dedo un 5 % más largo que utilizando el modelo matemático anatómico presentado con anterioridad. Además, a los dedos se les ha añadido un tamaño extra en la punta, asignado a lo que sería la yema, por lo que de forma global, se obtienen unas relaciones longitud-grosor más naturales. En la Tabla 4.2, se pueden observar las longitudes finales de los metacarpos y las falanges, la longitud total del dedo aplicando el nuevo modelo matemático, y la longitud final tras introducir el tamaño extra que representa la yema, todas ellas en milímetros.

Dedo	Metacarpo	F.Proximal	F.Media	F.Distal	Longitud teórica	Longitud final
Índice	91	60	39	26	125	131
Corazón	112	74	47	33	156	164
Anular	101	67	44	29	140	147
Meñique	82	54	35.5	23.5	113	119

Tabla 4.2: Longitudes de las falanges y dedos creados

4.4.3. Diagramas de construcción de los dedos. Diseños CAD

Realizado el modelo 3D y comprobada su funcionalidad, se ha pasado a dar forma a cada pieza. Para ello, basándose en el módulo 3D de cada dedo, se han creado los correspondientes modelos bidimensionales, con las medidas establecidas en la Tabla 4.2. En esta fase se ha intentado dar a los dedos forma natural, aplicando una forma ovalada a sus piezas, haciendo que sean más anchos por la base que en la punta, creando la forma de la uña, etc. Los modelos creados para los dedos corazón y meñique, pueden observarse en la Figura 4.12, arriba y abajo respectivamente, donde además se aprecian los detalles comentados y la diferencia de tamaño entre ambos.

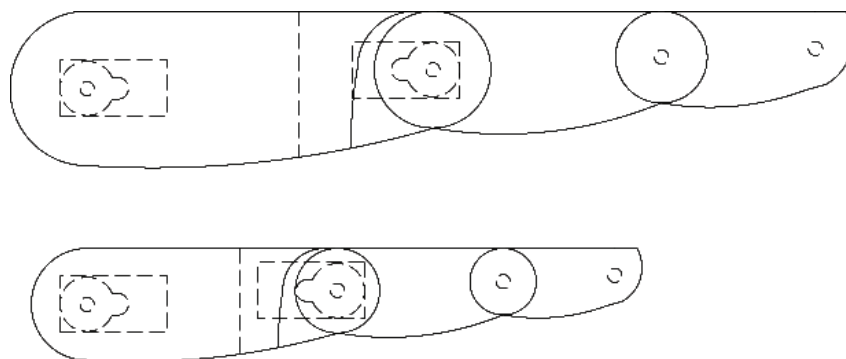


Figura 4.12: Diseño CAD 2D de los dedos corazón y meñique

Una vez creados los modelos bidimensionales, se han separado las partes para dar forma a las piezas necesarias al construir cada dedo. En esta fase de diseño individual de piezas, se han tenido en cuenta los tamaños de los diferentes tornillos y elementos a utilizar, así como de

los servomotores para que las piezas encajen a presión. En el anexo A se pueden encontrar los diagramas de las piezas necesarias para construir el dedo anular.

4.4.4. Diseño de la palma

Las piezas de la palma de la mano son las que sustentan el resto de los dedos y alojan los servomotores encargados del movimiento de abducción/aducción de cada uno de ellos. Para crear estas piezas, se ha realizado un diseño CAD al igual que para las piezas de los dedos. Las medidas de la palma, al igual que los dedos, también siguen las medidas referentes a los huesos metacarpianos mostradas en la Tabla 4.2. En la Figura 4.13, puede verse un esquemático de la palma diseñada.

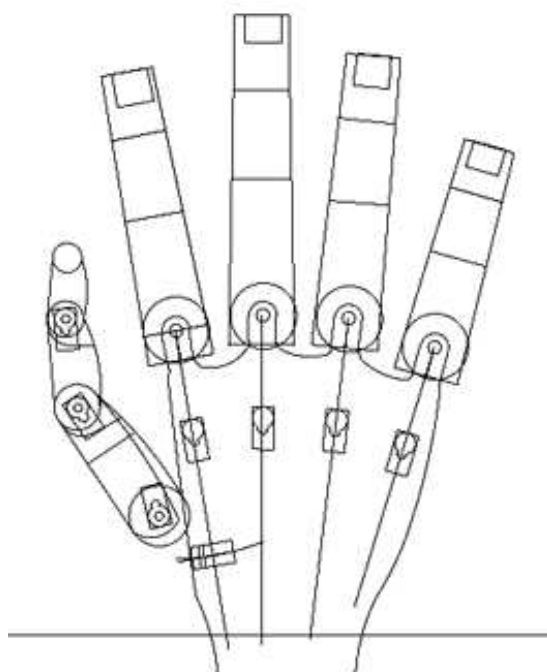


Figura 4.13: Diseño final de la palma de la mano

El modelo diseñado de la palma, ha evolucionado a través de diversas versiones hasta conseguir las piezas que permiten toda la movilidad requerida y proporcionan un soporte suficientemente estable al resto de las partes. La versión definitiva de la palma introduce una serie de características que facilitan el montaje y movilidad del resto de las piezas, algunas de las cuales son:

- La separación entre los dedos no es la misma para todas las articulaciones MP, sino que es mayor en los dedos índice y meñique que tienen más capacidad de abducción/aducción. Se evita de esta forma colisiones con los dedos colindantes.

- Los servomotores encargados del movimiento de abducción/aducción de cada dedo se sitúan en las líneas imaginarias de los dedos hacia la palma. Su ubicación se mantiene para cada dedo, dentro de dicha línea, a la misma distancia de la articulación MP. De esta forma se consigue que las varillas utilizadas para transmitir los movimientos desde el servomotor a la articulación sean todas del mismo tamaño y, por lo tanto, se simplifica el diseño.
- La tarjeta controladora de los servomotores, se integra en el interior de la palma. (manteniendo la condición de que la mano ha de ser autocontenida), y se sujeta a ésta por ambas caras, mediante cuatro tornillos y separadores.
- La sujeción del conjunto se realiza con los propios servomotores del interior de la palma, que actúan de piezas de unión al estar encajados a presión. Además, los tornillos que sujetan la tarjeta controladora y los propios anclajes de los servomotores de la palma y las articulaciones MP, también colaboran en la sujeción del conjunto. De esta forma se consigue un desarrollo más compacto, resistente y accesible.

En el anexo B, se muestra la evolución de la palma, desde la primera versión, hasta la última, y se detallan más profundamente todos los detalles comentados.

4.5. Construcción de la mano

En esta sección se realizará un breve repaso de los puntos más importantes a la hora de realizar la construcción de la mano mecánica. Información más detallada y profunda puede encontrarse en el anexo C.

El material a utilizar para construir la mano mecánica tiene que ser ligero y resistente, para permitir a los actuadores realizar los movimientos con el menor esfuerzo posible. El material utilizado durante la creación del prototipo era fibra de vidrio en formato PCB. Para construir la mano completa, se ha probado con un tipo de material plástico (poliestireno), pero por problemas con el corte de las piezas se ha decidido volver al primer material, fibra de vidrio.

Según el diseño creado, los servomotores actúan como articulaciones en sí mismos, aplicando los movimientos directamente sobre las piezas. Es, por tanto, necesario crear sobre ellos un segundo punto de apoyo alineado con el eje rotor, que hará las funciones de un eje pasivo de forma que se complete un eje transversal total. Este eje pasivo, proporcionará sujeción al servomotor y permitirá que los movimientos se realicen uniformemente sobre las piezas. En las Figuras C.1 y C.5(b) del anexo C, se puede observar el segundo eje creado.

Con las piezas de los dedos diseñadas, como se ha expuesto en la sección 4.4.3, mediante herramientas de diseño vectorial, se ha pasado a construirlas sobre la fibra de vidrio. Para ello se ha utilizado la función de corte de una máquina fresadora disponible diseñada para la creación de circuitos impresos. Una vez fresadas las piezas, hay que prepararlas para el montaje lavándolas y suavizando sus bordes.

Con las piezas listas y los servomotores preparados, se procede a realizar el ensamblaje de la mano mecánica. En la sección C.5 se muestran los detalles técnicos y de montaje, que junto con el esquema general de ensamblaje de la Figura C.4 ayudarán a entender el proceso.

Tras ensamblar los dedos, se continúa con el montaje del resto de la estructura introduciendo los servomotores de la palma, y la electrónica de control de todos los actuadores. En la Figura 4.14, se muestra el resultado final, con la mano mecánica completamente ensamblada y funcional.



Figura 4.14: Mano mecánica completa

5

Control de la mano mecánica

El sistema de control de la mano mecánica construida tiene dos partes bien diferenciadas: el hardware, que incluye la construcción y programación de la tarjeta controladora de servomotores; y el software, la aplicación diseñada para manejar la mano desde el ordenador.

5.1. Hardware de control

Para poder manejar los servomotores de la mano, ha sido necesario diseñar, construir y programar una tarjeta controladora de servomotores, que se encarga de recibir las instrucciones de control desde un ordenador y mandar las señales pertinentes de control a los actuadores.

5.1.1. El microcontrolador

Uno de los requisitos de este PFC presentados en la sección 4.1, fue que el «cerebro» de la tarjeta que controlará los servomotores fuera un microcontrolador de bajo coste. Antes de elegir dicho microcontrolador, se debe hacer un estudio de las necesidades que ha de cubrir, para luego encontrar que productos las cumplen. Los requisitos que ha de tener el microcontrolador a utilizar son:

- Tiene que tener como mínimo, tantas entradas/salidas programables como actuadores existan en la mano mecánica, para poder controlarlos independientemente.

- Ha de tener suficientes canales PWM hardware para poder controlar los servomotores, o disponer de suficientes contadores para poder hacer un control PWM software.
- Ha de poder funcionar con un reloj externo rápido (16 MHz), que controle con precisión los ciclos de los servomotores (como se vió en la sección 4.1.1) y proporcione rapidez de procesamiento para las instrucciones recibidas.
- Debe poder comunicarse mediante el protocolo serie (debe disponer de USART).

Una vez establecidos los requisitos del microcontrolador, y tras estudiar el abanico de productos existentes actualmente en el mercado, se ha decidido utilizar el microcontrolador ATMEGA 162, de ATMEL. Como características generales, este microcontrolador tiene 35 entradas/salidas programables, dos USART, puede trabajar a frecuencias de 16 MHz y, aunque no dispone de canales PWM hardware suficientes, tiene dos contadores de 16 bits cada uno con dos registros de comparación independientes que permiten realizar un control PWM software para incluso más de los actuadores a utilizar.

5.1.2. La tarjeta controladora de servomotores

Para el control de la mano mecánica, se ha de crear una tarjeta controladora de servomotores que, aparte de incluir el microcontrolador elegido en la sección anterior, agrupe el resto de la electrónica necesaria para el control de la mano y los conectores de todos los servomotores, alimentación y comunicación. Todo ello, en una superficie lo suficientemente pequeña para poder integrarse en el interior de la palma. Algunos elementos a destacar de la tarjeta controladora creada son:

- *Chip FTDI*: la tarjeta ha de comunicarse con el ordenador a través del protocolo serie del microcontrolador. Sin embargo, muchos ordenadores actuales no disponen de un puerto serie que facilite las comunicaciones. Para solucionar este problema, se ha añadido un chip FTDI, encargado de adaptar las comunicaciones entre la USART del microcontrolador y el puerto USB de los ordenadores actuales, configurando el USB como un puerto serie (COM) dentro del ordenador.
- *Puerto USB*: se ha añadido un conector hembra de USB tipo B, para poder conectar la tarjeta controladora al ordenador.
- *Conectores de 3 pines*: las conexiones de los servomotores (3 pines por servomotor), han de situarse en los bordes de la tarjeta y en un plano paralelo a ésta. Los conectores no podrán estar en perpendicular porque, aunque se reduzca el tamaño de la placa, el conjunto sería demasiado grueso como para caber en el interior de la palma, incumpliendo el requisito de que la mano sea autocontenida.

- *Alimentación:* la placa controladora ha de llevar la alimentación a todos los servomotores y chips, por lo que se incluye también un conector jack con este propósito. La tensión a los servomotores, se aplica a través de una pista especial en el circuito impreso, diseñada más ancha de lo normal para aguantar la corriente máxima que pueden requerir los 16 servomotores funcionando a la vez. Observando el dato de la tabla 4.1, cada servomotor puede requerir hasta 200 mA de corriente, que por 16 servomotores puede llegar a un total de 3,2 A.
- *Leds:* se han incorporado dos leds indicadores de comunicaciones al lado del conector USB: uno verde, cuando se recibe información desde el ordenador y uno rojo, para la transmisión del feedback de la tarjeta al PC.
- *Reset:* ha de existir un botón de reset que, en caso de algún mal funcionamiento de cualquiera de los elementos, pueda reiniciar el programa del microcontrolador y llevar la mano a una posición inicial.

En la Figura 5.1 se puede observar el resultado final de la tarjeta controladora construida, cuyas medidas finales son 7,3 cm de largo por 5,1 cm de ancho. Los números que se observan en los pines de los bordes, son los que reciben los servomotores ahí conectados para reconocerlos a la hora de realizar los movimientos. Los pines de los servomotores 07, 08 y 09, se encuentran en la capa inferior, reduciendo así el espacio empleado.

5.2. Programación del Hardware

Como se explicó en la sección 4.1.1, para poder controlar los servomotores empleados, se necesita una señal PWM de ancho de pulso de entre 0,5 ms y 2,4 ms, con un periodo de 20 ms. Al no contar el microcontrolador con suficientes canales PWM hardware, el control de los 16 servomotores que utiliza la mano mecánica se realiza mediante software programando las distintas funciones del hardware de los contadores. El microcontrolador elegido, dispone de contadores de 8 y 16 bits, algunos de los cuales disponen de hasta dos registros de comparación. Dichos registros almacenan los valores que se indiquen, y son comparados con el valor de la cuenta. Cuando ambos valores coinciden, el hardware del contador es capaz de activar, previa configuración, una interrupción de comparación. Para el programa del microcontrolador que genera la señal de control de los servomotores, se utilizan los contadores de 16 bits internos, junto con los dos registros de comparación independientes de cada uno. Así se pueden conseguir programar el salto de hasta 4 interrupciones de comparación distintas, que se utilizarán para controlar el ancho del pulso y el periodo correspondientes a cada servomotor.

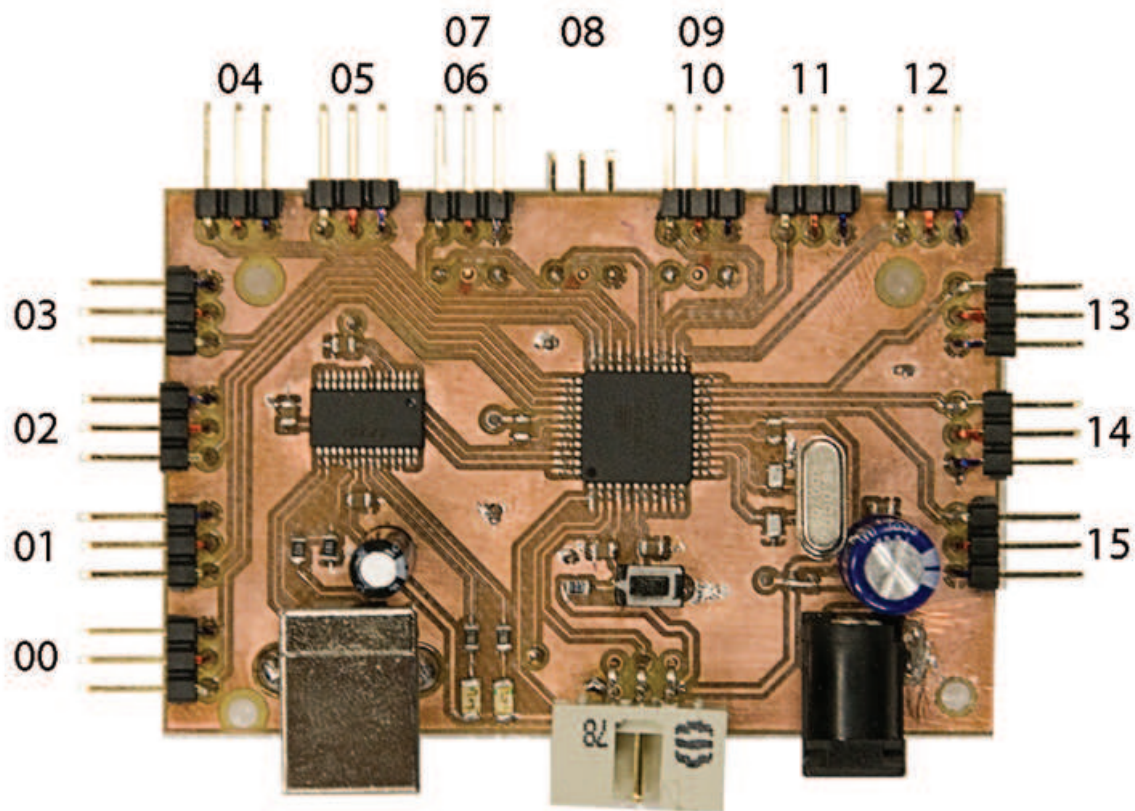


Figura 5.1: Tarjeta controladora de servomotores contruida

5.2.1. Algoritmo de control para un servomotor

La programación del microcontrolador para obtener el pulso PWM de un servomotor, se realiza con un contador de 16 bits y una única interrupción. Al inicio del programa, se activa la salida del pulso para el servomotor, y se introduce en el registro de comparación del contador el valor (en ticks de reloj) del ancho de pulso que sitúa el rotor del servomotor en la posición deseada. Cuando el valor de la cuenta, coincide con el almacenado en el registro de comparación, salta una interrupción (int. A). Al procesar dicha interrupción, se desactiva la señal del servomotor, finalizando así el ancho del pulso a enviar, y se introduce en el registro de comparación el valor restante del periodo de 20 ms para terminar el pulso PWM (int. B). En la Figura 5.2, se muestra un esquema del ciclo PWM de control de un servomotor, útil para entender el algoritmo descrito.

Para poder realizar el proceso correctamente, hay que tener en cuenta que el reloj de la tarjeta controladora es muy rápido (16 MHz.), pues se especificó así para poder atender a las interrupciones sin problemas. Esto implica que se contarán muchos ticks de reloj en poco tiempo, por lo que puede llegar a darse un error por desbordamiento de la cuenta antes de haber transcurrido el tiempo necesario. Debido a esto, el valor máximo de tiempo que pueden alcanzar

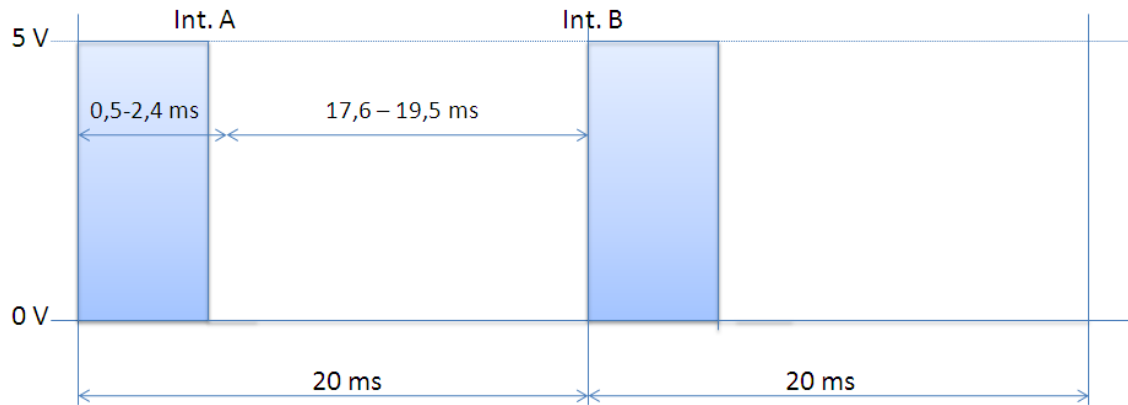


Figura 5.2: Pulso PWM para el funcionamiento de un servomotor

los contadores estará limitado hasta el tiempo en que se desborde el registro de cuenta. Si el contador es de 16 bits, el número máximo de ticks que podrá contar es 2^{16} . A una velocidad de reloj de 16 Mhz, se tienen:

$$16 \cdot 10^6(\text{ticks}/\text{seg}) \iff 16(\text{ticks}/\mu\text{s})$$

Por lo que el contador tardaría en desbordarse

$$2^{16}(\text{ticks}) \div 16(\text{ticks}/\mu\text{s}) = 4096(\mu\text{s})$$

Por tanto, con un contador de 16 bits y un reloj de 16 MHz, se tardará 4,096 ms en producirse el desbordamiento del registro que almacena la cuenta, es decir, se puede contar un máximo de 4,096 ms. Dado que con el método explicado en esta sección se necesita contar un máximo de hasta 9,5 ms, un servomotor no podría controlarse correctamente. Sin embargo, el control de varios servomotores si podrá hacerse sin problema, como se muestra a continuación.

5.2.2. Algoritmo de control para varios servomotores

Como se puede observar en la Figura 5.2, al hacer funcionar un servomotor, la señal está activa un máximo de 2,4 ms dentro de un periodo de 20 ms. Para no desaprovechar el tiempo en que el pulso de control está desactivado, se pueden generar secuencialmente las señales de control para varios servomotores en un mismo periodo de 20 ms. De esta forma, teniendo en cuenta el ancho de pulso máximo para un servomotor (más un pequeño margen de seguridad), se subdividirá el periodo completo en ventanas individuales en las que se atenderá a cada actuador. Dando a cada servomotor una ventana de 2,5 ms, con este método se pueden controlar hasta un máximo de:

$$20(\text{ms}) \div 2,5(\text{ms}/\text{servomotor}) = 8(\text{servomotores})$$

Puesto que el tamaño de la ventana no puede ser menor de 6,5 ms (4,096 ms de cuenta máxima antes del desbordamiento del contador, más 2,5 de ancho de pulso máximo), el número mínimo de servomotores que se debe controlar con este algoritmo y el hardware utilizado es:

$$20(ms) \div 6,5(ms/servomotor) = 3,08(servomotores) \Rightarrow 4(servomotores)$$

El algoritmo diseñado para controlar varios servomotores, es similar al anterior, pero más eficiente, pues realiza el control de hasta 8 servomotores por periodo de 20 milisegundos. En la Figura 5.3, se puede observar un diagrama de cómo se realiza el control PWM de cinco servomotores en un mismo periodo de 20 ms,

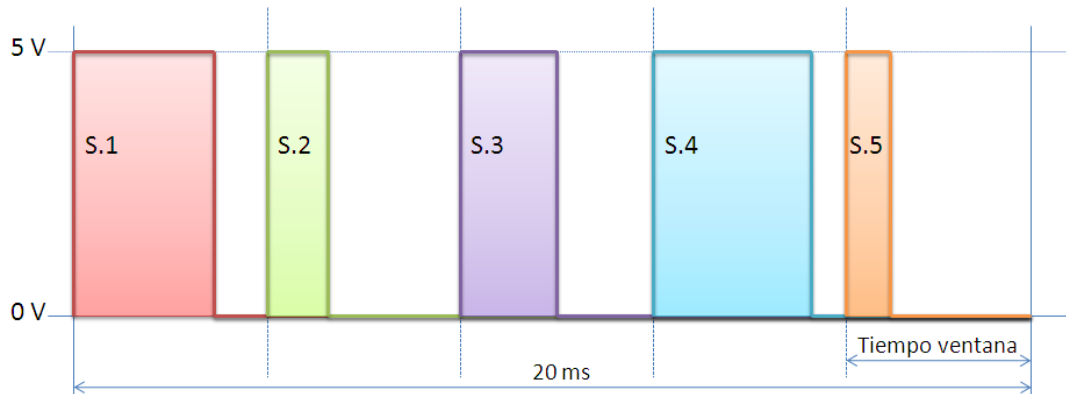


Figura 5.3: Control de cinco servomotores en un mismo periodo

El algoritmo se ejecuta principalmente en la atención a la interrupción de comparación. Un diagrama de flujo que define su funcionamiento se puede encontrar en la Figura 5.4, mientras que en la Figura 5.5, se pueden observar las señales de control de 4 servomotores con este algoritmo a través de un osciloscopio.

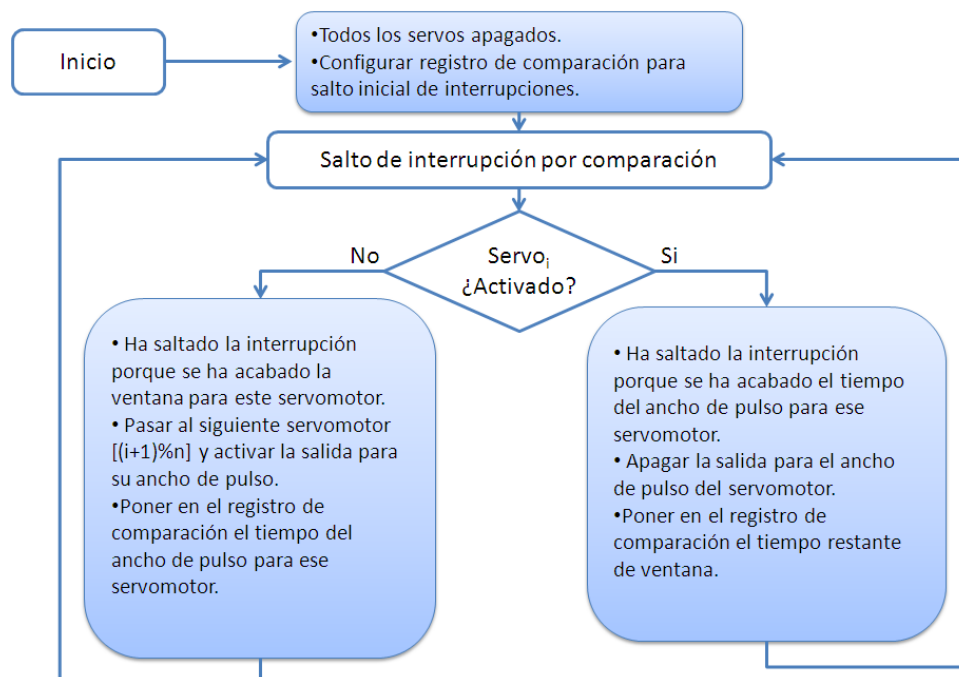


Figura 5.4: Diagrama de flujo del algoritmo utilizado

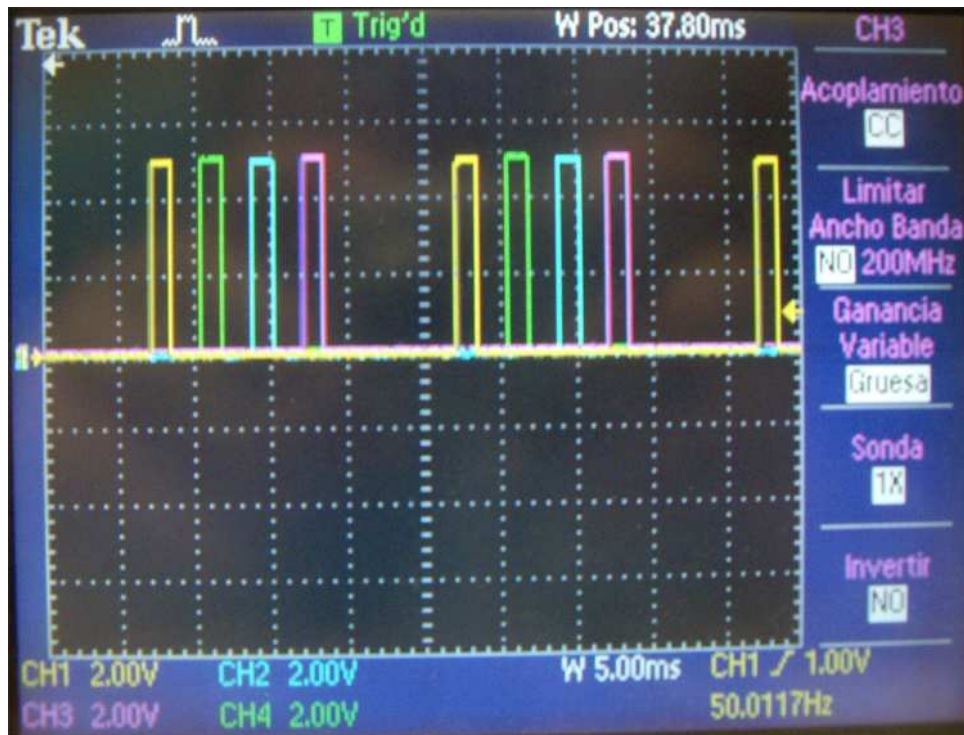


Figura 5.5: Señales de control de cuatro servomotores en el osciloscopio

- Al inicio del programa hay que configurar el registro de comparación del contador para que la interrupción salte inmediatamente. Todas las salidas de los servos que controla ese contador, estarán apagadas.
- En la primera atención a la interrupción de comparación, se activa la señal correspondiente al primer servomotor manteniendo todas las demás desactivadas. A continuación se almacena en el registro de comparación el número de ticks del contador que representan que el pulso del primer servomotor se mantendrá en alto.
- Al alcanzarse el valor escrito en el registro, saltará de nuevo la interrupción de comparación. Cuando sea atendida se desactivará la señal de ese servomotor y se actualizará el registro de comparación con el valor de tiempo en ticks de reloj restante hasta el final de la ventana reservada para dicho servomotor.
- Cuando vuelva a saltar la interrupción de comparación, significará que ha terminado la ventana de tiempo para el primer servomotor, y comienza la del segundo. Se activa el pulso de control de ese servomotor, y se actualiza el registro de comparación con el tiempo que se mantendrá activo.
- Cuando termine el tiempo en activo para ese servomotor, saltará de nuevo la interrupción de comparación y se actualizará el registro con el valor restante hasta el final de su ventana.

El proceso se realiza de la misma forma hasta recorrer todos los servomotores. Puesto que el fin de la ventana del último servomotor es el fin del periodo completo de 20 milisegundos, se

consigue actualizar la señal de todos los servomotores multiplexados en ese contador, cada 20 milisegundos.

5.2.3. Control de velocidad de los servomotores

Los servomotores empleados en este proyecto, como puede verse en la Tabla 4.1, tienen una velocidad de rotación de 0.1 segundos para 60° . Por tanto, si el servomotor está en una posición (dada por el ancho de pulso PWM que está recibiendo) y se le indica que debe rotar 120° , tardará 0.2 segundos en alcanzar la nueva posición. Si se tiene en cuenta que los servomotores moverán el peso de las piezas de los dedos a alta velocidad, existirán problemas de inercia cuando se alcancen las posiciones finales, con el consecuente riesgo de estropear los engranajes internos. Por otro lado, para poder interpretar correctamente la configuración representada por la mano, se requiere que todos los servomotores alcancen su posición final a la vez. Para ello, se necesita que cada servomotor tenga una velocidad distinta, dependiente de la distancia que tenga que recorrer (una articulación que ha de variar un ángulo grande ha de moverse más rápido que una que ha de recorrer poco).

La solución alcanzada es hacer que el servomotor se mueva en varios pasos, avanzando poco a poco. Así, en lugar de situarse directamente en la posición final, se irá situando en tantas posiciones intermedias como indique el valor «velocidad», configurable desde el ordenador. Para conseguir asignar a cada servomotor una velocidad distinta, en el programa del microcontrolador se han creado cuatro tablas internas que almacenan información sobre la posición inicial, posición final, paso y posición siguiente de cada servomotor. Brevemente, la función de estas tablas es:

- posiciones actuales: almacena para cada servomotor, el valor del ancho de pulso actual que se le está dando (posición).
- posiciones finales: almacena la posición en la que se quiere situar cada servomotor.
- paso: contiene para cada servomotor el cociente entre el avance (diferencia de posición final e inicial) y el número de pasos a realizar antes alcanzar la posición final (variable «velocidad»).
- posiciones siguientes: contiene para cada servomotor el valor de la suma entre su posición actual y su paso calculado.

Con esta configuración tabular, cada vez que el microcontrolador recibe la orden para mover las articulaciones de la mano, repetitivamente calcula y vuelca la tabla posición siguiente sobre la tabla posición actual, hasta llegar a la posición final. Puesto que el número de pasos es el mismo para todos los servomotores, la velocidad a la que se mueve cada uno será distinta, pero todos llegarán al mismo tiempo a la posición final. En la Figura 5.6, se puede observar un diagrama que muestra el avance de un servomotor a su posición final, en cuatro pasos.

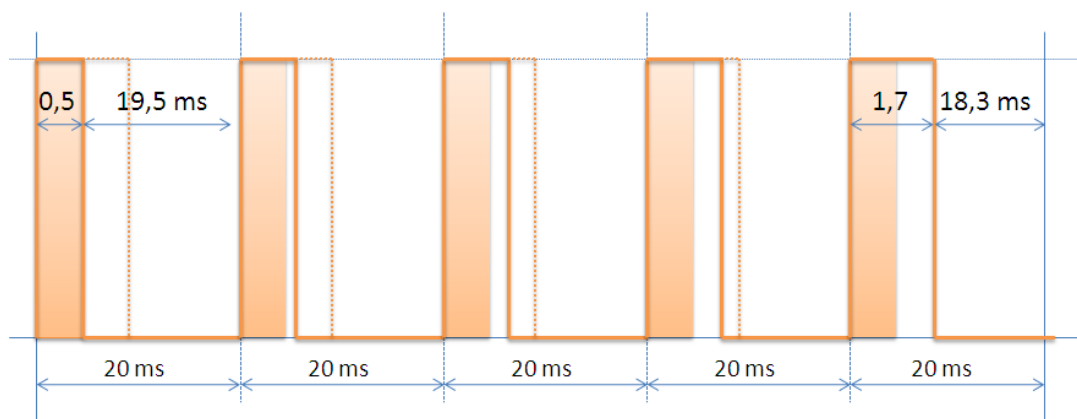


Figura 5.6: Método de control de la velocidad de un servomotor, para un valor «velocidad»=4. El bloque coloreado es el pulso inicial. El pulso en línea punteada es el objetivo. El pulso en línea continua, es el pulso en el paso i

5.3. Control de la mano mecánica

Para controlar los movimientos de la mano robótica, la tarjeta controladora ha de conectarse a un PC que le envíe, a través del puerto serie configurado por el FTDI, las instrucciones a ejecutar. Hay disponibles dos aplicaciones distintas de control con el ordenador, una a bajo nivel que se realiza a través de un terminal de comunicaciones serie, y otra a alto nivel, a través de una aplicación JAVA diseñada para el control general de los movimientos de la mano mecánica.

5.3.1. Control por ordenador desde un terminal serie

El control básico de la mano robótica se realiza enviando instrucciones desde un terminal serie del ordenador a la tarjeta controladora de la mano. Se han programado tres instrucciones para el control de la mano mecánica:

- Instrucción escribir. Su finalidad es escribir (en la tabla interna de «posición final») la información referente a la posición en la que se quiere situar un servomotor.
- Instrucción mover. Tras recibirlo, la tarjeta controladora actualiza los servomotores, moviéndolos a las posiciones indicadas en la tabla interna de «posición final».
- Instrucción de modificar velocidad. Espera la recepción de un valor entre 1 y 99, que será el número de pasos intermedios que dará cada servomotor antes de llegar a su posición final.

En el anexo D, se muestra información más detallada sobre las instrucciones de control de la mano mecánica a través del terminal serie de comunicaciones. En él, se pueden encontrar tanto las estructuras de los mensajes necesarios para el control, como los procesos que realiza la tarjeta controladora de la mano al recibir las instrucciones.

5.3.2. Control mediante la aplicación JAVA

Para facilitar y centralizar el control de los 16 servomotores de la mano, se ha creado la aplicación JAVA que puede observarse en la Figura 5.7. En esta sección se describen brevemente los principales controles de la aplicación. Una definición más profunda de las partes de la aplicación y las instrucciones que genera y transmite a la tarjeta controladora, se encuentra en el anexo E.

En la parte principal de la aplicación se presentan 16 sliders, cada uno referente a una articulación de cada dedo, que controlan los 16 actuadores utilizados.

El slider que se observa a la izquierda de la aplicación, debajo de los botones para conectar y desconectar, es el que controla la variable «velocidad» de los movimientos.

El botón «Move», que se encuentra a la izquierda de la pantalla debajo del slider de velocidad, es el encargado de mover todos los servomotores a la posición que indiquen sus sliders.

La pestaña desplegable que se observa en la zona izquierda de la aplicación, son posiciones estándares preconfiguradas de la mano.

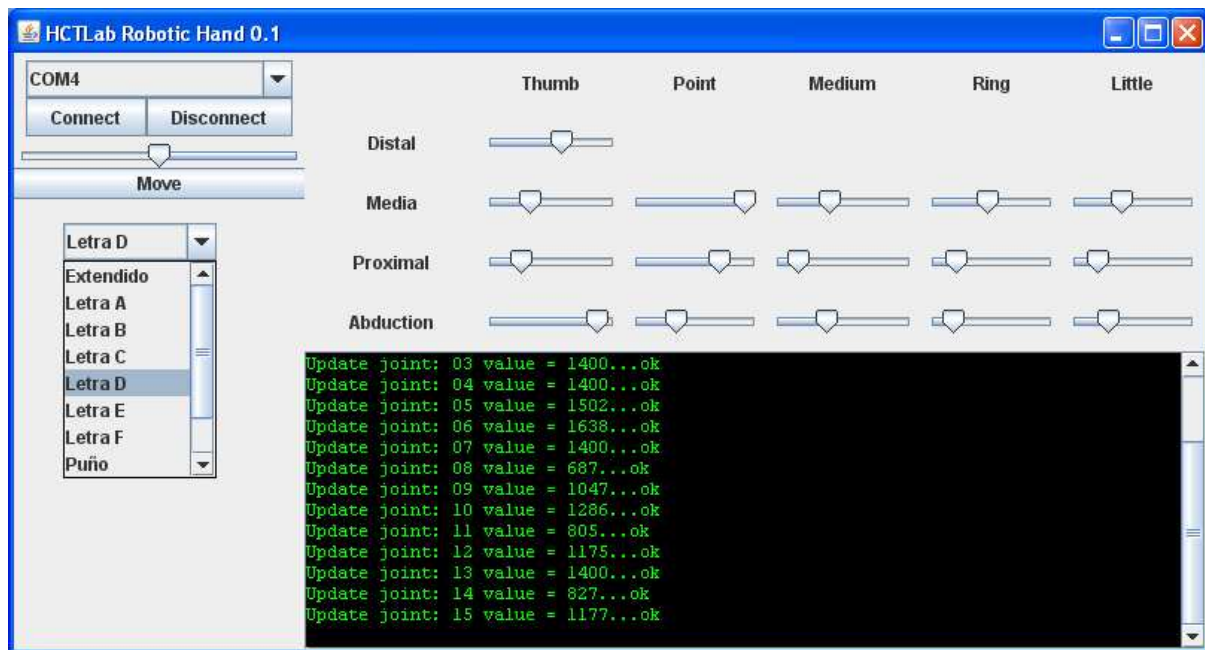


Figura 5.7: Aplicación utilizada para el control de la mano mecánica

6

Pruebas y experimentos

Durante el proceso de construcción de la mano mecánica, se han realizado diversas pruebas de manejo y control de los movimientos de los dedos. Con el desarrollo del prototipo inicial, las pruebas se limitaron a mover las distintas articulaciones programando el hardware disponible para ganar experiencia de cara al manejo final. Pese a ser simples, estas primeras pruebas han servido de base para afianzar conocimientos y validar tanto los diseños como los programas hardware creados.

Las pruebas funcionales realizadas con la mano mecánica completa construida, han consistido en representar las distintas letras del alfabeto dactilológico español, y diversas posiciones comunes (puño cerrado, mano natural, mano extendida...). Para cada letra o configuración, se han guardado en la aplicación JAVA descrita en la sección 5.3.2, las posiciones de todos los servomotores asignándolas una etiqueta identificativa en la pestaña de selección de la propia aplicación. De esta forma, se puede representar la configuración deseada fácilmente seleccionándola en dicha pestaña. En la Figura 6.1, se puede observar el diccionario dactilológico español representado con la mano mecánica contruida. Ésto ha permitido validar el correcto funcionamiento de los servomotores y las articulaciones. Además se ha verificado la resistencia de los materiales y robustez del montaje.

La evaluación de la inteligibilidad llevada a cabo, ha consistido en representar diversas letras del alfabeto dactilológico de la LSE, y ver si un grupo de usuarios era capaz de reconocerlas. Dicho grupo está formado por una muestra de 14 personas sin experiencia previa en LSE o conocimientos de deletreo en LSE. El experimento realizado ha consistido en representar con la

Alfabeto Dactilológico

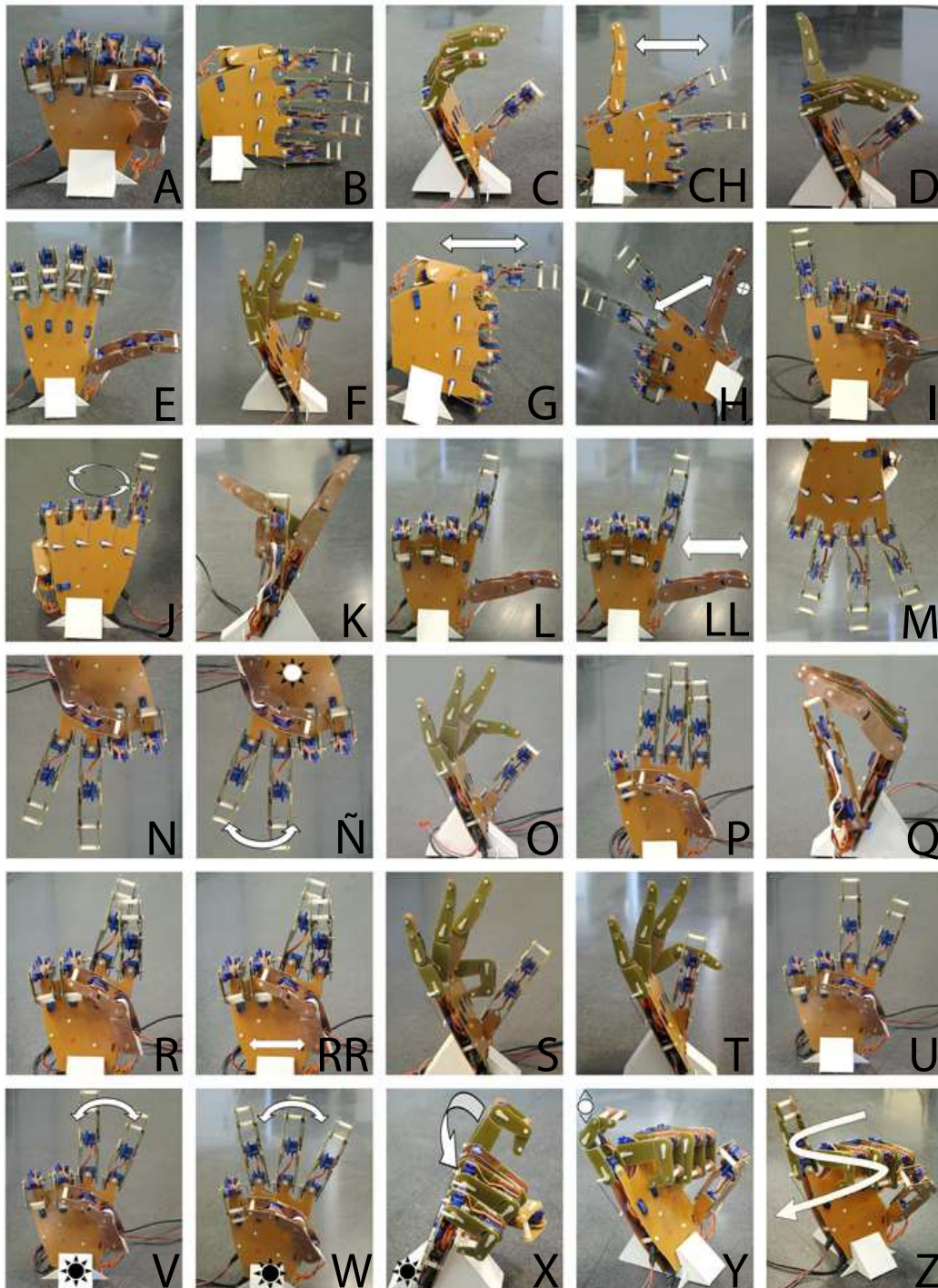


Figura 6.1: Representación del diccionario dactilológico español

mano mecánica 20 letras distintas, pidiendo a los usuarios que identificasen la letra representada con ayuda de una plantilla del alfabeto de deletreo de la LSE como la mostrada en la Figura 2.4. Se realizó en dos tandas independientes (usuarios 1-7 y 8-14), y antes de realizar el experimento al segundo grupo, se han exagerado algunas de las letras con mayor confusabilidad observadas en los resultados del primer grupo, como la letra «M» (en la que se ha aumentado la abducción de los dedos).

A la hora de interpretar los resultados se dan por válidos las letras que utilizan la misma configuración pero distinta orientación o necesitan de una representación dinámica, ya que la mano no puede orientarse ni realizar gestos dinámicos. Estas agrupaciones de letras son:

- N-Ñ-U-V
- M-W
- I-J-Z
- L-LL

En la Tabla 6.1, se muestran los resultados obtenidos con el experimento para ambos grupos. Ha existido un acierto del 95,7% en la interpretación de las letras, puesto que la mayoría de personas del grupo experimental ha identificado correctamente entre 18 y 20 de las letras representadas. Los fallos más comunes, se han producido al confundir la «P» (cuya configuración tiene dedos índice, corazón y anular estirados y juntos) con la «W» y la «M» (cuyas configuraciones tienen estirados los mismos dedos, pero separados). Sin embargo, se puede observar como se redujo este error entre los experimentos del primero y segundo grupos, pues como se ha comentado, se exageraron las representaciones de ambas letras.

Otro error encontrado en los resultados de los experimentos, ha sido la interpretación de las letras «D» y «G». Este error principalmente se ha debido a que la plantilla de apoyo sólo mostraba el reverso de la palma, y no la posición de todos los dedos para la «G», y por tanto podía ser igual que la «D».

La letra «Q», pese a ser una configuración que requiere el arqueamiento de los nudillos, ha sido exitosamente identificada en el 100% de los casos, pues es la única que concentra todos los dedos en un punto.

En la Tabla 6.2 se muestran los resultados del experimento desarrollado, aplicando cierta tolerancia en las respuestas. Al analizar estos resultados se consideran válidas las respuestas en las que la letra «P» se confunde con alguna de las del grupo de configuración similar «M-W». También se dan por válidos los errores entre la «T» y la «F», pues su configuración varía sólo en la posición del pulgar, que puede estar delante o detrás del dedo índice, y por tanto puede verse incorrectamente desde ciertos ángulos y en la plantilla suministrada.

	Pregunta																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Correcta	B	D	IZJ	F	MW	R	K	Q	A	UVNÑ	S	E	O	UVNÑ	L LL	C	P	T	X	Y	
Usuario																					Aciertos
1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	20
2	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	19
3	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	19
4	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	19
5	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	18
6	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	18
7	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	18
8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	20
9	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	20
10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	20
11	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	20
12	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	18
13	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	20
14	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	19
Total																					95,7%

Tabla 6.1: Resultados del experimento

	Pregunta																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Correcta	B	D	IZJ	F	MW	R	K	Q	A	UVNÑ	S	E	O	UVNÑ	L LL	C	P	T	X	Y	
Parecida		G		T	P												MW	F			
Usuario																					Aciertos
1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	20
2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	20
3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	20
4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	20
5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	20
6	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	19
7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	20
8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	20
9	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	20
10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	20
11	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	20
12	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	20
13	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	20
14	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	20
Total																					99,6 %

Tabla 6.2: Resultados del experimento aplicando tolerancia

7

Conclusiones y trabajo futuro

Como se ha mostrado en los capítulos 2 y 3, la mano humana es una estructura compleja con numerosas funcionalidades, movimientos y sensibilidad.

La diversidad de áreas tratadas durante el desarrollo de este proyecto, hacen que se trate de un proyecto muy completo y enriquecedor. Ha sido realizado un modelo inicial completo de la mano mecánica en 3D, gracias al cual se han creado diseños en 2D de las piezas necesarias. Se han ideado e implementado soluciones mecánicas de bajo coste que permiten realizar el mayor número posible de movimientos. Se ha construido y ensamblado toda la estructura completa de la mano mecánica. Para poder realizar el control, se han utilizado servomotores de bajo coste, para los que se ha diseñado y programado todo el hardware y software de control necesario. Finalmente, se han realizado pruebas y experimentos con la mano robótica, representando letras del alfabeto de deletreo y configuraciones de la LSE.

La mano mecánica desarrollada, tiene la capacidad de movimiento equiparable a muchas de las manos robóticas existentes, presentadas en el capítulo 3. Sin embargo, aún hay que profundizar en el desarrollo y control de nuevas partes como muñeca y brazo para conseguir el objetivo de poder representar la LSE.

7.1. Trabajo futuro.

Gran parte del trabajo futuro que se plantea, puede centrarse en mejorarse el diseño de la mano construida. Pueden buscarse nuevas alternativas a los actuadores empleados, que re-

duzcan el tamaño final del diseño, así como mejorar puntos clave de la estructura, como es la implementación del dedo pulgar.

Por otro lado, en este proyecto se ha desarrollado el atributo de movilidad de la mano mecánica. Muchas de las manos mecánicas presentadas en la sección 3, tienen además control sobre la presión que ejercen los dedos, temperatura de la mano, etc. Una posible mejora sería la sensibilización de la mano, que permitiría utilizar la extremidad para desarrollar algoritmos de agarre y experimentar con la manipulación de objetos e interacción con el entorno.

Por otro lado, como se comentó en la sección de «Motivación»(1.1), este proyecto de desarrollo de una mano mecánica, comienza una línea de investigación dentro del grupo de trabajo HCTLab, que puede ser continuada mediante el desarrollo de un brazo robótico y un avatar mecánico completo sobre el que se ensamble la mano, permitiendo realizar la comunicación a través de la LSE de forma más completa. Otra línea para continuar esta investigación, se orienta a la creación de extremidades para gente con discapacidad, que puede derivar en el manejo de la extremidad mediante sensores situados en el cuerpo humano y activados por señales cerebrales o impulsos eléctricos musculares.

Glosario de acrónimos

- **DIP**: Articulación interfalángica distal (*Distal Inter Phalangeal joint*).
- **DoF**: Grado de libertad (*Degree Of Freedom*).
- **LS**: Lengua de Signos.
- **LSE**: Lengua de Signos Española.
- **MP**: Articulación metacarpofalángica (*Metacarpo Phalangeal joint*).
- **PCB**: Tarjeta de circuito impreso (*Printed Circuit Board*).
- **PFC**: Proyecto de Fin de Carrera.
- **PIP**: Articulación interfalángica próxima (*Proximal Inter Phalangeal joint*).
- **PWM**: Modulación por ancho de pulso (*Pulse Width Modulation*).
- **SMA**: Aleación con memoria de forma (*Shape Memory Alloy*).
- **USART**: Universal Synchronous/Asynchronous Receiver Transmitter.
- **USB**: Universal Serial Bus.

Bibliografía

- [1] Pamela K. LeVangie and Cynthia C. Norkin. *Joint Structure and Function: A Comprehensive Analysis*. F.A. Davis Company, 3 edition, 2001.
- [2] Ángel Herrero Blanco. *Gramática Didáctica de la Lengua de Signos Española (LSE)*. Ediciones SM, 1 edition, 2009.
- [3] X.H. Gao, M.H. Jin, L. Jiang, Z.W. Xie, and P. He. The dlr/hit dexterous hand: work in progress. In *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, page 3164–3168, Taipei, Taiwan, 2003.
- [4] H. Liu, P. Meusel, N. Seitz, B. Willberg, G. Hirzinger, M.H. Jin b, Y.W. Liu, R. Wei, and Z.W. Xie. The modular multisensory dlr-hit-hand. In *Mechanism and Machine Theory 42*, page 612–625, 2007).
- [5] Raúl Suárez Patrick Grosch. Modelado y control de una mano mecánica. In *1ª Jornada de Recerca en Automàtica, Visió i Robòtica*, pages 299–306., Barcelona, Febrero 2004.
- [6] Raúl Suárez. Mano mecánica ma-i. *XXIV Jornadas de Automática*, 10-12 de Septiembre 2003.
- [7] R. Suárez and P. Grosch. Dexterous robotic hand ma-i software and hardware architecture. In *Intelligent Manipulation and Grasping International Conference*, pages 91–96, Genova, Italy, July 1-2, 2004 2004.
- [8] Tsukasa Ogasawara Jun Ueda, Masahiro Kondo. The multifingered naist hand system for robot in-hand manipulation. *Mechanism and Machine Theory*, pages 224–238, 2010.
- [9] Jun Ueda, Yutaka Ishida, Masahiro Kondo, and Tsukasa Ogasawara. Development of the naist-hand with vision-based tactile fingertip sensor. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2343–2348, Barcelona, Spain, 2005.
- [10] Hyouk Ryeol Choi Byungjune Choi, Sanghun Lee and Sungchul Kang. Development of anthropomorphic robot hand with tactile sensor : Skku hand ii. In *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, October 9 - 15 2006.

- [11] Sungmoo Ryew and Hyoukryeol Choi. Double active universal joint (dauj): Robotic joint mechanism for humanlike motions. In *IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION*, volume 17, pages 290–300, 2001.
- [12] F. Lotti, P. Tiezzi, G. Vassura, L. Biagiotti, G. Palli, and C. Melchiorri. Development of ub hand 3: Early results. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, April 2005.
- [13] M.C. Carrozza, P. Dario, F. Vecchi, S. Roccella, M. Zecca, and E. Sebastiani. The cyberhand: on the design of a cybernetic prosthetic hand intended to be interfaced to the peripheral nervous system. In *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2642–2647, Las Vegas, Nevada, October 2003.
- [14] M.C. Carrozza, G.P. Stellin, S. Roccella, G. Cappiello, F. Zaccone, C. Cipriani, F. Beccai, S. Vecchi, and P. Dario. Advanced cable-driven sensing artificial hands for extra vehicular and exploration activities. In *In Proceedings of the 9th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation 'ASTRA 2006' ESTEC*, Noordwijk, The Netherlands, November 2006.
- [15] Alan Rudolph Joseph Ayers, Joel L. Davis. *Neurotechnology for biomimetic robots*, chapter 6, pages 117–134. 2002.
- [16] Siavash Haroun Mahdavi and Peter J. Bentley. Evolving motion of robots with muscles. *S. Cagnoni et al. (Eds.): EvoWorkshops 2003*, pages 651–660, 2003.
- [17] D. B. Reynold, D. W. Repperger, C. A. Phillips, and G. Bandry. Modeling the dynamic characteristics of pneumatic muscle. In *Annals of Biomedical Engineering*, volume 31, page 310–317, USA, 2003.
- [18] Josiah Rosmarin Kyu-Jin Cho and Harry Asada. Sbc hand: A lightweight robotic hand with an sma actuator array implementing c-segmentation. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007.
- [19] Kyu-Jin Cho and Harry Asada. Multi-axis sma actuator array for driving anthropomorphic robot hand. In *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1356–1361, Barcelona, Spain, April 2005.
- [20] H. van Brussel D. Reynerts. A sma high performance actuator for robot hands. In *JOURNAL DE PHYSIQUE*, 1991.

A

Diseño de las piezas

Para poder realizar las piezas necesarias al construir cada dedo, se realizó un diseño bidimensional de cada uno. En la Figura 4.12, puede verse un ejemplo de los modelos desarrollados para los dedos corazón y meñique. En estos modelos, se respetan las longitudes de cada falange expresadas en la Tabla 4.2.

Una vez obtenido el diagrama de cada dedo, se realiza el diseño de las piezas necesarias. Siguiendo las medidas de los modelos creados, se van separando cada una de las piezas necesarias para la construcción. Durante este despiece, se tiene en cuenta el tamaño de los orificios necesarios para los tornillos, que se utilizarán a la hora de realizar el montaje final, así como de los actuadores para que puedan encajarse a presión. Las piezas necesarias para la construcción del dedo meñique, se pueden observar en la Figura A.1.

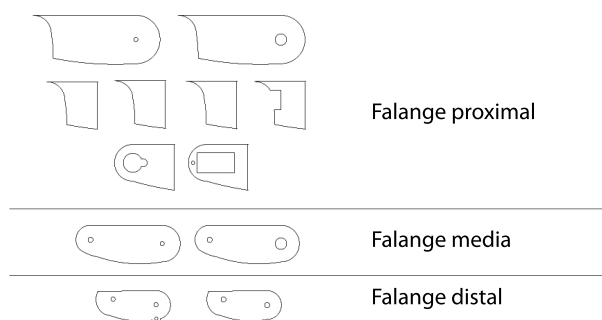


Figura A.1: Diseño de las piezas necesarias para construir el dedo anular

B

Evolución de la palma

Como se ha comentado en la sección 4.4.4, la palma de la mano creada ha sufrido una evolución desde un primer diseño a modo de prototipo, a un diseño más funcional y estilizado. En la Figura B.1, pueden observarse de izquierda a derecha, cuatro de las etapas evolutivas, siendo la figura de la derecha la opción final realizada.

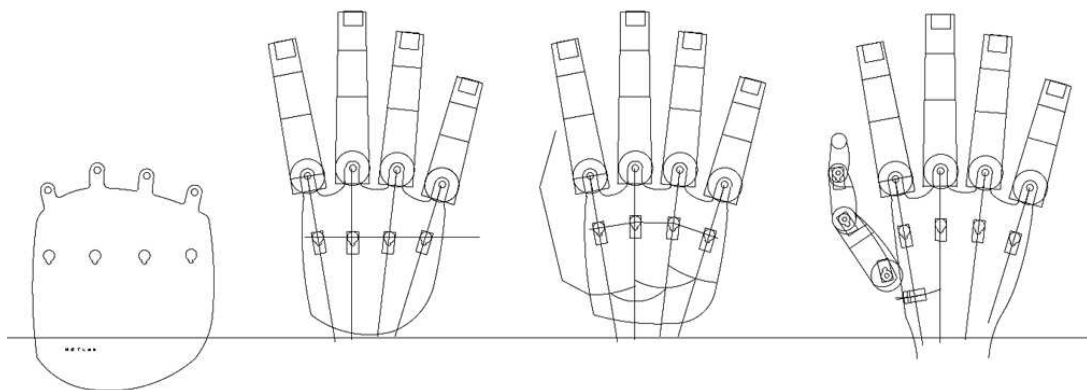


Figura B.1: Evolución de la palma de la mano

A lo largo de la evolución que se muestra en la Figura B.1, se pueden observar la serie de características nuevas brevemente comentadas en la sección 4.4.4. Algunas de ellas son:

- Las líneas que se observan en la palma, y que la recorren de arriba a abajo, son los ejes imaginarios de los dedos en estado relajado. Estas líneas convergen en un punto del antebrazo. En el diagrama sirven para conocer la situación aproximada de los metacarpos.

- En el tercer diagrama empezando por la izquierda de la serie evolutiva, se pueden observar sobre la palma los arcos que delimitan la longitud de los metacarpos según el modelo matemático descrito en la Tabla 4.2. El resto de espacio dejado hasta el corte de la palma, sería la zona de la muñeca.
- Se observa en las figuras centrales, como se pasa de situar los servomotores alineados sobre la palma, a hacerlo sobre la línea imaginaria que une los nudillos, trasladada sobre la palma. De esta forma se consigue que cada servomotor de la palma (encargados de realizar los movimientos de abducción/aducción de cada dedo) esté a la misma distancia de la articulación MP sobre la que realiza el movimiento. Esta mejora, facilita que todas las varillas que trasladan los movimientos a las articulaciones tengan el mismo tamaño.
- Los dedos introducidos en los diagramas evolutivos, respetan los tamaños reales creados tanto en longitud como en grosor. Introduciendo estos diagramas de los dedos, se han podido establecer las distintas separaciones entre ellos y así verificar el movimiento de abducción/aducción de cada dedo.

C

Construcción de la mano mecánica

Este anexo presenta, de forma más detallada que en la sección 4.5, el proceso de construcción de la mano mecánica. Durante la etapa de construcción, hay que elegir el material sobre el que se realizará el proyecto, preparar los elementos actuadores, dar forma a todas las piezas y ensamblar todo el conjunto.

C.1. Elección de los materiales

Puesto que uno de los propósitos de este proyecto es el de desarrollar la mano mecánica con el menor coste posible, existen algunos factores importantes a la hora de elegir el material utilizado. Según se puede ver en la Tabla 4.1, los servomotores utilizados tienen una fuerza limitada, por lo que la mano tiene que estar compuesta por un material liviano a la vez que resistente. La opción utilizada para el prototipo, ha sido hacer las piezas sobre planchas de PCB, un material compuesto de fibra de vidrio con una capa de cobre en una o ambas de sus caras, utilizado para la creación de circuitos impresos. Este material, cumple los requisitos deseados, pues es bastante resistente a la vez que ligero, pero cuesta alrededor de 70 €/m^2 . Sin embargo, para la realización del desarrollo final, se quiso utilizar otro material más barato que el PCB. Tras realizar un análisis del mercado de plásticos, se decidió probar con poliestireno de 2 mm de grosor, de color blanco, y con un coste de unos 10 €/m^2 . El problema surgió a la hora de crear las piezas de los dedos sobre este material, pues el plástico no aguanta las altas temperaturas generadas al ser cortado con la fresadora utilizada y se funde, por lo que no fue válido para realizar las piezas de la mano mecánica. Tras el experimento con nuevos materiales plásticos,

se ha decidido utilizar para la construcción de la mano completa el material empleado en el prototipo, esto es, la fibra de vidrio en formato PCB.

C.2. Preparación de los servomotores

Para poder realizar mecánicamente cualquier solución que implique que los servomotores a utilizar actúen como una articulación en sí misma, hay que crear puntos de anclaje de las piezas sobre ellos. El servomotor consta de un eje rotatorio en un extremo, sin embargo, en el extremo contrario hay que crear un segundo eje pasivo, que complete un eje transversal total y proporcione un segundo punto de apoyo a las piezas.

Para realizar este segundo eje, hay que hacer un agujero en el encapsulado del servomotor, exactamente en la posición opuesta al eje real, y colocar un pasador. Como este proceso hay que hacerlo en un mínimo de 11 servomotores para la mano mecánica, se ha creado una pieza auxiliar para marcar rápidamente el punto exacto del encapsulado donde realizar el taladro y guiarlo. En la Figura C.1, puede observarse el servomotor desmontado con el pasador montado.

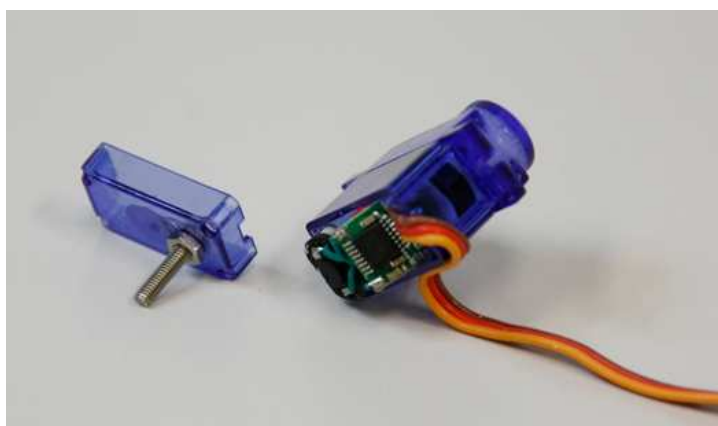


Figura C.1: Detalle del segundo eje del servomotor

C.3. Fresado de las piezas

Con los diagramas bidimensionales creados en 4.4.3, se ha pasado a construir las piezas sobre la fibra de vidrio a utilizar descrita en la sección C.1. Para ello, se ha utilizado una máquina fresadora disponible, diseñada para realizar todas las fases de la creación de un circuito impreso, como taladros, pistas, serigrafía, corte final de la placa, etc. Cada archivo de piezas creado con herramientas CAD, ha sido dividido para poder pasar la información a la máquina fresadora según los tipos de fresado necesarios (corte interno, corte externo o taladro), de esta forma se han podido crear todos los cortes y taladros de las piezas. En la Figura C.2(a), se puede ver una de las planchas de fibra de vidrio con piezas correspondientes a los dedos después de realizar la fase de fresado.



(a) Plancha de PCB con las piezas fresadas

(b) Piezas listas para el montaje

Figura C.2: Fabricación de las piezas de la mano mecánica

El siguiente paso una vez fresadas las piezas, es sacarlas de la plancha, lavarlas y limarlas para eliminar las venas de sujeción y posibles impurezas. En la Figura C.2(b), se pueden ver algunas piezas de los dedos preparadas para el montaje.

C.4. Soporte de la mano

La mano mecánica construida aún no se ensamblará en ningún brazo mecánico. Por este motivo, se ha diseñado y construido un soporte que la mantenga en una posición donde puedan realizarse todas las pruebas de control necesarias. Dicho soporte está construido con el poliestireno blanco nombrado en la sección C.1, un material ligero, resistente y relativamente fácil de cortar a mano para piezas sencillas. Para realizar el soporte se ha seguido el mismo proceso que con la mano. Primero se ha creado un modelo en 3D para obtener las formas de las piezas. Tras esto se ha creado un esquema completo de las piezas con herramientas CAD, se han recortado y se han ensamblado. El modelo 3D creado se puede observar en la Figura C.3. El soporte puede observarse sosteniendo la mano en la Figura 4.14.

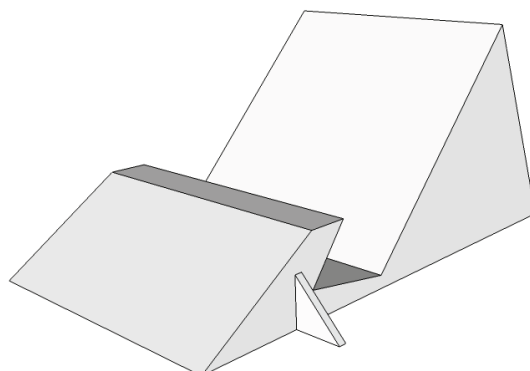


Figura C.3: Modelo 3D del soporte de la mano

C.5. Ensamblaje del conjunto

Teniendo todas las piezas y mecánica listas, se ha procedido al montaje del conjunto. En la Figura C.4, se muestra una esquema general realizado en Autocad del ensamblaje de todas las piezas de un dedo, que junto con los detalles técnicos y de montaje que se exponen a continuación, ayudará a entender el proceso.

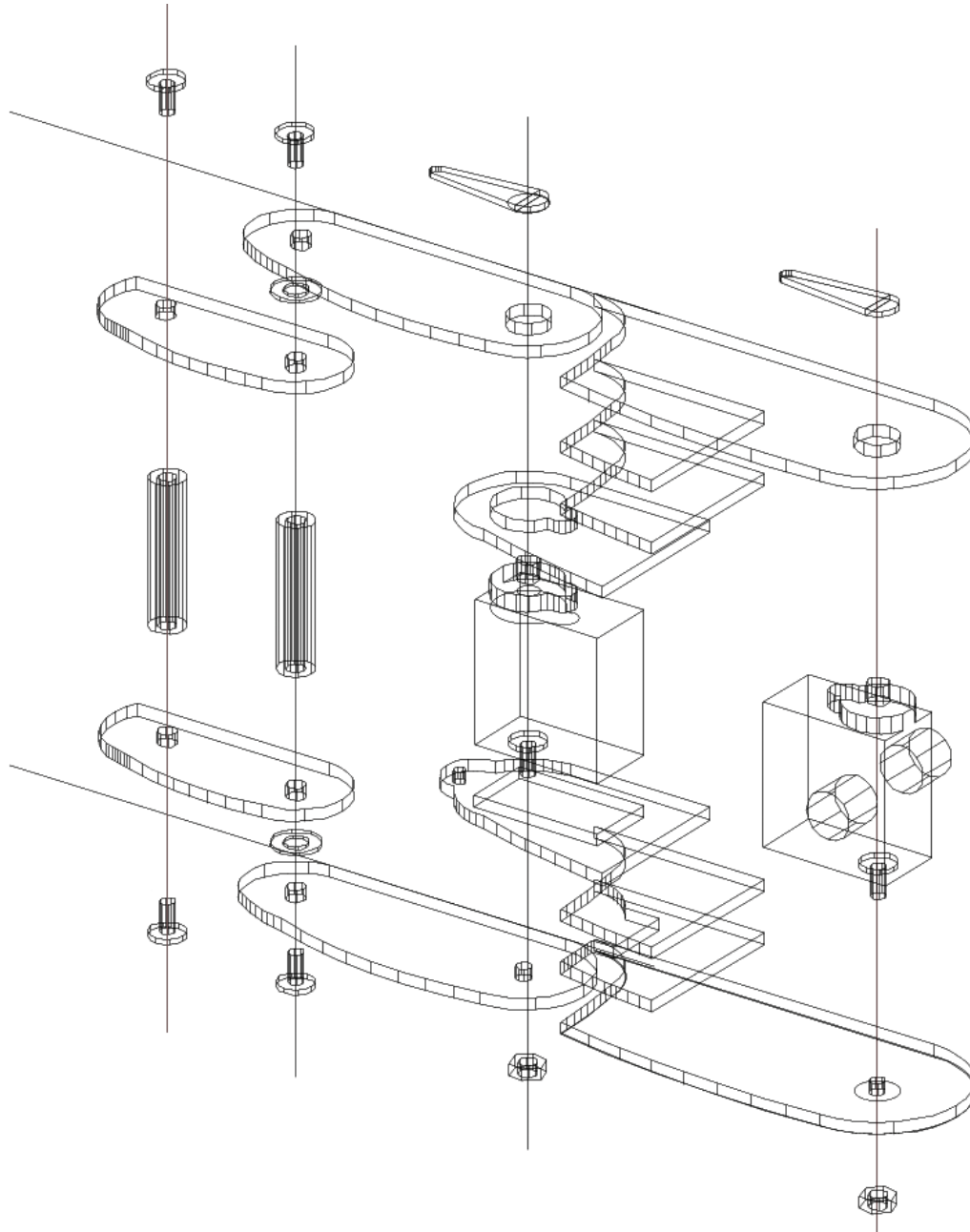
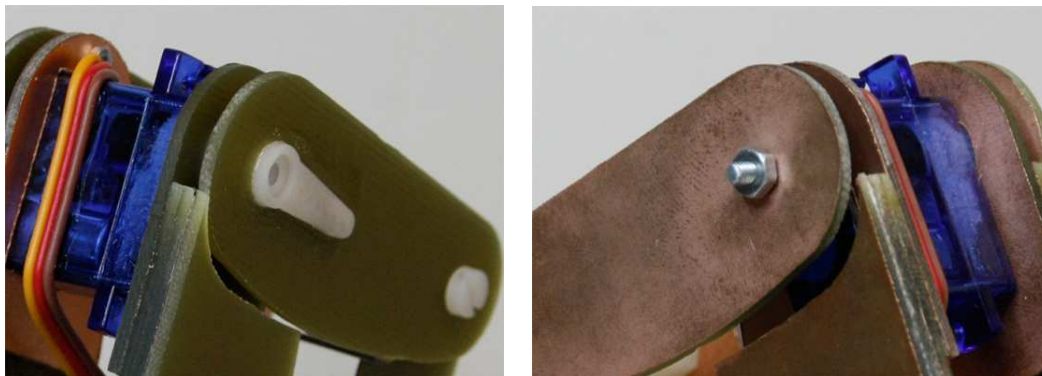


Figura C.4: Diseño en 3D del montaje de un dedo de la mano mecánica

- Cada dedo consta de 12 piezas de fibra de vidrio, que sujetan todos los servomotores y mecanismos.
- Los servomotores de cada articulación, se unen a las piezas de la falange siguiente por

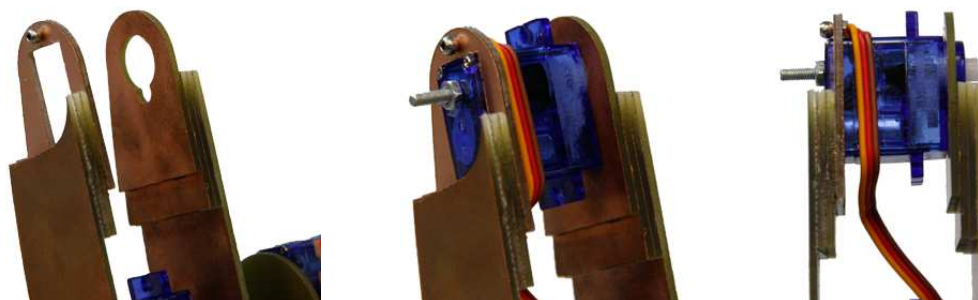
presión de las aspás plásticas en los rotores y mediante tuercas a través de los segundos ejes creados, como se observa en la Figura C.5.



(a) Detalle de la sujeción de los servomotores por el lado del rotor activo (b) Detalle de la sujeción de los servomotores por el lado del eje pasivo creado

Figura C.5: Aplicación del movimiento de los servomotores a las piezas

- El servomotor de la articulación PIP, se une a la falange proximal también por presión, pero en este caso a través de las piezas fresadas a medida del encapsulado, como se puede observar en las Figuras C.6(a) y C.6(b).
- Entre el final de la falange proximal y las piezas que sujetan el servomotor de la articulación PIP, se adhieren dos piezas que proporcionan el grosor necesario a la articulación PIP para sostener el servomotor. Éstas pueden observarse en la Figura C.6(c).



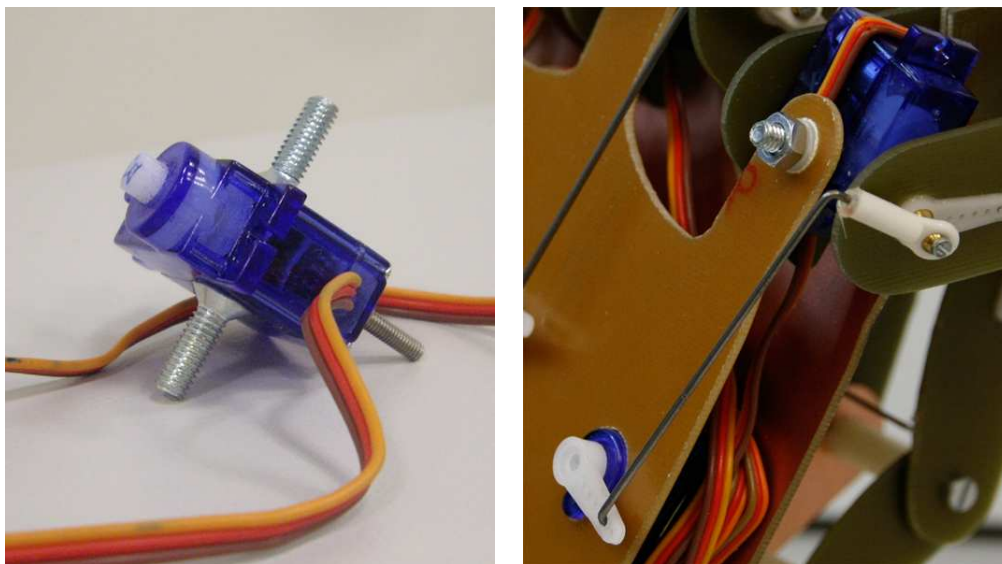
(a) Piezas para sujeción de los servomotores por presión (b) Servomotor sujeto por presión en las articulaciones PIP (c) Detalle del grosor de la articulación PIP

Figura C.6: Sujeción de los servomotores en la articulación PIP

- Para poder unir las piezas laterales de la falange distal, se han utilizado separadores de 2,5 cm, con tornillos de métrica 3.
- En la falange media, se ha añadido una varilla de acero, que actúa como tope de la falange distal, impidiendo que gire más de 90°.
- Los dedos se unen a la palma a través de un eje artificial creado en los servomotores de

la articulación MP, que actúa de eje de movimiento para la abducción/aducción. El eje transversal se puede observar en la Figura C.7(a).

- Para comunicar el movimiento de abducción/aducción al dedo desde el servomotor en la palma, se utiliza una varilla que se ancla al dedo en su lateral mediante una articulación de rótula de acero, como puede observarse en la Figura C.7(b)



(a) Eje transversal creado en los servomotores para sujeción a la palma

(b) Anclaje de las varillas que proporciona la abducción/aducción a los dedos

Figura C.7: Detalles mecánicos para el movimiento de abducción/aducción

Tras realizar el montaje de los dedos, se procede al de la palma de la mano. La unión de los dedos con las piezas de la palma, se realiza a través del eje transversal creado sobre los servomotores de la articulación MP, mostrado en la Figura C.7(a). Los actuadores que proporcionan el movimiento de abducción/aducción, están encajados a presión en las piezas de la palma, y a su vez sirven de soporte para éstas, como se explicó en el apartado 4.4.4. En la Figura C.8 se puede observar el interior de la palma de la mano mecánica construida, en la que se aprecian los servomotores que generan el movimiento de abducción/aducción de los dedos, el que genera la rotación del dedo pulgar, y la tarjeta controladora de la mano con todas las conexiones.

El resultado final del conjunto, se muestra en la Figura C.9, donde puede observarse la mano construida al completo.

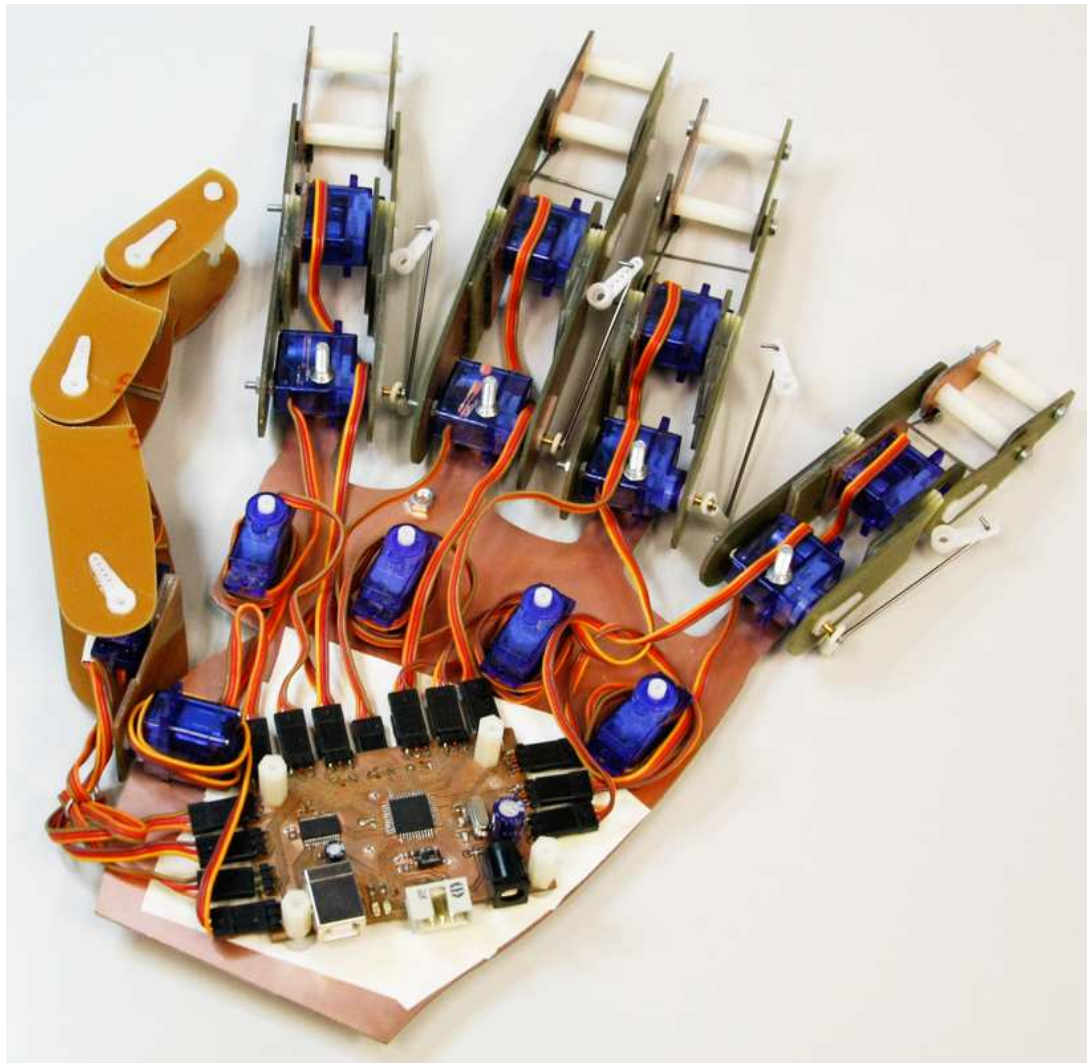


Figura C.8: Interior de la palma de la mano mecánica



Figura C.9: Mano mecánica completa



Control de la mano mecánica desde el terminal de comunicaciones serie del PC

El control básico de la mano robótica, se realiza enviando instrucciones desde un terminal serie del ordenador a la tarjeta controladora de la mano. La tarjeta, una vez recibidas las secuencias de caracteres programadas para cada instrucción, interpretará y ejecutará las ordenes, devolviendo feedback al ordenador.

Según los caracteres iniciales que envía el ordenador a la tarjeta controladora de servomotores, se han programado tres instrucciones para el control de la mano mecánica:

- *Caracter «E»*: Instrucción escribir. Su finalidad es escribir en la tabla interna de «posición final» creada en el microcontrolador, la información referente a la posición en la que se quiere situar un servomotor. La estructura de esta instrucción es:

«E» + «NN» + «PPPP» ,

Tras recibir el caracter «E», el programa del microcontrolador espera la recepción de dos caracteres ASCII («NN»), que indicarán el número de servo cuya posición se pretende modificar. A continuación, se espera la recepción de cuatro caracteres ASCII («PPPP»), que indicarán el tiempo en microsegundos del ancho de pulso PWM para posicionar el servomotor. Con esta información, se rellena en la tabla la nueva posición referente al número de servo indicado, se calcula la diferencia entre la posición actual y la posición final que se quiere alcanzar, y se recalcula el paso necesario para alcanzar dicha posición según el número de saltos que indica la variable «velocidad».

- *Caracter «M»*: Instrucción mover. Una vez rellena las posiciones de los servomotores que desean moverse, se envía el caracter «M». Al recibirlo, la tarjeta controladora procede a actualizar la tabla de «posición actual» sumando a cada servo su paso calculado, lo que modifica el ancho de pulso actual que recibe cada servomotor, y por tanto los reposiciona.
- *Caracter «V»*: Instrucción de modificar velocidad. Tras recibir este caracter, se esperan dos caracteres ASCII que indicarán el nuevo valor de la variable «velocidad» (del 1 al 99). Este valor será el número de pasos intermedios que dará cada servomotor para llegar a su posición final a la hora de moverse.



Control de la mano mecánica desde la aplicación Java del PC

Para facilitar y centralizar el control de los 16 servomotores de la mano, se ha creado la aplicación JAVA que puede observarse en la Figura E.1.

En la parte principal de la aplicación se presentan 16 sliders, cada uno referente a una articulación de cada dedo, que controlan los 16 actuadores utilizados. Al mover cada slider se genera y envía a la tarjeta controladora de la mano mecánica, la instrucción «escribir» descrita en la sección 5.3.1, con el número de servomotor que representa la articulación del slides movido, y el valor de la nueva posición adquirida. Todos los sliders están calibrados de forma que el valor máximo y mínimo que pueden alcanzar son los valores de ancho de pulso máximo y mínimo que puede realizar la articulación real a la que representan, definido en la Tabla 2.1.

En la parte superior izquierda de la aplicación, se encuentra la pestaña de conexión, en la que se debe indicar el puerto COM a utilizar en el ordenador para las comunicaciones serie con la mano mecánica. Este puerto lo configura automáticamente el chip FTDI de la tarjeta controladora al conectarla por primera vez, y puede consultarse dentro del administrador de dispositivos de Windows. Una vez establecido el puerto, se pulsa el botón de «Conectar», y la consola de la parte inferior de la aplicación, nos confirmará si se ha realizado la conexión correctamente.

El slider que se observa a la izquierda de la aplicación debajo de los botones para conectar y desconectar, es el que controla la variable «velocidad» de los movimientos. Cabe recordar que la

velocidad aplicada a los movimientos, es relativa a la distancia a mover, pues la variable ajusta el valor de la división aplicada a la hora de obtener el paso de cada servomotor (como se expuso en la sección 5.2.3). Cada vez que se mueve dicho slider, la aplicación envía a la tarjeta controladora la instrucción «modificar velocidad», descrita en la sección 5.3.1. La posición mínima se da a la izquierda del slider y asigna a la variable velocidad el valor 99. La posición máxima se da a la derecha del slider y asigna el valor 01 a la variable velocidad (velocidad máxima de los servomotores, que realiza el movimiento de una vez sin pasos intermedios).

El botón «Move», que se encuentra a la izquierda de la pantalla debajo del slider de velocidad, es el encargado de mandar la instrucción de «mover», enviando el caracter M a la tarjeta controladora. Por tanto, al pulsarlo se moverán todos los servomotores a la posición que indiquen sus sliders.

La pestaña desplegable que se observa en la zona izquierda de la aplicación, son posiciones estándares preconfiguradas de la mano. Si se selecciona cualquiera de las opciones de dicha pestaña, los sliders de la aplicación se mueven a las posiciones necesarias para representar la configuración indicada. Con el movimiento de cada slider, se envía la instrucción «escribir», cargando en la tarjeta controladora las nuevas posiciones deseadas para representar la configuración. La actualización de todos los sliders y el envío de las instrucciones al seleccionar una posición preconfigurada, se hace escalonadamente en un intervalo de tiempo, asegurando así el procesamiento completo de cada instrucción en el microcontrolador.

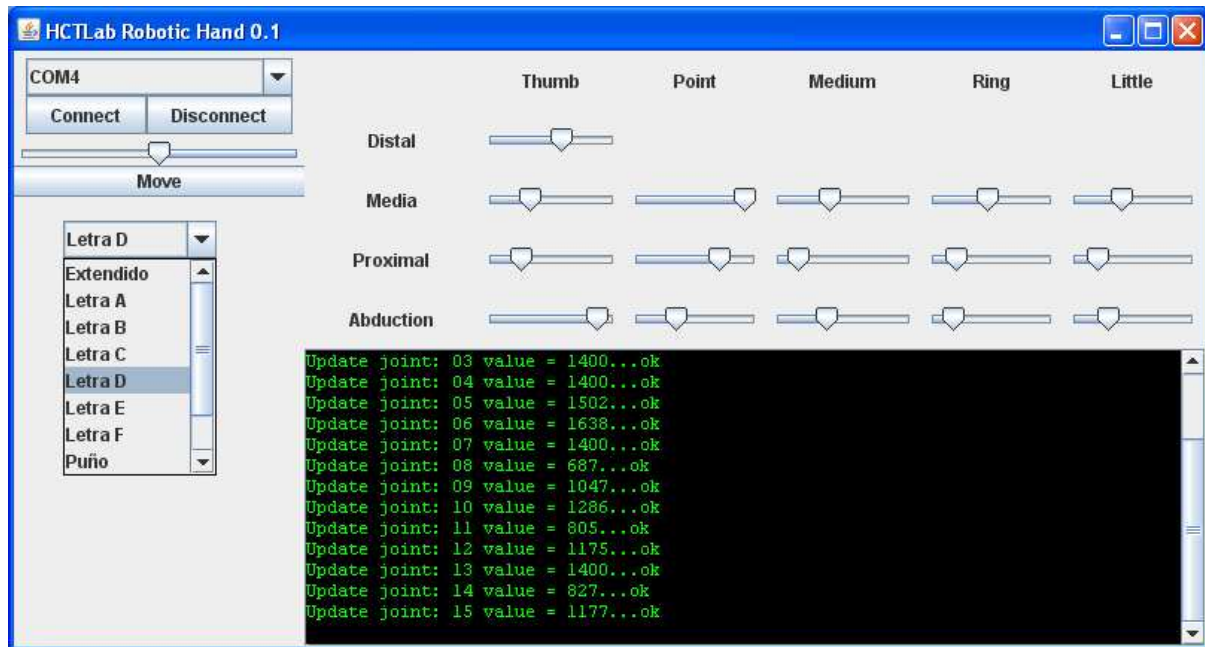


Figura E.1: Aplicación utilizada para el control de la mano mecánica



Publicación

En este anexo se adjunta la publicación realizada en las actas del XI Congreso Internacional de Interacción Persona-Ordenador, con ISBN 978-84-92812-52-3. El congreso tuvo lugar entre los días 7 y 10 de Septiembre de 2010 en Valencia (España).

Diseño de una mano mecánica para deletreo dactilológico en LSE

Victor Vaquero Alberto Sanchez
Guillermo González de Rivera Fernando López-Colino

Departamento de Ingeniería Informática

Escuela Politécnica Superior

Universidad Autónoma de Madrid

28049 Madrid

victor.vaquero@hctlab.com

alberto.sanchezgonzalez@uam.es

guillermo.gdrivera@uam.es

fj.lopez@uam.es

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño y construcción de una mano robótica cuyo objetivo será representar las distintas configuraciones de las lenguas de signos (LS). Se muestra el diseño realizado de una novedosa estructura antropomórfica con la capacidad de generar una amplia variedad de movimientos precisos. También se mostrará el propósito de este desarrollo dentro del contexto general de un proyecto mucho más amplio, que será la construcción de un androide intérprete de LS.

1. Introducción

El trabajo actual se centra en el diseño y construcción de una mano robótica. Las lenguas de signos (LS) se definen en base a distintos Parámetros Fonéticos [2]. Este proyecto se centrará en uno de ellos: la *Configuración*, que define la forma de la mano en la representación del signo. Por otro lado, ésta implementación se enmarca dentro de un proyecto mucho más amplio, que persigue como objetivo final la construcción de un androide mecánico con la capacidad de representar LS.

2. Estado del arte

Actualmente existen varias alternativas a estudio a la hora de contruir una mano mecáni-

ca antropomórfica. En un principio, habrá que tener en cuenta la finalidad que se le dará (manipulación física, gesticulación...), lo que condicionará las distintas decisiones a la hora de realizar el diseño y la elección de los elementos actuadores (que proporcionen los movimientos a las distintas partes de la estructura) así como los materiales.

Una de las aproximaciones posibles, es el desarrollo puramente mecánico a través de motores y engranajes capaces de transmitir los movimientos deseados a las articulaciones (mano NAIST [3], mano MA-I [5]). En dichos ejemplos se obtiene para cada dedo tres grados de libertad (DOF) considerados como ejes de aplicación de movimientos. Cabe destacar que en ambos ejemplos los movimientos de abducción/aducción y flexión/extensión de la articulación metacarpofalángica (MP) se realizan mediante dos motores en giro simultáneo y una serie de engranajes diferenciales consiguiendo los dos ejes de movimiento de forma simultánea en un mismo punto. Además, se realiza una simplificación que atiende al estudio de la anatomía humana, haciendo que el movimiento de la articulación distal (DIP) sea solidario al de la articulación media (PIP).

Otros diseños, como la mano SHADOW [1], incluyen actuadores neumáticos que realizan una contracción al inflarse, provocando sobre la estructura un movimiento similar al de los músculos humanos. Siguiendo esta línea, tam-

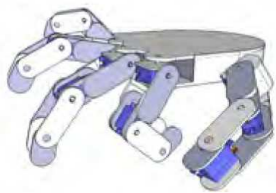


Figura 1: Diseño infográfico de la mano mecánica

bién se han desarrollado manos [4] con actuadores de Shape Memory Alloy (SMA) como los alambres de *nitinol*, que tienen la capacidad de contraerse al verse sometidos al paso de corriente eléctrica.

3. Desarrollo realizado

Como se ha expuesto en la sección 2, y dadas las necesidades de precisión, control de posición, y estabilidad de éste desarrollo, en la fase de diseño se ha decidido utilizar servomotores como actuadores, y fibra de vidrio en la estructura. El desarrollo ha de prestar especial atención a la cantidad y calidad de movimientos para imitar los realizados por la mano humana, por tanto, el primer reto ha sido la creación de un modelo en 3 dimensiones con un diseño que proporcione dicha libertad de movimiento (Figura 1). El modelo utiliza tres servomotores para cada dedo: el primero, en la palma, genera los movimientos de abducción y aducción, el segundo, en la base del dedo, proporciona los movimientos de flexión y extensión del dedo completo, y el tercero, en la articulación PIP, genera la flexión y extensión de las articulaciones media y distal de forma simultánea.

Tras esta primera fase, se ha pasado a la construcción de un primer dedo funcional (Figura 2). Para ello, se han diseñado y construido cada una de las piezas con ayuda de un programa CAD y una fresadora.



Figura 2: Prototipo del dedo mecánico

Tras el ensamblaje, se ha implementado el manejo y control de los servomotores, y probado todas las posiciones posibles conociendo las capacidades de movimiento de los dedos humanos. Se han diseñado algoritmos de control sobre las velocidades de movimiento de las articulaciones para conseguir que cada dedo de forma independiente, llegue a la vez a la posición final de la configuración representada.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado el diseño de una mano mecánica con capacidad para representar las configuraciones de las LS. Se ha mostrado la fase actual del desarrollo y situado dentro de un amplio proyecto consistente en la creación de un androide mecánico capaz de representar la LSE.

Referencias

- [1] COMPANY, S. R. *Shadow Dexterous Hand C5 Technical Specification*, May 2008.
- [2] HERRERO BLANCO, A. *Gramática Didáctica de la Lengua de Signos Española (LSE)*, 1 ed. Ediciones SM, 2009.
- [3] JUN UEDA, MASAHIRO KONDO, T. O. The multifingered naist hand system for robot in-hand manipulation. *Mechanism and Machine Theory* (2010), 224–238.
- [4] KYU-JIN CHO, J. R., AND ASADA, H. Sbc hand: A lightweight robotic hand with an sma actuator array implementing c-segmentation. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2007).
- [5] SUÁREZ, R. Mano mecánica ma-i. *XXIV Jornadas de Automática* (10-12 de Septiembre 2003).

Diseño de una mano mecánica para deletreo dactilológico en LSE

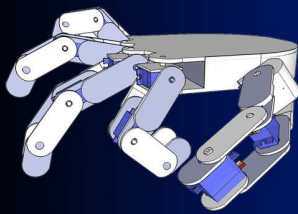
Victor Vaquero, Alberto Sanchez, Guillermo Gonzalez de Rivera y Fernando Lopez-Colino

Introducción

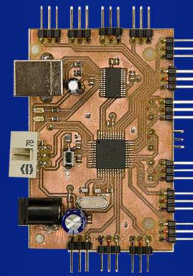
Se presenta el diseño y construcción de una mano mecánica utilizada para representar el diccionario dactilológico de la Lengua de Signos Española (LSE). Este diccionario está formado por distintas configuraciones y orientaciones de la mano, que representan una letra del alfabeto. Este desarrollo se enmarca en un proyecto para la creación de un prototipo humanoide con capacidad de realizar una comunicación completa a través de LSE. La LSE define distintos parámetros fonológicos, entre ellos, la Configuración, que describe la forma de la mano al signar, y que será tratado con este desarrollo.

Diseño

Durante la fase de diseño se han contemplado las restricciones del desarrollo, como pueden ser las restricciones anatómicas humanas, la funcionalidad para la que se lleva a cabo el desarrollo, la minimización del coste de producción, los elementos actuadores, los materiales, etc. Para realizar movimientos precisos, se ha decidido utilizar servomotores, que se sitúan en la palma y los dedos, para mover las articulaciones. Para optimizar el desarrollo, observando la anatomía humana, se ha eliminado el movimiento autónomo de la falange distal, pues va ligado al de la falange media.



Modelo antropomórfico de la mano en 3D para verificar el diseño del conjunto.



Electrónica de control de los servomotores que realizan los movimientos de los dedos, basada en microcontrolador.

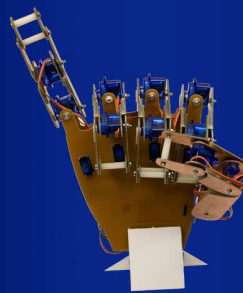


Desarrollo actual en fibra de vicrio del modelo diseñado y validado en 3D.

Electrónica y funcionamiento

El conjunto electrónico está formado por un microcontrolador Atmel ATMEGA162 y un chip FTDI encargado de adaptar la comunicación entre el microcontrolador y el ordenador a través del puerto USB.

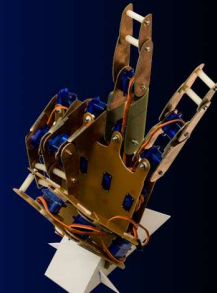
El microcontrolador obtiene la descripción de las configuraciones de una base de datos en el ordenador. Después genera para cada servomotor la señal que lo sitúa en la posición requerida. A través de algoritmos específicos, se multiplexa el control de los 16 servomotores, usando los dos contadores de 16 bits que tiene el microcontrolador.



I



O



U

REFERENCIAS SELECCIONADAS:

- [1] Company, S. R. "Shadow Dexterous Hand C3 Technical Specification", May 2008.
- [2] Herrerero Blanco, A. "Gramática Didáctica de la Lengua de Signos Española (LSE)", 1 ed. Ediciones SM, 2009.
- [3] Jun Ueda, Masahiro Kondo, T. O. "The multifingered naist hand system for robot in-hand manipulation". *Mechanism and Machine Theory* (2010), 224-238.
- [4] Kyu-Jin Cho, J. R., and Asada, H. "Sbc hand: A lightweight robotic hand with an sma actuator array implementing c-segmentation". In *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2007).



Pliego de condiciones

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

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

Condiciones generales.

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.
2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.
3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra

- y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.
4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.
 5. Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.
 6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.
 7. Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.
 8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.
 9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.
 10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.
 11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores

dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.

12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partida alzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.
13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.
14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.
15. La garantía definitiva será del 4
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 Contrataz 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.



Presupuesto

1) Ejecución Material

▪ Compra de ordenador personal (Software incluido)	2.000 €
▪ Alquiler de impresora láser durante 6 meses	260 €
▪ Material de oficina	150 €
▪ Total de ejecución material	2.400 €

2) Gastos generales

▪ sobre Ejecución Material	352 €
----------------------------	-------

3) Beneficio Industrial

▪ sobre Ejecución Material	132 €
----------------------------	-------

4) Honorarios Proyecto

▪ 1200 horas a 15 €/ hora	18000 €
---------------------------	---------

5) Material fungible

▪ Gastos de impresión	280 €
▪ Encuadernación	200 €

6) Subtotal del presupuesto

▪ Subtotal Presupuesto 23.774 €

7) I.V.A. aplicable

▪ 18 % Subtotal Presupuesto 4.280 €

8) Total presupuesto

▪ Total Presupuesto 20.054 €

Madrid, Noviembre 2010

El Ingeniero Jefe de Proyecto

Fdo.: Victor Vaquero Gómez

Ingeniero Superior de Telecomunicación