

TESIS DE MÁSTER

DISEÑO DE UNA MANO ROBÓTICA ACTUADA MEDIANTE SMA

Autor: Florencia Andrioli Bogliani
Director: Álvaro Villoslada Peciña

MÁSTER OFICIAL EN
ROBÓTICA Y AUTOMATIZACIÓN

Leganés, Madrid
SEPTIEMBRE 2016



Universidad
Carlos III de Madrid

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA

TESIS DE MASTER

DISEÑO DE UNA MANO ROBÓTICA ACTUADA MEDIANTE SMA

Autor: Florencia Andrioli Bogliani

Tutor: Prof. Luis Moreno Lorente

Director: Álvaro Villoslada Peciña

MASTER OFICIAL EN
ROBÓTICA Y AUTOMATIZACIÓN

LEGANÉS, MADRID

SEPTIEMBRE - 2016

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
MASTER OFICIAL EN ROBÓTICA Y AUTOMATIZACIÓN

El tribunal aprueba la tesis de Máster titulada “**DISEÑO DE UNA MANO ROBÓTICA ACTUADA MEDIANTE SMA**” realizado por **Florencia Andrioli Bogliani**.

Fecha: Septiembre 2016

Tribunal:

María Dolores Blanco Rojas

Fernando Martín Monar

Luis Santiago Garrido Bullon

A los que nunca dudaron de que podía superar mis límites.

A los que saben lo que cuesta.

Contenidos Generales

1	Contenidos Generales	IX
2	Índice de Figuras	XII
3	Índice de Tablas	XV
4	Resumen	XVII
5	Abstract	XIX
1	Introducción	21
	1.1 <i>Motivación</i>	21
	1.2 <i>Objetivo</i>	23
2	Estado del arte	25
	2.1 <i>Manos robóticas</i>	25
	2.2 <i>Shape Memory Alloys</i>	34
3	Estudio de la mano	40
	3.1 <i>Anatomía</i>	40
	3.2 <i>Movimiento</i>	42
	3.3 <i>Biométrica</i>	43
4	Diseño de la mano	47
	4.1 <i>Visión general</i>	47
	4.2 <i>Conjunto dedo</i>	52
	4.3 <i>Conjunto Pulgar</i>	57
	4.4 <i>Palma</i>	61
	4.5 <i>Actuadores</i>	64
	4.6 <i>Sensores</i>	66
	4.7 <i>Conjunto electrónico</i>	67
	4.8 <i>Recursos</i>	70

5	Funcionamiento de la mano	74
	<i>5.1 Sistema de control</i>	<i>74</i>
	<i>5.2 Ensayo de funcionamiento</i>	<i>80</i>
6	Conclusiones y trabajos futuros	85
	<i>Conclusiones y trabajos futuros</i>	<i>85</i>
7	Referencias	87
	<i>Referencias</i>	<i>87</i>
8	Anexos	91
	<i>8.1 Tiempo de desarrollo</i>	<i>91</i>
	<i>8.2 Presupuesto</i>	<i>93</i>
	<i>8.3 Hojas de características</i>	<i>95</i>

Índice de Figuras

Figure 1 - DLH/HIT Hand II	26
Figure 2 – Mano Shadow	26
Figure 3 – Mano Gifu	27
Figure 4 – Mano Robonaut	27
Figure 5 - Mano SMD	28
Figure 6 - Mano Inmoov	28
Figure 7 - Mano Dextra	29
Figure 8 - Mano Dextrus	29
Figure 9 - Ada Hand	30
Figure 10 - Prótesis I-Limb	31
Figure 11 - Prótesis Bebionic	32
Figure 12 - Mano actuada mediante SMA	32
Figure 13 - SMA compactado en un sistema de poleas	33
Figure 14 - Actuadores formados por un grupo de SMA	33
Figure 15 - Transformación entre austenita y martensita inducida por cambio de temperatura	35
Figure 16 - Esquema tensión, deformación y temperatura	36
Figure 17 - Proceso de transformación de los SMA	36
Figure 18 - BionicOpter	39
Figure 19 - Estructura ósea de la mano	40
Figure 20 - Centro virtual de rotación de las falanges	41
Figure 21 - Músculos flexores y extensores de la mano	41
Figure 22 - Sección del perfil de la mano	42
Figure 23 - Agarres básicos	42
Figure 24 - Vista frontal	48
Figure 25 - Vistas frontal, posterior y lateral del diseño	49
Figure 26 - Conjunto mano, filamentos y electrónica	49
Figure 27 – Puntos de actuación de los SMA	50
Figure 28 – Clips	50
Figure 29 - Conjunto de piezas impresas que forman la mano	51
Figure 30 - Modelo 3D Dedo	52
Figure 31 - Vistas frontal y lateral dimensionadas	52
Figure 32 – Anclaje de hilos y elásticos de la flexión del dedo	53
Figure 33 - Flexión proporcional del dedo	54
Figure 34 - Potenciómetro 3382	55
Figure 35 - Detalle unión F4 - Palma	55
Figure 36 – Anclaje de hilos de la aducción de los dedos	56
Figure 37 - Aducción de los dedos	56
Figure 38 - Mano con pulgar opuesto	57
Figure 39 - Dimensiones pulgar	57
Figure 40 – Anclaje de hilos y elásticos de la flexión del pulgar	58
Figure 41 - Posición del hilo de flexión al realizarse la abducción del pulgar	59

Figure 42 - Anclaje de hilos y elásticos de la abducción del pulgar	60
Figure 43 - Diseño 3D del conjunto palma	61
Figure 44 - Pieza principal de la palma	61
Figure 45- Pieza soporte de los dedos	61
Figure 46 - Pieza acople actuadores	62
Figure 47 - Cara interna de la tapa	62
Figure 48 - Mano con y sin tapa	63
Figure 49 - Detalle de los acoples hilo - filamento SMA en el interior de la palma	63
Figure 50 - Cable Bowden	65
Figure 51 - Actuadores acoplados a la mano	66
Figure 52 - Potenciómetro 3382	66
Figure 53 - Potenciómetro lineal PTA 2043	67
Figure 54 - Controlador STM32F4 Discovery	68
Figure 55 - Electrónica del circuito de conmutación	68
Figure 56 - Circuito acondicionador	69
Figure 57 - Esquema del circuito acondicionador	69
Figure 58 - Interfaz Blender	70
Figure 59 - Prusa I3	71
Figure 60 - Interfaz RepetierHost	72
Figure 61 - Interfaz Fritzing	73
Figure 62 - Modelo de adquisición de datos de los sensores	75
Figure 63 - Modelo controlador bilineal	76
Figure 64 - Modelo de comunicaciones USB	77
Figure 65 - Modelo "Host" y barra deslizante de KP	78
Figure 66 - Respuesta del dedo índice ante una señal de referencia escalonada	81
Figure 67 - Respuesta del dedo índice ante una señal de referencia sinusoidal	81
Figure 68 - Respuesta del dedo índice ante una señal de referencia escalonada incremental	81
Figure 69 - Mano sujetando una tarjeta	83
Figure 70 - Mano sujetando bolígrafo	83
Figure 71 - Mano sujetando pelota de tenis	83
Figure 72 - Mano sujetando pelota de ping pong	83
Figure 73 - Mano sujetando botella de plástico	84

Índice de Tablas

Table 1 - Dimensiones estándar mujer (cm)	43
Table 2 - Dimensiones estándar hombre (cm)	44
Table 3 - Centro de masa (cm)	44
Table 4 - Momento de inercia (<i>g. cm² x 10³</i>)	45
Table 5 - Fuerzas brazo, mano, dedos y pulgar (N)	46
Table 6 - Ganancias del controlador BPID	79
Table 7 - Diagrama de Gantt	92
Table 8 - Material de fabricación	93
Table 9 - Material para actuadores y sistema de control	93
Table 10 - Coste herramientas	94
Table 11 - Coste recursos humanos	94
Table 12 - Coste total	94

Resumen

Este proyecto busca diseñar y crear una mano robótica versátil, *open source* y de bajo coste, que permita investigar la viabilidad de los materiales *Shape Memory Alloys* (SMA) como actuadores. Se describe el diseño completo de un prototipo de mano robótica antropomórfica que emplea actuadores basados en filamentos de SMA para efectuar la flexión y aducción los dedos, y la flexión y abducción el pulgar. Se hace uso de la tecnología de impresión 3D, basada en la técnica FDM (*fused deposition modeling*), para crear de forma rápida y económica el prototipo diseñado, en conjunto con materiales de fácil adquisición.

El diseño final se integra con un sistema de actuadores basado en filamentos de SMA y un sistema de control RCP (*Rapid Control Prototyping*). Finalmente se comprueba el funcionamiento del conjunto y se analizan sus posibilidades.

Abstract

This project aims to design and create a versatile, open source and low cost robotic hand to investigate the viability of Shape Memory Alloys (SMA) as actuators. The complete design of an anthropomorphic robotic hand is described. This hand makes use of SMA filament based actuators to effectuate the flexion and adduction of the fingers, and the flexion and abduction of the thumb. 3D printing technology based on FDM (fused deposition modelling) is used to create the designed prototype in less time and at a lower price, in addition to easy to acquire materials.

The final design is integrated with an SMA filament based actuators and a RCP (Rapid Control Prototyping) control system. Finally, the whole system is tested and its possibilities discussed.





Capítulo 1

Introducción

El diseño de una mano robótica pretende recrear la herramienta más compleja y versátil presente en la naturaleza. Las manos sirven para sentir y manipular los elementos del entorno, tanto el natural como el artificial. También cumplen un papel fundamental en la comunicación e interacción entre personas.

Una mano robótica ideal cumpliría el objetivo de ser un actuador universal, capaz de adaptarse al trabajo, objeto o herramienta necesaria. Un único diseño que permitiese realizar infinidad de operaciones y tareas. La complejidad y dificultad del diseño sigue siendo un desafío para la ingeniería.

1.1 Motivación

El diseño de la mano presentada en el este documento tiene como objetivo explorar la viabilidad de los filamentos de *Shape Memory Alloys* (SMA) como actuadores de manos robóticas. Se busca desarrollar e implementar una mano artificial imprimible, fácil de

montar, de bajo coste y con un diseño optimizado para integrar el sistema de filamentos de SMA.

Los filamentos de SMA están formados por una aleación de metales, en este caso de níquel y titanio. Dicha aleación se trabaja mecánicamente para obtener una estructura cristalina estable a temperatura ambiente que al calentarse recupera la estructura original. En este caso la estructura original es más compacta, por lo que el filamento disminuye su longitud al recordar su forma original. Los SMA son ligeros, compactos y económicos, por lo que son idóneos para utilizarlos como tendones artificiales.

En una investigación previa, A. Villoslada et al. [1] implementaron unos actuadores basados en filamentos de SMA en una mano impresa de diseño libre (*open source*) llamada Inmoov [2]. A pesar del éxito obtenido en la implementación de SMA como actuadores de manos, se encontraron numerosos problemas debido a que la mano no estaba diseñada para las particularidades de los SMA.

Un problema fue la falta de sensores integrados en la mano, los cuales son indispensables para el correcto control y alimentación de los SMA. Fue necesario colocarlos de forma externa e inestable. Otro problema fue el mecanismo de extensión, diseñado originalmente para ser actuado con el mismo motor, por lo que se tuvo que adaptar para incluir una extensión pasiva.

El principal problema se encontró en la interacción de los hilos con el plástico de las piezas. Los filamentos estaban incluidos dentro de los dedos, por lo que al calentarse y contraerse, estos se incrustaban en el plástico. Al enfriarse y extenderse el filamento, el plástico se solidificaba y la fuerza necesaria para extraerlos forzaba los hilos hasta romperlos.

Esta experiencia llevó al planteamiento de una nueva mano diseñada específicamente para un sistema de actuación basado en SMA, pensada para que evite los problemas anteriormente mencionados y que, además, sea de libre distribución, con el objetivo de que ayude a otros investigadores a explorar las posibilidades de los SMA como actuadores de manos robóticas y sus múltiples aplicaciones.

1.2 Objetivo

El objetivo de este proyecto es diseñar e implementar una mano robótica antropomórfica adecuada para utilizar SMA como actuadores, de bajo coste, replicable con impresoras 3D, de código abierto y fácil montaje.

La mano se actuará integrando los actuadores y el sistema de control de SMA desarrollados por A. Villoslada et al [1], que utiliza la herramienta Simulink de Matlab para la implementación del firmware que controla el funcionamiento de los filamentos.

Las condiciones que debe cumplir el diseño incluyen, a nivel estético, que tenga una forma y dimensiones similares a las humanas, cuatro dedos y un pulgar oponible. Se minimizará la cantidad de filamentos utilizados a la par que se busca la mayor diversidad de movimientos. Debe tener un diseño simple, fácil de montar y de reparar. Los materiales utilizados deben ser accesibles en la medida de lo posible. Se deberá compartir en código abierto para que pueda ser utilizado por investigadores de todo el mundo.

Para simplificar el mecanismo y reducir el número de filamentos, no se articulará la muñeca y el mecanismo de flexión de cada dedo será subactuado e independiente, pudiendo realizarse con un único filamento por dedo. Se debe minimizar el desplazamiento necesario para mover un dedo, ya que la longitud del filamento SMA será proporcional a dicho desplazamiento.

Para evitar problemas, los dedos y el pulgar incluirán en su interior hilos de nylon que se acoplen a los SMA en la palma y muñeca, para evitar que el calor ponga en peligro la integridad de las piezas. Es absolutamente necesario que, o bien cada actuador, o bien cada elemento actuado, disponga de un sensor que indique el movimiento realizado, para permitir su control.



Capítulo 2

Estado del arte

2.1 Manos robóticas

Las manos son una de las partes del cuerpo más compleja de replicar con la tecnología actual. La diversidad de movimientos que es capaz de realizar, la destreza, la velocidad y la fuerza en relación con su tamaño y peso no son reproducibles completamente en un dispositivo robótico con los recursos disponibles actualmente.

Existen diversas líneas de investigación en este tema que se centran en diferentes características de la mano dependiendo del propósito y los recursos disponibles. Por un lado, existen manos diseñadas para brazos robóticos a modo de herramienta versátil, y se utilizan principalmente en investigación en universidades y centros científicos. Por otra parte, existen prótesis biónicas para personas con manos o brazos amputados que intentan unificar funcionalidad con comodidad y estética. Junto con el auge de las impresoras 3D, han aparecido diversas manos impresas de menor coste a las manos biónicas comerciales, que se centran en la utilidad y funcionalidad.

Se ha realizado un gran avance de la tecnología en manos destinadas a la investigación. Estas manos son diseñadas para utilizarse con brazos robóticos y tienen como prioridad la destreza, utilidad o fuerza. Sirven como una herramienta versátil que puede realizar diferentes tipos de manipulaciones y adaptarse a herramientas diseñadas para humanos. Por otra parte, el peso y las dimensiones quedan únicamente limitados por el presupuesto y las características técnicas, sin que deban ajustarse a ninguna medida estándar e incluso pueden diferir en forma y configuración de una mano humana para adaptarse al objetivo perseguido. Existen dos tipos principales de manos robóticas, las que tienen los actuadores en el antebrazo y las que los tienen integrados en la misma mano.



Figure 1 - DLH/HIT Hand II

Ejemplos de estas manos son la DLR/HIT Hand II [3] que está compuesta por cinco dedos idénticos modulares con tres grados de libertad cada uno y una palma. Se actúa mediante motores planos que están incluidos en los dedos, al igual que los sensores y la



Figure 2 – Mano Shadow

electrónica necesaria para adquirir datos y controlar los motores. La palma se encarga de establecer la comunicación entre los diferentes dedos, gestionar los datos de los sensores, establecer trayectorias y alimentar todo el sistema. La mano pesa 1,5 kg y la fuerza en las yemas de los dedos puede alcanzar los 10 N (ver fig. 1).

La mano Shadow [4] tiene 20 grados de libertad y ha sido diseñada para ofrecer una fuerza y una precisión de movimientos similar a la mano humana. Su diseño imita en forma y tamaño la mano de un hombre y reproduce, en la medida de lo posible, la cinemática y destreza de la mano humana. Existen dos modelos disponibles, uno

actuado mediante motores llamados “Smart Motors” que integran electrónica de control en posición y fuerza, mientras que el otro modelo se actúa mediante músculos artificiales neumáticos llamados “*Air Muscle*” que integran electrónica de control de presión y posición. Ambos actuadores están alojados en el antebrazo y actúan sobre los dedos mediante tendones artificiales. Se ha utilizado para investigar tipos de agarre, manipulación, control neuronal, control de calidad industrial y manipulación de elementos peligrosos (Ver fig. 2).



Figure 3 – Mano Gifu

La mano Gifu [5] tiene 20 articulaciones con 16 grados de libertad en total, accionados mediante servos incluidos en la mano. Además tiene un sensor de tacto distribuido por toda la palma y los dedos, con 859 puntos de contacto (Fig. 3).

Otro caso es la mano desarrollada para el Robonaut de la NASA [6] que ha sido diseñada para ayudar a los astronautas en la estación espacial internacional. Se pretende crear una herramienta multifuncional que se adapte a las herramientas diseñadas para humanos, con lo cual se busca la máxima utilidad con una forma antropomórfica. La mano tiene 12 grados de libertad y 2 grados más en la muñeca. Contiene los motores en el antebrazo y el movimiento se transmite mediante tendones artificiales. Tiene 43 sensores además del sensor de tacto. Se puede ver en la figura 4.

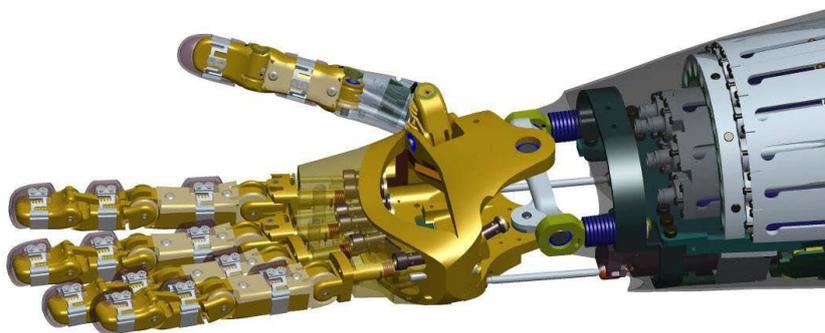


Figure 4 – Mano Robonaut

La mano SMD [7,8] se desvía mucho de una forma puramente antropomórfica en busca de optimizar el agarre. Es una mano personalizable, compuesta por elementos comerciales y de bajo coste, ideada para la investigación. Consiste en cuatro dedos subactuados accionados por un único motor y un mecanismo de adaptabilidad diferencial (ver fig. 5). Se ha fabricado mediante impresión 3D y “*shape deposition manufacturing*” (SMD) donde se incluye en la mano impresa los moldes para rellenarlos con un tipo de caucho líquido. Cuando el caucho está curado, se elimina el molde quedando piezas de caucho incluidas en la estructura de la mano.



Figure 5 - Mano SMD

Dentro de la categoría de manos impresas en 3D, existen varios modelos *open source* que buscan, al igual que este proyecto, ofrecer una mano impresa de bajo coste que se pueda utilizar en investigación o se pueda adaptar como prótesis. La gran ventaja de estas manos es que se pueden modificar y adaptar para ajustarse al objetivo perseguido. Son fáciles de reparar y permiten desarrollar nuevas versiones a partir de ellas.



Figure 6 - Mano Inmoov

Entre dichas manos se encuentra la mano Inmoov [2], desarrollada por el diseñador Gael Langevin y forma parte del desarrollo de un robot completo a tamaño real. Su estructura, mostrada en la fig. 6, permite oponer el pulgar al resto de los dedos y flexionar la palma para los dedos meñique y anular, mejorando el agarre

circular. Dispone de 16 articulaciones y se puede accionar mediante servos controlados por arduino.

La mano Dextra desarrollada por Álvaro Villoslada [9] ofrece un diseño simple y fácilmente replicable, como se observa en la figura 7. Los dedos son modulares, de agarre adaptativo y controlados en posición por encoders magnéticos. Los actuadores lineales están comprimidos dentro de un módulo, formando parte de cada dedo. Su control se puede efectuar tanto desde una interfaz gráfica (GUI) como empleando sensores electromiográficos (EMG).

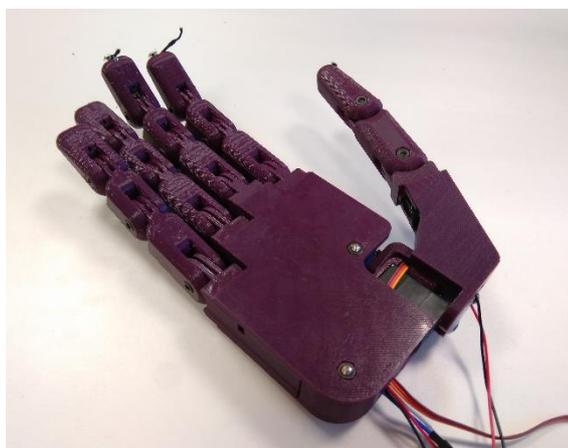


Figure 7 - Mano Dextra

La organización Open Hand Project busca ofrecer prótesis robóticas funcionales a menor coste que las disponibles en el mercado. Su diseño Dextrus [10] (fig. 8) incluye los

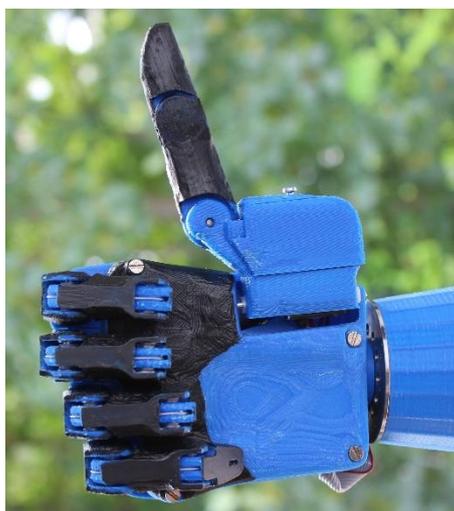


Figure 8 - Mano Dextrus

motores y la electrónica dentro de la palma para poder adaptarse a varios tipos de amputados. Está pensada para conectarse a un conector estándar de prótesis para simplificar el proceso de adaptación al amputado. Cada dedo está actuado por un tendón independiente y se flexionan al contacto con un objeto, amoldándose a su forma. Cada dedo dispone de un motor que se activa mediante sensores EMG, su control es en fuerza y se emplean sensores de tacto para definir si se está haciendo presión sobre un objeto.

El trabajo de Open Hand Project lo continúa Open Bionics y su diseño Ada Hand [11]. Esta mano destaca por su diseño simple, limpio y orgánico. Tiene 5 grados de libertad y alberga dentro de la palma los motores y un circuito de diseño propio. Este circuito está diseñado basado en el microcontrolador ATMEGA2560 y se puede programar desde el entorno de programación de Arduino. Como prótesis, se están desarrollando versiones inspiradas en películas con el objetivo de que las prótesis resulten más atractivas, especialmente en niños. Su diseño limpio y orgánico se puede apreciar en la figura 9.



Figure 9 - Ada Hand

Existen diversas prótesis biónicas que integran en menor o mayor medida los sistemas de actuación y control de las manos robóticas. Cuando se diseña una mano que será utilizada por una persona, aparecen ciertas limitaciones. Al desarrollar una prótesis, se deben tener en cuenta tanto el aspecto estético como el impacto físico y psicológico que tendrá sobre el paciente, lo cual delimita el peso, las dimensiones y la configuración, que no podrán desviarse en exceso de las características antropomórficas. Por coste y utilidad, una prótesis con forma de garfio es mejor frente a una mano artificial, que resulta menos

funcional, menos duradera y con un precio y peso mayor. Sin embargo, se tiende a preferir una prótesis con forma de mano, principalmente por razones estéticas [12].

Se pueden encontrar varias prótesis biónicas muy avanzadas disponibles en el mercado. La mano I-Limb Quantum[13], desarrollada y comercializada por Touch Bionics, ha evolucionado hasta conseguir una mano rápida y fuerte, capaz de realizar movimientos ágiles controlados por las contracciones en los músculos del antebrazo. Como se aprecia en la figura 10, los actuadores están incluidos dentro de la mano y la muñeca. La carga máxima que soporta la mano son 90 kg, la carga máxima que soporta el dedo son 32 kg y tarda 0,8 segundos en cerrar completamente la mano.



Figure 10 - Prótesis I-Limb

Como la diversidad de movimientos que se pueden controlar con señales musculares es limitada, se dispone de otras herramientas complementarias para definir las diferentes posiciones de los dedos. Una aplicación de móvil conectada a la mano permite seleccionar el patrón de agarre que se quiere realizar. Adicionalmente, se dispone de una serie de fichas

programables que al acercarse la mano le indican un patrón de agarre predefinido. Por ejemplo, una ficha colocada sobre un teclado permite que al acercar la mano, esta se coloque automáticamente en posición de escribir, sin necesidad de indicarlo mediante la app. Esto agiliza el uso de la mano para las tareas cotidianas, como usar el móvil, escribir, cocinar, etc. Debido a la importancia de la estética en las prótesis, existen fundas de piel sintética que la recubren y disimulan.

Otro ejemplo de manos comerciales es la mano Bebionic 3 [14], desarrollada por RSL Steeper, tiene 14 patrones de agarre diferentes (ver fig. 11). Soporta 90 kg de carga estática, cada dedo puede soportar 25 kg y tiene una fuerza de agarre máxima de 140,1 N. En cuestión de velocidad, tarda 1 segundo en cerrar la mano. Al igual que la mano I-limb, los actuadores están incluidos en la mano y la muñeca y se acciona mediante impulsos generados por el movimiento de los músculos del antebrazo. El pulgar se debe colocar manualmente en posición oponible o paralela, variando los tipos de agarre que se pueden hacer con él. También dispone de una aplicación para seleccionar el tipo de agarre.



Figure 11 - Prótesis Bebionic

Las manos analizadas previamente están actuadas mediante servomotores o sistemas neumáticos. Sin embargo, algunos diseños también incluyen los SMA como actuadores.

Utilizando este tipo de actuador, Adrianesis [15], realizó el diseño de una mano protésica subactuada con 7 grados de libertad, uno por cada dedo y tres en el pulgar (ver fig. 12) Debido a la necesidad de utilizar largos filamentos de SMA para conseguir el desplazamiento



Figure 12 - Mano actuada mediante SMA

necesario para flexionar completamente los dedos, estos se colocan en el antebrazo compactados en un sistema de poleas, representado en la figura 13, que reduce la longitud del actuador sin perder la capacidad de contracción.



Figure 13 - SMA compactado en un sistema de poleas

En el análisis sobre la viabilidad de los SMA para prótesis llevado a cabo por O'toole et al [15] se plantea el uso de agrupaciones de SMA (ver fig. 14) para cada dedo. La ventaja que presenta este sistema es que la fuerza será proporcional a la cantidad de hilos que se le asignen a cada dedo. En este trabajo se busca dar a cada dedo la fuerza equivalente a la de un dedo humano, por lo cual se deben utilizar un determinado número de hilos para cada dedo.

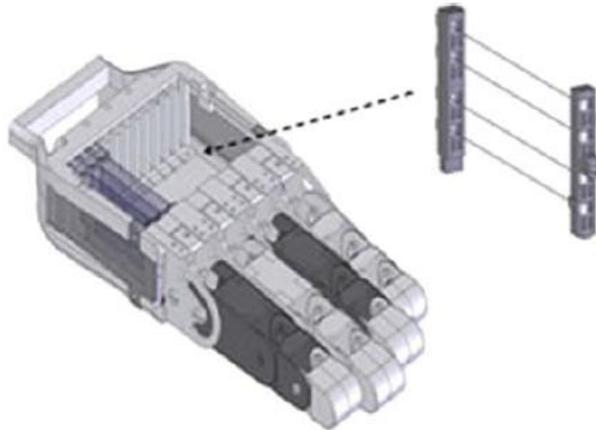


Figure 14 - Actuadores formados por un grupo de SMA

2.2 Shape Memory Alloys

Los materiales que entran en la categoría de *Shape Memory Alloys* (SMA) son una serie de aleaciones de metales que tras ser deformados mecánicamente, pueden recuperar su forma original al calentarse por encima de una temperatura determinada. Esta propiedad, llamada el efecto de memoria de forma, se puede observar en otros materiales, tales como polímeros y cerámicas. El interés que tiene este material para su aplicación en dispositivos robóticos, es la posibilidad de fabricar hilos de SMA que al ser calentados disminuyen su longitud.

La primera observación de este efecto elástico en una aleación la realizó Ölander en una aleación Au-Cd en 1932. En los años siguientes, otros investigadores observaron los mismos efectos incluso en otras aleaciones como Cu-Zn o Indio-Talio, sin embargo, estas investigaciones no despertaron mucho interés en la comunidad científica. En 1965, Buehler y Wiley del "U.S. Naval Ordnance Laboratory (NOL)", desarrollaron una aleación de Níquel y Titanio que patentaron como NiTiNol. Esta aleación presenta mejores características que el resto de aleaciones, tales como una excelente resistencia a la corrosión, una configuración muy estable y buena biocompatibilidad [17]. Esta aleación impulsó el desarrollo de esta tecnología.

El efecto de memoria de forma debe su funcionamiento a una reorganización de la estructura cristalina del material. El material tiene dos estructuras estables, a una temperatura inferior, martensita, y otra a una temperatura superior, austenita. Ambas estructuras tienen la misma composición, pero lo que cambia son sus estructuras cristalográficas [18]. La transformación entre un estado y el otro ocurre en un intervalo de temperaturas relativamente pequeño. Dicha transformación presenta una histéresis que se observa como ΔT en la figura 15.

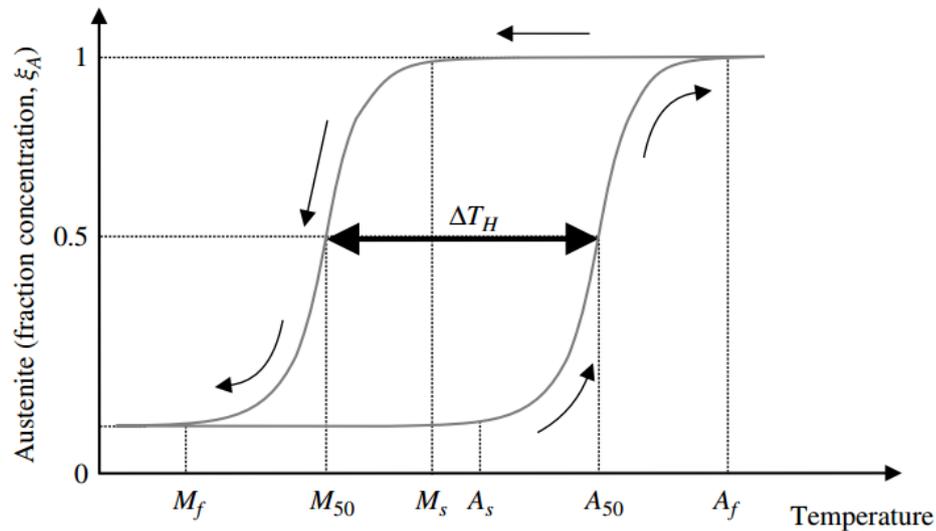


Figure 15 - Transformación entre austenita y martensita inducida por cambio de temperatura

La transformación entre austenita y martensita inducida por el cambio de temperatura está caracterizada por cuatro temperaturas. M_s y M_f son las temperaturas de inicio y fin de la transformación de la martensita, mientras que A_s y A_f son las temperaturas de inicio y fin de la transformación a austenita. La histéresis ΔT se encuentra entre los 10° y 50° dependiendo de la composición del material. Es importante tener en cuenta la histéresis a la hora de elegir el material de SMA adecuado para la aplicación que se le va a dar. Por ejemplo, los actuadores rápidos utilizados en robótica tienen una histéresis pequeña, mientras que una histéresis mayor es útil para mantener una forma predefinida en un rango amplio de temperaturas, como en el caso de uniones de tuberías [19].

En la figura 16 se muestra el esquema de tensión, deformación y temperatura. La memoria de forma se obtiene partiendo de la estructura de austenita, que se deforma mecánicamente aplicando tensión hasta superar el punto crítico donde la estructura cristalina pasa a ser martensita. Al eliminar la tensión, el material mantiene la nueva estructura, pero al aplicar calor se puede recuperar su estructura de austenita original.

No se puede alcanzar la deformación máxima de la martensita si no se aplica tensión, como se ve en la figura 17, donde se observa que al enfriarse sin tensión cambia la

estructura pero no se recupera la longitud original. Esto es el efecto de memoria de forma de un sentido. En algunos materiales, el material también recuerda su forma en la fase martensita con lo que se consigue el cambio de forma sólo variando las temperaturas, lo que se conoce como efecto memoria de forma de dos sentidos [17]. La principal desventaja de esta configuración es la poca fuerza que puede ejercer, prácticamente nula, por lo que se prefiere el uso de dos actuadores antagónicos de memoria en un sentido [20].

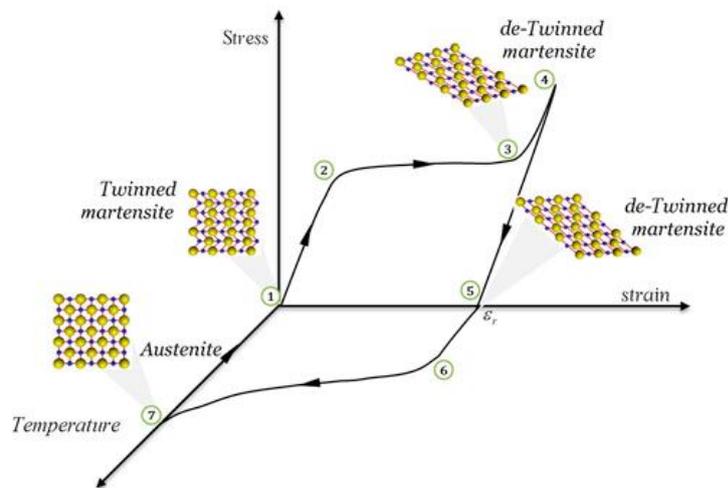


Figure 16 - Esquema tensión, deformación y temperatura

En la transformación de martensita a austenita, el material puede ejercer altas fuerzas de tracción si se le ofrece alguna resistencia externa [18]. Esta fuerza se utiliza como medio de actuación.

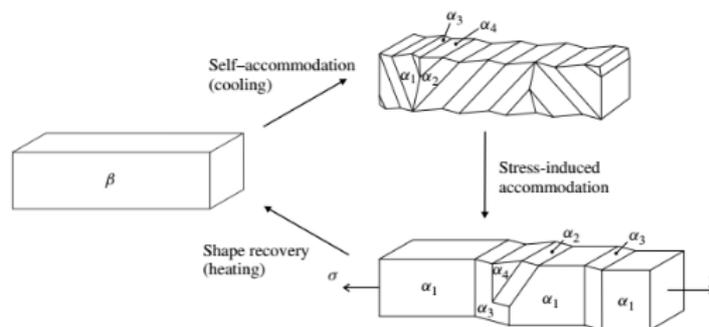


Figure 17 - Proceso de transformación de los SMA

Las propiedades principales de los SMA son la super-elasticidad, o pseudoelasticidad, la termoelasticidad y el efecto de memoria de forma. La primera implica que al deformar el material a una temperatura superior a la de transformación a austenita, este puede recuperar su forma original tras dejar de aplicar la carga. Esta deformación puede ser del 10% o más dependiendo del material. La segunda característica implica que la recuperación depende de las condiciones térmicas.

Las características propias de los SMA permiten su utilización a modo de actuadores. La forma más desarrollada y comercializada es en forma de hilos. Las propiedades del material permiten su uso bajo deformaciones de tensión, flexión y torsión. Sin embargo el uso óptimo se da al someter el material a la tensión, ya que aprovecha al máximo la fuerza que se ejerce al contraerse el material [20].

Esta configuración presenta múltiples ventajas como actuadores frente a los servomotores tradicionales. En primer lugar, tienen un alto ratio entre la potencia y el peso, permitiendo desarrollar dispositivos compactos y potentes. Se pueden accionar de forma sencilla y no requieren una corriente alta para actuar, por lo que es apropiado para usar en aplicaciones que involucran la presencia de humanos. Tienen una vida útil prolongada si se utilizan dentro de unos límites de tensión - deformación [18]. Son completamente silenciosos y no tienen vibraciones, lo cual resulta beneficioso especialmente en prótesis u otras aplicaciones donde el ruido constante pueda ser molesto para el usuario. Además, el material es biocompatible y resistente a la corrosión, por lo que se puede incluir en aplicaciones médicas.

Cuando se trabaja con filamentos, se aprecia una relación prácticamente lineal entre la contracción y la resistencia del hilo [20], lo cual permite su uso como sensores. Mientras el filamento trabaja como actuador se puede obtener una realimentación del movimiento ejercido y controlar la deformación del hilo.

El funcionamiento de los SMA como actuadores se basa en el control térmico de los mismos. Dependiendo de la aplicación, el proceso de calentamiento puede ser pasivo o activo. En las aplicaciones pasivas, el actuador responde a la elevación de temperaturas en el entorno, como es el caso de alarmas de incendio o de válvulas de agua. En las aplicaciones activas, la temperatura se eleva de forma eléctrica o inductiva. El calentamiento inductivo

provoca un calentamiento desigual a lo largo del SMA, que provoca tensiones microestructurales que pueden dañar el material. Por esta razón el método más extendido para calentar el material es el eléctrico, que se sirve del efecto Joule para transformar la corriente eléctrica en calor [20].

Sin embargo, existen ciertas limitaciones en sus capacidades. La principal limitación es que se necesitan largos filamentos para conseguir desplazamientos notables. Esto puede hacerlo inviable para aplicaciones que requieran grandes desplazamientos. Otra limitación es la eficiencia energética. Como se transforma mediante calor, la eficiencia está limitada por el modelo de eficiencia de Carnot a un 10% como máximo [20]. Además, como la temperatura es el factor determinante en las transformaciones, los ciclos de trabajo dependerán del tiempo que tarde en calentarse y enfriarse, siendo éste último el principal limitante. Esto se mejora incluyendo sistemas de disipación del calor. Uno de los grandes problemas del uso de los SMA como actuadores es el control, ya que la histéresis, las no linealidades en la deformación y las variaciones en la temperatura dificultan la implementación de un control preciso.

Los actuadores basados en SMA se están introduciendo en diversos campos, porque sus características particulares ofrecen aplicaciones innovadoras. Se ven aplicaciones principalmente en tecnología aeroespacial, automotriz, robótica y biomédica. En aplicaciones aeroespaciales, los SMA ofrecen muchas ventajas en espacios reducidos sometidos a cargas altamente dinámicas. Se utilizan como actuadores, amortiguadores de vibración, conectores, selladores, manipuladores, entre otros. En los vehículos modernos se incluyen cada vez más sensores y actuadores para conseguir mejoras en la seguridad, comodidad y funcionamiento. Los SMA se utilizan principalmente como actuadores lineales para plegar espejos, redireccionar las salidas de la climatización o el bloqueo de puertas. Además se utilizan como actuadores térmicos en el control de la temperatura del motor o su lubricación. Sin embargo, recientemente se están empleando SMA para aplicaciones estéticas y aerodinámicas. Dentro de la robótica, los principales desafíos a los que se enfrenta es mejorar el funcionamiento a la par que se reducen las dimensiones del hardware e incrementar la inteligencia de los sistemas integrados. La dualidad actuador-sensor de los SMA los hace idóneos para incluirlos micro-robots, ya que elimina la necesidad de sensores adicionales. Aparte de su uso como músculos artificiales, ya tratados

en la sección de manos robóticas, se han desarrollado aplicaciones novedosas como bigotes de ratas artificiales [21] para navegar espacios reducidos e identificar superficies, dispositivos voladores como BATMAV [22], Bat Robot [23] o BionicOpter [24], una libélula que puede maniobrar en todas direcciones en el aire (ver en fig.18). En aplicaciones biomédicas, lo SMA se utilizan principalmente para cirugía mínimamente invasiva, ya que este material está aprobado por la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA) desde 1989. Equipos y herramientas en diversos campos como ortopedia, neurología, cardiología o radiología intervencionista incluyen esta tecnología. Los SMA han mejorado la capacidad de los catéteres para moverse con precisión por ángulos complicados, lo que permite mejores diagnósticos [20].



Figure 18 - BionicOpter

Estudio de la mano

Para poder plantear un diseño antropomórfico, se debe comenzar por analizar el elemento que se quiere reproducir. Por ello se va a tratar en primer lugar la biomecánica, el funcionamiento y las dimensiones de la mano humana.

3.1 Anatomía

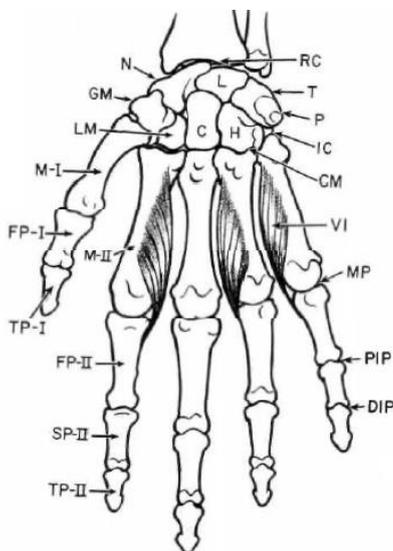


Figure 19 - Estructura ósea de la mano

La estructura funcional de la mano está formada por huesos, como se muestra en la figura 19. Existen ocho huesos comprimidos en el carpo, que forman la muñeca y por tanto la base de la mano, a ellos están unidos los huesos del metacarpo, que forman la palma, y finalmente se tienen los huesos de las falanges. Los huesos de las falanges son muy similares entre ellos exceptuando el pulgar, donde se pierde la segunda falange. El segmento del metacarpo tiene una flexión muy limitada, mientras que el segmento de las falanges está compuesto por piezas articuladas entre ellas que tienen como centro virtual de rotación el

extremo de la falange anterior. En la figura 20 se muestra una aproximación de la posición del centro de rotación de las falanges.

El movimiento de la mano es posible gracias a una serie de músculos y tendones que están unidos a la estructura ósea. Prácticamente todos los músculos que actúan sobre la mano y la muñeca se encuentran en el antebrazo, y se introducen a través de la muñeca estrechándose como tendones, ligándose en los diferentes componentes de la mano. Como se expone en la figura 21, los flexores de los dedos se originan en la epitroclea del húmero, mientras que los extensores se originan en el epicóndilo y parte del cúbito. En cambio, los extensores y abductores del pulgar se originan en la parte media y distal del cúbito y el radio.

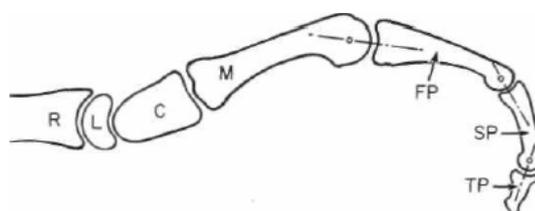


Figure 20 - Centro virtual de rotación de las falanges

Los músculos que se originan y se insertan dentro de los límites de la muñeca y la mano son aquellos especializados en la aducción de los dedos, necesarios para patrones de oposición tales como cerrar la mano en un puño o realizar un agarre esférico.

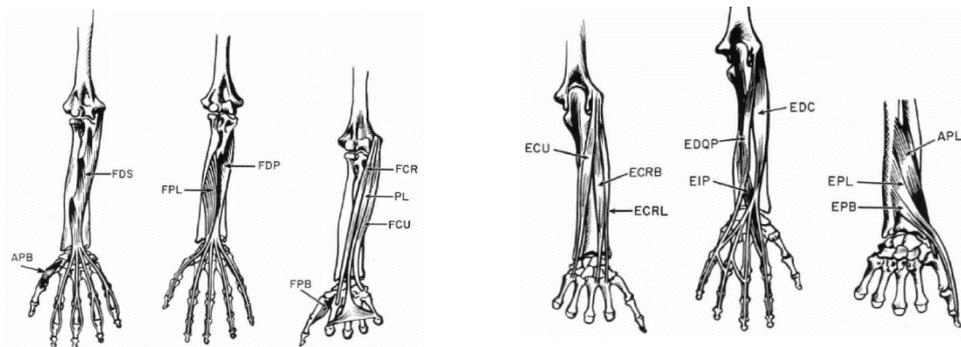


Figure 21 - Músculos flexores y extensores de la mano

Los tendones de la mano son guiados a través canales entre los huesos y ligamentos que aportan la estabilidad estructural, como se observa en la sección del perfil de la mano representada en la figura 22. Existen tendones tanto por la zona palmar y la zona dorsal, dependiendo de su función de flexión o extensión [25].

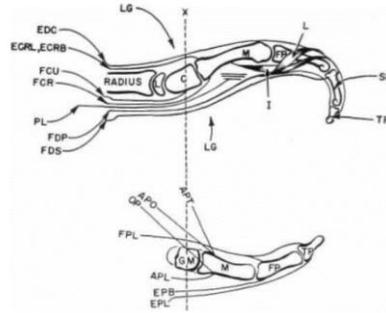


Figure 22 - Sección del perfil de la mano

3.2 Movimiento

Dentro del gran rango de movimientos que puede realizar una mano, Schlesinger [26] definió seis patrones de agarre básicos que se representan en la figura 23.

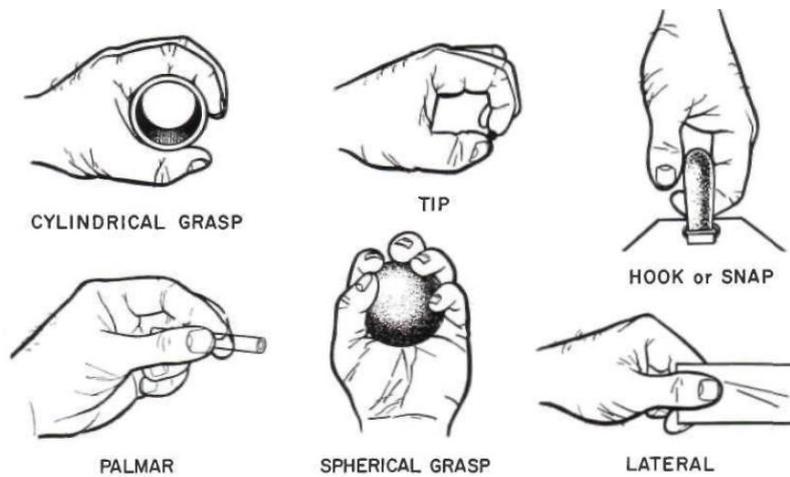


Figure 23 - Agarres básicos

Se definen como posiciones básicas:

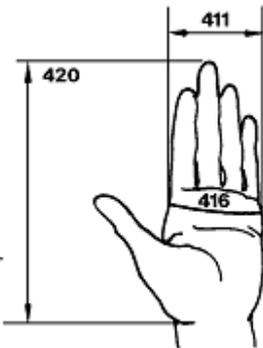
- **Agarre cilíndrico:** Todos los dedos se curvan sobre el objeto con el pulgar opuesto.

- Pinza: El objeto se sostiene entre las puntas del dedo índice y pulgar, manteniendo contacto mínimo.
- El gancho: Los dedos se curvan a modo de garfio y permiten enganchar objetos.
- Agarre palmar, donde el objeto se sujeta de forma precisa y estable entre el dedo pulgar y el índice.
- Agarre esférico, todos los dedos se curvan distribuidos sobre una superficie esférica.
- Agarre lateral, los dedos se curvan de forma tal que el dedo índice presenta una superficie plana en su lateral sobre la que el objeto se apoya y se lo mantiene con el pulgar.

3.3 Biométrica

Para dimensionar las características de la mano humana se van a seguir los estándares establecidos por la NASA [27]. En la tabla 1 se muestran las medidas de la mano de una mujer adulta americana en cm.

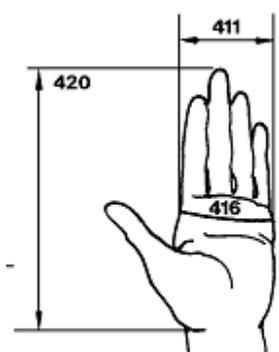
Table 1 - Dimensiones estándar mujer (cm)

	Nº	Dimensión	5º percentil	50º percentil	95º percentil
	420	Largo	15,8	17,2	18,7
	411	Ancho	6,9	7,8	8,6
	416	Circunferencia	16,5	17,9	19,3

Las siguientes características definidas por el estándar de la NASA están definidas para la mano de un hombre adulto americano, cuyas dimensiones se observan en la tabla 2.

Table 2 - Dimensiones estándar hombre (cm)

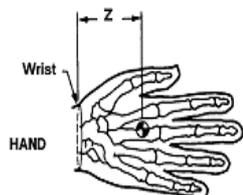
Nº	Dimensión	5º percentil	50º percentil	95º percentil
420	Largo	17,9	19,3	20,6
411	Ancho	8,2	8,9	9,6
416	Circunferencia	20,3	21,8	23,4



En la tabla 3 se define la posición del centro de masa de la mano como la distancia en cm, desde el centro de la muñeca hacia la palma de la mano.

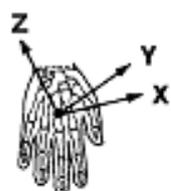
Table 3 - Centro de masa (cm)

Z	5º percentil	50º percentil	95º percentil
Z	5,1	5,6	6,0



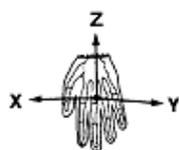
El momento de inercia de las manos se define en la tabla 4 como $g. cm^2 \times 10^3$.

Table 4 - Momento de inercia ($g. cm^2 \times 10^3$)



Eje	5º percentil	50º percentil	95º percentil
X	10,7	13,8	16,8
Y	8,7	11,2	13,7
Z	3,4	4,5	5,5

Mano derecha

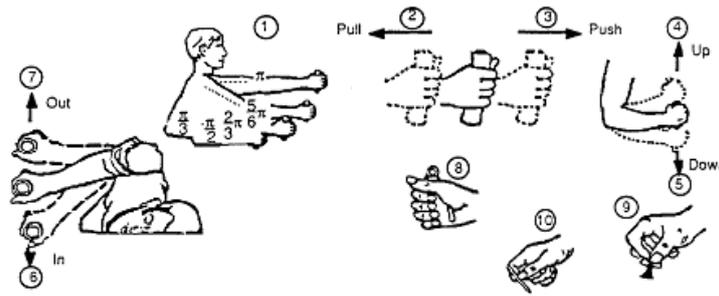


X	10,8	13,6	16,4
Y	9,0	11,3	13,6
Z	3,5	4,4	5,3

Mano izquierda

En la tabla 5 se muestran las fuerzas en N de brazos, manos, dedos y pulgar en función del movimiento realizado para el 5º percentil de hombres adultos.

Table 5 - Fuerzas brazo, mano, dedos y pulgar (N)



	(1)		(2)		(3)		(4)		(5)		(6)		(7)	
Flexión del codo (rad)	Tirar		Empujar		Arriba		Abajo		Dentro		Fuera			
	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D	I	D
π	222	231	187	22	40	62	53	75	58	89	36	62		
5/6 π	187	249	133	187	57	80	80	89	67	89	36	67		
2/3 π	151	137	116	160	76	107	93	116	89	98	45	67		
1/2 π	142	165	98	160	76	89	93	116	71	80	45	71		
1/3 π	116	107	96	151	67	89	80	89	76	89	53	76		
			(3)		(9)				(10)					
			Agarre		Agarre Palmar				Pinza					
			I	D										
Sujeción momentánea			250	260	60				60					
Sujeción mantenida			145	155	35				35					

Capítulo 4

Diseño de la mano

En este capítulo se va a describir el diseño completo de la mano, partiendo de una perspectiva global hasta desglosar los detalles particulares de sus componentes.

4.1 Visión general

La mano está diseñada para imitar dentro de lo posible las dimensiones y fisiología de una mano humana promedio. Esto implica una limitación en las dimensiones y configuración de la misma. Siguiendo los estándares de la NASA, las dimensiones de la mano son 185 mm de largo desde la base de la palma hasta el extremo de los dedos, y 80 mm de ancho de palma. Estas medidas se encuentran entre a las dimensiones de una mano femenina grande o una mano masculina pequeña. La longitud total de la mano, incluyendo

muñeca son 202,5 mm y el ancho incluyendo palma y pulgar cerrado son 100 mm. Su peso, excluyendo actuadores, es de 165 gramos.

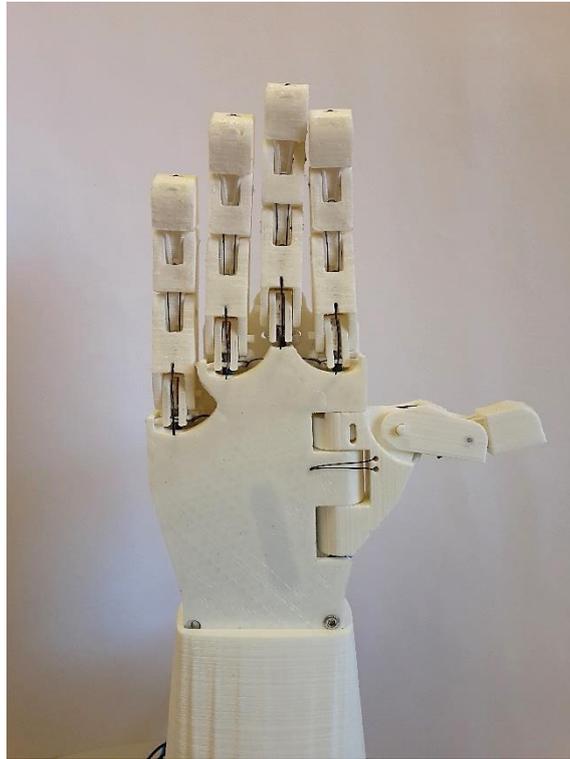


Figure 24 - Vista frontal

Su composición consiste en una palma como pieza principal, cuatro dedos idénticos y un pulgar oponible. La palma ofrece una amplia superficie de contacto por la cara interna mientras que en su interior recoge todo el sistema de vías por las que los hilos pasan de los dedos hasta conectarse con los filamentos. Los cuatro dedos son completamente idénticos e intercambiables, mientras que el pulgar presenta un diseño propio adaptado a sus funciones. Se muestra el diseño completo en la figura 25.

En estado de reposo, es decir, sin la acción de ningún actuador, la mano se encuentra completamente abierta, con todas las extremidades extendidas (ver fig. 24). La acción de flexión la realiza la activación de los hilos de SMA, mientras que el retorno es pasivo y se consigue con cordones elásticos actuando como antagonistas de los filamentos.

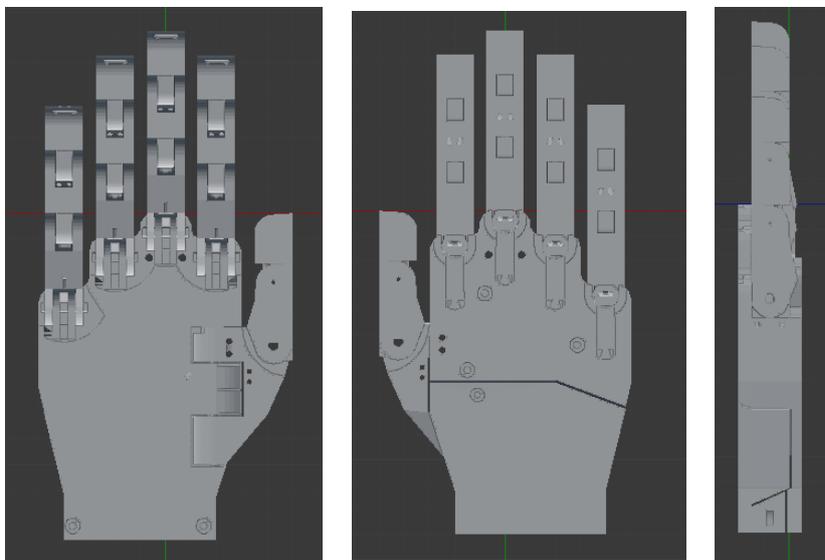


Figure 25 - Vistas frontal, posterior y lateral del diseño

Los filamentos de SMA forman parte de un sistema de actuación que se acopla a la mano en la muñeca. Este sistema está formado por una serie de tubos flexibles pero inextensibles que contienen casi toda la longitud del filamento, de forma tal que al accionarse el filamento y contraerse, mantienen un extremo fijo para que el otro realice el desplazamiento. Parte del sistema son los circuitos de control y alimentación que aportan y regulan la corriente que pasa por los filamentos para obtener de ellos el comportamiento buscado. La figura 26 muestra el conjunto completo.

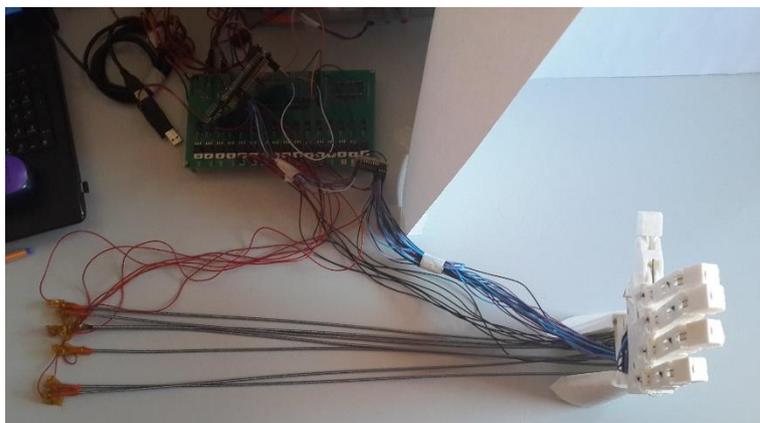


Figure 26 - Conjunto mano, filamentos y electrónica

Se ha establecido un compromiso entre el número de actuadores y los grados de libertad actuados, para conseguir la mayor cantidad de acciones posibles usando un número reducido de filamentos de SMA. Cada uno de los dedos y el pulgar son capaces de realizar un movimiento de flexión y extensión independientes (ver fig. 27). La flexión de las falanges de cada dedo es solidaria, siendo la acción de un único filamento la causante de la flexión de todas las articulaciones del dedo. Los dedos realizan de forma conjunta el movimiento de aducción, accionado por un mismo filamento SMA, mientras que la abducción la realizan de forma pasiva. Por el contrario, el pulgar realiza el movimiento de abducción de forma activa oponiéndose a los

dedos y el de aducción de forma pasiva. Esto implica un total de siete filamentos de SMA para actuar toda la mano. Cada uno de los grados de libertad activos cuenta con un sensor de posición para proporcionar una señal de realimentación al bucle de control.

La fabricación de la mano se ha realizado con una impresora 3D Prusa I3 y filamento de plástico PLA de 3mm de grosor. Esto permite prototipar rápidamente las diferentes versiones diseñadas y ponerlas a prueba. Sin embargo, existen ciertas limitaciones al trabajar con ellas que se deben tener en cuenta en el proceso de diseño para conseguir resultados óptimos. La figura 29 expone el conjunto de piezas que forman la mano.



Figure 28 – Clips

Los ejes de las articulaciones de las falanges que no incluyen un sensor utilizan alambre de acero extraído de clips de oficina. Esta elección se debe a la accesibilidad y precio económico de los mismos, además de ofrecer la resistencia necesaria y un bajo coeficiente de rozamiento con el plástico. Para fijarlos dentro de

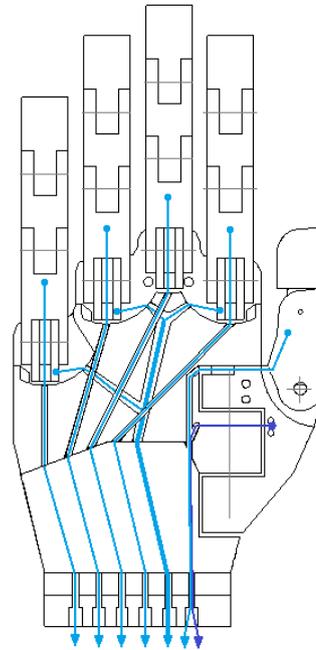


Figure 27 – Puntos de actuación de los SMA

las articulaciones se utilizó silicona caliente, que puede ser retirada si es necesario desmontar la articulación.

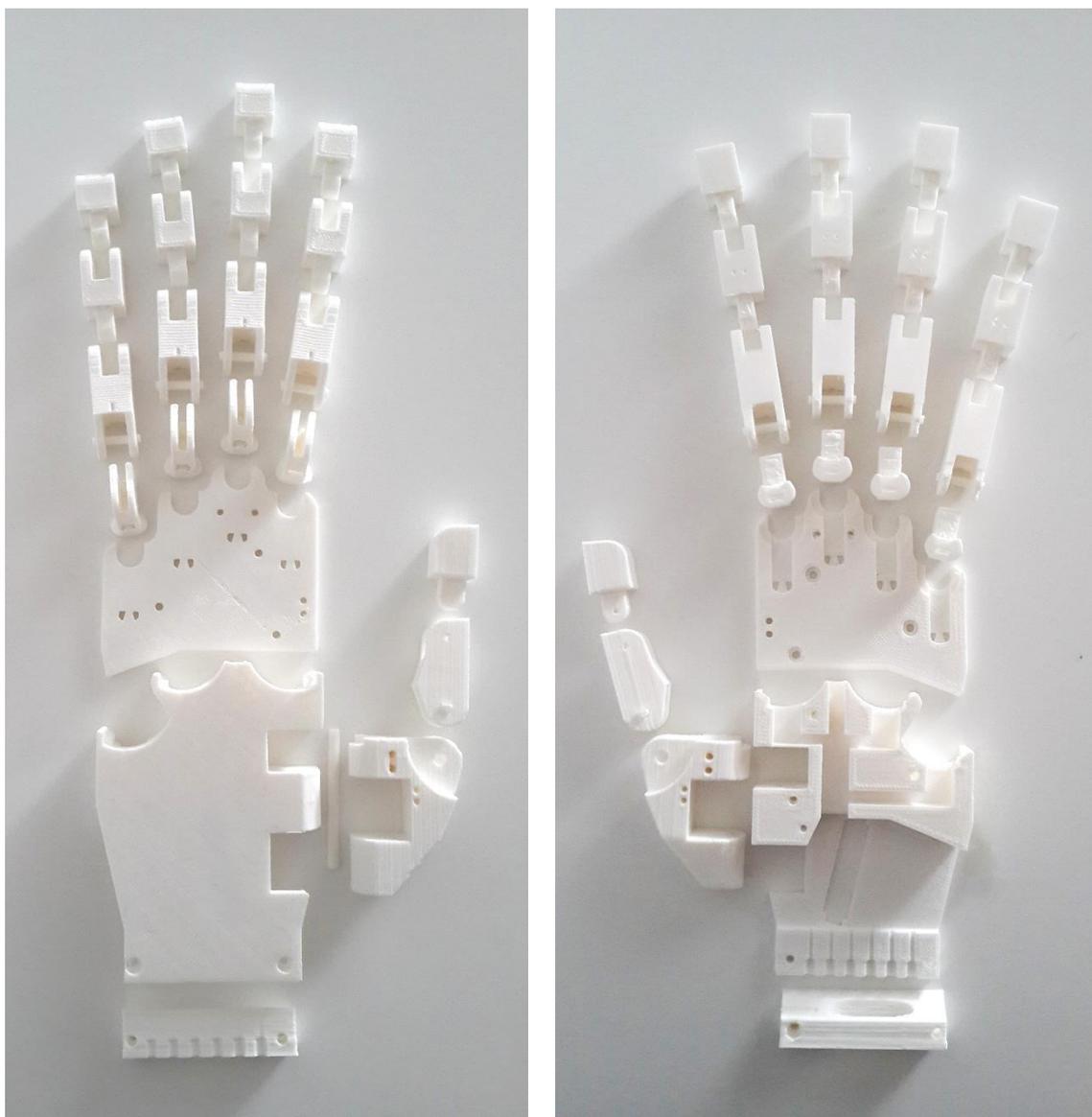


Figure 29 - Conjunto de piezas impresas que forman la mano

4.2 Conjunto dedo

Cada dedo está formado por cuatro piezas, las tres falanges presentes en un dedo humano y una cuarta pieza que se acopla a la palma de forma tal que permite tanto la flexión del dedo como su rotación en torno a la articulación metacarpofalángica. Para simplificar, los cuatro dedos son idénticos e intercambiables, lo que facilita además el montaje y la reparación de los mismos.

Para minimizar el número de actuadores, los dedos están subactuados en el movimiento de flexión, lo que implica que solo se emplea un actuador para flexionar cada dedo, mientras que su extensión es pasiva. Para asegurar diversidad de movimientos, cada dedo se flexiona de forma independiente, contando con un actuador por dedo.

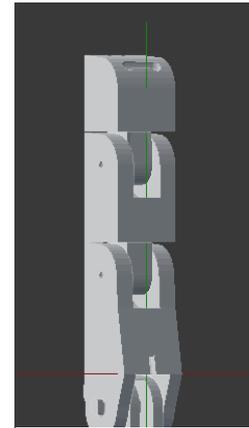


Figure 30 - Modelo 3D Dedo

Las dimensiones de cada falange imitan las proporciones anatómicas, por lo que cada falange tiene una longitud diferente, tal y como se muestra en la figura 31. Con el objetivo de hacer referencia a cada falange se las va a denominar F1, F2, F3 y F4, siendo F1 la falange distal y F4 el acople con la palma, como se indica en la figura 31.

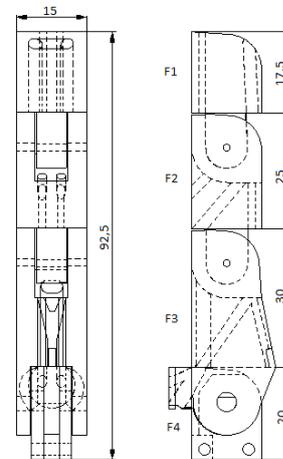


Figure 31 - Vistas frontal y lateral dimensionadas

4.2.1 Flexión - Extensión

El movimiento principal del dedo es la flexión. Este movimiento sólo se realiza con las falanges F2 y F3, mientras que F1 está ligeramente flexionada en todo momento, sin tener la habilidad de realizar ningún movimiento.

La falange F3 se flexiona al contraerse el hilo de SMA, que tira del hilo de aluminio plastificado que atraviesa F3 y el interior de la palma, apreciable en la figura 32. El rango del movimiento es de 90° , que por las características físicas del mecanismo requiere un acortamiento lineal del filamento de 2 cm. Esta medida determina la longitud total necesaria del filamento de SMA, que se contrae un 3% de su longitud en reposo. Hace falta un hilo de al menos 66 cm de longitud para conseguir el desplazamiento necesario para flexionar el dedo.

Si se usase un mismo actuador para flexionar F2 junto con F3, fijando su extremo móvil a F2, haría falta un filamento del doble de longitud, lo cual no resultaría práctico ni funcional. Por esta razón, el movimiento de F2 es solidario al movimiento de F3. Mediante un hilo inextensible se conectan F2 y F4, de forma tal que al flexionarse F3, se flexiona F2 de forma proporcional, como se muestra en las figuras 32 y 33. Este hilo atraviesa la estructura de F3 a través de unos canales internos.

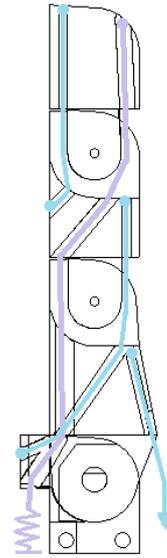


Figure 32 – Anclaje de hilos y elásticos de la flexión del dedo

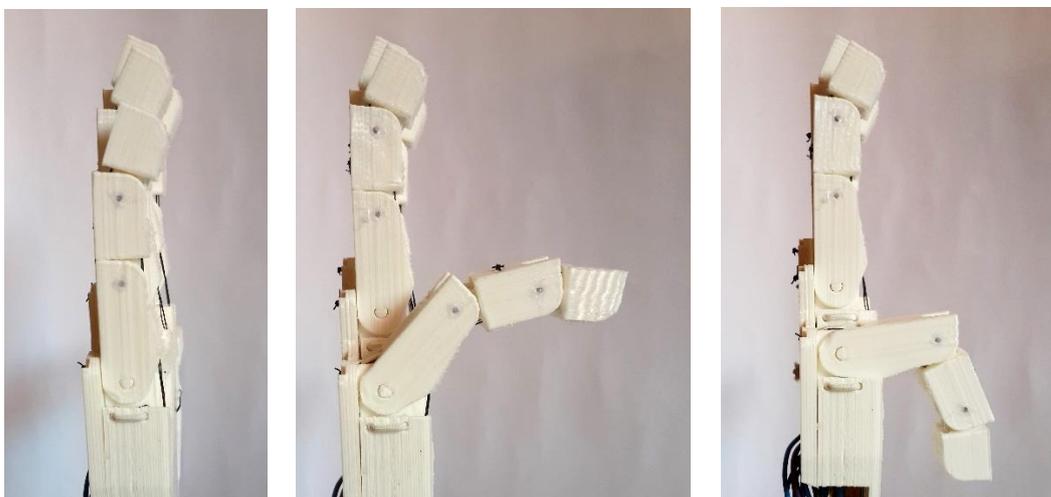


Figure 33 - Flexión proporcional del dedo

Para simplificar el mecanismo, no se ha habilitado la flexión de F1, siendo esta una falange inmóvil ligeramente flexionada. Dispone de una pequeña amortiguación para ayudar en los agarres. Esto se consigue flexionando con un cordón elástico que pasa por la cara interna de F1 y un hilo de aluminio recubierto de plástico que fija el grado de flexión máxima entre F1 y F2. Esto se puede apreciar en la figura 33.

La extensión del dedo la efectúa un cordón elástico de 3 mm de grosor que comienza en la cara interna de F1, atraviesa F2 en diagonal, continúa por una vía cercana a la cara externa de F3 y atraviesa F4 para anclarse finalmente en la palma. Esta configuración permite que el mismo elástico sirva de amortiguación para F1 y de agente extensor para F2 y F3. Esta configuración se aprecia en la figura 32. Se ha preferido emplear un único hilo para toda la configuración del dedo y de forma doble porque simplifica el diseño y sobretodo el montaje. Al ser doble, el anclaje en F1 es un surco en forma de U, al igual que en la palma donde ambos extremos del cordón se atan. Este formato se utiliza también con los hilos de aluminio plastificado.

La desventaja de usar un cordón elástico frente a otras opciones como un muelle, es la dificultad para conseguir la misma tensión en todos los dedos. Esto implica que los dedos responderán de forma ligeramente diferente para un mismo sistema de control. Sin

embargo, su bajo coste y alta disponibilidad lo convierten en la solución idónea para el objetivo propuesto.

La flexión del dedo se monitoriza mediante un sensor de rotación plano, modelo 3382 (fig. 34), integrado en F4. Este sensor sigue el movimiento de giro de F3, que al ser proporcional a F2 sirve para controlar el movimiento del todo el conjunto.



Figure 34 - Potenciómetro 3382

4.2.2 Aducción - Abducción

Para amplificar el rango de posiciones posibles, los cuatro dedos son capaces de realizar un movimiento de aducción. La falange F4 de cada dedo está diseñada para incrustarse en la palma de forma tal que su unión es un eje de rotación perpendicular al de flexión. Esto se observa con más claridad en la figura 35.

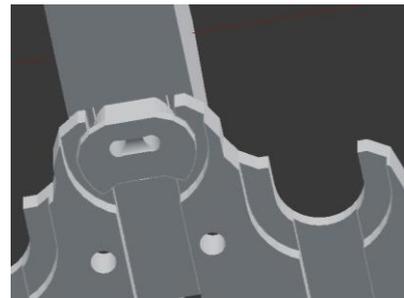


Figure 35 - Detalle unión F4 - Palma

El movimiento de aducción lo efectúan tres hilos de aluminio plastificado anclados en las falanges F4 de los dedos índice, anular y meñique, que se unen a un único hilo de SMA, como se refleja en la figura 36. Al contraerse el filamento, los tres dedos mencionados rotan sobre el eje de F4 en la palma. Si rotasen todos los dedos, el conjunto quedaría antinatural, por lo que el dedo corazón se mantiene en posición fija. La aducción se muestra en la figura 37.

Como la rotación del dedo afecta también a la distancia relativa entre la base de F3 y la palma, se procuró acercar lo máximo posible el eje de rotación a la base de P3. Esto permite que, al girar, la longitud del hilo de flexión que conecta P3 y la palma sufra una variación mínima. El eje de rotación de F4 está colocado a 4 mm de la base de P3.

La abducción, es decir, el regreso a la posición de reposo, se efectúa por medio de un cordón elástico que se opone a la dirección de los hilos, fijado a cada F4 y a la palma.

Para controlar la posición del filamento de SMA se dispone de un sensor lineal, modelo PTA2043, incluido en la palma que sigue el desplazamiento del hilo, realimentando esta información al sistema de control.

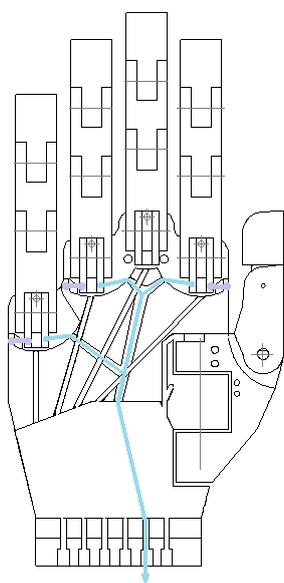


Figure 36 – Anclaje de hilos de la aducción de los dedos



Figure 37 - Aducción de los dedos

4.3 Conjunto Pulgar

El pulgar es la quinta extremidad de la mano y cumple una función fundamental en la mayoría de las manipulaciones y posiciones. La capacidad del pulgar para oponerse al resto de dedos (fig. 38) posibilita un agarre estable y afianzado de objetos grandes y una manipulación más delicada y puntual de objetos pequeños o finos. Un pulgar en posición abierta ofrece mayor superficie plana de contacto para empujar o sujetar cosas.

El pulgar está formado por dos falanges y una pieza que las une a la palma. Para hacer referencia a ellas las llamaremos P1, P2 y P3, siendo P1 la falange distal y P3 la unión a la palma. Las dos falanges tienen una configuración similar a los dedos, pero sus dimensiones varían para ajustarse a las características del pulgar. Se puede observar el pulgar en detalle en las figuras 38 y 39.

Para maximizar la capacidad motriz, el pulgar puede realizar tanto el movimiento de flexión-extensión como de aducción-abducción. La capacidad de oponer o no el pulgar a los dedos permite diversos tipos de agarres desde el cilíndrico hasta el lateral.

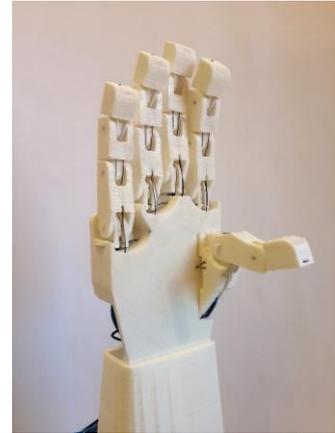


Figure 38 - Mano con pulgar opuesto

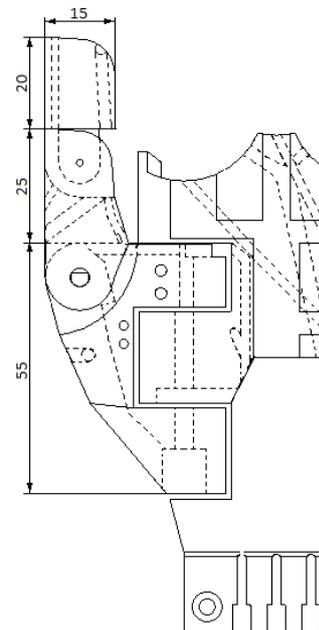


Figure 39 - Dimensiones pulgar

4.3.1 Flexión - Extensión

La falange distal del pulgar P1 tiene la misma configuración que la falange F1 de los dedos, es estática y ligeramente flexionada pero dispone de cierta flexibilidad gracias a la acción de un cordón elástico en la cara interna.

La falange que realiza la flexión es P2, que se flexiona hasta tocar la palma, con un rango de giro de 90° . Se ancla un hilo de aluminio en P2 con la misma forma de U presente en los dedos, este hilo atraviesa P3 por un canal que lo conduce hasta introducirlo en la palma, donde finalmente se acopla al filamento de SMA (ver fig. 40).

Este hilo en concreto presentó la dificultad de idear el sistema más óptimo para que el movimiento de aducción - abducción no afectara a la longitud del mismo ni a la fuerza necesaria para flexionar el dedo en la medida de lo posible. El diseño de P3 permite la entrada del hilo desde P2 de forma directa al eje de rotación de P3 sobre la palma, y a partir de ese punto se dirige a la palma en diagonal, de forma tal de que tanto si el pulgar está abierto o cerrado, el hilo tiene como máximo 45° de diferencia con la orientación del hilo en P3. Si el hilo se unía a la palma de forma recta en alguna de las posiciones, haría un ángulo de 90° en la posición contraria, por lo que la fuerza exigida al SMA sería mayor. Esto se visualiza con más claridad en la figura 41.

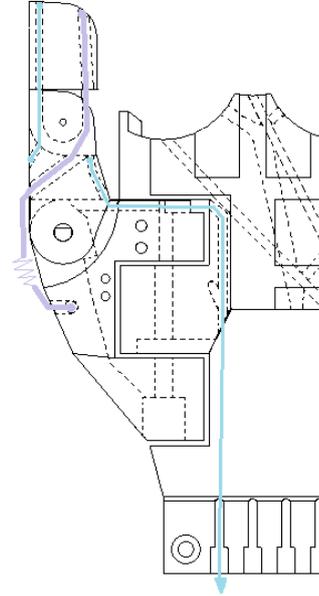


Figure 40 – Anclaje de hilos y elásticos de la flexión del pulgar

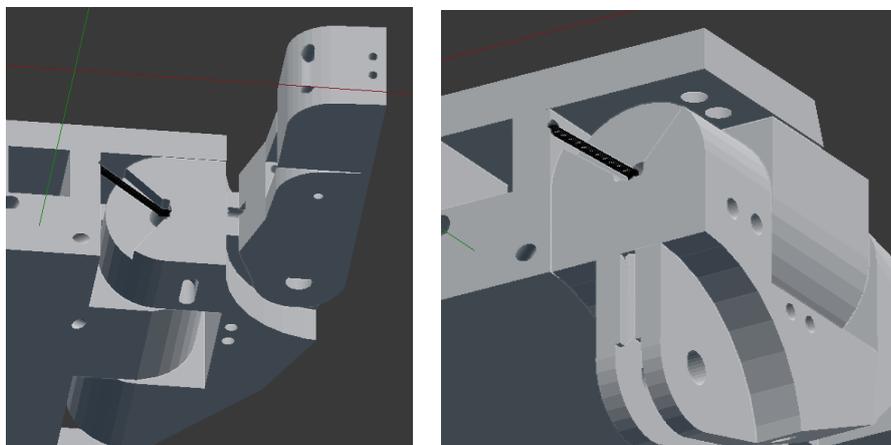


Figure 41 - Posición del hilo de flexión al realizarse la abducción del pulgar

La extensión del pulgar la efectúa un cordón elástico, al igual que en los dedos. Este cordón parte de la falange P1 por la cara interna, atraviesa P2 diagonalmente hasta su cara externa y se fija finalmente en la cara externa de P3. Esta configuración está representada en la figura 40.

Integrado en P3 y conectado al eje de P2 se encuentra el sensor de rotación plano, modelo 3382, que controla el movimiento de flexión del dedo y por tanto, el comportamiento del filamento asociado a este.

4.3.2 Aducción - Abducción

La pieza P3 es la responsable de realizar la función de aducción - abducción, lo que permite al pulgar oponerse a los dedos. La acción de abducción está actuada mediante un hilo que se inicia en P3 y se introduce en el interior de la palma, para luego conectarse con su filamento correspondiente.

La aducción es pasiva y la realiza un cordón elástico que une P3 y a la cara posterior de la palma. Estos mecanismos se pueden observar en la figura 42.

El control de esta función se consigue con otro sensor de rotación plano insertado en la palma dentro de la articulación, conectado a P3 por un eje plano.

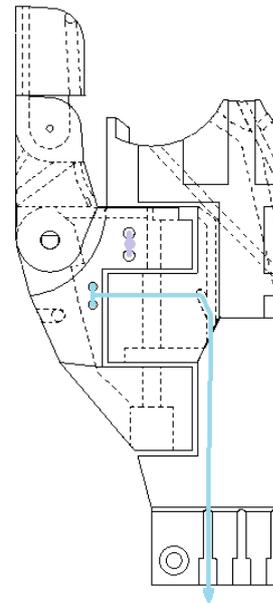


Figure 42 - Anclaje de hilos y elásticos de la abducción del pulgar

4.4 Palma

La palma es la estructura principal de la mano. Está compuesta por cuatro piezas: una pieza principal que contiene el pulgar y las vías de todos los hilos de tracción, una pieza que contiene los dedos, otra que contiene el punto de anclaje de los actuadores de SMA y el paso de los cables eléctricos, y por último una tapa para facilitar el acceso a los acoples entre hilos y filamentos.

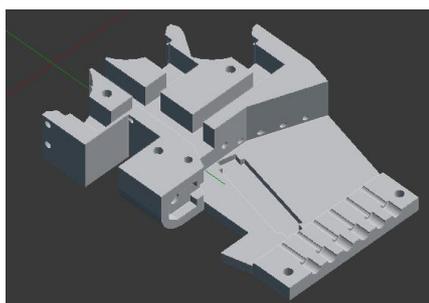


Figure 44 - Pieza principal de la palma

La pieza principal es la que corresponde a la cara interna de la palma (ver fig. 45), la mayor superficie de contacto de la mano. En un lateral contiene la articulación para el pulgar con el sensor correspondiente. Su grosor es el mismo que el del pulgar y ligeramente mayor que el de los dedos, para contener en su interior las vías necesarias para los tendones responsables del movimiento de todas las extremidades. En el centro de la pieza, por el lado posterior, se dispone de un amplio espacio donde los filamentos de SMA se conectan con los tendones y tienen suficiente espacio para contraerse y extenderse. En la base de la pieza, se encuentran surcos donde se alojan las fundas de los actuadores, que se fijan a presión al atornillar otra pieza.

La segunda pieza representa la mitad superior de la cara posterior de la mano (ver fig. 44). Se trata de una pieza más fina que aloja los ejes de rotación de las piezas F4 de cada

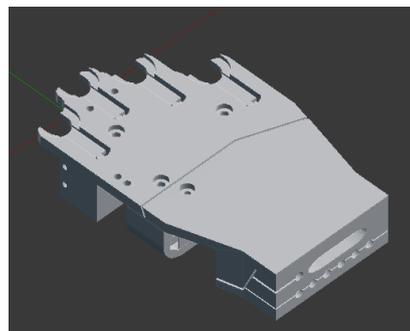


Figure 43 - Diseño 3D del conjunto palma

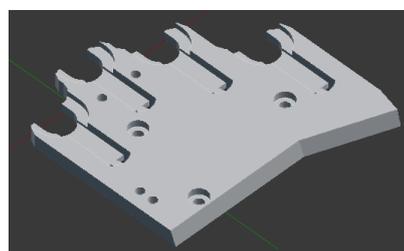


Figure 45- Pieza soporte de los dedos

dedo. Además sirve de anclaje para los elásticos extensores de los mismos y para el elástico aductor del pulgar. Se une a la pieza principal mediante tornillos M3 que se fijan a tuercas alojadas internamente en la pieza mayor.

En la sección correspondiente a la muñeca, la pieza principal se une a una tercera pieza para contener las fundas de los filamentos de SMA que se acoplan dentro de la palma con los hilos. La unión de ambas piezas mediante dos tornillos fijan las fundas cilíndricas de los actuadores para evitar que se descoloquen al contraerse y expandirse los filamentos. Además dispone de una abertura para que los cables de los sensores y los cables de alimentación de los filamentos de SMA puedan salir conjuntamente de la mano.

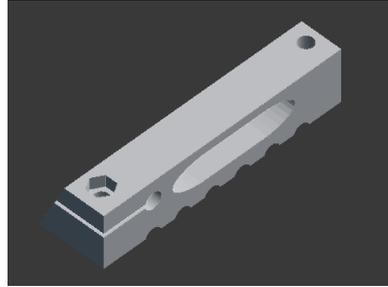


Figure 46 - Pieza acople actuadores

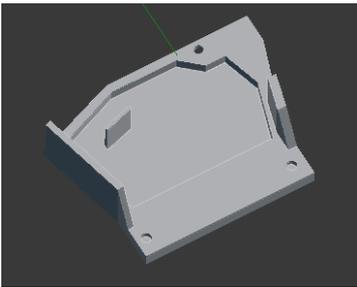


Figure 47 - Cara interna de la tapa

La última pieza sirve para cubrir la zona que queda expuesta de la palma. En este hueco se acoplan todos los tendones con sus filamentos correspondientes (ver fig. 49), por lo que conviene que sea una zona accesible para facilitar el montaje y posible reparación. Está sujeta con un solo tornillo a la pieza principal de la palma y por su forma queda encajada al resto de las piezas. En su cara interna contiene una lengüeta que guía los cables para que no interfieran con el sensor lineal de la aducción de los dedos. Con esta pieza se completa la cara posterior de la palma. En la figura 48 se muestra la mano con y sin tapa.

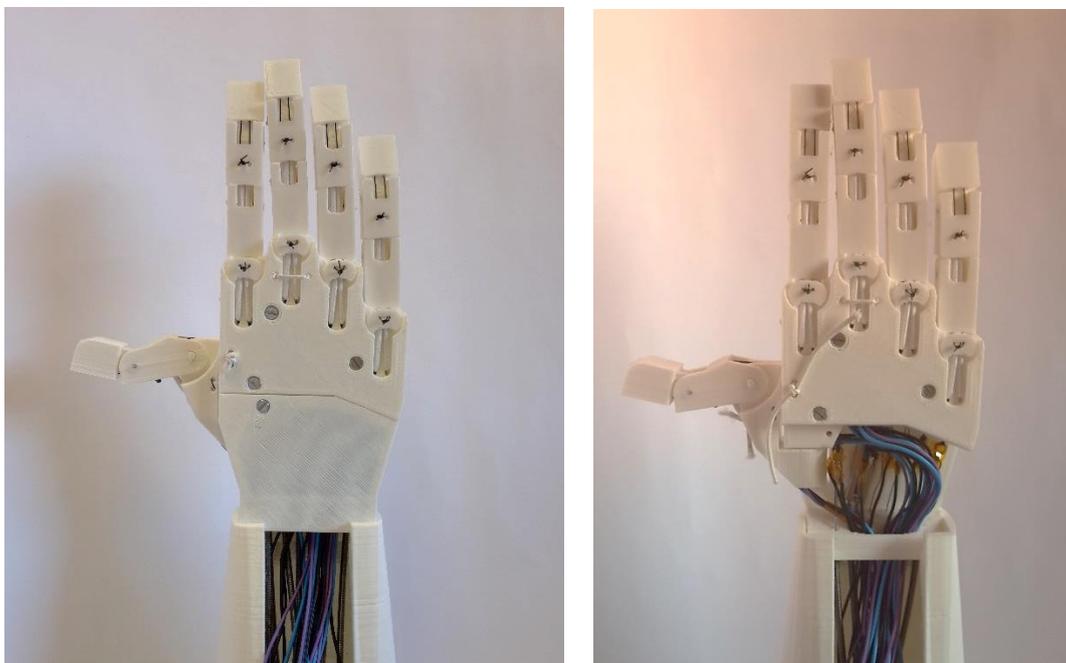


Figure 48 - Mano con y sin tapa



Figure 49 - Detalle de los acoples hilo - filamento SMA en el interior de la palma

4.5 Actuadores

Los filamentos de SMA utilizados para mover la mano están compuestos de Nitinol, una aleación de Níquel y Titanio, que se modifica su estructura cristalina interna y se contrae al ser calentado por encima de los 70°C y se estira al enfriarse por debajo de los 60°C. El ciclo de temperaturas no es lineal y presenta una gran histéresis, como se puede observar en el gráfico 15. El grosor del filamento utilizado es de 0,5 mm y la fuerza ejercida es muy alta en relación a su tamaño, llegando hasta los 35 N.

Para provocar el cambio de estructura del filamento y, por consiguiente, reducir su longitud, se aplica una corriente eléctrica que, debido al efecto Joule, eleva la temperatura de forma uniforme a lo largo del actuador. Para preservar la vida útil y la funcionalidad del filamento se utiliza una corriente modulada por ancho de pulsos (PWM) y se ajusta mediante un sistema de control que evita sobrecalentamientos, lleva el hilo a la temperatura deseada y la mantiene. La contracción se realiza rápidamente, pudiendo pasar de 0° a 90° en un segundo, pero la limitación se encuentra en el enfriamiento. A medida que el filamento disminuye su temperatura va recuperando su longitud original. Este tiempo depende tanto de las condiciones ambientales como del diseño del soporte del filamento, que puede mejorar la disipación.

La estructura que mantiene el filamento extendido y uno de sus extremos fijos puede tener diversas configuraciones. La forma más habitual es haciendo pasar el hilo por un sistema de poleas, que lo compactan dentro del diseño, como se observa en el modelo de Adrianensis et al. [11]. Los actuadores utilizados en este proyecto siguen el diseño de Villoslada et al. [28], que utiliza una configuración de cable Bowden para contener y guiar el filamento.

El sistema de cable Bowden se utiliza tradicionalmente para transmitir el desplazamiento de un punto de un mecanismo a otro alejado, como por ejemplo el freno de una bicicleta. El sistema Bowden de los actuadores SMA empleados está formado por una malla metálica flexible en la capa exterior, una capa intermedia compuesta por un tubo de teflón y finalmente en su interior se aloja el filamento de SMA. La malla metálica consiste en un tubo helicoidal de acero inoxidable que permite su flexión pero es lo suficientemente

rígido para mantener su forma cuando se activa el filamento. El recubrimiento intermedio de teflón reduce el coeficiente de rozamiento del filamento de SMA con el cable Bowden, reduciendo las pérdidas por fricción y mejorando la eficiencia de transmisión de fuerza del actuador. Su diámetro se ajusta para minimizar el aire libre entre el filamento de SMA y el tubo, para maximizar la conducción de calor entre ellos. La figura 50 muestra la estructura del cable Bowden.

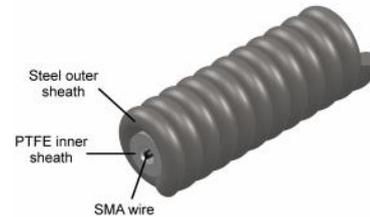


Figure 50 - Cable Bowden

Una ventaja de utilizar esta configuración es que actúa como disipador del calor, por lo que el filamento se enfría más rápido y se puede aumentar la frecuencia de los ciclos de actuación. La resistencia térmica del sistema será la suma de la resistencia térmica de conducción del recubrimiento de teflón más las resistencias térmicas de conducción y convección del recubrimiento de acero. La resistencia total es mucho menor que la resistencia térmica del filamento de SMA expuesto directamente al aire [1].

Al ser actuadores habitualmente largos, la posibilidad de flexionarlos cobra especial importancia a la hora de integrarlos en toda clase de sistemas como brazos robóticos, prótesis o exoesqueletos. El actuador se puede integrar en el cuerpo del brazo y moverse de forma solidaria a él. Además son ligeros, por lo que no aportan un peso extra en las extremidades, como suele pasar con los servomotores integrados en la mano.

A diferencia del modo de empleo habitual del cable Bowden, donde se transmite el desplazamiento de un hilo de un extremo al otro, en este actuador el filamento se fija en uno de los extremos y al contraerse se efectúa el trabajo en el otro extremo. El filamento se fija por un lado a un tornillo apretado con dos tuercas y por el otro se coloca un terminal metálico que se cierra sobre el hilo a presión.

La contracción del filamento de SMA al activarse es del 3% de la longitud total del hilo a temperatura ambiente. Como el máximo desplazamiento necesario es de 20 mm, se necesitan unos 670 mm de filamento. La longitud del cable Bowden es de 650 mm y sobresalen 20 mm de filamento que se introduce en la palma, por lo que en total se utilizan filamentos de 670 mm. Todos los cables son de la misma longitud para simplificar el

proceso de montaje y para poder reemplazarlos fácilmente. La figura 51 muestra los actuadores sobresaliendo por detrás de la mano.

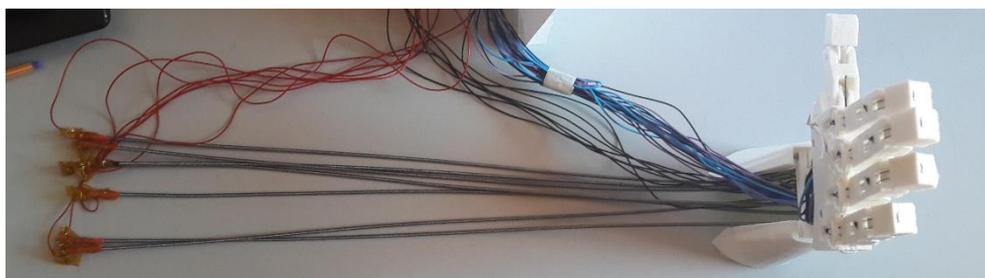


Figure 51 - Actuadores acoplados a la mano

4.6 Sensores

El uso de sensores es fundamental para implementar SMA como actuadores. Controlando la posición del hilo, se ajusta de forma adecuada la corriente que circula por el hilo, evitando sobrecalentamientos y desgaste mecánico. Se usan dos tipos de sensores, un potenciómetro plano de rotación y un potenciómetro lineal.

El sensor de rotación se utiliza para monitorizar la flexión de todos los dedos, del pulgar y la abducción del pulgar. El modelo es 3382 (ver fig. 52) de la marca Bourns. Este sensor es de rotación continua, pequeño y fino, por lo que resulta fácil de integrar dentro de las articulaciones. Para medir la rotación de las articulaciones el sensor está contenido en el interior de la pieza fija y la pieza móvil se acopla mediante un eje cilíndrico con una cara plana. Al girar la pieza, el eje transmite el movimiento al sensor, variando su resistencia. Colocar el sensor en la pieza fija impide que el movimiento articular dañe los cables del sensor.



Figure 52 - Potenciómetro 3382

Para controlar el movimiento de aducción de los dedos, se emplea un potenciómetro lineal, modelo PTA2043 (ver fig. 53) de Bourns. Consta de una pieza deslizante que tiene un recorrido de 15 mm, suficiente para medir el desplazamiento necesario para la aducción, que no es mayor a 10 mm. Está integrado en el centro interno de la palma, en la dirección que lleva el filamento atravesando la palma. Mide la contracción del filamento al estar la pieza deslizante fijada al acople del hilo y el filamento.



Figure 53 - Potenciómetro lineal PTA 2043

Las hojas de características de ambos sensores se pueden encontrar en los anexos.

4.7 Conjunto electrónico

El conjunto electrónico está basado en la configuración empleada por Villoslada et al [28] en su control de un actuador de SMA. Además, se ha diseñado un circuito de acondicionamiento de las señales analógicas de los sensores. La electrónica está por lo tanto compuesta por tres circuitos diferenciados. Uno principal que contiene el microcontrolador y periféricos tales como el sistema de carga de los programas al microcontrolador o la comunicación serie a través de una conexión USB, otro formado por los drivers que regulan la corriente que pasa por los filamentos y un último circuito de

acondicionamiento de las señales de los sensores que además sirve para conectarlos con el microcontrolador.

El circuito principal es un controlador STM32F4 Discovery (fig. 54). Este controlador puede trabajar de forma autónoma o comunicarse con una interfaz en el ordenador mediante un cable USB. Contiene el firmware que controla el comportamiento de los filamentos en función de la lectura obtenida de los sensores y de los comandos de control introducidos por el usuario. Cuenta con una salida de alimentación de 5V que permite alimentar los sensores.



Figure 54 - Controlador STM32F4 Discovery

El controlador STM32F4 no tiene capacidad para alimentar los filamentos de SMA a 15 V y 4 A necesarios para elevar su temperatura y contraerse. Dicha función la realiza un circuito de conmutación (fig. 55) de alta fidelidad actuado por un transistor MOSFET de baja resistencia ($2\text{ m}\Omega$, modelo STP310N10F7) controlado por una señal PWM (Pulse Width Modulated) del microcontrolador. Este circuito está optoacoplado del circuito de control, para proteger el resto del equipo de la alta corriente [1]. Una fuente de alimentación Digimess sm3040 es la que ofrece la corriente necesaria para activar los hilos.

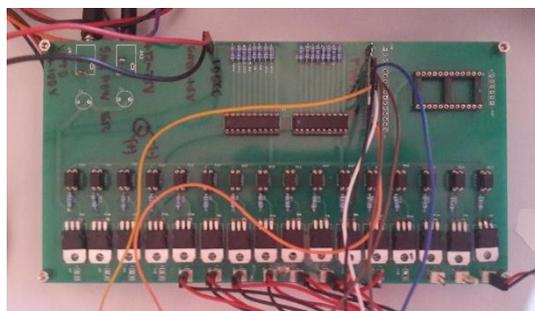


Figure 55 - Electrónica del circuito de conmutación

Para realizar un acondicionamiento sencillo de la señal recolectada de los sensores incluidos en la mano, la señal de salida pasa por un amplificador operacional configurado como seguidor de tensión, o buffer, antes de llegar al microcontrolador. Con el fin de minimizar el espacio ocupado y simplificar el montaje y desmontaje de los sensores, se ha diseñado un circuito que funciona como interfaz entre los sensores y el microcontrolador. Este circuito incluye los amplificadores operacionales de los buffers, pines de salida al microcontrolador, pines de alimentación y finalmente pines correspondientes a los sensores. La huella del circuito se presenta en la figura 56 y el esquema en la figura 57. Se utilizaron dos integrados modelo TL084 que cuentan con cuatro amplificadores operacionales cada uno.

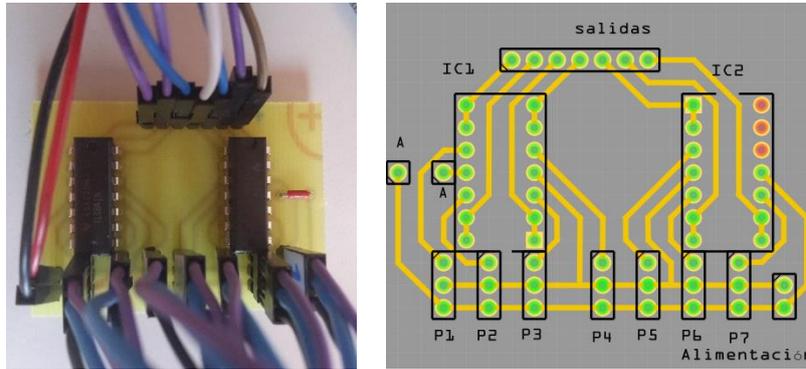


Figure 56 - Circuito acondicionador

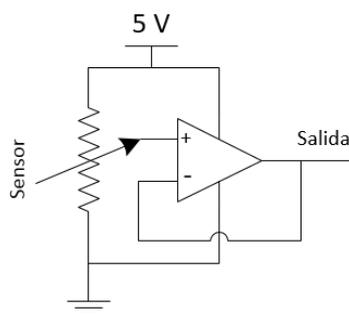


Figure 57 - Esquema del circuito acondicionador

4.8 Recursos

Se han empleado diversos recursos en la elaboración de la mano robótica que, al igual que esta, siguen la política de ser de libre distribución sin dejar de ser funcionales y potentes.

Las piezas que forman la mano se han diseñado completamente en Blender [29], una plataforma de creación que busca dar apoyo a creadores individuales y a pequeños estudios, para que tengan acceso a todas las herramientas necesarias para el diseño 3D. La gran ventaja de esta aplicación es la gran comunidad de usuarios que la sustenta, que ofrece mucha información sobre su uso y que desarrolla nuevas utilidades y herramientas constantemente. La principal desventaja es la lenta curva de aprendizaje, que requiere tiempo para adaptarse y controlar todas las herramientas que ofrece. La figura 58 muestra su interfaz.

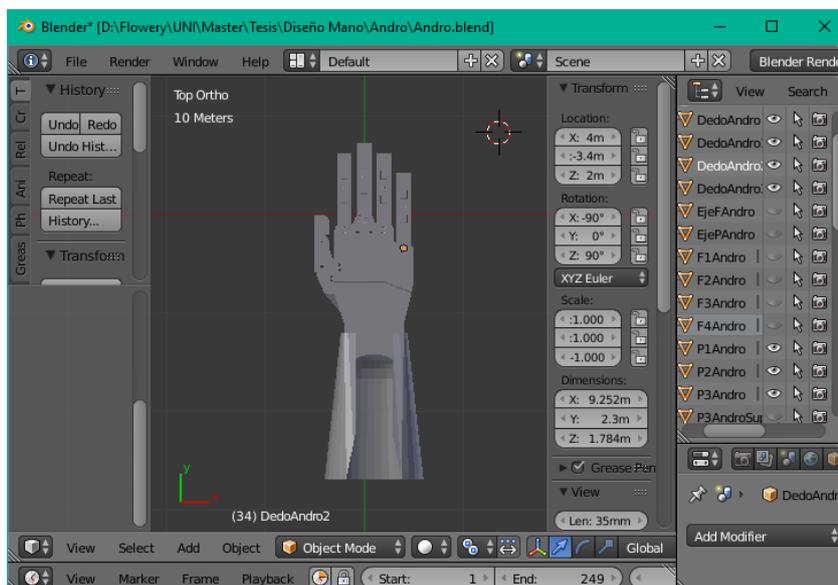


Figure 58 - Interfaz Blender

Como es una plataforma muy versátil, permite diseñar tanto de manera artística como piezas para imprimir en 3D, pero se debe tener el cuidado de verificar que las piezas diseñadas son fabricables en el mundo real y que la estructura está cerrada y bien definida.

Para convertir el diseño en un objeto físico se ha utilizado una impresora 3D modelo Prusa I3 (ver fig. 59). Este es el modelo más extendido de impresoras personales por sus buenos resultados en relación a su bajo precio. Su principal desarrollador es Josef Prusa y esta versión resuelve los errores encontrados en las versiones anteriores y en otras impresoras populares. Parte de las piezas de esta impresora son a su vez imprimibles y de libre distribución, por lo que existe una comunidad de usuarios, principalmente desde Reprap.org, que desarrollan variaciones y mejoras de las mismas. Es un diseño que evoluciona y mejora con el tiempo gracias al trabajo de la comunidad, lo cual es una de las principales ventajas de la filosofía *open source* [30].



Figure 59 - Prusa I3

La impresora 3D crea las piezas por medio de la técnica FDM (*fused deposition modeling*), depositando un filamento de plástico fundido sobre una superficie adherente, creando capa a capa la pieza diseñada. Se pueden utilizar diferentes plásticos como ABS, nylon, PET, etc., pero en este caso se ha usado PLA, un plástico biodegradable que se obtiene a partir del almidón de maíz. Es rígido y resistente, con la desventaja de que tiende a partirse sin deformarse. Una de sus principales ventajas es la biocompatibilidad, ya que no resulta tóxico ni presenta una amenaza para la salud [31].

El software que permite imprimir las piezas diseñadas es el Repetier Host (fig. 60) en conjunto con Slic3r. Repetier Host ofrece una interfaz amigable para el usuario desde la que se puede controlar y monitorizar la impresora, además de ser completamente gratuito [32]. Permite visualizar y posicionar las piezas dentro de la base de impresión y contiene el programa laminador Slic3r, entre otros, que es el responsable de traducir el modelo 3D a un conjunto de instrucciones de movimiento y extrusión para el funcionamiento de la impresora 3D [33].

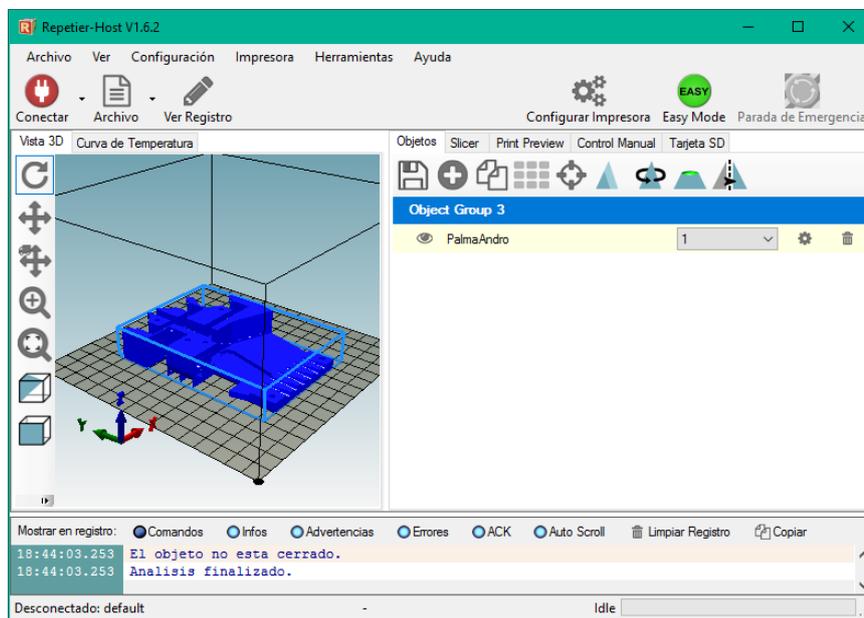


Figure 60 - Interfaz RepetierHost

Para diseñar las pistas del circuito impreso de acondicionamiento de los sensores, se utilizó la herramienta Fritzing (fig. 61), una herramienta de código abierto que permite diseñar circuitos de forma simple e intuitiva. Se pueden diseñar los circuitos sobre una protoboard virtual y luego transferir las conexiones a un circuito impreso. Su facilidad de manejo lo hace idóneo para circuitos sencillos y para usarlo en educación [34].

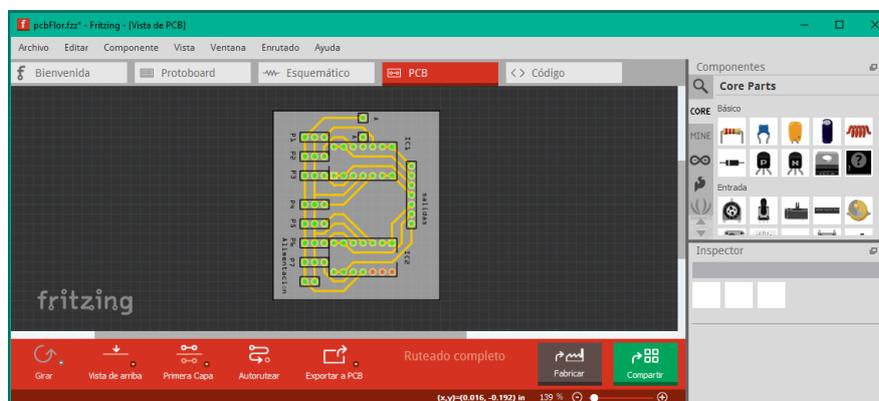


Figure 61 - Interfaz Fritzing

La plataforma idónea para compartir piezas 3D y software es Github [35]. Esta plataforma facilita el desarrollo de software, manteniendo un sistema de versiones, ramificaciones y guardando todo de forma remota en repositorios *online*. El contenido es abierto, por lo que otras personas pueden acceder a él y aprovecharlo para sus propios proyectos, o modificarlo y proponer la integración de las mejoras implementadas en el repositorio original. En lo respectivo a diseños 3D, permite publicar los diseños y visualizar los cambios que se van haciendo sobre ellos. Desde Github se accede a las piezas diseñadas en este proyecto desde el enlace: <https://github.com/FlorAndBo/Andro>.

Funcionamiento de la mano

5.1 Sistema de control

El software que controla los actuadores de la mano deriva del sistema utilizado por Villoslada et al. [28]. Se ha empleado una metodología de generación rápida de prototipos de control RCP (*rapid control prototyping*), que permite desarrollar y probar el firmware en el hardware de forma más rápida y económica frente al proceso tradicional que requiere un proceso más elaborado y costoso. El firmware está construido sobre el sistema de programación por bloques de Matlab/Simulink, que a partir de módulos de código interconectados permite desarrollar software rápidamente y dispone de una gran cantidad de herramientas para desarrollar sistemas de control potentes. Con el RCP desarrollado por la Universidad Carlos III de Madrid, generar el código, compilarlo y cargarlo al microcontrolador es un proceso fácil y automático para el usuario [36].

Es necesario instalar dos paquetes de bloques adicionales para implementar el RCP. El primero consiste en un set de bloques que ofrece gratuitamente Aimagin Ltd. que sirve para controlar casi todas las entradas y salidas del microcontrolador. El segundo set ha sido desarrollado a medida por el RoboticsLab de la universidad Carlos III de Madrid para ampliar las funcionalidades del primer conjunto de bloques, como el intercambio de datos por USB a alta velocidad o el control completo de entradas y salidas [28].

El controlador consta de dos modelos de Simulink. Un modelo es el “*target*” que contiene el controlador en sí y se ejecuta en el microcontrolador, y el segundo modelo es “*host*” que funciona desde el ordenador [36]. El modelo “*target*” tiene tres subsistemas diferenciados: la lectura de los sensores, el controlador y la comunicación USB.

La lectura de los sensores extrae la información que llega al microcontrolador de los potenciómetros, acondiciona dicha señal y modifica los valores para ser utilizados en el control. Los valores originales de los sensores se acondicionan mediante un filtro digital de paso bajo de respuesta rápida que elimina las grandes variaciones en las mediciones. Para que el cálculo de error del sistema de control funcione correctamente se necesita una señal que aumente cuando se realiza el movimiento. Se ha utilizado la lectura directa de los sensores, con sus valores en Voltios, sin utilizar ningún conversor a posición. La señal de los sensores alojados en los dedos varía desde un valor aproximado de 2,6 V en reposo hasta 1,5 V completamente flexionado, mientras que la señal del sensor de flexión del pulgar varía desde 1,4 V hasta 2,5 V. El sensor de abducción del pulgar se comporta igual que el de los dedos. Para normalizar el valor medido por los sensores, se transforma el valor de la señal de flexión de los dedos y la abducción del pulgar para que se comporten igual que la flexión del pulgar, aplicando la ecuación 1. Para normalizar la aducción de los dedos, que es decreciente, se utiliza la ecuación 2, lo que ofrece un valor en reposo de 1,4 V que aumenta hasta un valor de 3 V. La figura 62 representa este módulo.

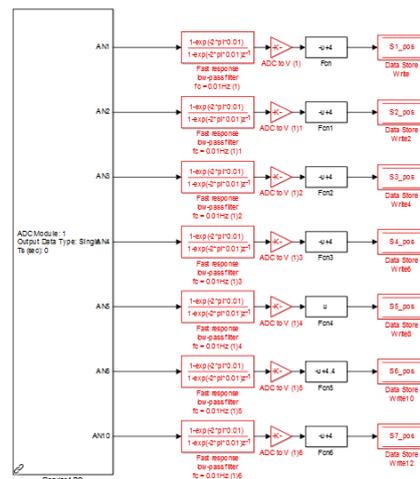


Figure 62 - Modelo de adquisición de datos de los sensores

$$S_{pos} = -u + 4 \quad (1)$$

$$S_{pos} = -u + 4,4 \quad (2)$$

El sistema de control consiste en un controlador PID junto con un compensador Bilineal (BPID). Los controladores bilineales permiten manejar sistemas no lineales, especialmente sistemas con histéresis. Una de sus ventajas frente a otras estrategias control más complejas es su simpleza y fácil implementación. Para generar la señal PWM que controla los actuadores, se parte de una referencia dada por el usuario Y_{ref} y la lectura real del sensor Y . El controlador PID define una señal PWM siguiendo la ecuación 3 y el valor resultante se multiplica por el compensador bilineal. El término bilineal sigue la ecuación 4, que compara la señal de referencia Y_{ref} en el instante actual con la señal del sensor Y en el instante anterior, lo que potencia la señal PWM cuando estos valores están alejados. El bloque controlador dispone de un interruptor que puede deshabilitar la señal del PID desde el ordenador y habilitar una señal PWM predefinida. Finalmente la señal PWM se lleva a un bloque de comunicación donde se le asigna una salida del microcontrolador. Se observa el esquema del controlador en la figura 63.

$$control(PWM) = K_p e(k) + K_i \int_0^k e(\tau) d\tau + K_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad (3)$$

$$\frac{1 + K_b Y_{ref}(k)}{1 + K_b y(k-1)} \quad (4)$$

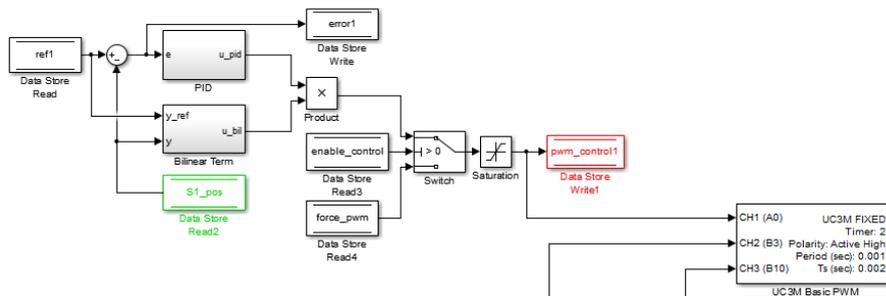


Figure 63 - Modelo controlador bilineal

El sistema de comunicación USB consta de dos bloques, un bloque receptor que sirve para recibir información desde el módulo “*host*” que se ejecuta en el ordenador y un bloque emisor que envía información del microcontrolador al ordenador. El bloque receptor almacena las señales de referencia, los valores de las ganancias P, D y Kb, y la posición del interruptor del control en sus respectivas variables, valores que el usuario puede modificar desde el “*host*”. No se incluyen en este bloque la constante I ni la señal PWM forzada porque fue necesario simplificar las señales transmitidas para no saturar la comunicación, por lo que estos dos campos no son modificables a tiempo real. El bloque emisor transmite al PC los valores de los sensores, los errores entre referencia y sensor calculados y la señal PWM generada para cada actuador. Se observa esta composición en la figura 64.

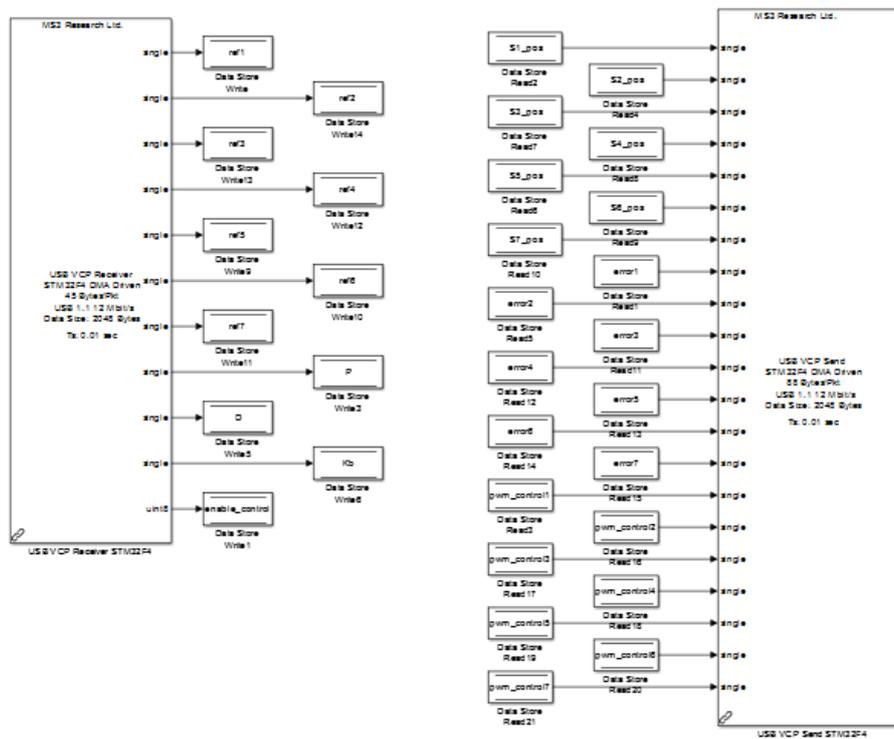


Figure 64 - Modelo de comunicaciones USB

El modelo “*host*” consta, de forma análoga al sistema de comunicación, de dos bloques, un emisor y un receptor. Las entradas del bloque emisor consisten en los valores de referencia y las ganancias P, D y Kb, introducidas mediante bloques que permiten modificar

El modelo *“target”* se carga al microcontrolador para que al ejecutarse el modelo *“host”* desde el ordenador, se comuniquen entre ellos y efectúen el control de la mano a tiempo real. Gracias a esta configuración se pueden realizar pruebas del controlador directamente sobre el hardware y solucionar problemas rápidamente si aparecen.

El primer paso para conseguir un funcionamiento correcto de la mano es definir los parámetros del sistema de control BPID. El proceso ideal sería establecer un controlador particular para cada actuador, ya que tanto las fuerzas de rozamiento entre piezas y sobre el tendón, como la tensión del elástico, modifican ligeramente el comportamiento de una articulación a otra. Al tratarse de un prototipo, el sistema RCP utilizado para implementar el sistema de control no es capaz de asumir tal cantidad de variables modificables a tiempo real, por lo que en este caso se han utilizado las mismas ganancias para los siete bucles de control, aquellas que mejor se adaptan a todos los actuadores.

Las ganancias se definen de forma empírica, asignándoles diferentes valores y comprobando la respuesta del actuador. El resultado final resulta en un controlador BPD, sin hacer uso del término integral, con los valores que refleja la tabla 6.

Kp	500
Kd	5
Ki	0
Kb	25

Table 6 - Ganancias del controlador BPID

5.2 Ensayo de funcionamiento

El diseño final impreso y montado se integra con los actuadores y el sistema de control desarrollado por Villoslada et al. [28] para comprobar su correcto funcionamiento y utilidad. Este primer prototipo no está optimizado para realizar ninguna función concreta, ya que el objetivo de este proyecto era crear un diseño simple pero versátil que sirva de base para futuras investigaciones e implementaciones. Debido a esto, las pruebas realizadas no están centradas en conseguir un control perfecto y riguroso del movimiento de la mano, sino comprobar que ofrece múltiples posibilidades de aplicación y un amplio rango de movimientos.

Para observar el comportamiento de la mano y el actuador, se va a analizar la respuesta de la mano controlada por el filtro BPD definido previamente ante diferentes patrones de señal de referencia. Se va a activar al actuador con una señal de referencia escalonada, una sinusoidal y una escalonada incremental, partiendo desde 1,7 V hasta llegar a 2,3 V. Este rango se define entre un valor mínimo al que el actuador se mantiene estable en reposo tras ser accionado previamente y un valor superior a una distancia prudencial del límite mecánico de la articulación. Se analiza el comportamiento de la flexión del dedo índice que refleja el comportamiento aproximado del resto de las flexiones.

Los resultados obtenidos de los tres ensayos se representan en las figuras 66, 67 y 68. A grandes rasgos se observa que el control sólo se efectúa en la flexión, mientras que la extensión se realiza lentamente, limitada por la disipación de calor del actuador y por la falta de tensión de los elásticos antagonistas. Una mayor tensión por parte del cordón elástico mejoraría la recuperación del actuador.

La respuesta ante la señal de escalón es de 0,6 y 0,66 segundos desde que se eleva la referencia hasta que se establece la posición en ambos escalones. Hay una ligera sobreoscilación de 0,01 V de promedio y en la mayor parte la señal se mantiene por debajo de la referencia en un promedio de 0,064 V.

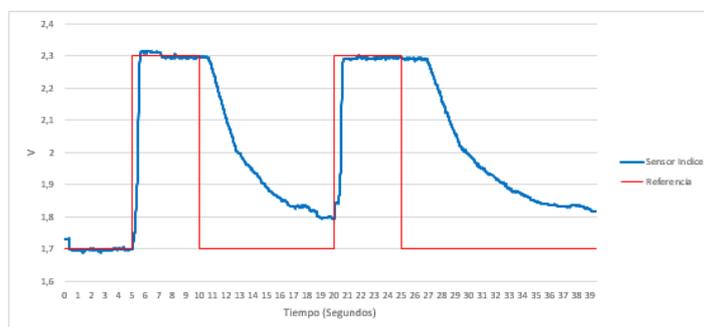


Figure 66 - Respuesta del dedo índice ante una señal de referencia escalonada

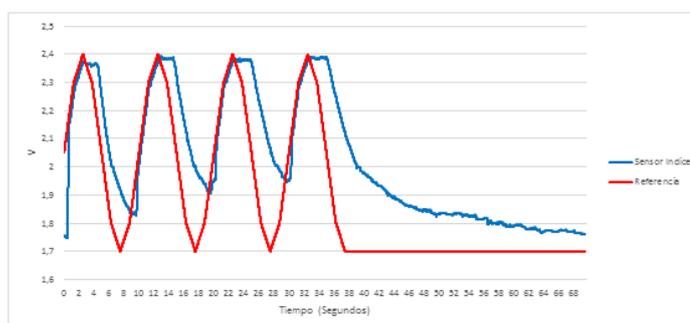


Figure 67 - Respuesta del dedo índice ante una señal de referencia sinusoidal

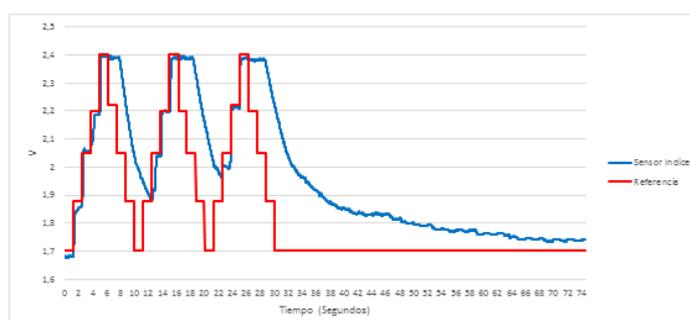


Figure 68 - Respuesta del dedo índice ante una señal de referencia escalonada incremental

Un patrón común al excitar el actuador es la aparición de un pequeño escalón justificado por las características mecánicas del dedo, ya que al movilizar la falange F3, se tensa el tendón que fija la falange F2 por lo que existe un primer pequeño movimiento donde se vence el rozamiento de F3 y seguidamente aparece el rozamiento de F2, que se vence también, quedando reflejado en la gráfica como un escalón inicial al pasar de una posición a otra.

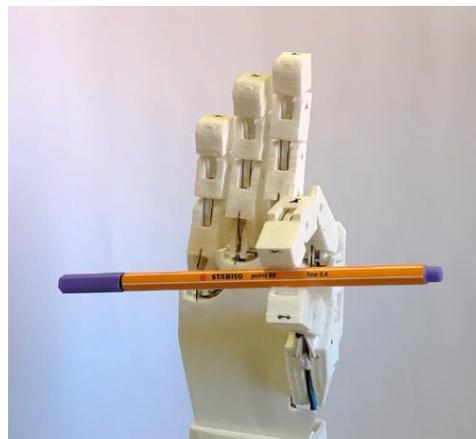
Otra característica notoria es la diferencia entre el nivel inicial de la señal, partiendo del reposo completo, y el nivel al que baja tras la activación. Se parte de una lectura de aproximadamente 1,7 V en el estado completamente extendido, sin embargo, al activar y desactivar el actuador con cualquiera de los patrones de señales, el dedo se estira hasta establecerse en una lectura de aproximadamente 1,8 V. Esta diferencia de 0,1 V se debe a que el elástico antagonista ejerce más fuerza cuando el dedo está completamente flexionado que al acercarse a su estado original, por lo que en este caso no dispone de suficiente tensión elástica para devolver el dedo a su posición original. Se debe tener en cuenta que esta diferencia de medida se refleja como una ligera flexión en el dedo, de aproximadamente 10°.

Se han encontrado dificultades con los sensores a la hora de implementar el control. Por ser un prototipo con un acondicionamiento muy simple de los sensores, se observó en estado de reposo una oscilación ligera pero constante en la señal extraída, que se observa en la señal final en la figura 68. Por dimensiones y disponibilidad se utilizaron potenciómetros analógicos multivuelta, por lo que el rango aprovechado por las articulaciones es pequeño y queda afectado por el ruido. Estas limitaciones se deberán trabajar en implementaciones futuras.

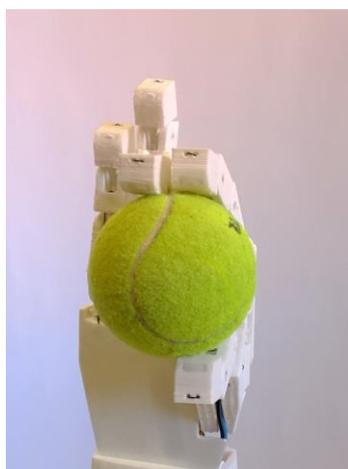
Para poner a prueba la utilidad del diseño se realizó el agarre de diversos objetos controlando manualmente la posición de los dedos. En las figuras 69, 70, 71, 72 y 73 se observa el agarre estable de una tarjeta, un bolígrafo, una pelota de tenis, una pelota de ping pong y de una botella de plástico.



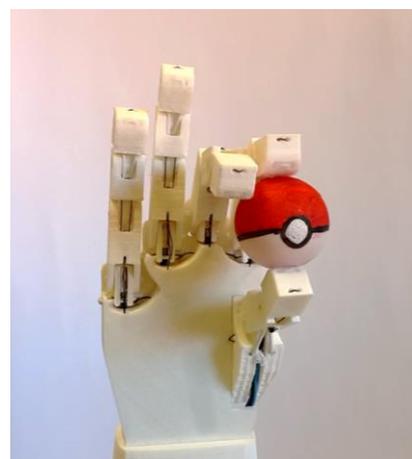
**Figure 69 -
Mano
sujetando
una tarjeta**



**Figure 70 - Mano
sujetando
bolígrafo**



**Figure 71 -
Mano
sujetando
pelota de
tenis**



**Figure 72 - Mano
sujetando pelota
de ping pong**

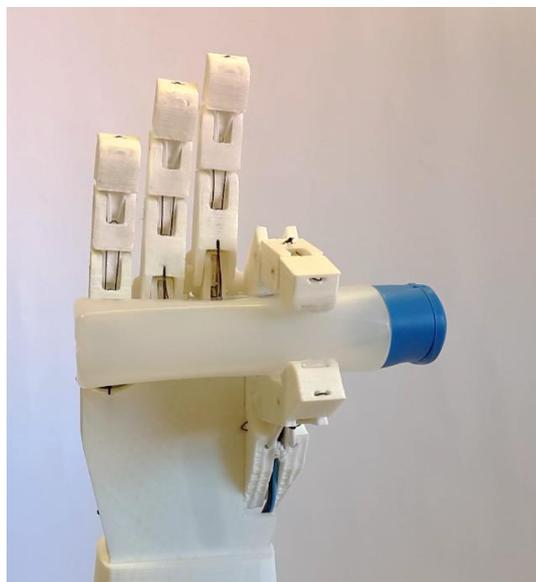


Figure 73 - Mano sujetando botella de plástico

Como se puede comprobar en las imágenes, la configuración de los dedos permite sujetar objetos grandes de forma envolvente, y también realizar agarres más precisos como con el bolígrafo. Sin embargo, para optimizar estos agarres habría que incluir sensores de presión en los dedos, a fin de controlar el movimiento en fuerza, además de posición.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

En vista de los resultados obtenidos a partir del diseño, se ven cumplidos los objetivos establecidos para la mano en su planteamiento inicial. Sus dimensiones y características antropomórficas combinadas con una estética de líneas geométricas sencillas permitirán que el diseño sea fácilmente adaptable a diversas aplicaciones. Su construcción ligera, 165 g, puede resultar ventajosa en su integración con brazos robóticos, ya que no aumenta excesivamente la inercia del brazo, a diferencia de otras manos comerciales. También resulta útil en su adaptación a prótesis, para la comodidad del usuario.

Su coste de fabricación, reflejado en el anexo 8.2, es muy reducido y los materiales necesarios son fáciles de conseguir internacionalmente. El coste de los materiales de fabricación de la mano es de 7,28 €, lo que representa un precio increíblemente bajo, e incluyendo todo el sistema de actuadores y control se alcanzan los 245,30€, que sigue estando por debajo de la gran mayoría de manos disponibles. Otros grupos de investigación pueden aprovechar esta mano como base de sus investigaciones, adaptándola a sus necesidades y a sus propios actuadores, sin que el precio sea una limitación. Con la tecnología de impresión 3D tan a mano, este prototipo es fácil de reproducir desde cualquier parte del mundo.

En lo relativo a la funcionalidad, se ha podido comprobar la versatilidad de movimientos que posee. Sus limitaciones de control se pueden resolver optando por

sensores más adecuados para el rango de movimiento de las articulaciones y dotándolos de un circuito de acondicionamiento apropiado. El sistema de control se puede mejorar y adaptar al comportamiento particular de cada articulación.

Este diseño proporciona una base sobre la que desarrollar diferentes aplicaciones. Se puede utilizar como actuador en un brazo robótico, integrando los actuadores de SMA a lo largo del brazo, ya que pueden flexionarse con el resto de articulaciones del brazo. Un actuador antropomórfico resulta útil para manipular herramientas y objetos complejos o como parte de un robot antropomórfico completo. Su principal ventaja es que se adapta a las herramientas diseñadas para humanos. Su aspecto anatómico y amigable puede ser una ventaja en aplicaciones que requieran la interacción con personas.

El coste y peso de la mano la habilita para ser usada en desarrollo de prótesis, especialmente para personas con bajos recursos o niños en desarrollo que necesitan una mano que se adapte a su crecimiento. Se pueden aprovechar las cualidades flexibles y silenciosas de los SMA para incluirlos rodeando el brazo, por lo que se moverían junto con este y no aportarían peso a la mano. Se podría controlar el cierre de la mano mediante sensores electromiográficos y diseñar una aplicación móvil que defina los patrones de agarre. Otra aplicación en este campo podría ser como parte de un mecanismo de traducción a lenguaje de signos, el lenguaje utilizado por las personas sordomudas para comunicarse mediante gestos con las manos.

Como conclusión se puede afirmar que se ha desarrollado un diseño funcional y versátil que cumple los objetivos establecidos en su planteamiento inicial, y a partir del cual se podrán desarrollar mejores tecnologías en el campo de las manos robóticas gracias a ser *open source*. La colaboración entre investigadores es fundamental para desarrollar tecnologías cada vez más complejas que mejoren la calidad de vida de las personas.

Referencias

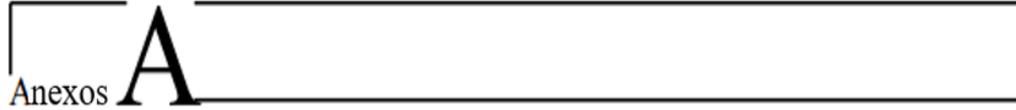
- [1] VILLOSLADA, A., et al. High-displacement fast-cooling flexible Shape Memory Alloy actuator: application to an anthropomorphic robotic hand. En 2014 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. IEEE, 2014. p. 27-32.
- [2] Inmoov. 2016. The robot hand you can print and animate. [ONLINE] Available at: <http://inmoov.fr/171/>.
- [3] LIU, Hong, et al. Multisensory five-finger dexterous hand: The DLR/HIT Hand II. En Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2008.
- [4] Shadow dextrous hand technical specification. Shadow Robot Company, 2013.
- [5] MOURI, Tetsuya, et al. Anthropomorphic robot hand: Gifu hand III. En Proc. Int. Conf. ICCAS. 2002.
- [6] LOVCHIK, C. S.; DIFTLER, Myron A. The robonaut hand: A dexterous robot hand for space. En Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on. IEEE, 1999.
- [7] MA, Raymond R.; ODHNER, Lael U.; DOLLAR, Aaron M. A modular, open-source 3d printed underactuated hand. En Robotics and Automation (ICRA), 2013 IEEE International Conference on. IEEE, 2013.
- [8] DOLLAR, Aaron M.; HOWE, Robert D. The highly adaptive SDM hand: Design and performance evaluation. The international journal of robotics research, 2010, vol. 29.
- [9] Alvaro Villoslada. 2016. Dextra. [ONLINE] Available at: <https://github.com/Alvipe/Dextra>.

- [10] Open Hand Project. 2016. Dextrus. [ONLINE] Available at: <http://www.openhandproject.org/dextrus.php>.
- [11] Open Bionics. 2016. Ada Hand Kit. [ONLINE] Available at: <http://www.openbionics.com/shop/ada>.
- [12] DOSHI, Rajiv; YEH, Clement; LEBLANC, Maurice. The design and development of a gloveless endoskeletal prosthetic hand. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 1998, vol. 35.
- [13] I-Limb quantum clinician manual. MA01333 Issue 1. Touch Bionics, 2015.
- [14] Bebionic 3, Technical Information. RSLIT Issue 4. RSL Steeper, 2014.
- [15] ANDRIANESIS, Konstantinos; TZES, Anthony. Design of an anthropomorphic prosthetic hand driven by Shape Memory Alloy actuators. *En Biomedical Robotics and Biomechanics*, 2008. BioRob 2008. 2nd IEEE RAS & EMBS International Conference on. IEEE, 2008.
- [16] O'TOOLE, Kevin T.; MCGRATH, Mark M.; COYLE, Eugene. Analysis and evaluation of the dynamic performance of SMA actuators for prosthetic hand design. *Journal of materials engineering and performance*, 2009, vol. 18.
- [17] LECCE, L., CONCILIO, A. & AMEDURI, S. 2015; 2014, *Shape memory alloy engineering: for aerospace, structural and biomedical applications*, Butterworth-Heinemann, Kidlington, England; Waltham, Massachusetts.
- [18] ANDRIANESIS, Konstantinos, et al. Experimental study of a shape memory alloy actuation system for a novel prosthetic hand. INTECH Open Access Publisher, 2010.
- [19] JANI, Jaronie Mohd, et al. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials & Design*, 2014, vol. 56, p. 1078-1113.
- [20] PONS, José L. *Emerging actuator technologies: a micromechatronic approach*. John Wiley & Sons, 2005.

- [21] TUNA, Cagdas, et al. Object shape recognition with artificial whiskers using tomographic reconstruction. En 2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2012. p. 2537-2540.
- [22] FURST, Stephen J.; BUNGET, George; SEELECKE, Stefan. Design and fabrication of a bat-inspired flapping-flight platform using shape memory alloy muscles and joints. Smart Materials and Structures, 2012, vol. 22, no 1, p. 014011.
- [23] COLORADO, J., et al. Biomechanics of smart wings in a bat robot: morphing wings using SMA actuators. Bioinspiration & biomimetics, 2012, vol. 7, no 3, p. 036006.
- [24] Festo. BionicOpter – Inspired by dragonfly flight. Festo; 2013.
- [25] TAYLOR, Craig L.; SCHWARZ, Robert J. The anatomy and mechanics of the human hand. Artificial limbs, 1955, vol. 2.
- [26] SCHLESINGER, Ing G. Der mechanische aufbau der künstlichen glieder. EnErsatzglieder und Arbeitshilfen. Springer Berlin Heidelberg, 1919.
- [27] Man-systems integration standards. NASA-STD-3000. Anthropometry and Biomechanics. Volume 1, section 2 and 3.
- [28] VILLOSLADA, A., et al. High-displacement flexible Shape Memory Alloy actuator for soft wearable robots. Robotics and Autonomous Systems, 2015, vol. 73, p. 91-101.
- [29] Blender. 2016. About. [ONLINE] Available at: <https://www.blender.org/about/>.
- [30] RepRap. 2016. Prusa i3. [ONLINE] Available at: http://reprap.org/wiki/Prusa_i3.
- [31] MARTIN, O.; AVEROUS, L. Poly (lactic acid): plasticization and properties of biodegradable multiphase systems. Polymer, 2001, vol. 42, no 14, p. 6209-6219.
- [32] Repetier. 2016. Repetier-Host. [ONLINE] Available at: <https://www.repetier.com/>.
- [33] Slic3r. 2016. About. [ONLINE] Available at: <http://slic3r.org/about>.
- [34] Fritzing. 2016. Fritzing Homepage. [ONLINE] Available at: <http://fritzing.org/home/>.

[35] Github. 2016. Open-Source. [ONLINE] Available at: <https://github.com/open-source>.

[36] VILLOSLADA, Álvaro, et al. Position control of a shape memory alloy actuator using a four-term bilinear PID controller. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, vol. 236, p. 257-272.



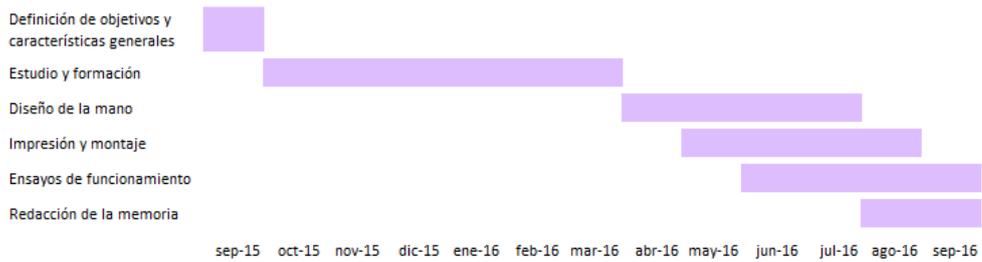
Anexos

8.1 Tiempo de desarrollo

A continuación se van a detallar las fases implicadas en el desarrollo del proyecto y el tiempo dedicado a cada una de ellas. Se representa el proceso de forma visual en el diagrama de Gantt de la tabla 7.

- Definición de objetivos y características generales (2 h): Reuniones iniciales para delimitar el alcance del proyecto y sus principales características, sobre las que basar el desarrollo del diseño.
- Estudio y formación (120 h): Tiempo dedicado a la investigación del estado del arte, aspectos anatómicos de la mano y familiarización con el programa de modelado 3D Blender.
- Diseño de la mano (360h): El proceso de diseño de cada una de las piezas constituyentes del mecanismo se hizo de forma gradual, empezando por el diseño de un dedo funcional, la parte superior de la palma que los incluye, el pulgar y por último el resto de la palma.
- Impresión y montaje (180 h): El proceso de prototipado con una impresora 3D requiere mucho tiempo y en ocasiones incluso modificar la orientación o la propia geometría de la pieza para realizarlo con éxito.

- Ensayos de funcionamiento (80 h): Cada prototipo se puso a prueba para comprobar que realizaba correctamente las funciones deseadas. Sobre el modelo final se realizaron pruebas con el sistema de actuación y control completo.
- Redacción de la memoria (120 h): Se refleja el tiempo destinado a documentar y plasmar el proceso completo de diseño.
- Tiempo total de desarrollo del proyecto: 862 h.

Table 7 - Diagrama de Gantt

8.2 Presupuesto

Se va a detallar en las siguientes tablas el coste del proyecto organizado por categorías para poder analizar su verdadero coste.

Table 8 - Material de fabricación

MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Plástico PLA	0,2 Kg	26,24 €/kg	5,248
Tornillos M3 x 12 mm	3 u	0,0265 €/u	0,08 €
Tornillos M3 x 20 mm	2 u	0,0265 €/u	0,05 €
Tuercas M3	13 u	0,0265 €/u	0,34 €
Clips oficina	1 u	0,00048 €/u	0,00 €
Cordón elástico	1,25 m	0,40 €/m	0,50 €
Hilo de aluminio plastificado	3 m	0,35 €/m	1,05 €

Table 9 - Material para actuadores y sistema de control

MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	TOTAL
Filamentos SMA	4,70 m	8,90 €	41,83 €
Cable Bowden	4,55 m	2,50 €	11,38 €
Tubo teflón	4,55 m	0,88 €	4,00 €
Crimps	7 u	0,04 €	0,29 €
Tornillos M3 x 12 mm	7 u	0,03 €	0,19 €
Sensores rotación 3382	6 u	2,14 €	12,84 €
Sensor lineal PTA2043	1 u	1,01 €	1,01 €
Cable flexible 0,5 mm	25 m	0,17 €	4,13 €
Conector pin macho	30 u	0,02 €	0,57 €
conector hembra	65 u	0,27 €	17,62 €
PCB	1 u	1,00 €	1,00 €
Amplificador operacional TL084	2 u	0,55 €	1,10 €
STM32F4 Discovery	1 u	14,17 €	14,17 €
Cable USB	2 u	3,95 €	7,90 €
Placa drivers	1 u	120,00 €	120,00 €

Table 10 - Coste herramientas

	PRECIO	VIDA ÚTIL	USO	COSTE
PC	800 €	60 meses	12 meses	160,00 €
impresora 3D Prusa i3	500 €	48 meses	4 meses	41,67 €
Licencia Matlab/Simulink (Student)	69 €	48 meses	1 mes	1,44 €

Table 11 - Coste recursos humanos

	COSTE HORA	HORAS TRABAJADAS	COSTE
Ingeniero Junior	17 €/h	862 h	14.654,00 €

Table 12 - Coste total

FABRICACIÓN MANO	7,28 €
ACTUADORES Y SISTEMA DE CONTROL	238,02 €
HERRAMIENTAS	203,10 €
RECURSOS HUMANOS	14.654,00 €
TOTAL	15.102,40 €



8.3 Hojas de características

Las siguientes hojas representan las hojas de características correspondientes a los sensores y actuadores utilizados en este proyecto.





DYNALLOY, Inc.
Makers of Dynamic Alloys

Technical Characteristics of



Actuator Wires

Flexinol® Actuator Wires are small diameter wires which contract like muscles when electrically driven. Smaller than motors or solenoids, cheaper and generally easier to use, these wires perform physical movement across an extremely wide variety of applications.

Table of Contents

Physical Properties Summary	2
Introduction	3
Section 1. Movement	4
Section 2. Electrical Guidelines	6
Section 3. Cycle Time	7
Section 4. Miscellaneous	9
Section 5. Underlying Technology	11

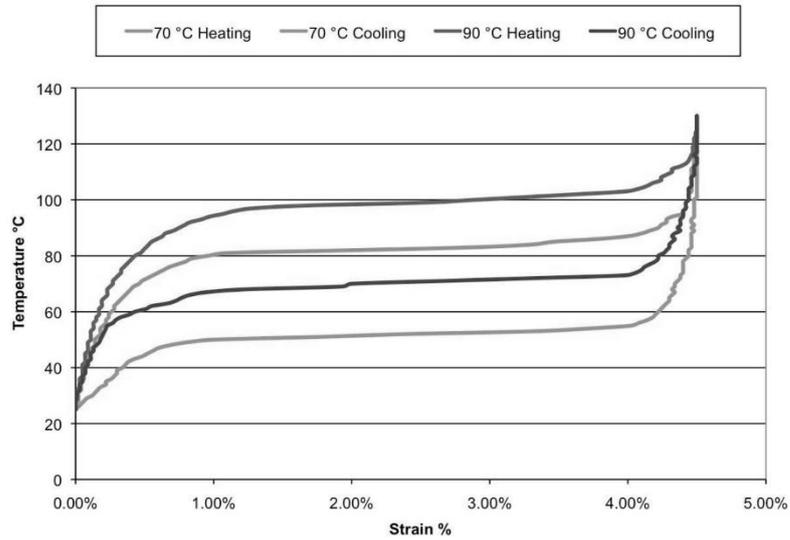


DYNALLOY, Inc.
Makers of Dynamic Alloys

NICKEL - TITANIUM ALLOY PHYSICAL PROPERTIES

1. Density	0.235 lb/in ³ (6.45 g/cm ³)
2. Specific Heat	0.20 BTU/lb * °F (0.2 cal/g * °C)
3. Melting Point	2370 °F (1300 °C)
4. Latent Heat of Transformation	10.4 BTU/lb (5.78 cal/g)
5. Thermal Conductivity	10.4 BTU/hr * ft * °F (0.18 W/cm * °C)
6. Thermal Expansion Coefficient	
Martensite	3.67x10 ⁻⁶ /°F (6.6x10 ⁻⁶ /°C)
Austenite	6.11x10 ⁻⁶ /°F (11.0x 10 ⁻⁶ /°C)
7. Electrical Resistivity (approx.)	
Martensite:	32 micro-ohms * in (80 micro-ohms * cm)
Austenite:	39 micro-ohms * in (100 micro-ohms * cm)

14762 Bentley Circle, Tustin, California 92780 USA 714-436-1206 714-436-0511 fax <http://www.dynalloy.com>



Typical Temperature vs. Strain Characteristics for Dynalloy's standard 158°F (70°C) "LT" and 194°F (90°C) "HT" Austenite start temperature alloys, at 172 MPa



DYNALLOY, Inc.
Makers of Dynamic Alloys

Introduction

Flexinol® is a trade name for shape memory alloy actuator wires. Made of nickel-titanium these small diameter wires contract like muscles when electrically driven. This ability to flex or shorten is characteristic of certain alloys that dynamically change their internal structure at certain temperatures. The idea of reaching higher temperatures electrically came with the light bulb, but instead of producing light these alloys contract by several percent of their length when heated and can then be easily stretched out again as they cool back to room temperature. Like a light bulb both heating and cooling can occur quite quickly. The contraction of Flexinol® actuator wires when heated is opposite to ordinary thermal expansion, is larger by a hundredfold, and exerts tremendous force for its small size. The underlying technology that causes the effect is discussed in Section 5. The main point is that movement occurs through an internal "solid state" restructuring in the material that is silent, smooth, and powerful.

This effect can be used in many ways. The list of viable applications is too long for any single listing. A safe assumption is that any task requiring physical movement in a small space with low to moderate cycling speeds is something that most likely will be better done with actuator wires. Many of the tasks currently being done with small motors or solenoids can be done better and cheaper with Flexinol® actuator wires. Since the actuator wires are much smaller for the work they do a number of new products and improved designs on existing products are readily accomplished.

For new users of Flexinol® actuator wires Dynalloy, Inc. strongly recommends that an overview of what can be done first be established. This can be done by obtaining one of the Dynalloy, Inc. kits, which are made for such familiarization. Secondly, new users should consider obtaining from Dynalloy, Inc. or other consultants a "Proof of Concept" working model. This is not only useful as an internal marketing and sales tool, it also helps the new user to see how those with more experience approach the specific task in hand. Knowing this provides immeasurable insight into how to proceed and helps reduce the redundancy of reinventing existing techniques. One can always improve on existing methods and sufficient legal and other safeguards can be readily employed to ensure protection of proprietary ideas.

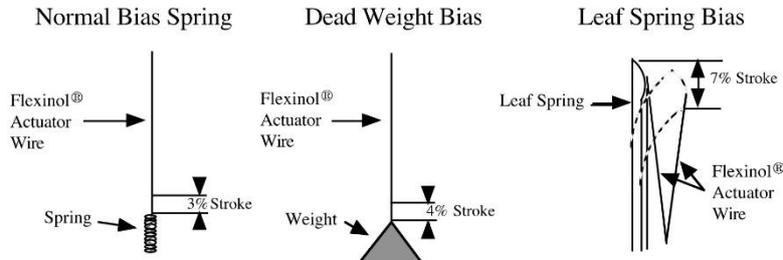


DYNALLOY, Inc.
Makers of Dynamic Alloys

Section 1. Movement

The movement or stroke of Flexinol® actuator wire is measured as a percentage of the length of the wire being used and is determined, in part, by the level of stress one uses to reset the wire, or to stretch it in its low temperature phase. This opposing force, used to stretch the wire, is called the bias force. In most applications, the bias force is exerted on the wire constantly, and on each cycle as the wire cools, this force elongates it. If no force is exerted as the wire cools, very little deformation or stretch occurs in the cool, room temperature state and correspondingly very little contraction occurs upon heating. Up to a point the higher the load the higher the stroke. The strength of the wire, its pulling force and the bias force needed to stretch the wire back out are a function of the wire size or cross sectional area and can be measured in pounds per square inch or "psi". If a load of 5,000 psi (34.5 MPa) is maintained during cooling, then about 3% memory strain will be obtained. At 10,000 psi (69 MPa), about 4% results, and with 15,000 psi (103 MPa) and above, nearly 5% is obtained. However, there is a limit to how much stress can be applied.

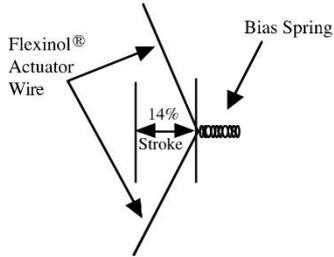
Far more important to stroke is how the wire is physically attached and made to operate. Dynamics in applied stress and leverage also vary how much the actuator wires move. While normal bias springs that increase their force as the Flexinol® actuators contract have only 3-4% stroke, reverse bias forces which decrease as the actuator wires contract can readily allow the wire to flex up to 7%. Mechanics of the device in which it is used can convert this small stroke into movements over 100% of the wires' length and at the same time provide a reverse bias force. The stress or force exerted by Flexinol® actuator wires is sufficient to be leveraged into significant movement and still be quite strong. Some basic structures, their percent of movement, and the approximate available force they offer in different wire sizes are as follows:



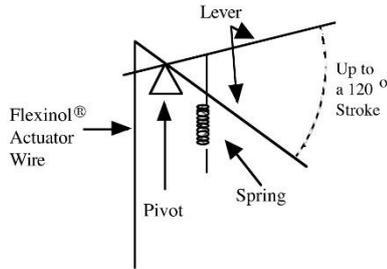


DYNALLOY, Inc.
Makers of Dynamic Alloys

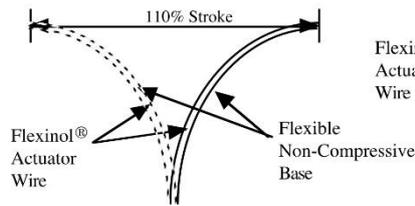
Right Angle Pull



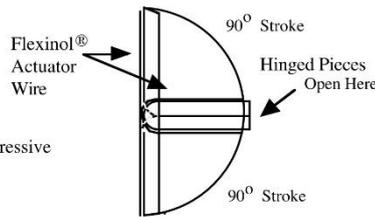
Simple Lever



Adjusting Curvature



Clam Shell



14762 Bentley Circle, Tustin, California 92780 USA 714-436-1206 714-436-0511 fax <http://www.dynalloy.com>

Stroke and Available Force Table

	Approx. Stroke	0.003" Wire (0.076 mm)	0.006" Wire (0.15 mm)	0.010" Wire (0.25 mm)
Normal Bias Spring	3%	0.18 lb (80 g)	0.73 lb (330 g)	2.05 lb (930 g)
Dead Weight Bias	4%	0.18 lb (80 g)	0.73 lb (330 g)	2.05 lb (930 g)
Leaf Spring Bias	7%	0.18 lb (80 g)	0.73 lb (330 g)	2.05 lb (930 g)
Right Angle Pull	14%	0.04 lb (20 g)	0.18 lb (83 g)	0.51 lb (232 g)
Simple Lever (6:1 ex)	30%	0.024lb (11 g)	0.10 lb (47 g)	0.29 lb (133 g)
Adjusting Curvature	110%	0.006 lb (3 g)	0.026 lb (12 g)	0.075 lb (34 g)
Clam Shell	100%	0.007 lb (3.2 g)	0.028 lb (13 g)	0.082 lb (37 g)



DYNALLOY, Inc.
Makers of Dynamic Alloys

Section 2. Electrical Guidelines

If Flexinol® actuator wire is used in the appropriate conditions then obtaining repeatable motion from the wire for tens of millions of cycles is reasonable. If higher stresses or strains are imposed, then the memory strain is likely to slowly decrease and good motion may be obtain for only hundreds or a few thousands of cycles. The permanent deformation that occurs in the wire during cycling is heavily a function of the stress imposed and the temperature under which the actuator wire is operating. Flexinol® wire has been specially processed to minimize this straining, but if the stress is too great or the temperature too high some permanent strain will occur. Since temperature is directly related to current density passing through the wire care should be taken to heat, but not overheat, the actuator wire. The following charts give rough guidelines as to how much current and force to expect with various wire sizes.

Diameter Size inches (mm)	Resistance ohms/inch (ohms/meter)	Pull Force* pounds (grams)	Approximate** Current for 1 Second Contraction (mA)	Cooling Time 158°F, 70°C "LT" Wire *** (seconds)	Cooling Time 194°F, 90°C "HT" Wire *** (seconds)
0.001 (0.025)	36.2 (1425)	0.02 (8.9)	45	0.18	0.15
0.0015 (0.038)	22.6 (890)	0.04 (20)	55	0.24	0.20
0.002 (0.050)	12.7 (500)	0.08 (36)	85	0.4	0.3
0.003 (0.076)	5.9 (232)	0.18 (80)	150	0.8	0.7
0.004 (0.10)	3.2 (126)	0.31 (143)	200	1.1	0.9
0.005 (0.13)	1.9 (75)	0.49 (223)	320	1.6	1.4
0.006 (0.15)	1.4 (55)	0.71 (321)	410	2.0	1.7
0.008 (0.20)	0.74 (29)	1.26 (570)	660	3.2	2.7
0.010 (0.25)	0.47 (18.5)	1.96 (891)	1050	5.4	4.5
0.012 (0.31)	0.31 (12.2)	2.83 (1280)	1500	8.1	6.8
0.015 (0.38)	0.21 (8.3)	4.42 (2250)	2250	10.5	8.8
0.020 (0.51)	0.11 (4.3)	7.85 (3560)	4000	16.8	14.0

* The pulling force is based on 25,000 psi (172 MPa), which for many applications is the maximum safe stress for the wire. However, many applications use higher and lower stress levels. This depends on the specific conditions of a given design.

** The contraction time is directly related to current input. The figures used here are only approximate since room temperatures, air currents, and heat sinking of specific devices vary. On small diameter wires (<= 0.006" diameter) currents that heat the wire in 1 second can typically be left on without over-heating it.

*** Approximate cooling time, at room temperature in static air, using a vertical wire. The last 0.5% of deformation is not used in these approximations.

F1140Rev H



DYNALLOY, Inc.
Makers of Dynamic Alloys

Section 3. Cycle Time

The contraction of the Flexinol® actuator wire is due solely to heating and the relaxation solely to cooling. Both contraction and relaxation are virtually instantaneous with the temperature of the wire. As a result mechanical cycle speed is dependent on and directly related to temperature changes. Applying high currents for short periods of time can quickly heat the wire. It can be heated so fast in fact that the limiting factor is not the rate at which heating can occur but rather the stress created by such rapid movement. If the wire is made to contract too fast with a load, the inertia of the load can cause over stress to the wire. To perform high speed contractions inertia must be held low and the current applied in short high bursts. Naturally, current which will heat the wire from room temperature to over 212 °F (100 °C) in 1 millisecond, will also heat it much hotter if left on for any length of time.

While each device has quite different heat sinking and heating requirements, a simple rule of thumb test can be used to prevent overheating. Measuring the actual internal temperature of the wire across such short time periods is somewhat problematic, however, one can tell if the actuator wire is overheated simply by observing if the wire immediately begins to cool and relax when the current is shut off or not. If it does not begin to relax and elongate under a small load promptly, when the power is cut, then the wire has been needlessly overheated and could easily be damaged. Simple visual observation is all that is needed to design measured heating circuitry.

Flexinol® actuator wire has a high resistance compared to copper and other conductive materials but is still conductive enough to carry current easily. In fact one can immerse the wire in regular tap water and enough current will readily flow through it to heat it. All of the conventional rules for electrical heating apply to the wire, except that its resistance goes down as it is heated through its transformation temperature and contracts. This is contrary to the general rule of increased resistance with increased temperature. Part of this drop in resistance is due to the shortened wire, and part is due to the fact that the wire gets thicker as it shortens, roughly maintaining its same three-dimensional volume. It makes no difference to the wire whether alternating current, direct current, or pulse width modulated current is used.

Again relaxation time is the same as cooling time. Cooling is greatly affected by heat sinking and design features. The simplest way to improve the speed of cooling is to use smaller diameter wire. The smaller the diameter the more surface to mass the wire has and the faster it can cool. Additional wire, even multiple strands in parallel, can be used in order to exert whatever force is needed. The next factor in improving the relaxation or cooling time is to use higher temperature wire. This wire contracts and relaxes at higher temperatures. Accordingly the temperature differential between ambient or room temperature and the wire temperature is greater and correspondingly the wire will drop below the transition temperature faster in response to the faster rate of heat loss.

Other methods of improved cooling are to use: forced air, heat sinks, increased stress (this raises the transition temperature and effectively makes the alloy into a higher transition temperature wire), and liquid coolants. Combinations of these methods are also effective. Relaxation time can range from several minutes (i.e. delay switches) to fractions of milliseconds (i.e. miniature high speed pumps) by effective and proper heat sinking. The following page gives some idea of the effect these various methods have.



DYNALLOY, Inc.
Makers of Dynamic Alloys

Relative Effects of Cooling Methods

	Improvement in Speed
Increasing Stress	1.2:1
Using Higher Temperature Wire	2:1
Using Solid Heat Sink materials	2:1
Forced Air	4:1
Heat Conductive Grease	10:1
Oil Immersion	25:1
Water with Glycol	100:1

*These improvements are not accumulative on the same basis when used together.

Better cooling methods are likely to require more current or heat to move and/or hold the wire in an "on" position. In some cases one may wish to quickly turn the wire on (that is electrically heat it until it contracts) then hold it on for some time. This will likely require a two-step driving current with a larger current to heat the wire and a reduced current to keep it hot without overheating it. There are a number of simple circuits, which will do this.



DYNALLOY, Inc.
Makers of Dynamic Alloys

Section 4. Miscellaneous

Cutting - Flexinol® actuator wire is a very hard and anti-corrosive material. It is so hard that cutting it with cutters designed to cut copper and soft electrical conductors will damage the cutters. If you plan to do much work with Flexinol® actuator wires a good high quality pair of cutters like those used to cut stainless steel wires will be a good investment.

Attaching - Attaching Flexinol® actuator wires to make both a physical and an electrical connection can be done in several ways. It can be attached with screws, wedged onto a PC board, glued into a channel with conductive epoxies, and even tied with a knot. The simplest and best way is usually by crimping or splicing. With crimping machines both electrical wires and hooks or other physical attachments can be joined at once. Flexinol® wires tends to maintain the same volume, so when they contract along their length, they simultaneously grow in diameter. This means the wires expand inside the crimps and hold more firmly as the stress increases through pulling. While this works to the advantage in crimps it can be a disadvantage if glues or solder is used, as the material tends to work itself loose in those cases. Flexinol® wire is a very strong material and is not damaged by the crimping process. Dynalloy, Inc. can provide wire that is already crimped at specified intervals. One can then solder or spot-weld to the crimps if such manufacturing methods are preferred.

Accompanying Materials - Flexinol® actuator wires work by internal resistance or other heating methods. Their temperature is often over 212 °F (100 °C) and they often apply pressure with a high force over a small area of the device they are attached to, so it is a good idea to use temperature resistant materials in connection with them. Such materials if used in direct contact with the wire will also need to be non conductive so as to not provide an electrical path around the Flexinol® actuator wire. Silicone rubber, Kapton (used to make flexible circuit boards), ceramics, and glass are good examples.

Strain Reliefs - Over stress can damage Flexinol® wires by permanently stretching (or elongating) them or by reducing the stroke over which they contract. To prevent this one should design products with strain reliefs in them. Care should also be taken to prevent manual interference with their contraction or movement as this can over stress the wire. In other words if the device gets stuck and cannot move or is forced backwards while operating a problem can be created breaking or adversely affecting the actuator wires' performance. Protective measures against this should be used.

Reverse Biases - Although Flexinol® actuator wire moves about 4.5% when lifting a weight or when contracting against a constant force, one can improve this stroke by designing mechanisms which have a reverse bias force. The bias force is the force that elongates the wire in its rubber-like martensitic phase. A reverse bias force is one that gets weaker as the stroke gets longer. This can be done with leaf springs or with designs that give the Flexinol® actuator wires a better mechanical advantage over the bias spring or force as the stroke progresses.

Performance Margins - Although very stable compared to other similar alloys Flexinol® actuator wires will permanently stretch out or strain with large cycles strokes and high stresses. At stresses below 15,000 psi (103 MPa), permanent strain will remain less than 0.5% strain even after hundreds of thousands of cycles. At 20,000 psi (138 MPa), perhaps 1% permanent strain will occur after 100,000 cycles, and with higher stresses proportionally more will occur.



DYNALLOY, Inc.
Makers of Dynamic Alloys

Section 4. Miscellaneous cont'd.

Good engineering design dictates that one should take into account the amount of memory strain, possible small decreases in the amount of that strain during operation, and some permanent deformation of the wire during cycling if the design is to meet expectations. Pushing all performance aspects of the wire to the limit from the outset of its cycling is likely to lead to disappointment at an early stage in the product life.

Longevity Testing - Flexinol® actuator wire can be over stressed and damaged even though it seems to be working. Much like actual muscles can be strained when called upon to do work above their actual capacity. The device may work in such a way that it is difficult to calculate the actual stresses involved. A good suggestion is to perform life cycle tests before assuming that a device which has worked a few times will continue to work millions more times. Fatigue which is damaging to Flexinol® actuator wire will usually show up in the form of wire elongation or reduced stroke within the first few hundred strokes. As one works with the material a "feel" for what is "working" will develop. The best rule of thumb is to use enough Flexinol® actuator wire to be sure one is well within the parameters in which it can work.

Precise Positioning - Given close temperature control under a constant stress one can get quite precise position control. Control in microns or less is to be expected. The problem is precise temperature control. The temperature is determined by an equilibrium between the rate of heating and the rate of cooling. Heating by electricity makes control of that easy, but the cooling is dynamically affected by changes in room temperature, airflow and so on. In practical terms this means that precise control is usually not feasible unless one can control the heat loss or has dynamic feedback through a closed loop system and can use this to control the heating rate.

Contact Dynalloy, Inc. Freely - There is no practical way for the authors to include everything that has been learned or will be learned in this short document. We have thousands of customers who call and contribute to our general understanding of typical application solutions. In most cases, we have already encountered problems which seem new to the first time user, so whenever possible we are happy to pass on these suggestions and be of help. We want your project to succeed, so please do not hesitate to call for assistance.



DYNALLOY, Inc.
Makers of Dynamic Alloys

Section 5. Underlying Technology

Flexinol® is a trade name for very high performance, shape memory alloy, actuator wires. Made of nickel-titanium these small diameter wires have been specially processed to have large, stable amounts of memory strain for many cycles. In other words, they contract like muscles when electrically driven. This ability to flex or shorten is characteristic of certain alloys that dynamically change their internal structure at certain temperatures. Flexinol® wires contract by several percent of their length when heated and then easily elongate again by a relatively small load when the current is turned off and they are allowed to cool.

The function of the Flexinol® wire is based on the shape memory phenomenon which occurs in certain alloys in the nickel-titanium family. When both nickel and titanium atoms are present in the alloy in almost exactly a 50%/50% ratio, the material forms a crystal structure which is capable of undergoing a change from one crystal form to another (a martensitic transformation) at a temperature determined by the exact composition of the alloy. In the crystal form that exists above the transformation temperature (the austenite) the material is high strength and not easily deformed. It behaves mechanically much like stainless steel. Below the transformation temperature, though, when the other crystal form (the martensite) exists, the alloy can be deformed several percent by a very uncommon deformation mechanism that can be reversed when the material is heated and transforms. The low temperature crystal form of the alloy will undergo the reversible deformation fairly easily, so the "memory" strain can be put into the material at rather low stress levels.

The resultant effect of the shape memory transformation of the Flexinol® wire is that the wire can be stretched about 4-5% of its length below its transformation temperature by a force of only 10,000 psi (69 MPa) or less. When heated through the transformation temperature, the wire will shorten by the same 4-5% that it was stretched, and can exert stresses of at least 25,000 psi (172 MPa) when it does so. The transformation temperature of the NiTi alloys can be adjusted from over 212 °F (100°C) down to cryogenic temperatures, but the temperature for the Flexinol® actuator wire has been chosen to be 140 – 230 °F (60 - 110 °C). This allows easy heating with modest electrical currents applied directly through the wire, and quick cooling to below the transformation temperature as soon as the current is stopped. Heating with electrical current is not required, but it is perhaps the most convenient and frequently used form of heat.

Flexinol® actuator wires' prime function is to contract in length and create force or motion when it is heated. There are limits, of course, to how much force or contraction can be obtained. The shape memory transformation has a natural limit in the NiTi system of about 8%. That is the amount of strain that can occur in the low temperature phase by the reversible martensitic twinning which yields the memory effect. Deformation beyond this level causes dislocation movement throughout the structure and then that deformation is not only non-reversible but degrades the memory recovery as well. For materials expected to repeat the memory strain for many cycles, it is best to utilize a cyclic memory strain of no more than 4-5%, and that is what is recommended with Flexinol® actuator wire.

The force that the Flexinol® actuator wire can exert when heated is limited by the strength of the high temperature austenitic phase. The phase transformation, or crystal change, that causes the memory effect has more driving force than the strength of the parent material, so one must use care not to exceed that yield strength. The yield strength of Flexinol®'s high temperature phase is over 50,000 psi (345 MPa), and on a single pull the wire can exert this force. To have repeat cycling, however, one should use no more than 2/3 of this level, and forces of 20,000 psi (138 MPa) or below give the best repeat cycling with minimal permanent deformation of the wire.

F1140Rev H



DYNALLOY, Inc.
Makers of Dynamic Alloys

ACTUATOR WIRE
*A SOLID STATE ACTUATOR THAT MOVES BY
"MOLECULAR RESTRUCTURING"!*

FOR BETTER MECHANICAL PERFORMANCE...

- In really tight places - Flexinol® actuator wires are smaller by far than alternatives. At least 1,000 times smaller than solenoids for the same work done.
- To simplify designs - Flexinol® actuator wires can often be used "as is", eliminating gear boxes, housings, bearings, and so on. Their flexible forgiving performance is easier to work with.
- In corrosive environments - Flexinol® actuator wires' high corrosion resistance really pays off.
- To reduce noise levels - Flexinol® actuator wires' movement by molecular restructuring is both electrically and acoustically quiet.
- To lower costs - Flexinol® actuator wires are inexpensive to buy and cost less to use in many applications. A nice combination for that bottom line.

SAMPLE APPLICATIONS

ELECTRONICS

Micro Circuit Breakers
PC Mount Relays
Chassis Temp. Controls
Electronic Locks
PC Mount Pilot Valves
Mechanical Latches
Subminiature Door Openers
Micro Manipulators
Retrofit Switch to Relay
Micro Clutches
Spring Loaded Releases
Board Temperature Sensors
"Clean" Actuators
Remote Switch Controllers
Read/Write Head Lifters

MEDICAL

Intravenous Med. Controllers
Steerable Catheters
Prosthetic Limbs
Surgical Instruments
Braille Displays

Vacuum Test Manipulators
Micro Pumps
Blood Pressure Test Valve
Exoskeletal Assistance

AUTOMOTIVE

Door Locks
Environmental Controls
Gear Changing Triggers
Clutch Engagement Triggers
Mirror Controls
Heater Cutoff/Sensors
Pneumatic Valve
Remote Latches
Remote Releases
Alarm Devices

APPLIANCES

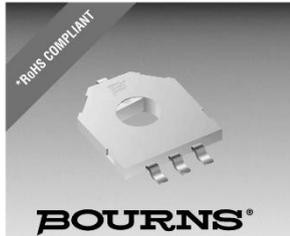
Moving Louvers
Spring Releases
Door Openers
Electronic Locks

Mechanical Volt. Regulator
Mechanical Curr. Regulator
Motor Protectors
Box Temperature Control
Overheating Controllers
Hair Dryer Cutoff/Sensors
Safety Cutoffs

MISCELLANEOUS

Ultralight Remote Control
Mechanical Scanners
Camera Manipulators
Magnetic Free Positioners
Manipulator Safety
PC Cutoffs
Fiber Gate
Camera Shutters
Cuckoo Clocks
Alarm Devices Light
Light Fiber Switches
Smart Materials
Mechanical IC's
Robotic Limbs

Flexinol® Actuator Wires are small diameter wires which contract like muscles when electrically driven. Smaller than motors or solenoids, cheaper and generally easier to use, these wires perform physical movement for an extremely wide variety of applications.



Features

- Surface mount and through-hole versions
- 12 mm Square / Dustproof
- One million rotational cycles
- Thin profile
- RoHS compliant*

Applications

- Volume control on audio equipment
- Motion controllers
- Dishwasher control systems
- Automotive temperature range

3382 - 12 mm Rotary Position Sensor

Electrical Characteristics

Standard Resistance Range 2.5K to 100K ohms
 Resistance Tolerance ±30 % std.
 Linearity ±2 %
 Resolution Essentially infinite
 Insulation Resistance @ 500 VDC 100 megohms min.
 Dielectric Strength
 Sea Level 500 VAC
 70,000 Feet 350 VAC
 Adjustment Angle 330 ° nom.

Environmental Characteristics

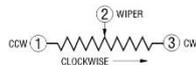
Power Rating (16 volts max.)
 50 °C 0.05 watt
 120 °C 0 watt
 Operating Temperature Range
 -40 °C to +120 °C
 Temperature Coefficient ±500 ppm/°C
 Humidity 20 G TRS ±10 %; TRS ±20 %
 Shock 20 G TRS ±10 %; VRS ±10 %
 Load Life @ 50 °C Rated Power
 TRS +10/-20 %
 Rotational Life 1,000,000 cycles
 TRS ±20 %
 Thermal Shock 5 cycles
 TRS ±20 %; VRS ±10 %

Physical Characteristics

Mechanical Angle Continuous rotation
 Torque 30 gf-cm max.
 Weight Approximately 0.0321 g
 Marking Resistance code and date code
 Standard Packaging
 G Style 1000 pcs./13 " reel
 H Style 50 pcs./tube
 IP Rating IP40

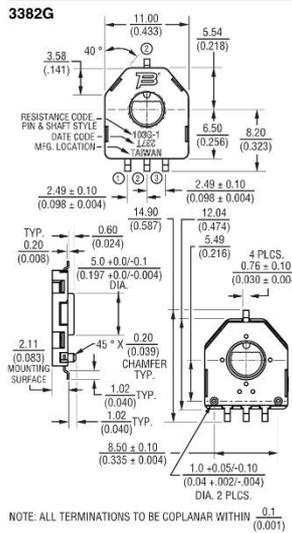
Standard Resistance Table

Resistance (Ohms)	Resistance Code
2,500	252
5,000	502
10,000	103
25,000	253
50,000	503
100,000	104

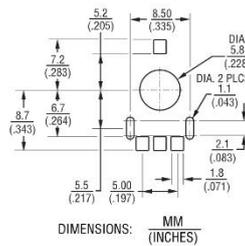


*RoHS Directive 2002/95/EC Jan. 27, 2003 including annex and RoHS Recast 2011/65/EU June 8, 2011. Specifications are subject to change without notice. The device characteristics and parameters in this data sheet can and do vary in different applications and actual device performance may vary over time. Users should verify actual device performance in their specific applications.

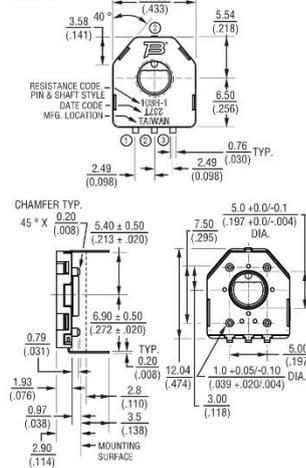
Product Dimensions



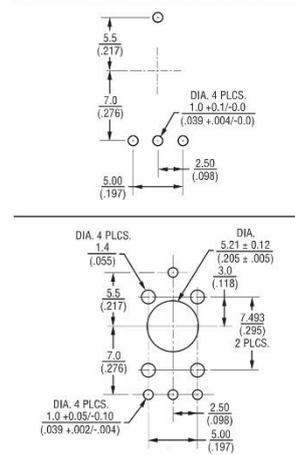
Recommended Land Pattern



3382H

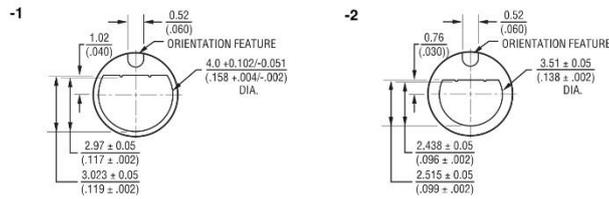


Recommended Land Patterns



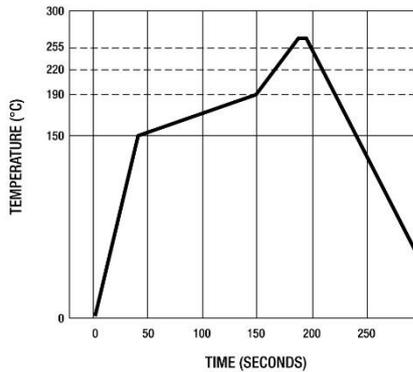
3382 - 12 mm Rotary Position Sensor **BOURNS®**

Rotor Dimensions

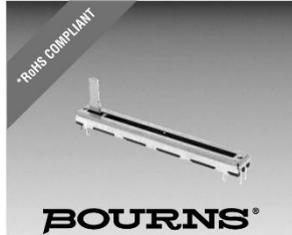


Processing Information

Process Description	Materials	Temperature	Time Interval
1. Apply solder paste to test board (8 - 10 mil thick)	<ul style="list-style-type: none"> Sn/Ag/Cu Alloy water soluble or no clean solder paste Single sided epoxy glass (G10) (UL approved) PC board approx. 4x4x.06 in. 	Room temperature	
2. Place test units onto board	6 units/board		
3. Ramp up	Convection oven		2.5 °C ±0.5 °/second
4. Preheat		150 °C to 190 °C	90 ±30 seconds
5. Time above liquidus		220 °C	60-90 seconds
6. Peak temperature			260 °C +0 -5 ° 10-20 sec. within 5 °C of peak
7. Ramp down		Room temperature	3 °C ±0.5 °C/second



Specifications are subject to change without notice. The device characteristics and parameters in this data sheet can and do vary in different applications and actual device performance may vary over time. Users should verify actual device performance in their specific applications.



Features

- Carbon element
- Metal housing
- 15-60 mm travel
- Single and dual gang
- Center detent option
- Dust cover option
- RoHS compliant*



PTA Series - Low Profile Slide Potentiometer

Electrical Characteristics

Taper..... Linear, audio
 Standard Resistance Range
 1 K ohms to 1 M ohms
 Standard Resistance Tolerance..... ±25 %
 Residual Resistance
 500 ohms or 1 % max.
 Insulation Resistance
 Min. 100 megohms at 250 V DC

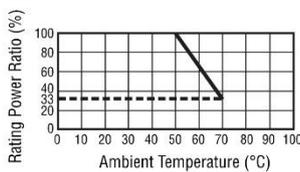
Environmental Characteristics

Operating Temperature
 -10 °C to +50 °C
 Power Rating, Linear
 15 mm 0.05 W (0.025 W Dual Gang)
 20 mm 0.1 W (0.05 W)
 30 mm 0.2 W (0.1 W)
 45 mm 0.25 W (0.125 W)
 60 mm 0.25 W (0.125 W)
 Power Rating, Audio
 15 mm .. 0.025 W (0.015 W Dual Gang)
 20 mm 0.05 W (0.025 W)
 30 mm 0.1 W (0.05 W)
 45 mm 0.125 W (0.06 W)
 60 mm 0.125 W (0.06 W)
 Maximum Operating Voltage, Linear
 15 mm 100 V DC
 20-60 mm..... 200 V DC
 Maximum Operating Voltage, Audio
 15 mm 50 V DC
 20-60 mm..... 150 V DC
 Withstand Voltage, Audio
 1 Min. at 300 V AC
 Sliding Noise..... 100 mV maximum
 Tracking Error..... 3 dB at -40 to 0 dB

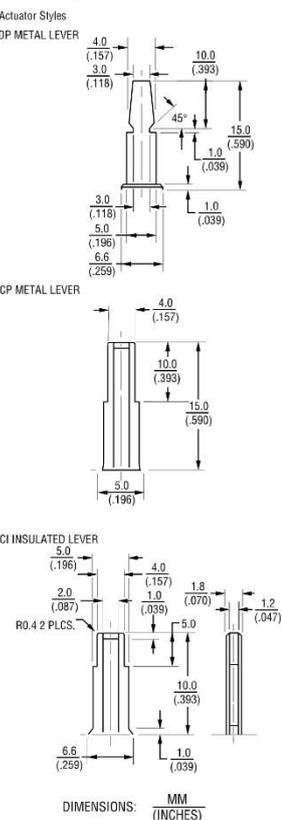
Mechanical Characteristics

Operating Force 30 to 250 g-cm
 Stop Strength 5 kg-cm min.
 Sliding Life..... 15,000 cycles
 Soldering Condition
 300 °C max. within 3 seconds
 Travel 15, 20, 30, 45, 60 mm

Derating Curve



Lever Style & Product Dimensions



How To Order

PTA 15 4 3 - 2 0 10 DP B 203

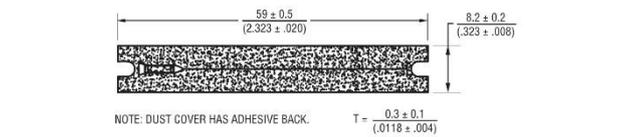
Model
 Stroke Length
 • 15 = 15 mm
 • 20 = 20 mm
 • 30 = 30 mm
 • 45 = 45 mm
 • 60 = 60 mm
 Dust Cover Option
 • 4 = No Dust Cover
 • 5 = Rubber Dust Cover**
 No. of Gangs
 • 3 = Single Gang
 • 4 = Dual Gang
 Pin Style
 • 2 = PC Pins Down Facing
 Center Detent Option
 • 0 = No Detent
 • 2 = Center Detent
 Standard Lever Length (See Table)
 • 10 = 10 mm (CI Lever)
 • 15 = 15 mm (DP, CP and CI)
 Lever Style
 • DP = Metal Lever (Refer to Drawing)
 • CP = Metal Lever (Refer to Drawing)
 • CI = Insulated Lever (Refer to Drawing)
 Resistance Taper
 • A = Audio Taper
 • B = Linear Taper
 Resistance Code (See Table)

Other styles available.
 ** Part numbers with dust covers must be mounted with screws to a panel to prevent issues with the dust cover during usage.

Standard Resistance Table

Resistance (Ohms)	Resistance Code
1,000	102
2,000	202
5,000	502
10,000	103
20,000	203
50,000	503
100,000	104
200,000	204
500,000	504
1,000,000	105

Optional Dust Cover



*RoHS Directive 2002/95/EC Jan. 27, 2003 including annex and RoHS Recast 2011/65/EU June 8, 2011. Specifications are subject to change without notice. The device characteristics and parameters in this data sheet can and do vary in different applications and actual device performance may vary over time. Users should verify actual device performance in their specific applications.

Applications

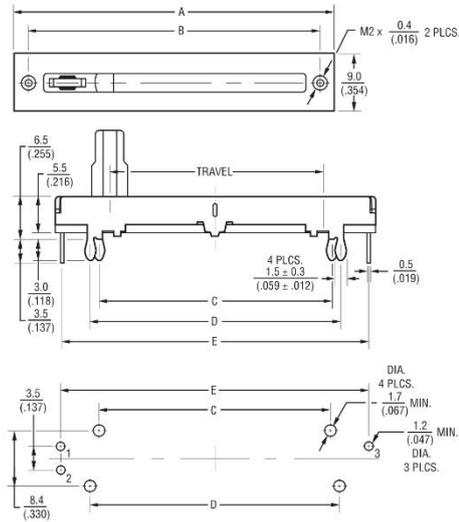
- Audio/TV sets
- Car radio
- Amplifiers/mixers/drum machines/synthesizers
- PCs/monitors
- Appliances

PTA Series - Low Profile Slide Potentiometer

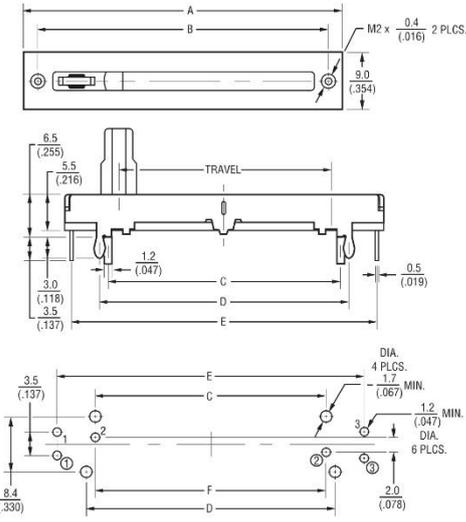


Product Dimensions

PTAxx43



PTAxx44



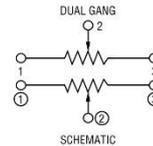
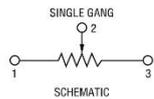
DIMENSIONS: $\frac{MM}{(INCHES)}$

Single Gang Dimensions

Model	A	B	C	D	E	Travel
PTA1543	30 (3.18)	26 (1.02)	17.8 (.700)	20.2 (.795)	28.5 (1.12)	15 (.59)
PTA2043	35 (1.37)	31 (1.22)	22.8 (.897)	25.2 (.992)	33 (1.29)	20 (.787)
PTA3043	45 (1.77)	41 (1.61)	32.8 (1.29)	35.2 (1.38)	43.5 (1.71)	30 (1.18)
PTA4543	60 (2.36)	56 (2.20)	47.8 (1.88)	50.2 (1.97)	58.5 (2.30)	45 (1.77)
PTA6043	75 (2.95)	71 (2.79)	62.8 (2.47)	65.2 (2.56)	73.5 (2.89)	60 (2.36)

Dual Gang Dimensions

Model	A	B	C	D	E	F	Travel
PTA1544	30 (3.18)	26 (1.02)	17.8 (.700)	20.2 (.795)	28.5 (1.12)	18 (.708)	15 (.59)
PTA2044	35 (1.37)	31 (1.22)	22.8 (.897)	25.2 (.992)	33 (1.29)	23 (.905)	20 (.787)
PTA3044	45 (1.77)	41 (1.61)	32.8 (1.29)	35.2 (1.38)	43.5 (1.71)	33 (1.29)	30 (1.18)
PTA4544	60 (2.36)	56 (2.20)	47.8 (1.88)	50.2 (1.97)	58.5 (2.30)	48 (1.88)	45 (1.77)
PTA6044	75 (2.95)	71 (2.79)	62.8 (2.47)	65.2 (2.56)	73.5 (2.89)	63 (2.48)	60 (2.36)



REV. 01/14

Specifications are subject to change without notice. The device characteristics and parameters in this data sheet can and do vary in different applications and actual device performance may vary over time. Users should verify actual device performance in their specific applications.



TL081, TL081A, TL081B, TL082, TL082A
TL082B, TL084, TL084A, TL084B

SLOS0811 – FEBRUARY 1977 – REVISED MAY 2015

TL08xx JFET-Input Operational Amplifiers

1 Features

- Low Power Consumption: 1.4 mA/ch Typical
- Wide Common-Mode and Differential Voltage Ranges
- Low Input Bias Current: 30 pA Typical
- Low Input Offset Current: 5 pA Typical
- Output Short-Circuit Protection
- Low Total Harmonic Distortion: 0.003% Typical
- High Input Impedance: JFET Input Stage
- Latch-Up-Free Operation
- High Slew Rate: 13 V/ μ s Typical
- Common-Mode Input Voltage Range Includes V_{CC+}

2 Applications

- Tablets
- White goods
- Personal electronics
- Computers

3 Description

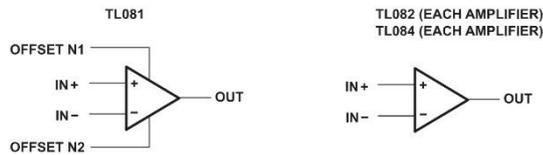
The TL08xx JFET-input operational amplifier family is designed to offer a wider selection than any previously developed operational amplifier family. Each of these JFET-input operational amplifiers incorporates well-matched, high-voltage JFET and bipolar transistors in a monolithic integrated circuit. The devices feature high slew rates, low input bias and offset currents, and low offset-voltage temperature coefficient.

Device Information⁽¹⁾

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
TL084xD	SOIC (14)	8.65 mm × 3.91 mm
TL08xxFK	LCCC (20)	8.89 mm × 8.89 mm
TL084xJ	CDIP (14)	19.56 mm × 6.92 mm
TL084xN	PDIP (14)	19.3 mm × 6.35 mm
TL084xNS	SO (14)	10.3 mm × 5.3 mm
TL084xPW	TSSOP (14)	5.0 mm × 4.4 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

Schematic Symbol



An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

TL081, TL081A, TL081B, TL082, TL082A
TL082B, TL084, TL084A, TL084B

SLOS081I – FEBRUARY 1977 – REVISED MAY 2015



www.ti.com

Table of Contents

1	Features	1	8.2	Functional Block Diagram	14
2	Applications	1	8.3	Feature Description	14
3	Description	1	8.4	Device Functional Modes.....	14
4	Revision History.....	2	9	Applications and Implementation	15
5	Pin Configuration and Functions	3	9.1	Application Information.....	15
6	Specifications.....	5	9.2	Typical Applications	15
6.1	Absolute Maximum Ratings	5	9.3	System Examples	16
6.2	ESD Ratings.....	5	10	Power Supply Recommendations	18
6.3	Recommended Operating Conditions.....	5	11	Layout.....	18
6.4	Thermal Information	6	11.1	Layout Guidelines	18
6.5	Electrical Characteristics for TL08xC, TL08xxC, and TL08xI	6	11.2	Layout Examples.....	19
6.6	Electrical Characteristics for TL08xM and TL084x ...	7	12	Device and Documentation Support	20
6.7	Operating Characteristics.....	7	12.1	Documentation Support	20
6.8	Dissipation Rating Table	8	12.2	Related Links	20
6.9	Typical Characteristics	9	12.3	Community Resources.....	20
7	Parameter Measurement Information	13	12.4	Trademarks	20
8	Detailed Description	14	12.5	Electrostatic Discharge Caution	20
8.1	Overview	14	12.6	Glossary	20
			13	Mechanical, Packaging, and Orderable Information	20

4 Revision History

NOTE: Page numbers for previous revisions may differ from page numbers in the current version.

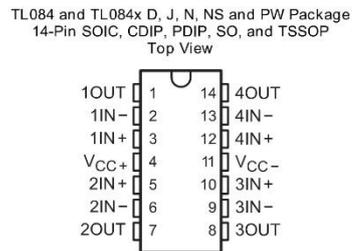
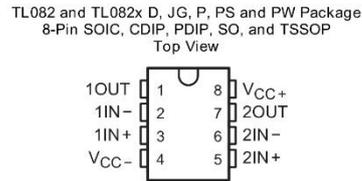
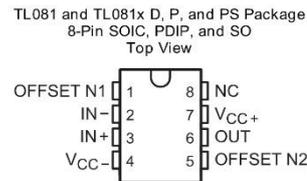
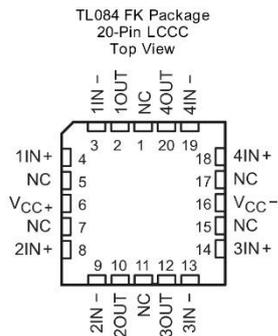
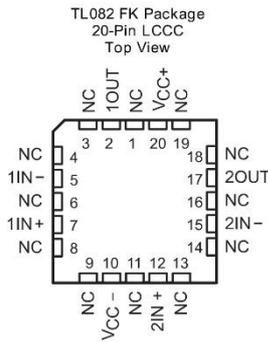
Changes from Revision H (January 2014) to Revision I	Page
• Added Pin Configuration and Functions section, Storage Conditions table, ESD Ratings table, Feature Description section, Device Functional Modes, Application and Implementation section, Power Supply Recommendations section, Layout section, Device and Documentation Support section, and Mechanical, Packaging, and Orderable Information section	1
• Added Applications.....	1
• Moved Typical Characteristics into Specifications section.	9
Changes from Revision G (September 2004) to Revision H	Page
• Updated document to new TI data sheet format - no specification changes.	1
• Deleted Ordering Information table.	1



www.ti.com

TL081, TL081A, TL081B, TL082, TL082A
 TL082B, TL084, TL084A, TL084B
 SLOS0811 –FEBRUARY 1977–REVISED MAY 2015

5 Pin Configuration and Functions



Pin Functions

NAME	PIN					I/O	DESCRIPTION
	TL081 SOIC, PDIP, SO	TL082 SOIC, CDIP, PDIP, SO, TSSOP	TL082 LCCC	TL084 SOIC, CDIP, PDIP, SO, TSSOP	TL084 LCCC		
1IN-	—	2	5	2	3	I	Negative input
1IN+	—	3	7	3	4	I	Positive input
1OUT	—	1	2	1	2	O	Output
2IN-	—	6	15	6	9	I	Negative input
2IN+	—	5	12	5	8	I	Positive input
2OUT	—	7	17	7	10	O	Output
3IN-	—	—	—	9	13	I	Negative input
3IN+	—	—	—	10	14	I	Positive input
3OUT	—	—	—	8	12	O	Output
4IN-	—	—	—	13	19	I	Negative input
4IN+	—	—	—	12	18	I	Positive input
4OUT	—	—	—	14	20	O	Output



www.ti.com

TL081, TL081A, TL081B, TL082, TL082A
TL082B, TL084, TL084A, TL084B

SLOS0811 –FEBRUARY 1977–REVISED MAY 2015

6 Specifications

6.1 Absolute Maximum Ratings

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)⁽¹⁾

		MIN	MAX	UNIT	
V _{CC+}	Supply voltage ⁽²⁾		18	V	
V _{CC-}			-18		
V _{ID}	Differential input voltage ⁽³⁾		±30	V	
V _I	Input voltage ⁽²⁾⁽⁴⁾		±15	V	
	Duration of output short circuit ⁽⁵⁾		Unlimited		
	Continuous total power dissipation	See Dissipation Rating Table			
T _A	Operating free-air temperature	TL08_C TL08_AC TL08_BC	0	70	°C
		TL08_I	-40	85	
		TL084Q	-40	125	
		TL08_M	-55	125	
	Operating virtual junction temperature		150	°C	
T _C	Case temperature for 60 seconds	FK package	TL08_M	260	°C
	Lead temperature 1.6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds	J or JG package	TL08_M	300	°C
T _{stg}	Storage temperature		-65	150	°C

- (1) Stresses beyond those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under Recommended Operating Conditions is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.
- (2) All voltage values, except differential voltages, are with respect to the midpoint between V_{CC+} and V_{CC-}.
- (3) Differential voltages are at IN+, with respect to IN-.
- (4) The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply voltage or 15 V, whichever is less.
- (5) The output may be shorted to ground or to either supply. Temperature and/or supply voltages must be limited to ensure that the dissipation rating is not exceeded.

6.2 ESD Ratings

		VALUE	UNIT
V _(ESD)	Electrostatic discharge	Human body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 ⁽¹⁾	1000
		Charged-device model (CDM), per JEDEC specification JESD22-C101 ⁽²⁾	1500

- (1) JEDEC document JEP155 states that 500-V HBM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.
- (2) JEDEC document JEP157 states that 250-V CDM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

6.3 Recommended Operating Conditions

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

		MIN	MAX	UNIT	
V _{CC+}	Supply voltage	5	15	V	
V _{CC-}	Supply voltage	-5	-15	V	
V _{CM}	Common-mode voltage	V _{CC-} + 4	V _{CC+} - 4	V	
T _A	Ambient temperature	TL08xM	-55	125	°C
		TL08xQ	-40	125	
		TL08xI	-40	85	
		TL08xC	0	70	

TL081, TL081A, TL081B, TL082, TL082A
TL082B, TL084, TL084A, TL084B



SLOS081I—FEBRUARY 1977—REVISED MAY 2015

www.ti.com

6.4 Thermal Information

THERMAL METRIC ⁽¹⁾	TL08xx								UNIT
	D (SOIC)		N (PDIP)	NS (SO)	P (PDIP)	PS (SO)	PW (TSSOP)		
	8 PINS	14 PINS	14 PINS	14 PINS	{PIN COUNT} PINS	{PIN COUNT} PINS	8 PINS	14 PINS	
$R_{\theta JA}$ Junction-to-ambient thermal resistance ⁽²⁾⁽³⁾	97	86	76	80	85	95	149	113	°C/W

- (1) For more information about traditional and new thermal metrics, see the Semiconductor and IC Package Thermal Metrics application report, SPRA953.
- (2) Maximum power dissipation is a function of $T_{J(max)}$, $R_{\theta JA}$, and T_A . The maximum allowable power dissipation at any allowable ambient temperature is $P_D = (T_{J(max)} - T_A) / R_{\theta JA}$. Operating at the absolute maximum T_J of 150°C can affect reliability.
- (3) The package thermal impedance is calculated in accordance with JESD 51-7.

6.5 Electrical Characteristics for TL08xC, TL08xxC, and TL08xI

$V_{CC\pm} = \pm 15$ V (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	T_A ⁽¹⁾	TL081C, TL082C, TL084C			TL081AC, TL082AC, TL084AC			TL081BC, TL082BC, TL084BC			TL081I, TL082I, TL084I			UNIT
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
V_{IO} Input offset voltage	$V_O = 0$, $R_S = 50 \Omega$	25°C		3	15		3	6		2	3		3	6	mV
	Full range				20			7.5			5			9	
α_{VIO} Temperature coefficient of input offset voltage	$V_O = 0$, $R_S = 50 \Omega$	Full range		18			18			18			18		$\mu V/^\circ C$
I_{IO} Input offset current ⁽²⁾	$V_O = 0$	25°C		5	200		5	100		5	100		5	100	pA
	Full range				2			2			2			10	nA
I_{IB} Input bias current ⁽²⁾	$V_O = 0$	25°C		30	400		30	200		30	200		30	200	pA
	Full range				10			7			7			20	nA
V_{ICR} Common-mode input voltage range		25°C	± 11	-12 to 15		± 11	-12 to 15		± 11	-12 to 15		± 11	-12 to 15		V
V_{OM} Maximum peak output voltage swing	$R_L = 10$ k Ω	25°C	± 12	± 13.5		± 12	± 13.5		± 12	± 13.5		± 12	± 13.5		V
	$R_L \geq 10$ k Ω	Full range	± 12			± 12			± 12			± 12			
A_{VD} Large-signal differential voltage amplification	$V_O = \pm 10$ V, $R_L \geq 2$ k Ω	25°C	25	200		50	200		50	200		50	200		V/mV
	Full range		15			15			25			25			
B_1 Unity-gain bandwidth		25°C		3			3			3			3		MHz
f_i Input resistance		25°C		10^{12}			10^{12}			10^{12}			10^{12}		Ω
CMRR Common-mode rejection ratio	$V_{IC} = V_{ICRmin}$, $V_O = 0$, $R_S = 50 \Omega$	25°C	70	86		75	86		75	86		75	86		dB
k_{SVR} Supply-voltage rejection ratio ($\Delta V_{CC\pm} / \Delta V_{IO}$)	$V_{CC} = \pm 15$ V to ± 9 V, $V_O = 0$, $R_S = 50 \Omega$	25°C	70	86		80	86		80	86		80	86		dB

- (1) All characteristics are measured under open-loop conditions with zero common-mode voltage, unless otherwise specified. Full range for T_A is 0°C to 70°C for TL08_C, TL08_AC, TL08_BC and -40°C to 85°C for TL08_I.
- (2) Input bias currents of an FET-input operational amplifier are normal junction reverse currents, which are temperature sensitive, as shown in Figure 13. Pulse techniques must be used that maintain the junction temperature as close to the ambient temperature as possible.



TL081, TL081A, TL081B, TL082, TL082A
TL082B, TL084, TL084A, TL084B

www.ti.com

SLOS0811 – FEBRUARY 1977 – REVISED MAY 2015

Electrical Characteristics for TL08xC, TL08xxC, and TL08xI (continued)

$V_{CC\pm} = \pm 15$ V (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	T_A ⁽¹⁾	TL081C, TL082C, TL084C			TL081AC, TL082AC, TL084AC			TL081BC, TL082BC, TL084BC			TL081I, TL082I, TL084I			UNIT
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
I_{CC}	Supply current (each amplifier) $V_O = 0$, No load	25°C	1.4	2.8	1.4	2.8	1.4	2.8	1.4	2.8	1.4	2.8	mA		
V_{O1}/V_{O2}	Crosstalk attenuation $A_{VD} = 100$	25°C	120			120			120			120			dB

6.6 Electrical Characteristics for TL08xM and TL084x

$V_{CC\pm} = \pm 15$ V (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS ⁽¹⁾	T_A	TL081M, TL082M			TL084Q, TL084M			UNIT			
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX				
V_{IO}	Input offset voltage $V_O = 0$, $R_S = 50 \Omega$	25°C	3			6			mV			
		Full range				9						
α_{VIO}	Temperature coefficient of input offset voltage $V_O = 0$, $R_S = 50 \Omega$	Full range	18			18			$\mu V/^\circ C$			
I_{IO}	Input offset current ⁽²⁾ $V_O = 0$	25°C	5			100			pA			
		125°C				20			nA			
I_{IB}	Input bias current ⁽²⁾ $V_O = 0$	25°C	30			200			pA			
		125°C				50			nA			
V_{ICR}	Common-mode input voltage range	25°C	± 11	–12 to 15		± 11	–12 to 15		V			
V_{OM}	Maximum peak output voltage swing $R_L = 10 \text{ k}\Omega$ $R_L \geq 10 \text{ k}\Omega$ $R_L \geq 2 \text{ k}\Omega$	25°C	± 12	± 13.5		± 12	± 13.5		V			
		Full range	± 12			± 12						
		Full range	± 10	± 12		± 10	± 12					
A_{VD}	Large-signal differential voltage amplification $V_O = \pm 10$ V, $R_L \geq 2 \text{ k}\Omega$	25°C	25		200		25		200		V/mV	
		Full range	15				15					
B_1	Unity-gain bandwidth	25°C	3			3			MHz			
r_i	Input resistance	25°C	10^{12}			10^{12}			Ω			
CMRR	Common-mode rejection ratio $V_{IC} = V_{ICRmin}$, $V_O = 0$, $R_S = 50 \Omega$	25°C	80		86		80		86		dB	
k_{SVR}	Supply-voltage rejection ratio ($\Delta V_{CC\pm}/\Delta V_{IO}$) $V_{CC} = \pm 15$ V to ± 9 V, $V_O = 0$, $R_S = 50 \Omega$	25°C	80		86		80		86		dB	
I_{CC}	Supply current (each amplifier) $V_O = 0$, No load	25°C	1.4			2.8		1.4		2.8		mA
V_{O1}/V_{O2}	Crosstalk attenuation $A_{VD} = 100$	25°C	120			120			120			dB

- (1) All characteristics are measured under open-loop conditions, with zero common-mode input voltage, unless otherwise specified.
(2) Input bias currents of a FET-input operational amplifier are normal junction reverse currents, which are temperature sensitive, as shown in Figure 13. Pulse techniques must be used that maintain the junction temperatures as close to the ambient temperature as possible.

6.7 Operating Characteristics

$V_{CC\pm} = \pm 15$ V, $T_A = 25^\circ C$ (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
SR	$V_I = 10$ V, $R_L = 2 \text{ k}\Omega$, $C_L = 100 \text{ pF}$, See Figure 19	8 ⁽¹⁾	13		V/ μs
	$V_I = 10$ V, $R_L = 2 \text{ k}\Omega$, $C_L = 100 \text{ pF}$, $T_A = -55^\circ C$ to $125^\circ C$, See Figure 19	5 ⁽¹⁾			

- (1) On products compliant to MIL-PRF-38535, this parameter is not production tested.

TL081, TL081A, TL081B, TL082, TL082A
 TL082B, TL084, TL084A, TL084B



SLOS081I—FEBRUARY 1977—REVISED MAY 2015

www.ti.com

Operating Characteristics (continued)

$V_{CC\pm} = \pm 15\text{ V}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
t_r	Rise-time	$V_i = 20\text{ V}$, $R_L = 2\text{ k}\Omega$, $C_L = 100\text{ pF}$,		0.05	μs
	overshoot factor	See Figure 19		20%	
V_n	Equivalent input noise voltage	$R_S = 20\ \Omega$	$f = 1\text{ kHz}$	18	$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
			$f = 10\text{ Hz to }10\text{ kHz}$	4	μV
I_n	Equivalent input noise current	$R_S = 20\ \Omega$	$f = 1\text{ kHz}$	0.01	$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
THD	Total harmonic distortion	$V_{i\text{rms}} = 6\text{ V}$, $A_{VD} = 1$, $R_S \leq 1\text{ k}\Omega$, $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$, $f = 1\text{ kHz}$,		0.003%	

6.8 Dissipation Rating Table

PACKAGE	$T_A \leq 25^\circ\text{C}$ POWER RATING	DERATING FACTOR	DERATE ABOVE T_A	$T_A = 70^\circ\text{C}$ POWER RATING	$T_A = 85^\circ\text{C}$ POWER RATING	$T_A = 125^\circ\text{C}$ POWER RATING
D (14 pin)	680 mW	7.6 mW/ $^\circ\text{C}$	60 $^\circ\text{C}$	604 mW	490 mW	186 mW
FK	680 mW	11.0 mW/ $^\circ\text{C}$	88 $^\circ\text{C}$	680 mW	680 mW	273 mW
J	680 mW	11.0 mW/ $^\circ\text{C}$	88 $^\circ\text{C}$	680 mW	680 mW	273 mW
JG	680 mW	8.4 mW/ $^\circ\text{C}$	69 $^\circ\text{C}$	672 mW	546 mW	210 mW



TL081, TL081A, TL081B, TL082, TL082A
TL082B, TL084, TL084A, TL084B

www.ti.com

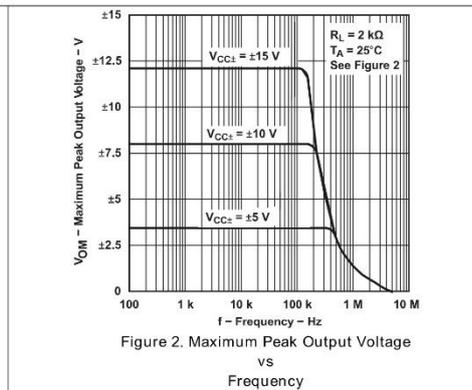
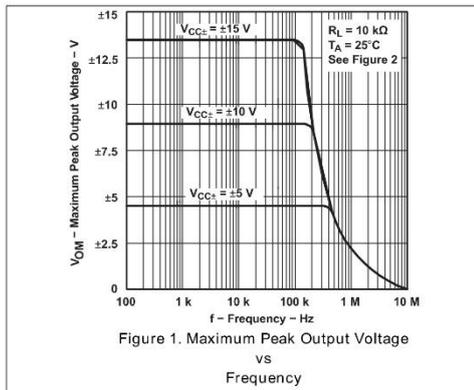
SLOS0811 –FEBRUARY 1977–REVISED MAY 2015

6.9 Typical Characteristics

Data at high and low temperatures are applicable only within the rated operating free-air temperature ranges of the various devices. The Figure numbers referenced in the following graphs are located in Parameter Measurement Information.

Table 1. Table of Graphs

			Figure
V_{OM}	Maximum peak output voltage	versus Frequency	Figure 1, Figure 2, Figure 3
		versus Free-air temperature	
A_{VD}	Large-signal differential voltage amplification	versus Load resistance	Figure 4
		versus Supply voltage	Figure 5
	Differential voltage amplification	versus Frequency with feed-forward compensation	Figure 6
P_D	Total power dissipation	versus Free-air temperature	Figure 7
I_{CC}	Supply current	versus Free-air temperature	Figure 8
		versus Supply voltage	Figure 9
I_{IB}	Input bias current	versus Free-air temperature	Figure 10
		Large-signal pulse response	versus Time
V_O	Output voltage	versus Elapsed time	Figure 12
CMRR	Common-mode rejection ratio	versus Free-air temperature	Figure 13
V_n	Equivalent input noise voltage	versus Frequency	Figure 14
THD	Total harmonic distortion	versus Frequency	Figure 15

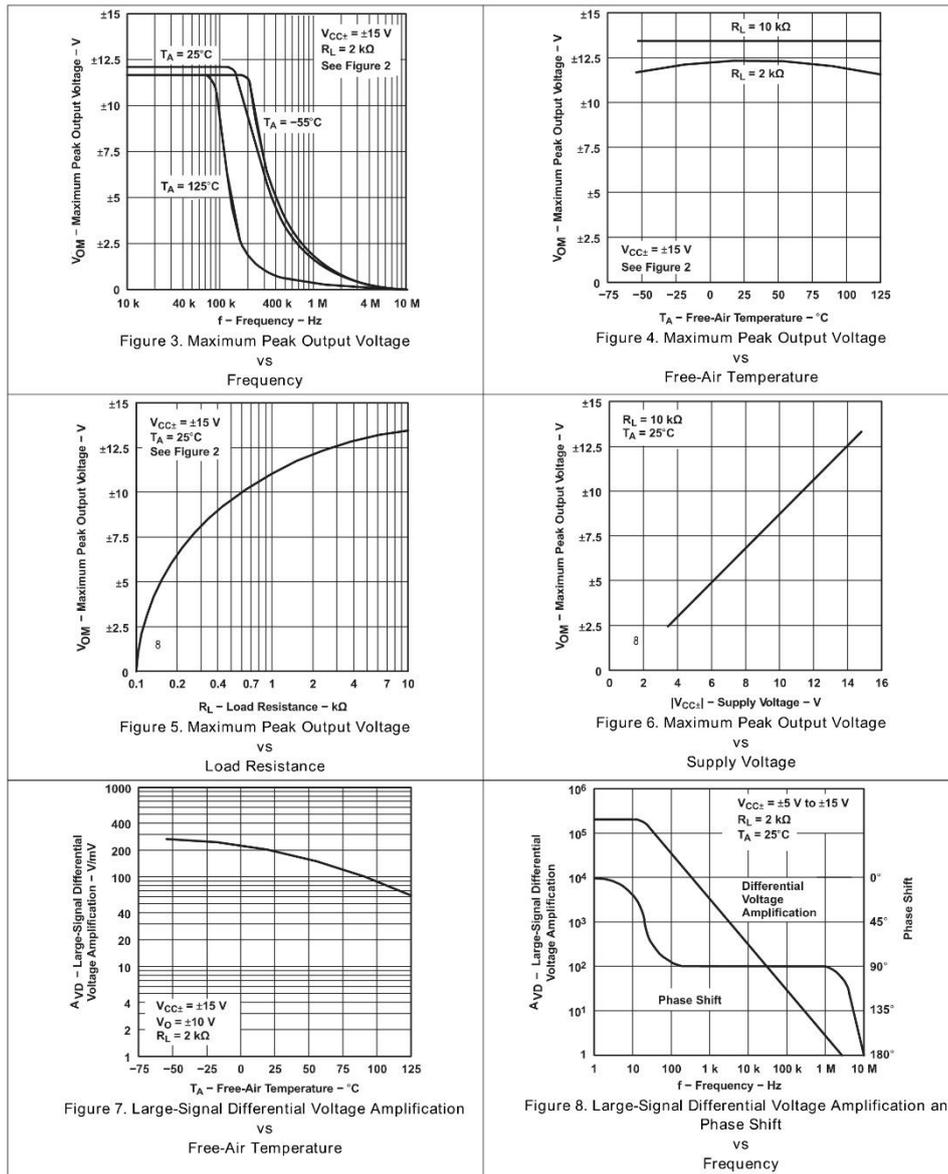


TL081, TL081A, TL081B, TL082, TL082A
 TL082B, TL084, TL084A, TL084B



SLOS081I—FEBRUARY 1977—REVISED MAY 2015

www.ti.com





www.ti.com

TL081, TL081A, TL081B, TL082, TL082A
TL082B, TL084, TL084A, TL084B

SLOS0811 – FEBRUARY 1977 – REVISED MAY 2015

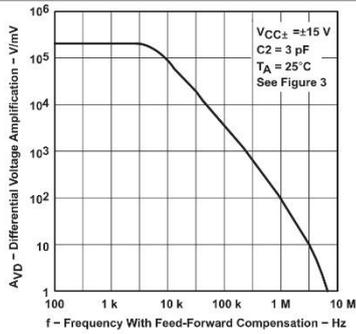


Figure 9. Differential Voltage Amplification vs Frequency with Feed-Forward Compensation

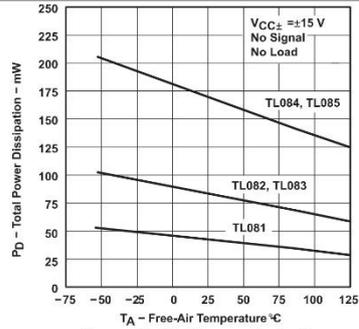


Figure 10. Total Power Dissipation vs Free-Air Temperature

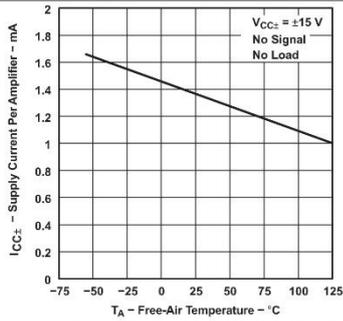


Figure 11. Supply Current per Amplifier vs Free-Air Temperature

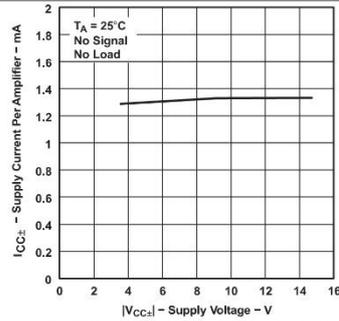


Figure 12. Supply Current per Amplifier vs Supply Voltage

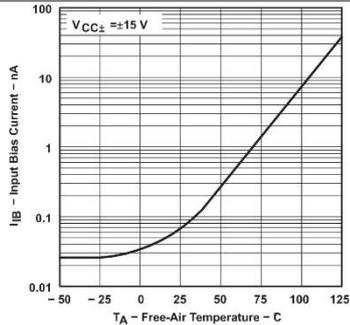


Figure 13. Input Bias Current vs Free-Air Temperature

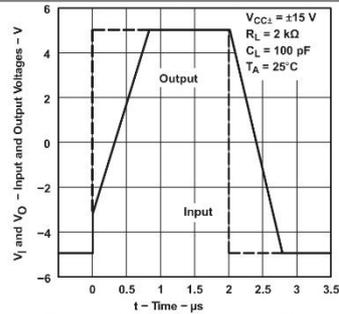


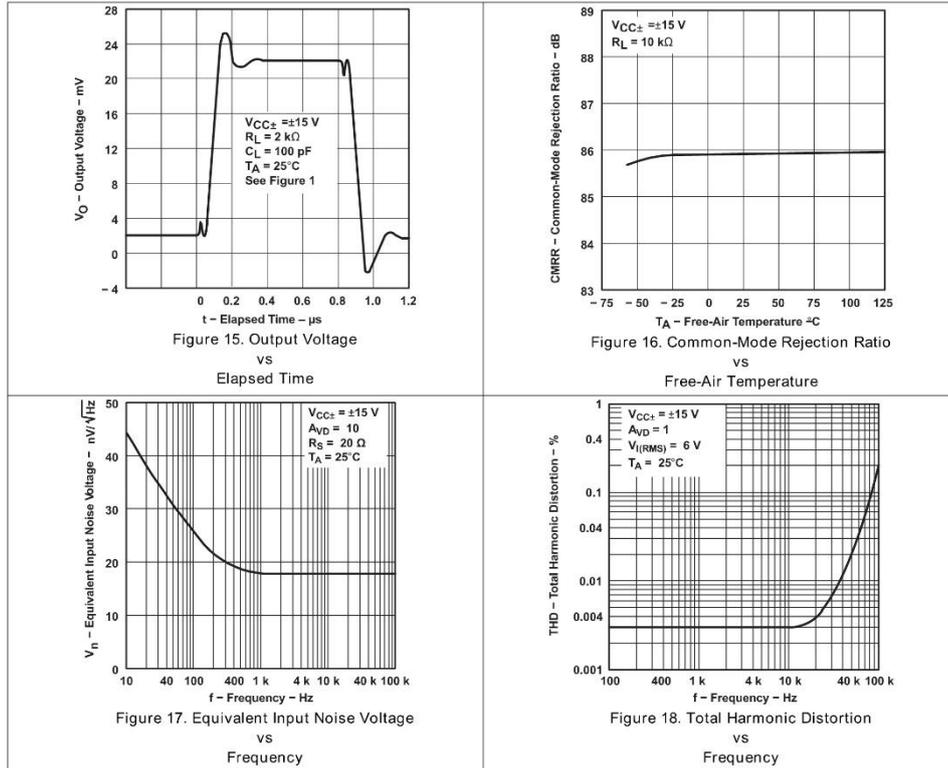
Figure 14. Voltage-Follower Large-Signal Pulse Response

TL081, TL081A, TL081B, TL082, TL082A
 TL082B, TL084, TL084A, TL084B



SLOS081I – FEBRUARY 1977 – REVISED MAY 2015

www.ti.com







Máster Oficial en Robótica y Automatización
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática
Universidad Carlos III de Madrid



Este proyecto busca diseñar y crear una mano robótica versátil, *open source* y de bajo coste, que permita investigar la viabilidad de los materiales *Shape Memory Alloys* (SMA) como actuadores. Se describe el diseño completo de un prototipo de mano robótica antropomórfica que emplea actuadores basados en filamentos de SMA para efectuar la flexión y aducción los dedos, y la flexión y abducción el pulgar. Se hace uso de la tecnología de impresión 3D, basada en la técnica FDM (*fused deposition modeling*), para crear de forma rápida y económica el prototipo diseñado, en conjunto con materiales de fácil adquisición.

El diseño final se integra con un sistema de actuadores basado en filamentos de SMA y un sistema de control RCP (*Rapid Control Prototyping*). Finalmente se comprueba el funcionamiento del conjunto y se analizan sus posibilidades.