



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

**Diseño mecatrónico y sensorización de un
dedo de un dispositivo de rehabilitación de
mano**

Autor: Lobo Granado, Víctor

Tutor: Fraile Marinero, Juan Carlos

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática

Valladolid, Febrero de 2018.

Agradecimientos

Quiero empezar este trabajo agradeciendo a mis padres y mi hermana la paciencia y el apoyo recibido desde el primer día. Gracias por estar donde y cuando se os ha necesitado y por hacerme mejorar y esforzarme cada día. No sería la persona que soy hoy sin vuestra gran aportación.

También quiero mencionar y agradecer al resto de mi familia y amigos por su influencia en mí tras los momentos vividos y que me ayudaron a ver las cosas de otro modo.

Resumen

En este TFG se plantea el proceso de sensorización de dispositivo mecatrónico tipo exoesqueleto de mano para su empleo en tareas de rehabilitación de la articulación de la mano en personas con discapacidad motora. Este proceso de sensorización consta de la elección de sensores adecuados para la función de prensión, el diseño de un cabezal o dedal para el dedo, su construcción incorporando el sensor seleccionado, y la programación del exoesqueleto incorporando el sensor elegido.

Palabras clave (Keywords)

Sensor, exoesqueleto, impresión 3D, mano, control.

Abstract

This TFG the process of sensorisation of an exoskeleton hand-held mechatronical device is proposed for its use in tasks of rehabilitation of the hand joint in people with motor disabilities. This process of sensing consists of the choice of sensors suitable for the function of the exoskeleton, the design of a head or thimble for the finger, its construction incorporating the selected sensor and the programming of the exoeskeleton.

Índice

Agradecimientos	3
Resumen	3
Palabras clave (Keywords).....	3
Abstract	3
Índice de figuras.....	9
1. Introducción, objetivos y estado del arte	13
1.1. Introducción.....	13
1.2. Objetivos del proyecto.....	14
1.3. Estado del arte	14
1.3.1. Exo-Glove Poly.....	14
1.3.2. Sensor flexible para detectar tumores	15
1.3.3. Exoesqueleto para rehabilitación de dedos	16
1.3.4. Finger TPS Sensor	17
1.3.5. Cyber Glove Systems	18
1.3.6. Proyectos de estudiantes.....	19
2. Sensores de presión para dispositivos de rehabilitación de dedos	21
2.1. Definición de sensor	21
2.1.1. Transductores capacitivos	21
2.1.2. Transductores resistivos	22
2.1.3. Interruptores, pulsadores y microinterruptores	26
2.2. Elección de sensores	27
3. Dedales diseñados para incorporar sensores en dispositivos de rehabilitación de dedos.....	33
3.1. Autodesk Inventor 2018	33
3.2. Impresora 3D empleada	34
3.3. Programa de laminación Cura Engine.....	35
3.4. Primeros prototipos de capuchones o dedales	36
3.4.1. Prototipo 1	36
3.4.2. Prototipo 2	36
3.4.3. Prototipo 3	37
3.4.4. Prototipo 4	37
3.4.5. Prototipo 5	38
3.4.6. Prototipo 6	39

3.4.7.	Prototipo 7	39
3.4.8.	Prototipo 8	40
4.	Pruebas desarrolladas con sensores y dedos	47
4.1.	Entorno Arduino.....	47
4.2.	Prueba 1: sensor piezoeléctrico	48
4.3.	Prueba 2: sensor célula de carga	51
4.4.	Prueba 3: sensor galga extensiométrica.....	53
4.5.	Prueba 4: interruptor push-button.....	54
4.6.	Resumen de las pruebas realizadas	54
4.7.	Pruebas con el sensor final seleccionado.....	55
5.	Integración y pruebas en el exoesqueleto de mano.....	59
5.1.	Descripción del exoesqueleto y su sistema de control inicial	59
5.2.	Rediseño de la caja de alojamiento del sistema de control y del exoesqueleto de mano	61
5.2.1.	Identificación del material	67
5.3.	Modos de funcionamiento del exoesqueleto de mano	68
5.4.	Desarrollo de software para el control del exoesqueleto con el sensor piezoeléctrico. Terapias programadas.	69
5.5.	Manual de instalación, conexionado y puesta en funcionamiento.....	72
5.6.	Pruebas realizadas. Resultados	76
6.	Conclusiones	83
7.	Bibliografía	85
Anexo I	.....	87
Mano_1.ino	.....	87
Mano.h	.....	89
Mano.cpp	.....	90
Dedo.h	.....	93
Dedo.cpp	.....	93
Anexo II	.....	95
Perfil de impresión: FlexiSmart	95	
Perfil de impresión: BQ PLA, calidad normal	96	
Anexo III	.....	97
Anexo IV	.....	99
Anexo V	.....	101
Anexo VI	.....	107

Anexo VII.....	111
Anexo VIII.....	115
Anexo IX.....	121
Anexo X.....	125

Índice de figuras

Figura 1 Conjunto de exoesqueleto y electrónica del proyecto [1].....	13
Figura 2 Envoltura de electrónica del proyecto [1]	13
Figura 3 Exo-Glove Poly.....	15
Figura 4 Sensor flexible para detectar tumores	15
Figura 5 Flexibilidad del sensor.....	16
Figura 6 Exoesqueleto desarrollado en la UMA.....	16
Figura 7 Finger TPS Sensor	17
Figura 8 Finger TPS Sensor	17
Figura 9 Guante CyberGlove de Cyber Glove Systems	18
Figura 10 Guante CyberGlove de Cyber Glove Systems.....	18
Figura 11 Exoesqueleto de Nicolás Rojas	19
Figura 12 Exoesqueleto desarrollado por estudiante de BUAP	20
Figura 13 Proyecto desarrollado por José Ángel López Beloso	20
Figura 14 Tipos de transductores capacitivos.....	22
Figura 15 Grafica de deformación elástica de un material	23
Figura 16 Sensor Resistivo Semiconductor.....	24
Figura 17 Puente Wheatstone	24
Figura 18 Esquema de un sensor táctil resistivo	25
Figura 19 Esquema resistivo de un sensor táctil resistivo	25
Figura 20 Esquemas eléctricos comunes de interruptores	26
Figura 21 Sensor Capacitivo de Proximidad.....	28
Figura 22 Sensor Capacitivo CQ35-25NPP-KC1	28
Figura 23 Sensor de Fuerza Honeywell	29
Figura 24 Sensor de Fuerza Serie FSA	29
Figura 25 Sensor de Fuerza Robusto Serie FS.....	29
Figura 26 Galga de deformación RS Pro	30
Figura 27 Sensor Piezoeléctrico Flexible	30
Figura 28 Push-Button Small	31
Figura 29 Interfaz del Autodesk Inventor 2018	33
Figura 30 Impresora 3D Prusa i3 Hephestos de BQ	34
Figura 31 Rollos de material termoplástico PLA	34
Figura 32 Interfaz de Cura Engine 2.4.0.....	35
Figura 33. Prototipo 1 de dedal	36
Figura 34 Prototipo 2 de dedal	36
Figura 35. Prototipo 3 de dedal	37
Figura 36 Prototipo 4 de dedal	37
Figura 37 Prototipo 4 de dedal en dos materiales.....	38
Figura 38 Prototipo 5 de dedal en dos materiales.....	38
Figura 39 Prototipo 5 de dedal	38
Figura 40 Prototipo 6 de dedal	39
Figura 41 Prototipo 7 de dedal	39
Figura 42 Prototipo 7 de dedal	40
Figura 43 Tabla de medidas de dimensiones de los dedos de una mano	40

Figura 44 Numeración de las dimensiones de los dedos de la Figura 43	41
Figura 45 Prototipo final de dedal en Autodesk Inventor	41
Figura 46 Prototipo final de pieza del sensor en Autodesk Inventor.....	42
Figura 47 Prototipo final real de dedal	42
Figura 48 Prototipo de dedal de 20mm de diámetro.....	43
Figura 49 Prototipo de dedal de 18mm de diámetro.....	43
Figura 50 Prototipo de dedal de 15mm de diámetro.....	44
Figura 51 Prototipo de dedal de 13mm de diámetro.....	44
Figura 52 Imágenes reales de los dedales diseñados.....	44
Figura 53 Placa de Arduino UNO	47
Figura 54 Esquema del hardware de Arduino	47
Figura 55 Grafica tensión-deformación del piezoeléctrico	48
Figura 56 Montaje en Arduino del sensor piezoeléctrico.....	48
Figura 57 Código Arduino para el sensor piezoeléctrico. Lectura analógica	49
Figura 58 Representación Serial del sensor piezoeléctrico. Lectura analógica	49
Figura 59 Código Arduino para el sensor piezoeléctrico. Lectura digital	50
Figura 60 Representación Serial del sensor piezoeléctrico. Lectura digital	50
Figura 61 Esquema eléctrico y terminales de la célula de carga	51
Figura 62 Montaje en Arduino de la célula de carga	51
Figura 63 Código Arduino de la célula de carga	52
Figura 64 Representación Serial de la célula de carga	52
Figura 65 Montaje en Arduino de la galga extensiométrica	53
Figura 66 Representación Serial de la galga extensiométrica	53
Figura 67 Pieza para el interruptor	54
Figura 68 Interrupciones existentes en Arduino. Pines y nº de interrupción	55
Figura 69 Código Arduino para el banco de pruebas.....	56
Figura 70 Esquema en Arduino del banco de prueba.....	56
Figura 71 Montaje real del banco de prueba	57
Figura 72 Servomotor Firgelli serie L12-R	59
Figura 73 Microcontrolador Arduino marca Velleman	59
Figura 74 Caja para la electrónica	60
Figura 75 Tapa de la electrónica.....	60
Figura 76 Interruptores del proyecto inicial.....	61
Figura 77 Parte inferior de la envoltura de la electrónica en Autodesk Inventor	62
Figura 78 Protoboard de conexiones empleada en el proyecto	62
Figura 79 Caja interna para la placa de Arduino en Autodesk Inventor.....	63
Figura 80 Placa de conexión de servomotores y dedal en Autodesk Inventor	63
Figura 81 Parte superior de la envoltura de la electrónica en Autodesk Inventor	64
Figura 82 Interruptor RLEIL RL3-3 empleado en el proyecto	64
Figura 83 Pulsador Ermec empleado en el proyecto	64
Figura 84 Embellecedor diseñado para el pulsador	65
Figura 85 Parte de arriba de la caja de la electrónica	65
Figura 86 Parte inferior de la caja de la electrónica	66
Figura 87 Caja interna para Arduino.....	66
Figura 88 Identificadores de cables empleados en el proyecto	67

Figura 89 Identificación del cableado y conexión a la envoltura.....	67
Figura 90 Parte de arriba de la caja de la electrónica	68
Figura 91 Placa de Arduino Mega de la marca Velleman	69
Figura 92 Interrupciones existentes en las placas de Arduino	70
Figura 93 Esquema de montaje de la electrónica del proyecto	72
Figura 94 Placa de circuito impreso para la conexión de servomotores	73
Figura 95 Montaje real de la electrónica del proyecto.....	74
Figura 96 Conexión con la fuente de alimentación	74
Figura 97 Conexión con el ordenador.....	74
Figura 98 Conexión con el exoesqueleto y con el dedal	75
Figura 99 Conexión final de todos los elementos	75
Figura 100 Panel de interruptores para el control del exoesqueleto	76
Figura 101 Exoesqueleto en posición FIJA CERRADO	76
Figura 102 Exoesqueleto en posición FIJA ABIERTO	77
Figura 103 Exoesqueleto en MODO CONTAR	77
Figura 104 Exoesqueleto en MODO CONTAR	78
Figura 105 Diferentes piezas para la realización de pruebas con el exoesqueleto	78
Figura 106 Pieza prismática grande cogida	79
Figura 107 Pieza prismática pequeña cogida	79
Figura 108 Piezas cilíndricas cogidas.....	80
Figura 109 Pieza cilíndrica cogida	80
Figura 110 Pieza esférica cogida.....	81
Figura 111 Bolígrafo cogido para escritura	81
Figura 112 Proyecto montado y preparado para usarse	81
Figura 113 Reductora empleada en el actuador lineal L12-R	99
Figura 114 Tabla de características de los motores L12-R.....	100
Figura 115 Servomotor Firgelli serie L12-R.....	100

1. Introducción, objetivos y estado del arte

1.1. Introducción

El siguiente Trabajo de Fin de Grado parte de los resultados de un TFG elaborado por José Ángel López Belloso titulado “Diseño mecánico y primer prototipo de un robot de rehabilitación de mano”, en el que se desarrolló un primer prototipo de un dispositivo mecatrónico tipo exoesqueleto de mano, Figura 1. Más información acerca de este proyecto se puede encontrar en [1] en la bibliografía del proyecto.

Partiendo de los resultados de ese trabajo, se pretende dotar al exoesqueleto de la capacidad de interactuar con objetos, deteniéndose cuando se detecte pieza al cogerla y soltándola cuando se desee. En definitiva, poder coger y soltar piezas, como se hace diariamente.

Como se puede ver en la Figura 1 y la Figura 2 se va a partir y trabajar con ése exoesqueleto y con su electrónica de control.

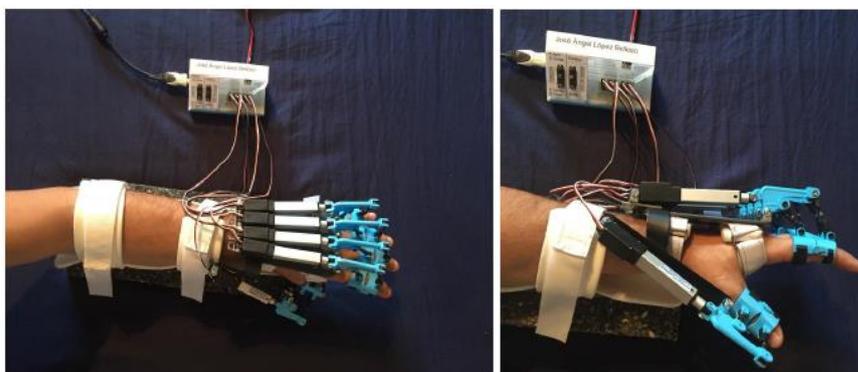


Figura 1 Conjunto de exoesqueleto y electrónica del proyecto [1]



Figura 2 Envoltura de electrónica del proyecto [1]

Al finalizar el trabajo se mostraran las modificaciones realizadas de este material.

1.2. Objetivos del proyecto

El objetivo general de este TFG es la sensorización de un dedo de un dispositivo mecatrónico tipo exoesqueleto de mano para dotarle de la capacidad de pensar, coger o tomar objetos, para interactuar con ellos.

Para conseguir ese objetivo general, se han seguido los siguientes pasos:

- Estudio de los diferentes tipos de sensores para presión de objetos.
- Búsqueda de un sensor adecuado para incorporar al exoesqueleto.
- Diseño CAD, fabricación y construcción de un elemento que albergue el sensor.
- Incorporación del sensor elegido a la programación existente del exoesqueleto.
- Pruebas manuales del exoesqueleto junto al sensor.
- Mejora del exoesqueleto y de la electrónica de control.

1.3. Estado del arte

En el campo de la bioingeniería y la biomedicina se están realizando grandes avances en la creación de dispositivos mecatrónicos tipo exoesqueleto, ya sea de piernas o brazos, que permita al ser humano mejorar la calidad de vida. Éstos dispositivos tienen gran cantidad de aplicaciones, como la ayuda a la hora de cargar objetos pesados con facilidad o la de ejercer una fuerza superior a la desarrollada por un humano. En este proyecto nos interesan los dispositivos orientados a la rehabilitación de extremidades, y en particular, los dedos de la mano.

A continuación se citan varios proyectos de diferente índole que representan las líneas de trabajo actuales en este ámbito.

1.3.1. Exo-Glove Poly

El proyecto biomecánico desarrollado por ingenieros de la Universidad Nacional de Seúl, Corea del Sur, consiste en un robot flexible, de base polimérica, que permite a personas que tienen limitación en las funciones motrices de la mano coger objetos de una manera sencilla.

El robot consta de un guante exoesqueleto de silicona con dos dedos, índice y corazón, y una estructura pasiva para el dedo pulgar de la mano. El guante de silicona actúa en los dos dedos flexionando o extendiendo las falanges de los mismos mediante unos sensores que actúan como tendones. En el dedo pulgar se coloca una estructura de termoplástico y silicona que mantiene el dedo en una postura óptima para el agarre de objetos como se puede ver en la Figura 3.

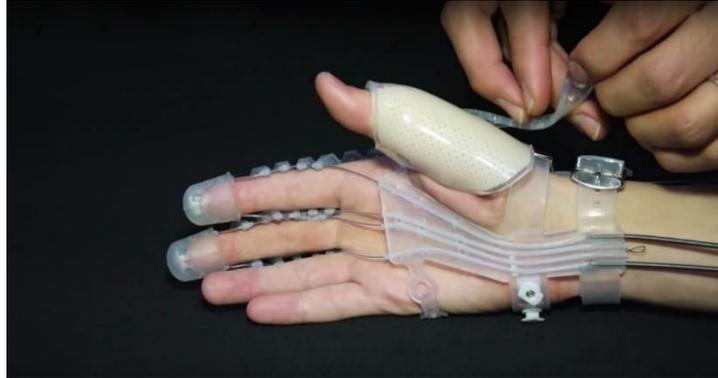


Figura 3 Exo-Glove Poly

Además del guante exoesqueleto y el adaptador para el dedo pulgar, existe un botón que permite el cierre o apertura de la mano tensando y destensando los hilos metálicos que recorren el guante, permitiendo agarres de hasta 40 N de fuerza, capaces de permitir realizar las actividades cotidianas.

Los materiales en los que está realizado el proyecto le otorgan ligereza, resistencia al agua, higiene, robustez, adaptabilidad a varios tipos de manos y un bajo precio.

Para más información sobre el proyecto Exo-Glove Poly consulte [2] en la bibliografía del proyecto.

1.3.2. Sensor flexible para detectar tumores

Un grupo de investigadores formado por ingenieros de las universidades de Tokio y Harvard trabaja en el desarrollo de un sensor flexible, como se ve en la Figura 4 y Figura 5, adaptable a los dedos, con la finalidad de detectar tumores en etapas tempranas.



Figura 4 Sensor flexible para detectar tumores

El sensor está formado por transistores orgánicos y conmutadores electrónicos realizados en materiales orgánicos basados en el oxígeno y el carbono, haciendo al sensor una estructura de nanofibra.

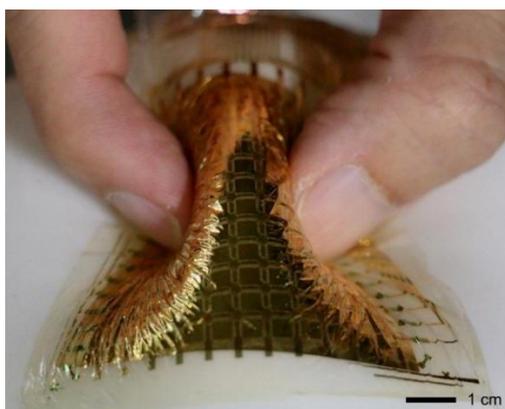


Figura 5 Flexibilidad del sensor

Los autores creen que el sensor tiene un enorme potencial en el campo de los dispositivos “vestibiles” o “wearables”, ya que es el primero que puede medir la presión sobre objetos reales que tiendan a deformarse.

Para más información sobre el proyecto consulte [3] en la bibliografía del proyecto.

1.3.3. Exoesqueleto para rehabilitación de dedos

Investigadores del Área de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Málaga (UMA) han desarrollado una prótesis ortopédica para facilitar el movimiento pasivo de los dedos de la mano, que es realizado sin que el implicado ejerza ningún tipo de esfuerzo. Este dispositivo, mostrado en la Figura 6, o exoesqueleto podría complementar la labor del fisioterapeuta en los procesos de recuperación requeridos cuando se produce una fractura, esguince o se programa una cirugía por lesión en el tendón.

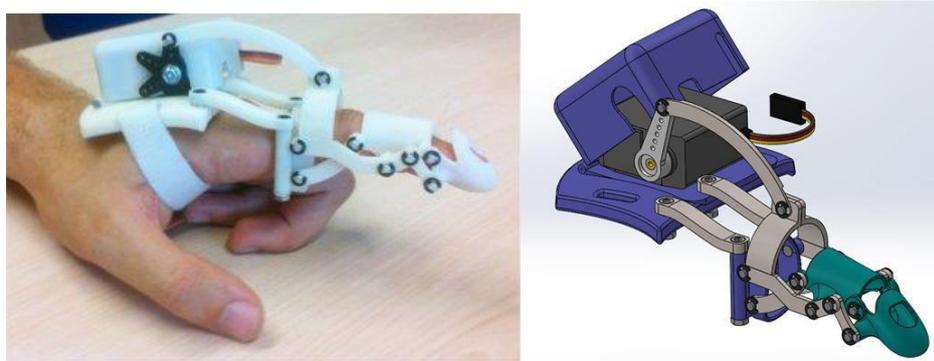


Figura 6 Exoesqueleto desarrollado en la UMA

La novedad de este trabajo es el diseño personalizado del prototipo de forma virtual y reproduce el propio movimiento de los dedos de la mano del paciente, así como la longitud de su falange. Con este diseño y a través de una impresora 3D, se fabrica el dispositivo con las características deseadas.

Para más información acerca del proyecto consulte [4] en la bibliografía del proyecto.

1.3.4. Finger TPS Sensor

La empresa PPS, Pressure Profile Systems, especializada en el diseño de sensores de presión ha desarrollado un proyecto para medir la presión ejercida sobre un objeto a la hora de agarrarlo. Finger TPS es un instrumento de medida que, cómodamente y con la mínima molestia, recoge datos en puntos de los dedos y de la mano.

El proyecto consta de una serie de guantes para los dedos en los que se alojan sensores, propios de la compañía, conectados a un acondicionador de la señal en la muñeca y a un dispositivo de control, como se muestra en la Figura 7. Las señales recibidas por el dispositivo de control se conectan con un software de análisis que permite exportar y guardar datos, realizar análisis de funciones y grabar y reproducir los videos con los datos recibidos para una mejor comprensión.



Figura 7 Finger TPS Sensor

Las ventajas de este proyecto son: la comodidad en la manipulación de objetos, el diseño de los sensores se asemeja a una experiencia real en interacciones con el entorno, calibración sencilla gracias al software, conectividad bluetooth para minimizar el número de cables y sensores capacitivos de alto rendimiento que reducen las veces que se calibra el aparato.



Figura 8 Finger TPS Sensor

Para más información acerca de Finger TPS Sensor consulte [5] en la bibliografía del proyecto.

1.3.5. Cyber Glove Systems

La empresa Cyber Glove Systems centra su trabajo en la creación de sofisticados guantes de captura de movimiento en 3D. Sus productos permiten a los usuarios capturar detalladamente los movimientos de los dedos, manos y brazos para digitalizarlos e interactuar, en realidad virtual, con objetos y entornos virtuales.

Entre los productos fabricados, destacan la saga de guantes CyberGlove, los cuales digitalizan el movimiento de los dedos y de la mano en tiempo real y los muestran por el interfaz gráfico del propio guante. Consta de entre 18 y 22 sensores flexibles resistivos y se comunica inalámbricamente con el receptor wireless que posee. Sus principales campos de aplicación son la captura de movimientos, estudios biomecánicos, entrenamiento médico y realidad virtual, como queda demostrado en la Figura 9.



Figura 9 Guante CyberGlove de Cyber Glove Systems

Otro producto de guantes que fabrica la empresa es lo forman la saga de guantes CyberTouch, los cuales, aparte de digitalizar todo el movimiento de los dedos y de la mano, utiliza una realimentación digital, dando la sensación táctil con objetos alojados en el interfaz gráfico, creando una experiencia más real al usuario. Consta de seis actuadores vibro táctiles, uno por cada dedo de la mano y otro en la palma de la misma. Al igual que el CyberGlove, se aplica a campos de rehabilitación médica, realidad virtual y estudios biomecánicos.



Figura 10 Guante CyberGlove de Cyber Glove Systems

Para más información acerca de CyberGlove consulte [6] en la bibliografía del proyecto.

1.3.6. Proyectos de estudiantes

Diversos grupos de investigación de estudiantes universitarios dedican tiempo y recursos en el diseño e implementación de prótesis para la recuperación y rehabilitación de la movilidad de la mano. Dentro de todos los proyectos de estudiantes existentes se mencionan los proyectos del colombiano Nicolás Rojas y estudiantes de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México y de José Ángel López Beloso de la Universidad de Valladolid.

El proyecto de Nicolás Rojas consiste en un exoesqueleto de mano mecánico y electrónico. El exoesqueleto está formado por guante con un motor que permite articular los diferentes dedos de la mano, todos a la vez, para agarrar objetos, como se ve en la Figura 11. El proyecto ha sido galardonado con el premio al diseño e investigación en Inglaterra otorgado por el Centro de Investigación para un Envejecimiento Saludable de la Universidad de Aston, Inglaterra.

En un futuro modelo, el exoesqueleto tendrá un sensor de fuerza en la punta de los dedos. De modo que cuando la persona tenga más movilidad pueda presionar ese sensor para inducir el movimiento del guante electrónico.

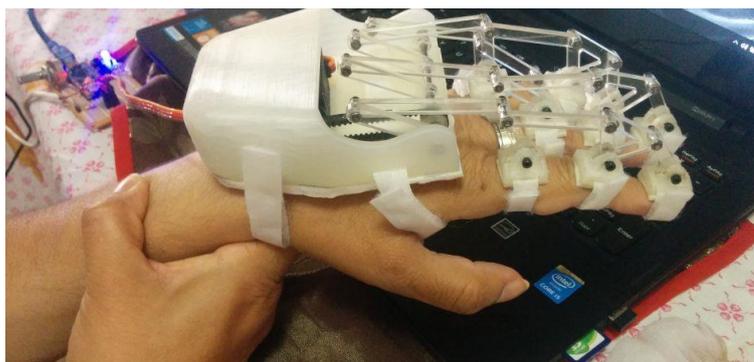


Figura 11 Exoesqueleto de Nicolás Rojas

Para más información acerca del proyecto de Nicolás Rojas consulte [7] en la bibliografía del proyecto.

Un grupo multidisciplinario de estudiantes de la BUAP diseñó un sistema de rehabilitación basado en un exoesqueleto que se adapta a los dedos de una persona.

El exoesqueleto está conformado por dos áreas: una, consiste en una parte de ingeniería mecánica en la que se desarrollaron las funciones de transmisión de movimiento, que permiten empujar y cerrar las falanges de la mano; la segunda, consta del sistema electrónico encargado de controlar las funciones, como se muestra en la Figura 12. El mecanismo se estructura por un conjunto de eslabones que permiten transformar un movimiento rotacional en una fuerza lineal, por medio de un motor. Los diseños fueron elaborados en un software especial y luego materializados por medio de impresión 3D.

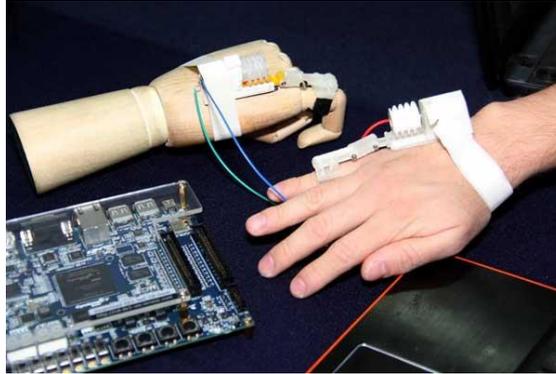


Figura 12 Exoesqueleto desarrollado por estudiante de BUAP

Para más información acerca del proyecto de los estudiantes de BUAP consulte [8] en la bibliografía del proyecto.

Ambos proyectos comparten el bajo costo en los materiales y la fácil fabricación y control de los mismos.

El proyecto de José Ángel López Belloso, [1], desarrollado en la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid, plantea el diseño mecánico, fabricación y construcción de un dispositivo mecatrónico tipo exoesqueleto de mano para su utilización en tareas de rehabilitación de mano, para personas que tienen discapacidad neuromotora, debido a que han sufrido daño cerebral adquirido. Este dispositivo mecatrónico se compone de una parte mecánica capaz de realizar todos sus movimientos y una parte electrónica de control que dote de movimiento dicho dispositivo. Varias fotografías del dispositivo son las mostradas en la Figura 13.

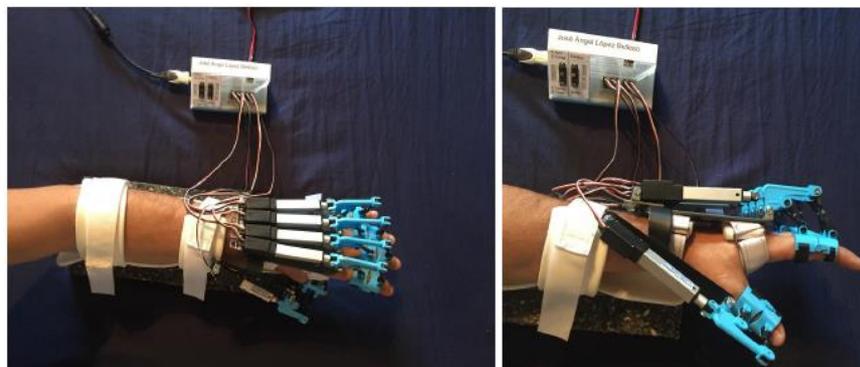


Figura 13 Proyecto desarrollado por José Ángel López Belloso

2. Sensores de presión para dispositivos de rehabilitación de dedos

Dado que el objetivo del proyecto es sensorizar el exoesqueleto para dotarle de la capacidad de coger objetos, es necesario conocer qué se entiende por sensor y los diferentes tipos de sensores que podemos encontrar en el mercado, siempre aplicado a la tarea de presión de objetos y adaptable al exoesqueleto de mano.

2.1. Definición de sensor

Entendemos por sensor aquel dispositivo que a partir de la energía del medio donde se mide produce una señal traducible que es función de la variable medida. No hay que confundir el término sensor con el término transductor, que es un dispositivo que transforma una señal de una forma física en otra forma física distinta, ya que es un término más amplio. Los transductores son el elemento inicial de la cadena de medida, convierten la variable a medir en una señal eléctrica.

Existen seis tipos de señales físicas: mecánicas, térmicas, magnéticas, eléctricas, ópticas y químicas. Cualquier dispositivo que convierta una señal de un tipo en otra de otro tipo podría ser considerado un transductor. No obstante, se considera transductor a aquellos dispositivos que ofrecen una señal de salida eléctrica.

A continuación se van a explicar los transductores capacitivos y los transductores resistivos porque son los que más aplicaciones y variedad puede haber. No se han incluido los transductores inductivos porque limitan el uso del exoesqueleto a piezas metálicas. Además, aunque no se interprete como sensor un interruptor, se van a incluir tras los transductores resistivos los interruptores o microinterruptores, ya que pueden dar una señal digital, o abierto o cerrado (0 o 1), en vez de una aplicación analógica como son los otros tipos.

2.1.1. Transductores capacitivos

Transductor capacitivo es un tipo de transductor electromecánico. La parte mecánica utiliza la presión para generar un desplazamiento de un elemento elástico. Este desplazamiento es utilizado para generar cambios en energía eléctrica, proporcionales a la presión ejercida. En el caso de transductores capacitivos, el elemento utilizado para generar cambios en la energía eléctrica son capacitores.

Desde el punto de vista puramente teórico, se dice que el transductor está formado por un oscilador cuya capacidad la forman un electrodo interno y otro externo. Dependiendo del tamaño, de la distancia entre las placas y del dieléctrico entre los electrodos, la capacidad de almacenamiento variará.

La capacidad entre dos conductores se rige por la siguiente fórmula:

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot F$$

Siendo F un factor relacionado con la geometría de los conductores. En el caso de dos placas paralelas, $F = A/d$ (A es superficie, d es distancia entre placas). Los parámetros ϵ_0 y ϵ_r muestran la permeabilidad de aire y la relativa del medio. A partir de esa fórmula, podemos diferenciar sensores basados en la variación de la permeabilidad relativa ϵ_r , como sensores capacitivos de temperatura o sensores capacitivos de nivel, y sensores basados en la variación de F , como sensores de desplazamiento.

Algunos transductores capacitivos basados en la variación de F son los mostrados en la Figura 14 con sus respectivas fórmulas de cálculo de capacidad. Nombrados de izquierda a derecha son: condensador de distancia variable entre placas, condensador con superficie enfrentada variable y condensador con dieléctrico variable.

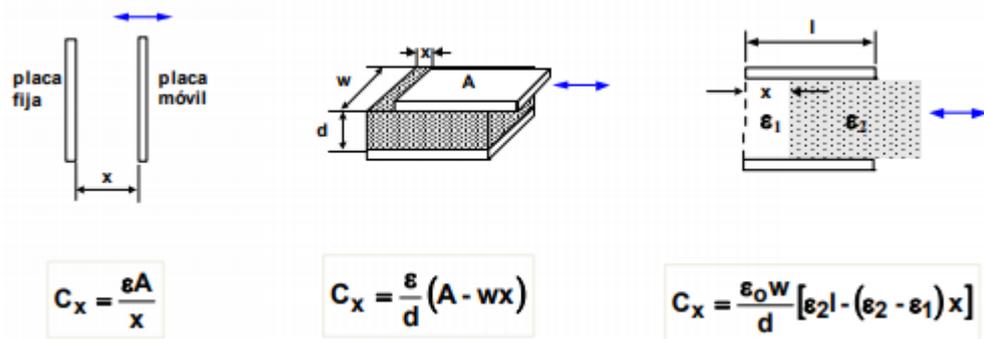


Figura 14 Tipos de transductores capacitivos

Estos sensores se emplean para la identificación de objetos, para funciones contadoras y para toda clase de controles de nivel de carga de materiales sólidos o líquidos. También son utilizados para muchos dispositivos con pantalla táctil, como teléfonos móviles, ya que el sensor percibe la pequeña diferencia de potencial entre membranas de los dedos eléctricamente polarizados de una persona.

La ventaja de este dispositivo es la detección de objetos sin necesidad de contacto físico, debido a su funcionamiento tiene muy buena adaptación a los entornos industriales, adecuado para la detección de materiales polvorientos o granulados. La duración de este sensor es independiente del número de maniobras que realice y soporta bien las cadencias de funcionamiento elevados.

2.1.2. Transductores resistivos

Un transductor resistivo de presión es un dispositivo capaz de transmitir mediante corrientes, con un voltaje determinado, el valor de presión medido por el sensor, que generalmente es un elemento elástico. Es resistivo ya que se varía el valor de una resistencia.

La resistencia entre dos conductores se rige por la siguiente fórmula:

$$R = \rho \cdot F$$

Siendo ρ la resistividad y F un factor relacionado con la geometría del conductor. A partir de esa fórmula podemos encontrar diferentes tipos de sensores:

- Sensores resistivos basados en la variación de alguno de los parámetros ρ y F .
- Sensores resistivos de temperatura: la resistividad tanto de metales como de semiconductores varía con la temperatura. La resistividad de un semiconductor decrece con la temperatura (coeficiente de temperatura negativo). La resistividad de un metal aumenta con la temperatura (coeficiente de temperatura positivo).
- Sensores resistivos de luz: la resistividad de algunos materiales depende de la iluminación incidente (efecto fotoresistivo).
- Sensores resistivos de fuerza: ante un esfuerzo mecánico tanto metales como semiconductores varían su resistencia. Si hablamos de galgas extensiométricas y consideramos un conductor de longitud l , sección A y resistividad ρ , la resistencia viene determinada por la siguiente fórmula:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

Si se somete a un esfuerzo en dirección longitudinal, cada una de las magnitudes que intervienen en R variaran y, por tanto, también cambiara R :

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} + \frac{dA}{A}$$

El cambio de longitud resultante de aplicar una fuerza F , siempre y cuando no se entre en la zona de fluencia, será, de acuerdo a la ley de Hooke:

$$\sigma = \frac{F}{A} = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{dl}{l}$$

Siendo: E la constante del material o módulo de Young, σ la tensión mecánica y ε la deformación unitaria.

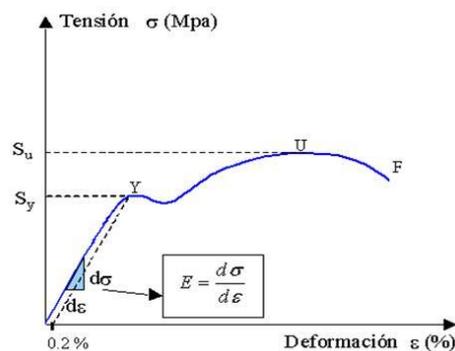


Figura 15 Grafica de deformación elástica de un material

Como la pieza, además de longitud, tiene una dimensión transversal t , al aplicar un esfuerzo longitudinal no solo cambia la longitud, sino también la sección transversal. La relación entre ambos cambios viene dada por la ley de Poisson:

$$\mu = -\frac{dt/t}{dl/l}$$

Donde μ es el coeficiente de Poisson y su valor varía entre 0 y 0,5.

Si hablamos de galgas semiconductoras el elemento sensible es una banda de cristal semiconductor. Un semiconductor al ser sometido a un esfuerzo, varía su resistividad (efecto piezoeléctrico) junto con sus dimensiones físicas.

La resistividad del cristal depende de la concentración específica de portadores y de la orientación cristalográfica respecto al esfuerzo. Su sensibilidad es 50 o 60 veces mayor que la de una galga metálica, aunque acusa más las variaciones de temperatura.

Dependiendo del material que forme la galga semiconductor, la resistividad queda determinada por:

$$\frac{dR}{R_0} = 119.5 \cdot \varepsilon + 4 \cdot \varepsilon^2 \text{ para el material tipo P}$$

$$\frac{dR}{R_0} = -110 \cdot \varepsilon + 10 \cdot \varepsilon^2 \text{ para el material tipo N}$$

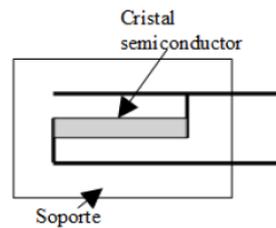


Figura 16 Sensor Resistivo Semiconductor

Las ventajas que presentan este tipo de sensores resistivos de fuerza son la buena linealidad y el pequeño tamaño, pero es importante no llevar a la galga fuera del margen elástico de deformaciones y que el esfuerzo se transmita totalmente a la galga a la hora de colocarla o pegarla.

Generalmente se emplean en el montaje eléctrico denominado Puente de Wheatstone. El circuito montado se utiliza para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente.

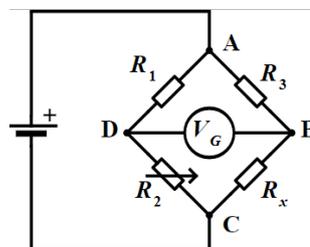


Figura 17 Puente Wheatstone

El montaje electrónico, alimentado por tensión, se rige por las siguientes ecuaciones:

$$V_g = V \cdot \frac{R_1 R_x - R_2 R_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_x}$$

Para tener una salida nula: $k = \frac{R_1}{R_x} = \frac{R_2}{R_3}$

- Sensores táctiles resistivos: se fabrican mediante conductores piezorresistivos, gracias a que son muy robustos en situaciones de vibraciones y sobrepresión por su complejión flexible. Sobre la cara del sensor se montan los electrodos para detectar la resistencia.

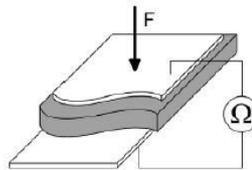


Figura 18 Esquema de un sensor táctil resistivo

La resistencia de salida consiste en tres resistencias, R_v corresponde a la resistencia volumétrica del material colocado entre los electrodos, a efectos prácticos se toma como constante, R_s corresponde a la resistencia superficial variable al aplicar una carga. En la imagen siguiente se muestra un esquema de un sensor fácil flexible.

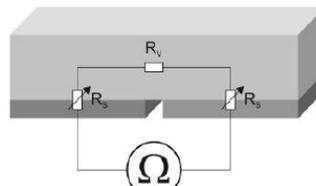


Figura 19 Esquema resistivo de un sensor táctil resistivo

2.1.3. Interruptores, pulsadores y microinterruptores

Son dispositivos que permiten el flujo de corriente en el circuito cuando están activos, ya sean normalmente abierto o normalmente cerrado. Son dispositivos comúnmente usados en el control de dispositivos electrónicos. Se emplean a menudo como conmutadores para construir y conectar circuitos.

Desde el punto de vista de la ingeniería, el funcionamiento de un interruptor es muy básico. Cuando un circuito está abierto la intensidad de corriente que circula es nula, y el aparato no funciona. Si está cerrado funciona.

El funcionamiento del interruptor se basa en abrir el circuito en un determinado punto, cortando el paso de la corriente a través de los conductores.

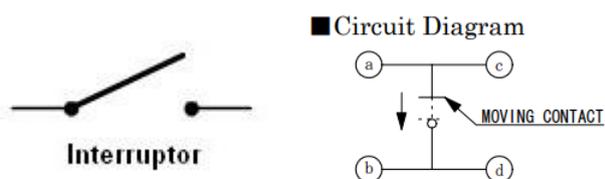


Figura 20 Esquemas eléctricos comunes de interruptores

Para más información acerca de sensores y transductores consulte [9] en la bibliografía del proyecto.

2.2. Elección de sensores

A la hora de elegir el elemento necesario para la sensorización del exoesqueleto, exploramos el mercado de vendedores de material electrónico como son RS Components, Farnell y Electronica Embajadores.

En principio, y para una primera selección, se van a buscar sensores que tengan un tamaño y volumen reducidos, ya que se pretende colocar en la zona de la yema de los dedos, introducido, acoplado o incorporado en una especie de dedal para la última falange del dedo índice de la mano. Pueden ser sensores planos y alargados o con forma cubica y con poca altura, pero que no excedan de unas dimensiones aproximadas de 20x15x3 mm.

Comenzamos buscando sensores o transductores en el distribuidor Farnell. Accedemos a la página web de Farnell y seguimos la ruta: “Todos los Productos>Sensores y Transductores>Sensores”, encontramos la gran variedad de posibilidades en el campo de la sensorización. Comenzamos mirando en el apartado de “Sensores / Interruptores de Proximidad”. Dentro de este campo existen sensores de proximidad de Efecto Hall, Inductivos, Magnetorresistivos, Ultrasónicos, Reed y Capacitivos de Proximidad.

Quedan descartados de búsqueda los:

- Sensores de Efecto Hall, ya que este sensor de efecto Hall se sirve del efecto Hall para la medición de campos magnéticos, corrientes o para la determinación de la posición en la que está.
- Sensores Inductivos, porque son sensores que sirven para detectar materiales ferrosos, y se pretende detectar todo tipo de objetos.
- Sensores Magnetorresistivos, pues, junto a los sensores de efecto Hall, son los empleados en la determinación de la posición.
- Sensores Ultrasónicos, porque detectan todo tipo de formas, colores y materiales a una determinada distancia. Emite un sonido y calcula el tiempo que tarda en regresar.
- Sensores Reed, porque son interruptores de lengüeta activados por campos magnéticos.

Los sensores capacitivos de proximidad parecen la mejor alternativa dentro de este campo. Dado que, como se ha dicho anteriormente, se precisa que el sensor se aloje en un dedal, se busca un tamaño reducido, tanto de superficie como de volumen, y un rango corto de actuación.

Tras realizar una búsqueda, aunque éste tipo de sensores no parecían los más adecuados para la presión de objetos en el exoesqueleto de mano se encontraron dos que podían cumplir los requisitos:

- Sensor Capacitivo de Proximidad, Serie E2K-F, Plano, 10 mm, NPN-NO, 10 Vdc a 30 Vdc, Diseño CAD.



Figura 21 Sensor Capacitivo de Proximidad

Éste sensor, Figura 21, se descarta porque se usa para detectar metales ferrosos y tiene unas dimensiones de 50x50x1mm, demasiado grandes para la aplicación pretendida. Más información acerca del sensor en [10] en la bibliografía del proyecto.

- Sensor Capacitivo CQ35-25NPP-KC1, 25mm, 10-36VDC.



Figura 22 Sensor Capacitivo CQ35-25NPP-KC1

Éste sensor, Figura 22, se descarta porque no cumple con la alimentación proporcionada por una placa Arduino, placa de electrónica que controla el funcionamiento de nuestro exoesqueleto. Más información acerca del sensor en [11] en la bibliografía del proyecto.

Continuamos la búsqueda en un nuevo campo como es: “Sensores de Fuerza y Células de Carga”. Una célula de carga o celda de carga es un transductor que convierte la fuerza aplicada sobre ella en una señal eléctrica medible. Los diseños de células de carga se pueden distinguir de acuerdo con el tipo de señal de salida generada (neumático, hidráulico, eléctrico) o de acuerdo con la forma en que detectan el peso (flexión, cizalladura, compresión). En nuestro caso necesitamos una célula de carga de compresión. En este apartado no tenemos más división de sensores, por lo que comenzamos a estudiar las características de los que se ofrecen. Los sensores que cumplen en mayor medida las especificaciones necesarias son:

- HONEYWELL-Sensor de Fuerza, Perfil Bajo, Serie FSS, 1.5 Kg, 5Vdc,-40°C a 85° C.



Figura 23 Sensor de Fuerza Honeywell

Éste sensor, Figura 23, puede ser adecuado para la utilización en este proyecto dado que posee unas dimensiones de 5.59x9.14x3.75mm y una carga soportada de 1.5Kg, que se adecua a la fuerza que puede ejercer un hombre con un dedo. Más información acerca del sensor en [12] en la bibliografía del proyecto.

- Sensor de Fuerza, Serie FSA, 10N, Diagnostico, Salida I2C, %Vdc, 3% FSAGPDX010WCAA5.



Figura 24 Sensor de Fuerza Serie FSA

Éste sensor, Figura 24, puede ser adecuado para la utilización en este proyecto dado que posee unas dimensiones de 25.02x17.36x8.25mm y una carga soportada de 10N, que se adecua a la fuerza que puede ejercer un hombre con un dedo. Más información acerca del sensor en [13] en la bibliografía del proyecto.

- Sensor de Fuerza Robusto, Serie FS, 1500g, 10 Vdc, -40°C a 85°C, FSG15N1A.



Figura 25 Sensor de Fuerza Robusto Serie FS

Éste sensor, Figura 25, puede ser adecuado para la utilización en este proyecto dado que posee unas dimensiones de 12.7x8x10.3mm y una carga soportada de 1.5 Kg, que se adecua a la fuerza que puede ejercer un hombre con un dedo. Más información acerca del sensor en [14] en la bibliografía del proyecto.

- Galga de deformación RS Pro N11MA512023, 5mm, 120 Ω



Figura 26 Galga de deformación RS Pro

Ésta galga extensiométrica laminar, Figura 26, para esfuerzos estáticos o dinámicos, puede ser adecuada gracias a su pequeño tamaño, 9.5x3.5mm. Más información acerca del sensor en [15] en la bibliografía del proyecto.

Buscando además en otros proveedores de material electrónico como Electrónica Embajadores, en el apartado de sensores ofrecen una gran variedad. Llama la atención un sensor piezoeléctrico, que es un dispositivo que utiliza el efecto piezoeléctrico para medir presión, aceleración, tensión o fuerza; transformando las lecturas en señales eléctricas. El sensor ofertado en la página es el siguiente:

- Sensor Piezoeléctrico-Vibraciones, Golpes, Flexibilidad, Tacto-LDTP-028K. Ref.SSPZ001



Figura 27 Sensor Piezoeléctrico Flexible

Película piezoeléctrica de polímero flexible PVDF. Amplio rango dinámico. Las dimensiones vistas en su datasheet son 13x25mm, bastante reducidas. Éste sensor, Figura 27, puede ser una alternativa a tener en cuenta para este proyecto. Más información acerca del sensor en [16] en la bibliografía del proyecto.

También, como se comentó en capítulos anteriores, se van a buscar también pequeños interruptores. Como se emplea una tarjeta Arduino para controlar el exoesqueleto suelen venir en el mismo kit de la tarjeta una serie de elementos para realizar montajes y programarlos como son: diodos LED, resistencias, cables, pantallas, condensadores, potenciómetros y botones. Como el botón que viene en el kit es pequeño se incorpora a la búsqueda de un sensor apropiado.

- Push-Button: pulsador perteneciente a los kit Arduino que se ofertan en el mercado.



Figura 28 Push-Button Small

Éste pulsador, Figura 28, se trata de un dispositivo de un tamaño reducido, 6.5x6.5x3.5mm que lo pueden hacer adecuado para el propósito. El funcionamiento es simple y permite la conexión desde diferentes pines, ya que están conectadas las patillas del dispositivo.

Una vez investigado el mercado de posibles sensores o transductores para la sensorización de nuestro exoesqueleto, se eligieron, de todos los mencionados anteriormente, para la realización de pruebas:

- Sensor de fuerza, mostrada en la Figura 23.
- Galga de deformación RS Pro, mostrada en la Figura 26.
- Sensor piezoeléctrico flexible, mostrado en la Figura 27.
- Push-Button Small, mostrado en la Figura 28.

Las hojas de características de estos sensores se pueden encontrar en los Anexos V, VI, VII y VIII.

La elección de estos sensores se ha basado en priorizar el tamaño, elegir un sensor apto para la programación con Arduino y la respuesta ante un esfuerzo o deformación en el elemento que lo aloje.

3. Dedales diseñados para incorporar sensores en dispositivos de rehabilitación de dedos

Para poder incorporar los sensores seleccionados a nuestro exoesqueleto debemos diseñar una serie de dedales o capuchones para el dedo.

Las herramientas que nos van a permitir diseñar, fabricar y construir estos elementos van a ser: Autodesk Inventor 2018, impresora 3D modelo Prusa i3 Hephestos y Cura Engine 2.4.0.

3.1. Autodesk Inventor 2018

El software CAD Autodesk Inventor es una herramienta de diseño CAD paramétrico de la empresa Autodesk que permite diseñar piezas modelando las dimensiones, geometría y material empleado.

Este programa posee gran variedad de operaciones que realizar una vez dibujado un boceto del objeto. Entre las más empleadas en este proyecto se encuentran la extrusión, el vaciado, el barrido, el empalme y el chaflán.

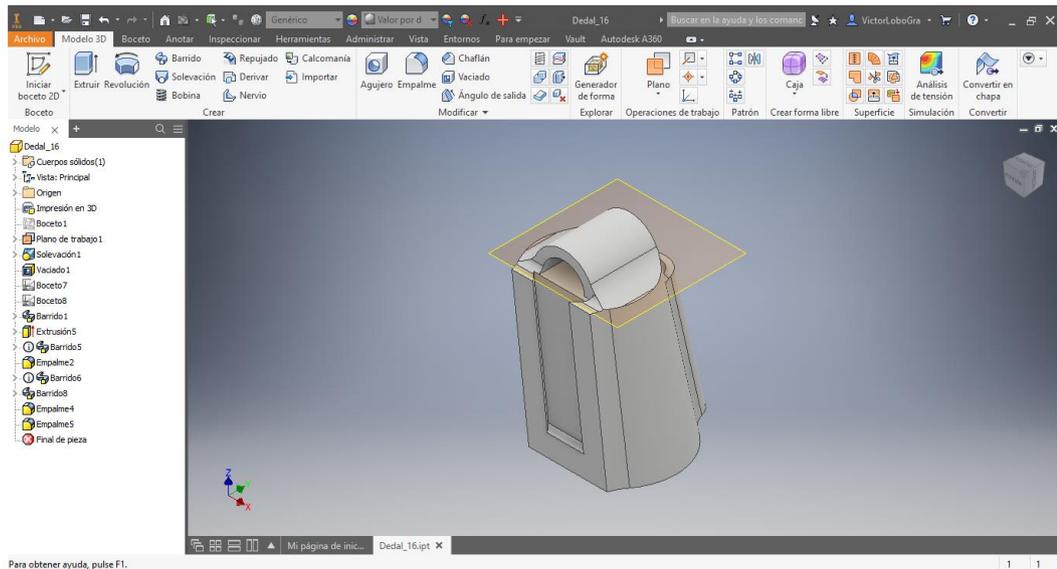


Figura 29 Interfaz del Autodesk Inventor 2018

El interfaz está organizado de la siguiente manera: en la parte superior tenemos la zona de las operaciones disponibles para realizar sobre el objeto diseñado, a la izquierda de la pantalla tenemos el árbol de operaciones realizadas sobre el objeto, y en la parte central tenemos el objeto de trabajo. Dado que las piezas diseñadas se van a realizar en impresión 3D, es importante saber que en la pestaña Entornos podemos generar los archivos .stl necesarios para que la impresora 3D pueda realizar los objetos.

3.2. Impresora 3D empleada

La impresora 3D modelo BQ Prusa i3 Hephestos es un tipo de impresora que emplea la tecnología llamada Modelado por Deposición Fundida o FFF, en inglés “Fused Filament Fabrication”.



Figura 30 Impresora 3D Prusa i3 Hephestos de BQ

El material empleado suele ser un termoplástico, mayoritariamente tipo PLA o ABS, que por lo general resulta bastante económico. Este material se suministra habitualmente en forma de un filamento enrollado en forma de bobina. Este filamento se funde al pasar a través de un extrusor calentado a la temperatura adecuada, dando lugar a un flujo de material fundido de grosor calibrado mucho menor.



Figura 31 Rollos de material termoplástico PLA

El poliácido láctico, ácido poliláctico o PLA es un polímero termoplástico formado por moléculas de ácido láctico. Se obtiene a partir de almidón de productos vegetales (almidón de maíz, yuca o caña de azúcar) y es biodegradable. Tiene propiedades semejantes al tereftalato de polietileno (PET).

El plástico PLA empleado en la realización de este proyecto es de la marca española BQ. En su ficha técnica podemos encontrar diferentes datos como la densidad, resistencia a la flexión, dureza Shore D y el modulo elástico de flexión. Los valores de las características nombradas, siguiendo el orden de escritura en la frase, son: $1.24 \frac{g}{cm^3}$, $108 MPa$, $85 Sh D$ y $3600 MPa$. Para más información acerca del PLA de BQ consulte [9] en la bibliografía del proyecto.

Existen otros materiales termoplásticos que tienen características elastoméricas (Termoplásticos Elastómeros, TPE), principalmente, la capacidad de ser estirados con alargamientos moderados y que, al retirar la tensión, el material vuelva a su estado original. Usualmente son fabricados mediante la mezcla química o física de un plástico y un caucho.

Filaflex y FlexiSmart son dos marcas comerciales de filamentos de termoplásticos elastómeros (TPE). Ambos materiales, Filaflex y FlexiSmart han sido empleados en este proyecto. El Filaflex de la marca Recreus empleado en este proyecto, empresa española fundada por Ignacio García, posee una dureza Shore de 85, resultando un material muy blando, flexible y elástico. El FlexiSmart de la marca FFFWorld, empresa española que pertenece al Grupo Estepla Gestión SA, posee una dureza de 97A, densidad de 0.96g/cm^3 , elongación máxima del 600%. Para más información acerca de Recreus y FFFWorld consulte [17] y [18] en la bibliografía del proyecto.

3.3. Programa de laminación Cura Engine

Cura Engine es un programa software de laminación de objetos para su posterior impresión en impresoras 3D. El software es gratuito y fácil de manejar para principiantes en el mundo de la impresión 3D con el modo recomendado.

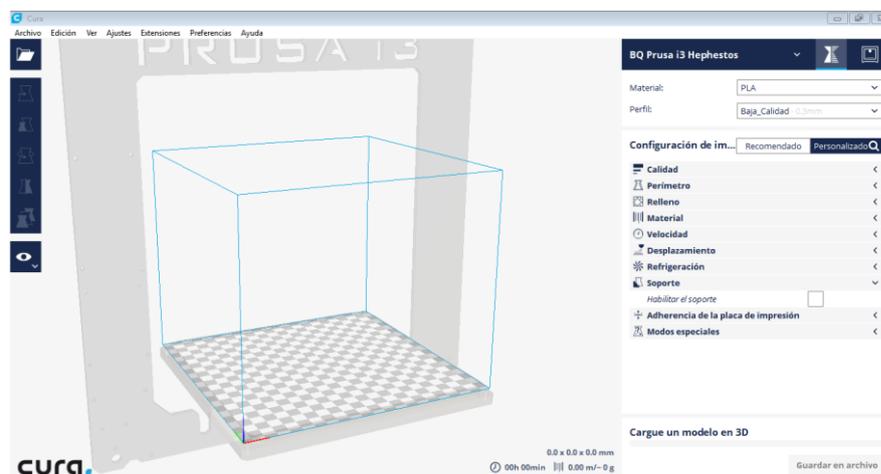


Figura 32 Interfaz de Cura Engine 2.4.0

En este programa, se debe configurar la impresora con la que se va a trabajar, introduciendo dimensiones y los parámetros de impresión. En este proyecto se ha configurado la impresora BQ Prusa i3 Hephestos con diferentes perfiles de impresión, todos ellos en el modo personalizado. Para conocimiento del lector, en caso de querer realizar este proyecto, se van a adjuntar los perfiles de impresión empleados a lo largo de este proyecto para la versión 2.4.0. Los perfiles de impresión se encuentran en el Anexo II.

Se cargan las piezas en formato .stl, se distribuyen en la superficie de impresión y se lamina el objeto. El proceso de impresión puede variar dependiendo del tamaño de la pieza, material empleado y acabado superficial deseado.

3.4. Primeros prototipos de capuchones o dedales

A continuación se muestra la progresión que se ha seguido, desde el primer “prototipo” hasta el último y definitivo para la realización de pruebas con los sensores seleccionados en el apartado 2.2.

3.4.1. Prototipo 1

Tomando la idea de Finger TPS, se modeló para empezar un diseño básico de dedal para todo el dedo. Se realizó en Inventor a través de varias solevaciones y un posterior vaciado del objeto. El resultado es el mostrado en la Figura 33.

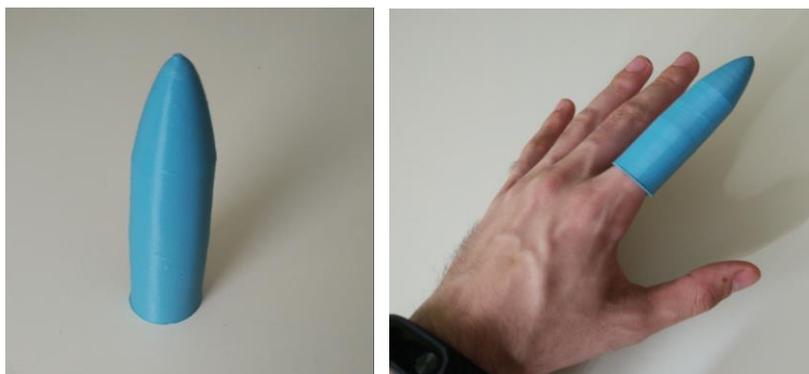


Figura 33. Prototipo 1 de dedal

Tras probar la flexibilidad del diseño y su agarre, se llegó a la conclusión de que no era todo lo ergonómico posible, no se adaptaba a la anatomía del dedo aunque era fácil de colocar en el dedo y el coste de doblar las falanges era alto, pudiendo provocar alguna lesión en la extremidad.

3.4.2. Prototipo 2

El siguiente prototipo, solucionaba algunos de los problemas, tales como la facilidad del doblar el dedo y la ergonomía pero el coste de colocación era elevado al diseñarse con unas medidas muy ajustadas. El resultado es el de la Figura 34.



Figura 34 Prototipo 2 de dedal

3.4.3. Prototipo 3

Se decidió por realizar un modelo más simple y reducido en forma de dedal, únicamente para la última falange del dedo. Realizando diseños similares en los siguientes modelos, el resultado es un dedal de fácil colocación en el que en el futuro se puede incorporar un sensor. De los dedales mostrados en la Figura 35, el que mejoraba más el diseño es el primero empezando por la izquierda, teniendo una parte plana en la zona de la huella dactilar.



Figura 35. Prototipo 3 de dedal

3.4.4. Prototipo 4

Se empezó a diseñar un dedal que alojara un primer sensor, en este caso, el microinterruptor push-button. El interruptor pulsador es el mostrado en apartados del proyecto anteriores. Se han tomado las dimensiones del interruptor de su datasheet y se han introducido en el programa Inventor. En este caso el material empleado es PLA, por ser un material rígido que permite alojar sin deformaciones el interruptor. El resultado no cumple la comodidad deseable en un dedal por lo que se realiza el mismo diseño mezclando dos materiales, PLA y FlexiSmart. El resultado es el de la Figura 36.



Figura 36 Prototipo 4 de dedal

A la hora de imprimir el dedal se va a orientar de manera que se pueda pausar la impresión para el cambio de hilo y de material a la altura programada. De esta forma se pretende tener el interruptor alojado en una zona rígida y no deformable y el resto del dedal flexible y adaptable al dedo. El resultado es el de la Figura 37.

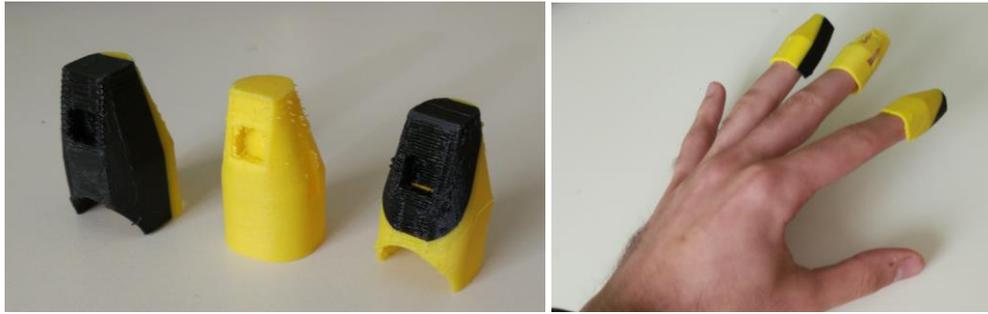


Figura 37 Prototipo 4 de dedal en dos materiales

3.4.5. Prototipo 5

El siguiente paso en el diseño fue la creación de un dedal con una esfera en la parte superior, ya que el diseño anterior resultaba incomodo a la hora de usarlo debido a las dimensiones del interruptor. Con la esfera en la parte superior se pretende obtener un mayor espacio en la parte del interruptor y una mayor comodidad a la hora de emplearlo. Se ha impreso en dos materiales siguiendo la idea del dedal anterior. Los resultados son los mostrados en la Figura 38 y la Figura 39.



Figura 38 Prototipo 5 de dedal en dos materiales

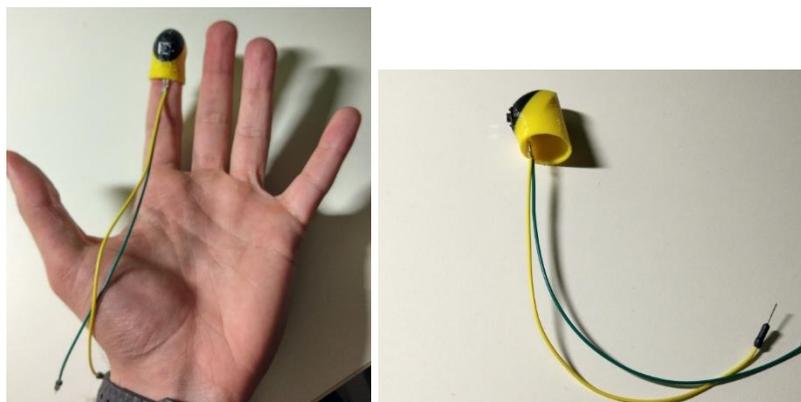


Figura 39 Prototipo 5 de dedal

3.4.6. Prototipo 6

El diseño tiene por objetivo alojar el sensor, ya sea galga extensiométrica, sensor piezoeléctrico o célula de carga, en el dedal buscando la mayor ergonomía y la mejor respuesta del sensor.

Para ello se diseñaron varios dedales en los que se alojaría el sensor en la parte inferior del dedal, en una ranura realizada haciendo que los terminales del mismo sobresalgan por la parte superior, donde se conectarán a los cables para su uso. Los resultados son los mostrados en la Figura 40.



Figura 40 Prototipo 6 de dedal

Se comprobó que la inserción y extracción de los sensores en las cavidades diseñadas es bastante dificultosa, deformando los terminales de conexión y haciendo que la medida proporcionada y el estado general del mismo se deteriore rápidamente.

3.4.7. Prototipo 7

Se cambia el diseño y se pretende alojar el sensor en una delgada pieza que se acoplará al dedal con una cola de milano, resolviendo gran parte de las dificultades mostradas por el anterior dedal. Además, permite el intercambio del sensor entre diferentes tamaños de dedal, para las diferentes personas que lo usen.

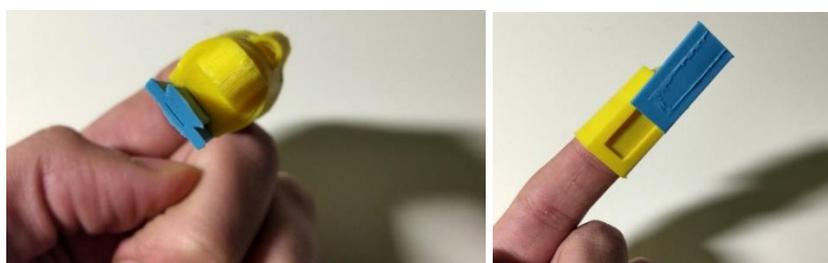


Figura 41 Prototipo 7 de dedal

Esta delgada pieza posee una cola de milano macho y una pequeña cavidad para introducir el sensor por la parte superior que permite deslizar el sensor fácilmente. Además se han incorporado dos canales por los que introducir y guiar los conectores de los sensores. Se ha diseñado una pieza diferente para cada sensor para la realización de pruebas. También se ha diseñado un dedal con dos colas de milano, pero se descarta dado que es muy costoso acoplarle la pieza, por el rozamiento existente, el doble que empleando una única cola de milano. Los resultados de estas modificaciones se pueden ver en la Figura 42.

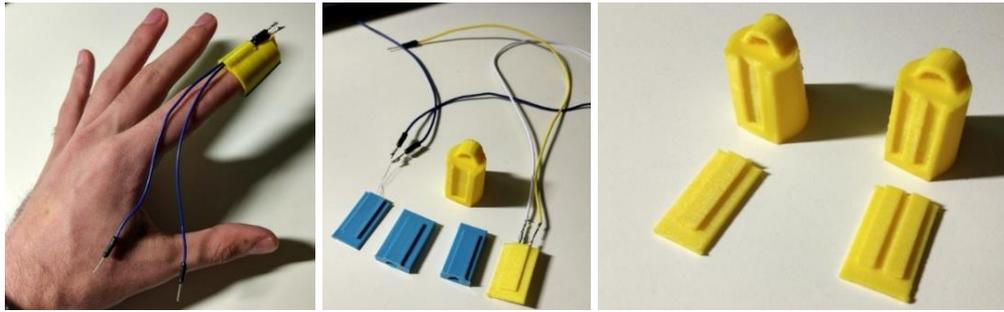


Figura 42 Prototipo 7 de dedal

Este diseño es el más valido para la aplicación de sensorización de nuestro exoesqueleto: es flexible en su totalidad, permite cambiar fácilmente el sensor y el dedal es de fácil empleo.

3.4.8. Prototipo 8

El prototipo 7 bien podría ser el modelo final empleado para la realización de pruebas, pero se va a retocar una serie de aspectos para hacerlo más ergonómico y fácil de utilizar.

Las variaciones introducidas se resumen: en una mayor longitud de los canales de los conductores, para protegerlos mejor del entorno. Unos cortes auxiliares, en los canales, para facilitar el montaje y desmontaje del sensor y una pequeña curvatura en el frontal del dedal para que la delgada pieza pueda deformarse mejor.

Dado que cada persona posee unos dedos diferentes, se ha investigado el tamaño medio de los dedos de la mano con el fin de realizar varios dedales que se adecuen a cada usuario. Según los datos de la Figura 43 y su correspondiente figura se van a realizar unos dedales siguiendo los percentiles mostrados. Más información sobre la Figura 43 y la Figura 44 se encuentra en [20] en la bibliografía del proyecto.

Dimensiones En cm.	PERCENTIL					
	Hombres			Mujeres		
	5 %	50 %	95 %	5 %	50 %	95 %
22 Ancho del meñique en la palma de la mano	1,8	1,7	1,8	1,2	1,5	1,7
23 Ancho del meñique próximo de la yema	1,4	1,5	1,7	1,1	1,3	1,5
24 Ancho del dedo anular en la palma de la mano	1,8	2,0	2,1	1,5	1,6	1,8
25 Ancho del dedeo anular próximo a la yema	1,5	1,7	1,9	1,3	1,4	1,6
26 Ancho del dedo mayor en la palma de la mano	1,9	2,1	2,3	1,6	1,8	2,0
27 Ancho del dedo mayor próximo a la yema	1,7	1,8	2,0	1,4	1,5	1,7
28 Ancho del dedo índice en la palma de la mano	1,9	2,1	2,3	1,6	1,8	2,0
29 Ancho del dedo índice próximo a la yema	1,7	1,8	2,0	1,3	1,5	1,7
30 Largo del dedo meñique	5,6	6,2	7,0	5,2	5,8	6,6
31 Largo del dedo anular	7,0	7,7	8,6	6,5	7,3	8,0
32 Largo del dedo mayor	7,5	8,3	9,2	6,9	7,7	8,5
33 Largo del dedo índice	6,8	7,5	8,3	6,2	6,9	7,6
34 Largo del dedo pulgar	6,0	6,7	7,6	5,2	6,0	6,9
35 Largo de la palma de la mano	10,1	10,9	11,7	9,1	10,0	10,8
36 Largo total de la mano	17,0	18,6	20,1	15,9	17,4	19,0

Figura 43 Tabla de medidas de dimensiones de los dedos de una mano

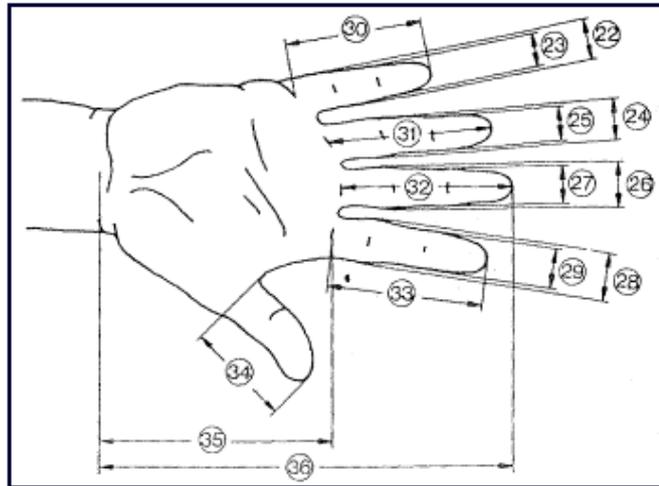


Figura 44 Numeración de las dimensiones de los dedos de la Figura 43

Con los datos extraídos de la tabla, de las medidas 29, 27 y 25, tanto para hombres como para mujeres, se diseñan varios dedales acorde a los percentiles 5, 50 y 95, dado que son valores extremos y se cubren todos los rangos de medida de las falanges, y en caso de no ser la adecuada, al ser impreso en un material flexible se puede deformar acorde al dedo sin afectar a la experiencia con el dedal.

El dedal está diseñado de tal manera que sea cómodo, de fácil colocación en el usuario, sea reutilizable el sensor e intercambiable con otros dedales de diferentes tamaños y, en caso de necesitar uno nuevo, rápido de imprimir en una impresora 3D.

A la hora de realizar el modelado 3D del dedal, se han realizado diferentes operaciones de extrusión, solevación, vaciado y barrido, cada una de ellas siguiendo las medidas de las falanges del dedo.

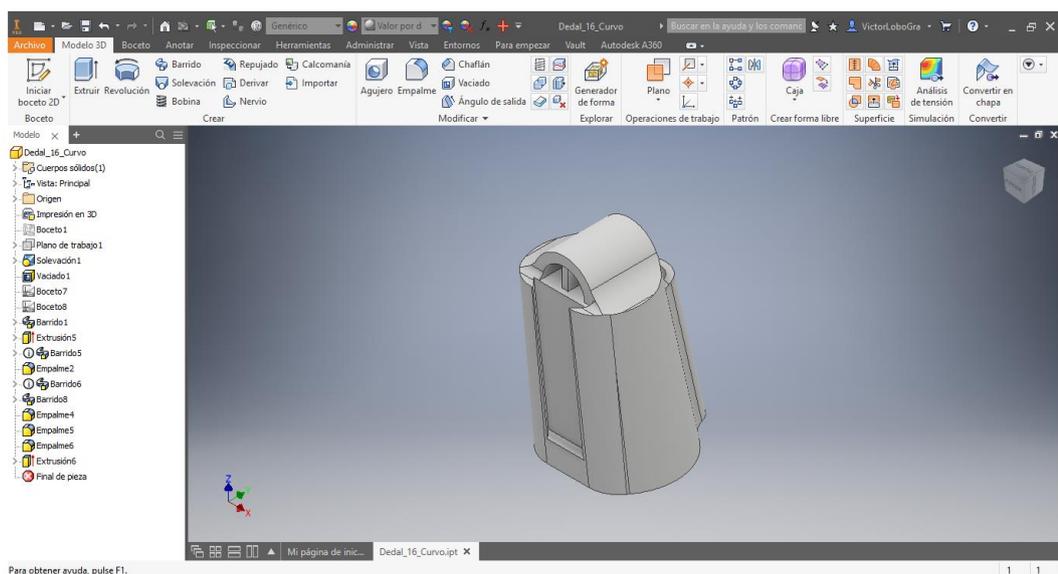


Figura 45 Prototipo final de dedal en Autodesk Inventor

Como se ve en la Figura 45, posee una cola de milano en la que encajara la parte del sensor y dos canales por los que introducir los cables del sensor, de fácil inserción.

En cuanto a la parte que aloja el sensor, la única variación existente es la mayor altura de la parte superior para cubrir del entorno las soldaduras y los conectores del sensor. Se modeló de tal manera que la extracción del sensor sea fácil en caso de reparación.

El modelado de esta pieza es el resultado de sucesivas extrusiones hasta tener el modelo.

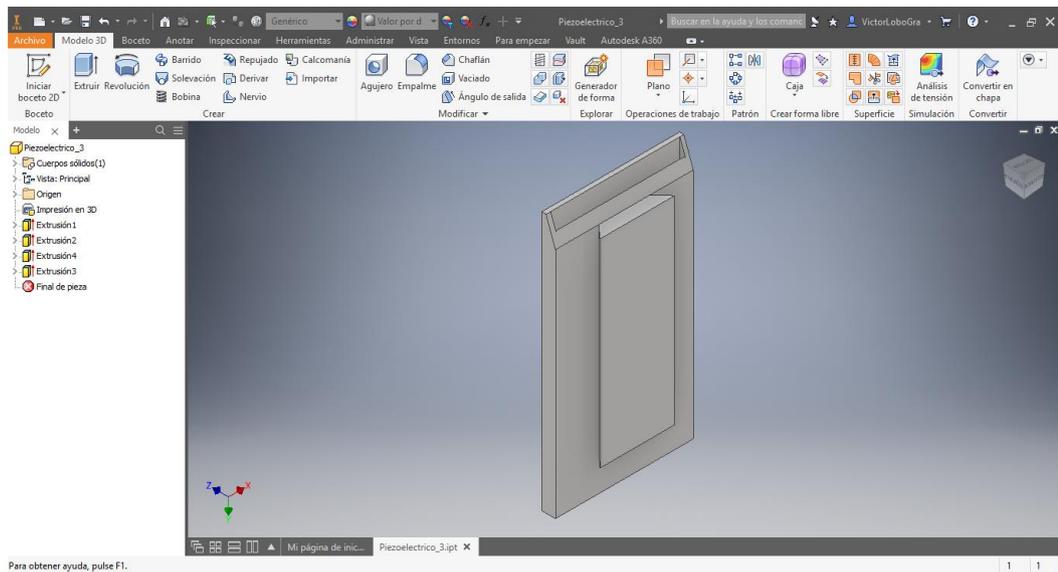


Figura 46 Prototipo final de pieza del sensor en Autodesk Inventor

Imágenes reales del dedal final son las mostradas en la Figura 47.

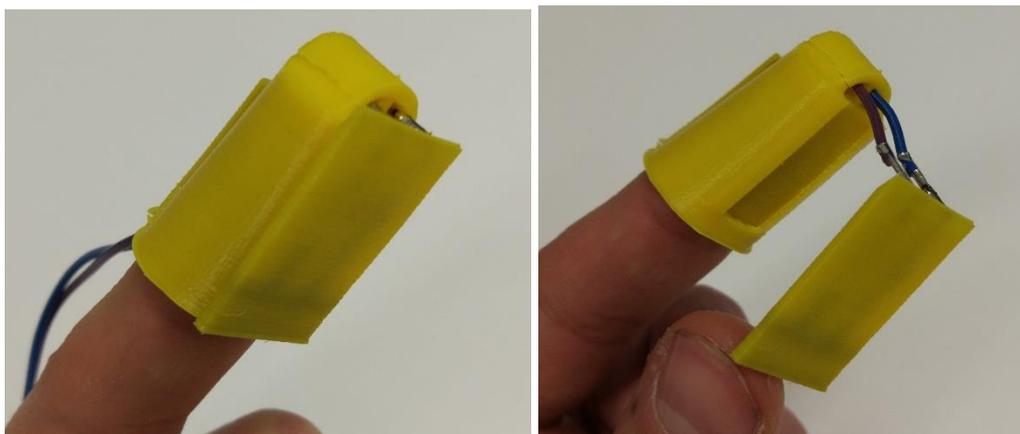


Figura 47 Prototipo final real de dedal

Con este prototipo como modelo final de dedal para la sensorización del exoesqueleto de mano, y apoyándonos en la tabla que aparece en la Figura 46, se realizan varios dedales para que cualquier persona pueda hacer uso del exoesqueleto de mano.

Siguiendo la Figura 43 y la Figura 44, y tomando las medidas para el dedo índice, se han realizado dedales para cumplir los percentiles 5, 50 y 95, tanto para hombres como para mujeres. Se van a realizar cuatro dedales. Se decide hacer cuatro porque la diferencia entre el percentil 5 y el 50 en hombre es 1mm. y esa medida es muy difiere poco de la medida del percentil 95 en mujeres.

Las medidas de los dedales finales realizados son:

- 20 mm de diámetro
- 18 mm de diámetro
- 15 mm de diámetro
- 13 mm de diámetro

Todos los planos de los dedales acotados se encuentran en el Anexo X de este proyecto.

A continuación se muestran todos los dedales, de la Figura 48 a la Figura 51, ordenados de mayor a menor diámetro, y posteriormente una imagen real de los dedales, Figura 52. Todos comparten la misma pieza que aloja el sensor.

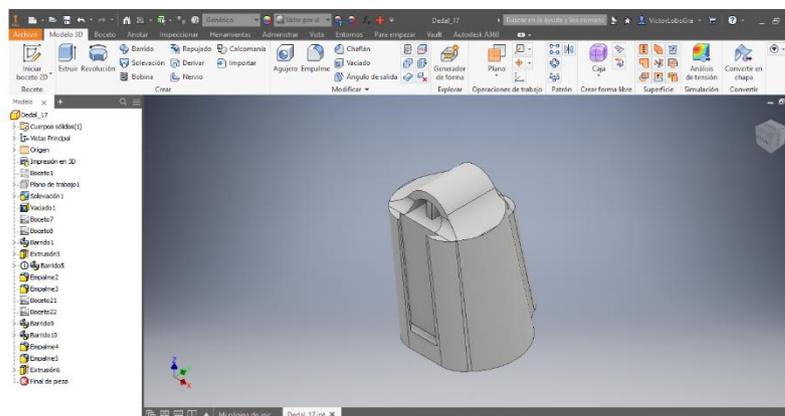


Figura 48 Prototipo de dedal de 20mm de diámetro

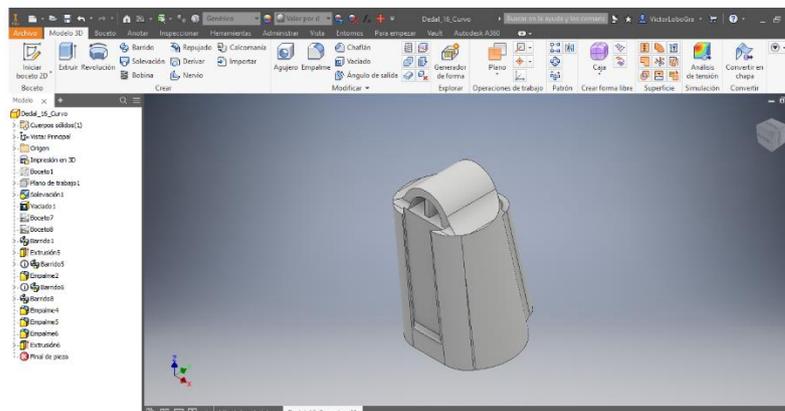


Figura 49 Prototipo de dedal de 18mm de diámetro

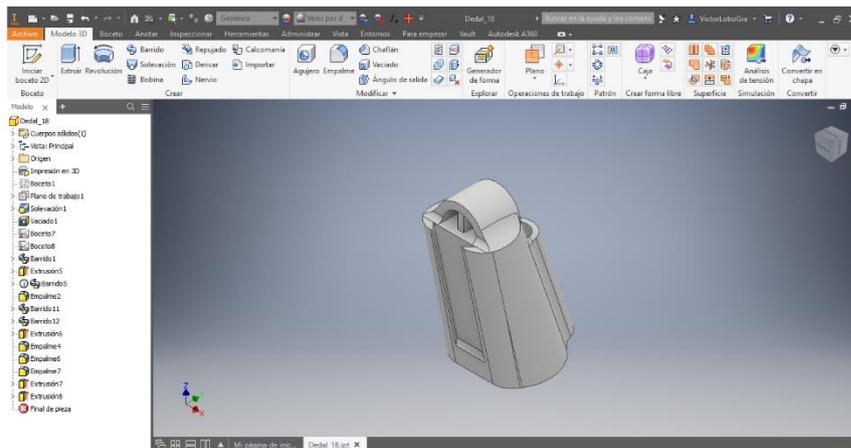


Figura 50 Prototipo de dedal de 15mm de diámetro

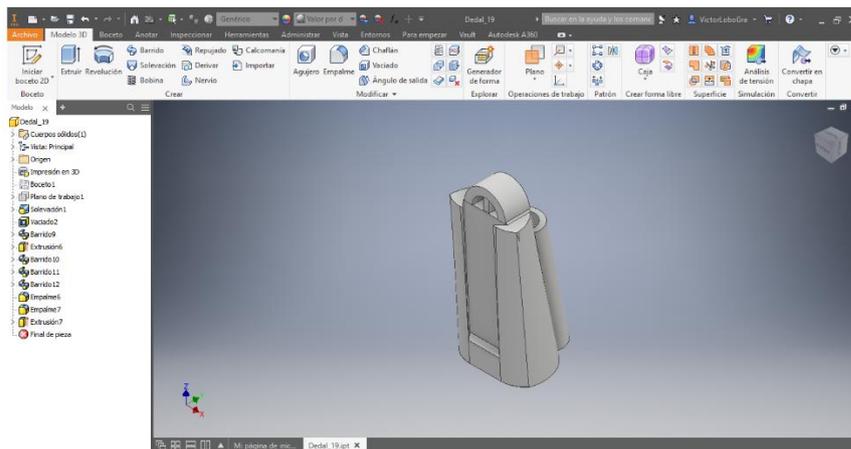


Figura 51 Prototipo de dedal de 13mm de diámetro



Figura 52 Imágenes reales de los dedales diseñados

Todos estos modelos se encuentran junto a la documentación de este proyecto con las extensiones de Autodesk Inventor y en formato .stl con los nombres de:

<i>NOMBRE</i>	<i>EXTENSION 1</i>	<i>EXTENSION 2</i>	<i>Diámetro dedal (mm)</i>
<i>Dedal_16_Curvo</i>	.ipt	.stl	18
<i>Dedal_17</i>	.ipt	.stl	20
<i>Dedal_18</i>	.ipt	.stl	15
<i>Dedal_19</i>	.ipt	.stl	13
<i>Piezoelectrico_3</i>	.ipt	.stl	

4. Pruebas desarrolladas con sensores y dedos

Con el elemento que va a albergar el sensor ya diseñado y fabricado con la impresora 3D vamos a proceder a la realización de pruebas para determinar el sensor que dé mejor resultado para la aplicación de sensorizar el exoesqueleto.

Como el proyecto de José Ángel López Beloso, [1], fué desarrollado empleando el entorno Arduino, vamos a seguir con la programación en este microcontrolador y su entorno.

4.1. Entorno Arduino

Arduino es una plataforma de hardware y software libre basada en una placa de circuito impreso con un microcontrolador, un entorno de desarrollo y elementos pasivos y activos, diseñada para facilitar el uso de la electrónica y la programación en sistemas embebidos en proyectos multidisciplinarios. Una placa de microcontrolador se ve en la Figura 53.



Figura 53 Placa de Arduino UNO

El hardware de Arduino consiste en una placa de circuito impreso con un microcontrolador, usualmente Atmel AVR, puertos digitales y analógicos de entrada/salida, los cuales pueden conectarse a placas de expansión (shields), que amplían los funcionamientos de la placa Arduino. Asimismo, posee un puerto de conexión USB desde donde se puede alimentar la placa y establecer comunicación con el computador.

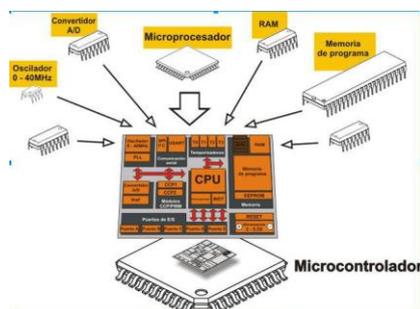


Figura 54 Esquema del hardware de Arduino

Arduino proporciona un software sencillo y fácil de usar consistente en un entorno de desarrollo integrado (IDE). Consiste en un editor de código, un depurador o debugger, un compilador y un constructor de interfaz gráfica.

Para más información acerca de Arduino consulte [21] en la bibliografía del proyecto y el Anexo III.

4.2. Prueba 1: sensor piezoeléctrico

La primera prueba se realizó con el sensor piezoeléctrico mencionado en la Figura 27 de este proyecto cuya hoja de características está disponible en el Anexo VII. Éste sensor genera un voltaje cada vez que es desplazado de manera mecánica del eje neutral o de reposo, lo que para su aplicación con Arduino es válida.

Como podemos ver en la Figura 55, cuando mayor es la deformación del piezoeléctrico, mayor es la tensión generada en circuito abierto.

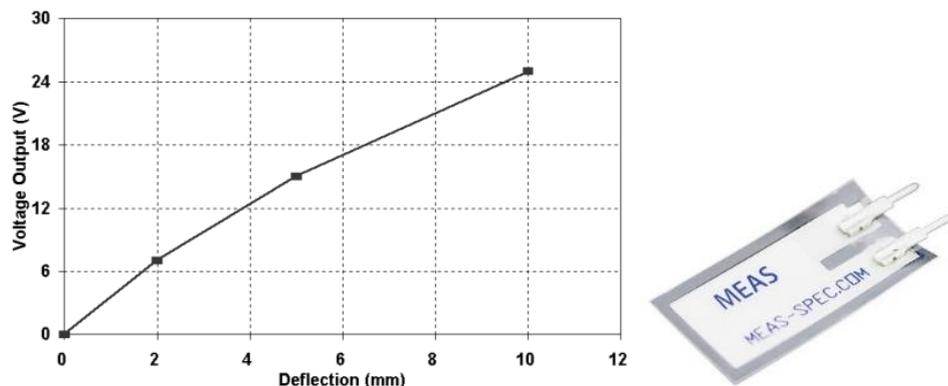


Figura 55 Grafica tensión-deformación del piezoeléctrico

Una deformación de 2mm es suficiente para que el piezoeléctrico genere 7V. Para generar una tensión máxima de más de 70V habría que deformar el sensor hasta formar 90°.

Aprovechando que este sensor genera tensiones al aplicarle una deformación, vamos a conectar los terminales del sensor a GND del Arduino y a la entrada analógica A0 como se puede ver en la Figura 56. Se deformará el dedal con la simple acción de presionar dedo pulgar contra dedo índice.

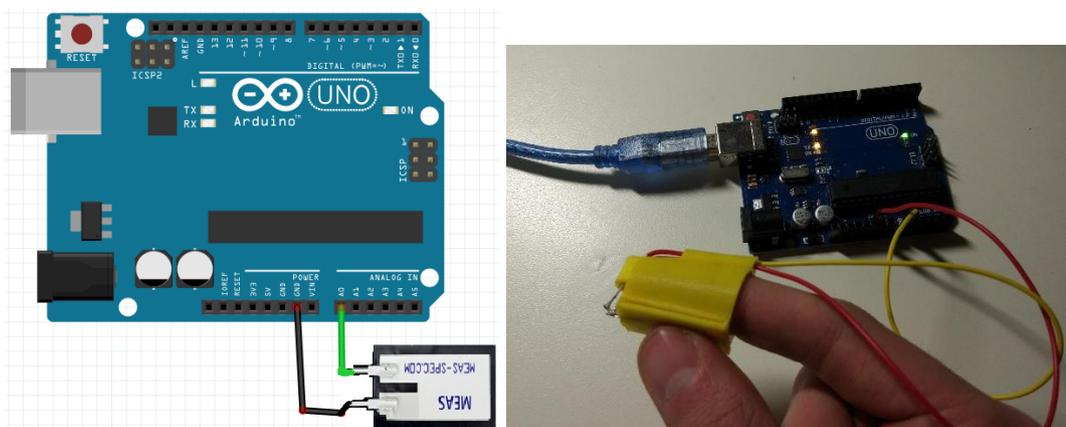


Figura 56 Montaje en Arduino del sensor piezoeléctrico

El código cargado en la tarjeta Arduino es el siguiente, Figura 55:

```
Piezoelctrico_6
int PIEZO_PIN = A0; // Piezo output

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
  // Read Piezo ADC value in, and convert it to a voltage
  float piezoADC = analogRead(PIEZO_PIN);
  double piezoV = (piezoADC / 1023.0)*5;
  Serial.println(piezoV); // Print the voltage.
}
```

Figura 57 Código Arduino para el sensor piezoeléctrico. Lectura analógica

En este código, Figura 57, podemos ver la declaración del pin analógico donde se conectará el sensor, la realización de una lectura analógica y una pequeña conversión del valor. Además se visualiza por el puerto serie el valor en cada momento. A la hora de visualizar el valor instantáneo podemos usar el puerto serie, pero en las versiones más recientes de Arduino se puede encontrar un Serial Plotter, que nos graficará el valor medido a lo largo del tiempo.

Una de las pruebas para comprobar la medida de deformación queda plasmada en la Figura 58, donde se aprecian perfectamente los instantes en los que el sensor está siendo deformado de cuando está en reposo. Teniendo salida de 5V en los momento de deformación y 0 cuando está en reposo.

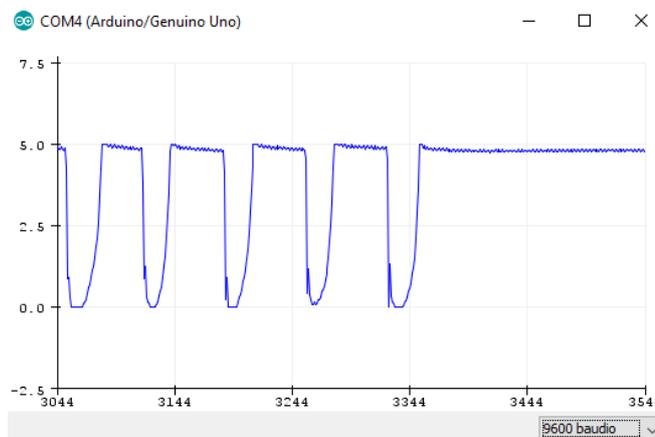


Figura 58 Representación Serial del sensor piezoeléctrico. Lectura analógica

Otra prueba realizada, aprovechando que los pines digitales de Arduino interpretan como 1 o HIGH una entrada de 5V o superior y con 0 cualquier otro valor, se va a emplear el sensor como un interruptor todo-nada. Para ello vamos a cambiar el extremo que estaba en la entrada analógica y llevarlo al pin digital número dos y realizamos la misma deformación del dedal, presionando dedo pulgar y dedo índice.

En el código Arduino mostrado, en la Figura 59, se puede ver la programación cargada en la tarjeta Arduino y la representación de estados 0 y 1 al deformar el sensor en el Serial Plotter de Arduino.

```
Piezoelctrico_5
int PIEZO_PIN = 2; // Piezo output

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
  // Read Piezo ADC value in, and convert it to a voltage
  int piezoADC = digitalRead(PIEZO_PIN);
  Serial.println(piezoADC); // Print the voltage.
}
```

Figura 59 Código Arduino para el sensor piezoeléctrico. Lectura digital

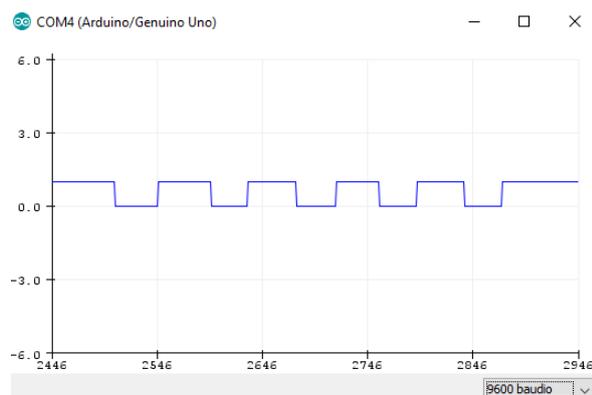


Figura 60 Representación Serial del sensor piezoeléctrico. Lectura digital

Como se aprecia en la Figura 60, se diferencian los momentos en los que está siendo deformado el sensor con los momentos de reposo. Reposo equivale a un 0 lógico y deformado equivale a un 1 lógico.

A la vista de los resultados, el comportamiento de este tipo de sensor para este tipo de aplicación es muy satisfactorio, la respuesta es rápida, no requiere un montaje costoso y es barato.

4.3. Prueba 2: sensor célula de carga

El siguiente sensor probado es el sensor de fuerza Honeywell mostrado en la Figura 23. Para conocer cómo se deben conectar los extremos debemos mirar en la hoja de características del sensor, incluido en el Anexo V del proyecto. En el podemos ver la siguiente información, Figura 61:

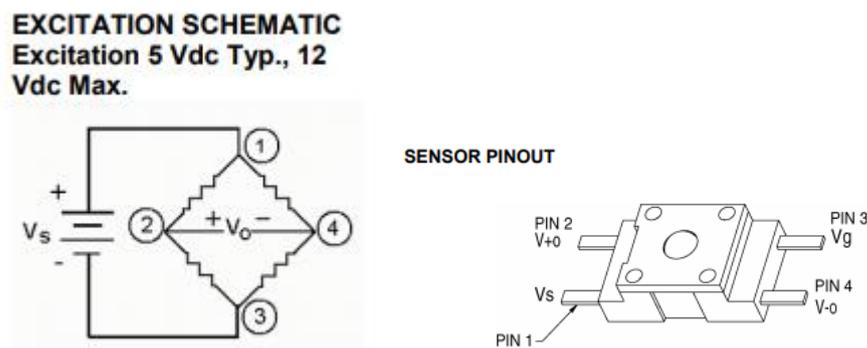


Figura 61 Esquema eléctrico y terminales de la célula de carga

Con estos esquemas de conexión, un puente Wheatstone, procedemos a realizar el montaje en nuestro protoboard y nuestro Arduino. Vamos a alimentar al sensor con 5 Vdc por el pin 1 y conectar el pin 3 a GND del Arduino. Después, los pines 2 y 4 van a ir conectados a las entradas analógicas 0 y 1 respectivamente, como muestra la Figura 62. Deformamos del dedal, presionando dedo pulgar y dedo índice y dedo índice contra la superficie de una mesa.

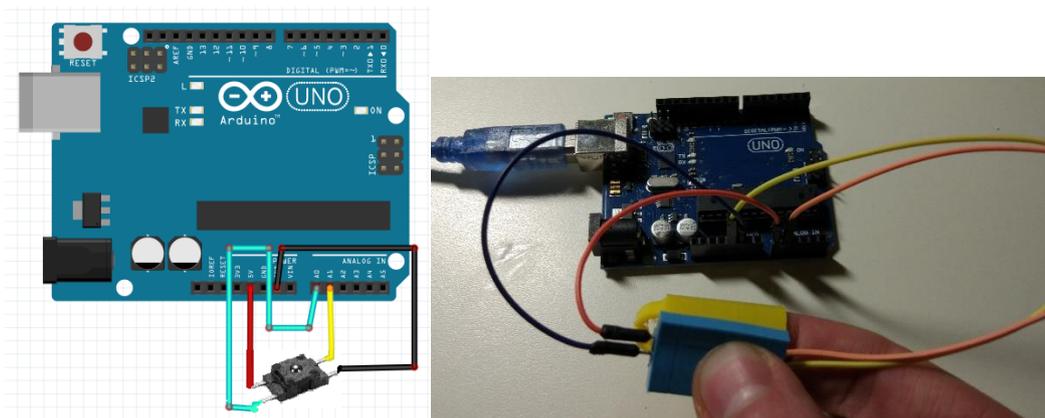


Figura 62 Montaje en Arduino de la célula de carga

En el código Arduino, Figura 63, que se programa se va a visualizar por el monitor serie, o por el Serial Plotter el valor de la diferencia de tensión entre los pines 2 y 4, que previamente ha sido tratada para adecuarse a la programación en Arduino. Como se puede ver en la gráfica del Serial Plotter, Figura 64, se distinguen los momentos en los que se ejerce presión sobre el sensor y los que no. Se aprecian variaciones en la continuidad de la línea, siendo en esos momentos en los que se está midiendo la presión ejercida. No tiene una resolución muy grande y la fuerza ejercida para observar una variación es muy grande, realizada al presionar el propio sensor sobre una superficie dura, ya que un dedo no produce variación apreciable en la gráfica.

```
Celula_1

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  float V2,V4,Vvalida;

  V2=analogRead(A0);
  V4=analogRead(A1);
  Vvalida=5*(V2-V4)/1023;
  Serial.println(Vvalida);
}
```

Figura 63 Código Arduino de la célula de carga

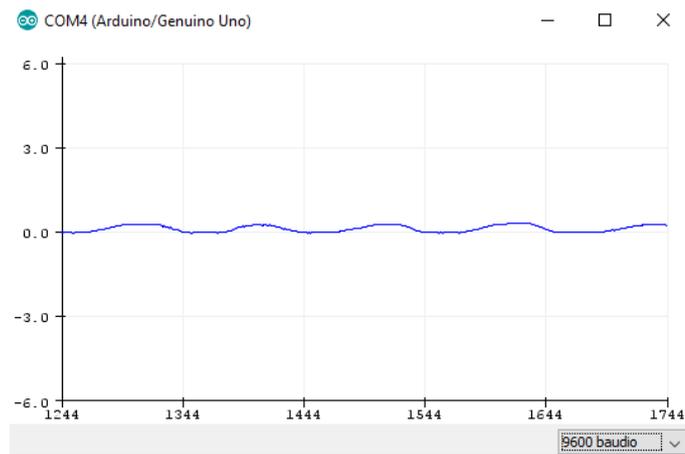


Figura 64 Representación Serial de la célula de carga

A la vista de los resultados podemos decir que este sensor no es del todo adecuado para esta aplicación ya que la fuerza necesaria para producir una variación apreciable no se puede ejercer con un dedo.

4.4. Prueba 3: sensor galga extensiométrica

El siguiente sensor probado es la galga de deformación RS Pro mostrada en la Figura 26. La hoja de características de éste sensor se encuentra en el Anexo VI. Lo primero que se va a realizar es un montaje electrónico tipo puente de Wheatstone. Se van a emplear unas resistencias de $220\ \Omega$ y una galga extensiométrica.

En el montaje, Figura 65, se va a conectar un extremo a 5V y otro a GND. Entre las resistencias se colocan terminales que van a las entradas analógicas A0 y A1. Se deforma el dedal, presionando dedo pulgar y dedo índice.

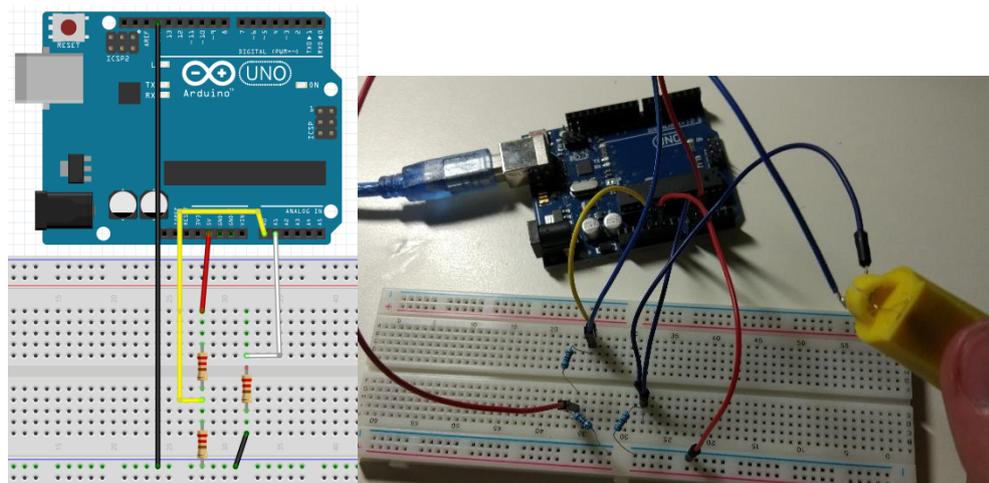


Figura 65 Montaje en Arduino de la galga extensiométrica

Con el montaje ya realizado, y la programación cargada en la tarjeta Arduino, vamos a abrir el Serial Plotter y comenzamos a deformar el sensor. Como se puede ver en la Figura 66, se aprecia el momento de reposo y el momento de deformación, línea con poca variación y una línea de gran ruido. El resultado no es el esperado, pero como se vio en clase de Instrumentación Electrónica en la carrera, las galgas extensiométricas requieren de una colocación precisa, un buen acople con la superficie y una leve deformación. Ninguno de estos requisitos se cumple en esta aplicación junto al dedal, por lo que este sensor queda prácticamente descartado.

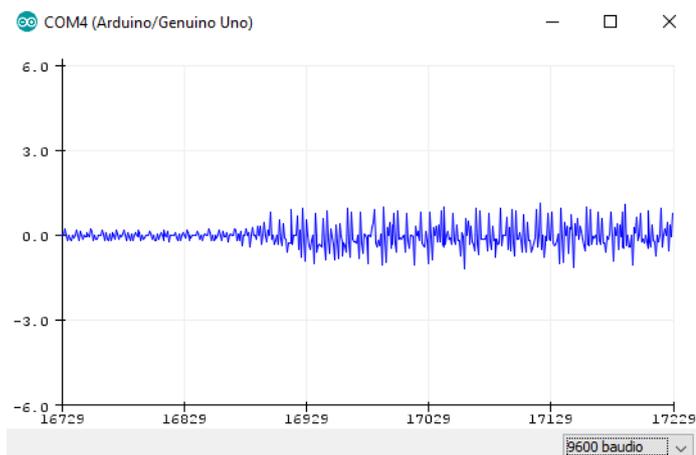


Figura 66 Representación Serial de la galga extensiométrica

4.5. Prueba 4: interruptor push-button

Para este sensor Push-Button Small mostrado en la Figura 28 no se van a realizar pruebas, ya que es demasiado alto, la pieza que lo albergaría es muy aparatosa y hace imposible tener la sensación de tener una pieza cogida con seguridad. En la Figura 67 se ve como es la pieza del interruptor. Descartado antes de realizar pruebas. La hoja de características de éste sensor se encuentra en el Anexo VIII.

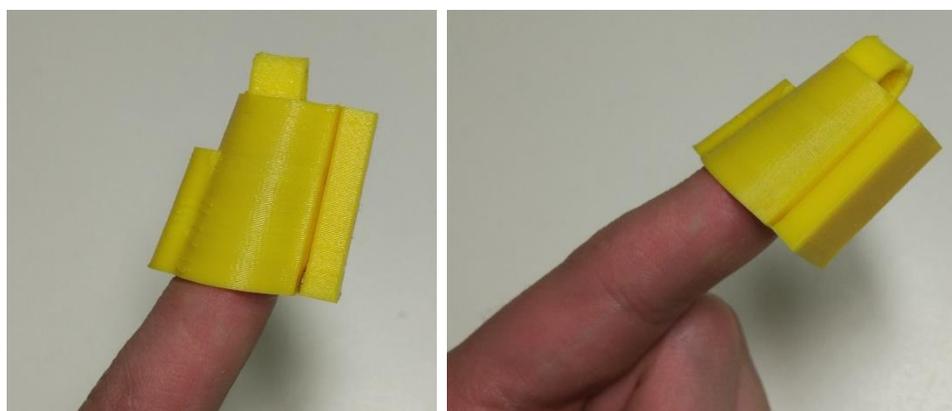


Figura 67 Pieza para el interruptor

4.6. Resumen de las pruebas realizadas

Con las pruebas realizadas en todos los sensores es el momento de decidir cuál de ellos es que mejor puede incluirse en la aplicación de sensorización del exoesqueleto. En la tabla siguiente se resumen una serie de aspectos para facilitar la selección.

Sensor/ Característica	Piezoeléctrico	Célula de carga	Galga extensiométrica	Interruptor
Tratamiento	Digital/Analógico	Analógico	Analógico	Digital
Respuesta	Excelente	Buena	Pésima	Buena
Esfuerzo	Pequeño	Grande	Pequeño	Medio
Dimensiones	13x25mm	5.59x9.14x3.75mm	9.5x3.5mm	6.5x6.5x3.5mm
Precio	3.18 €	58.50 €	9.34 €	0.90 €

A la vista de los resultados tras las pruebas y de los aspectos mostrados en la tabla anterior el sensor con el que se harán pruebas de aquí en adelante será el sensor piezoeléctrico, por la excelente respuesta ante esfuerzos leves, las dimensiones adecuadas, la capacidad de uso de manera analógica o digital y el precio.

4.7. Pruebas con el sensor final seleccionado

Con el sensor piezoeléctrico, se procede a realizar una serie de pruebas con los mismos materiales empleados en el prototipo final. Para ello se han realizado las pruebas con un servomotor lineal Servomotor Firgelli serie L12-R, el sensor piezoeléctrico, un pulsador y una placa de Arduino UNO.

Dado el tratamiento digital programado para el sensor, se va a introducir el concepto de interrupción en Arduino y aplicarlo tanto para el sensor como para el pulsador. Las interrupciones disponibles en Arduino UNO corresponden a los pines 2 y 3, aunque en el proyecto final se emplea un Arduino MEGA en el que se cambiará en pin de interrupción y el número de la interrupción, Figura 68. Más información acerca de Arduino y sus interrupciones en [21] en la bibliografía del proyecto.

MODELO ARDUINO	INT 0	INT 1	INT 2	INT 3	INT 4	INT 5
UNO	Pin 2	Pin 3				
MEGA	2	3	21	20	19	18
DUE	Todos los pines del DUE pueden usarse para interrupciones.					
Leonardo	3	2	0	1	7	

Figura 68 Interrupciones existentes en Arduino. Pines y nº de interrupción

El código de la Figura 69 programado pretende realizar el control de la salida del vástago del servomotor lineal. El vástago del servomotor de moverá de manera cíclica desde la posición 1100 a la 1900 en intervalos de 100. Si en algún momento salta la interrupción del sensor piezoeléctrico, Apretar, el movimiento del vástago del servomotor se para y permanece en esa posición hasta que se pulsa el interruptor y se vuelve al estado inicial.

```
Servo_Piezoelctrico
#include <Servo.h>

Servo miServo;
#define Pin_Servo (8)

int salidaservo=1100;
volatile int estado=1;

void setup() {
  pinMode(2, INPUT);
  pinMode(3, INPUT);
  miServo.attach(Pin_Servo);
  Serial.begin(9600);
  attachInterrupt(0, Apretar, HIGH);
  attachInterrupt(1, Soltar, FALLING);
}

void loop() {
  int i;
  if(estado==1){
    if(salidaservo <= 1900){
      miServo.writeMicroseconds(salidaservo);
      delay(salidaservo+200);
```

```

miServo.writeMicroseconds(salidaservo);
delay(salidaservo+200);
Serial.println(salidaservo);
Serial.println(estado);
salidaservo=salidaservo+100;
}else{
miServo.writeMicroseconds(1100);
delay(6000);
salidaservo=1100;
}
}else{
Serial.print("Pieza cogida");
Serial.println(estado);
}
}

void Apretar() {
estado=0;
}

void Soltar() {
estado=1;
salidaservo=1100;
}

```

Figura 69 Código Arduino para el banco de pruebas

El montaje en Arduino realizado es el mostrado en la Figura 7, es un esquema realizado en la aplicación Fritzing y la Figura 71 es el montaje real. El esquema realizado con Fritzing varía del montaje real porque no se disponen de los elementos empleados en dicha aplicación.

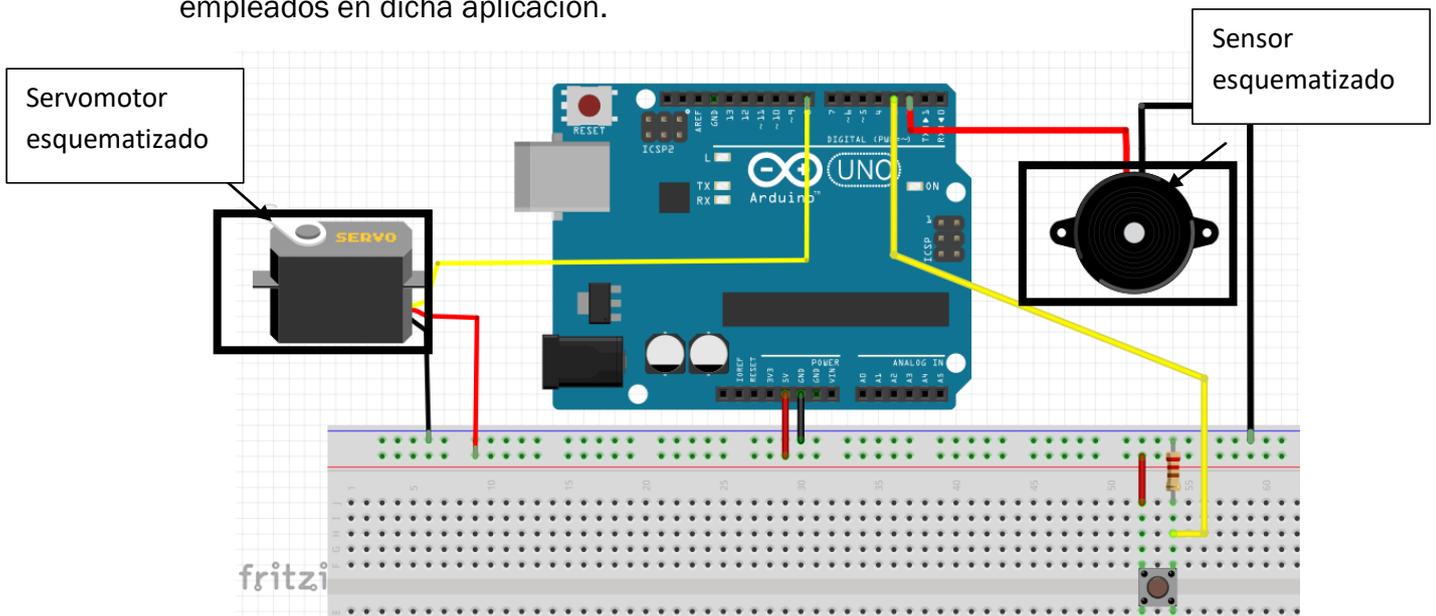


Figura 70 Esquema en Arduino del banco de prueba

Como se puede ver, el servomotor es lineal en vez de rotación, y el piezoeléctrico no es el zumbador, sino que está incorporado en el dedal diseñado.

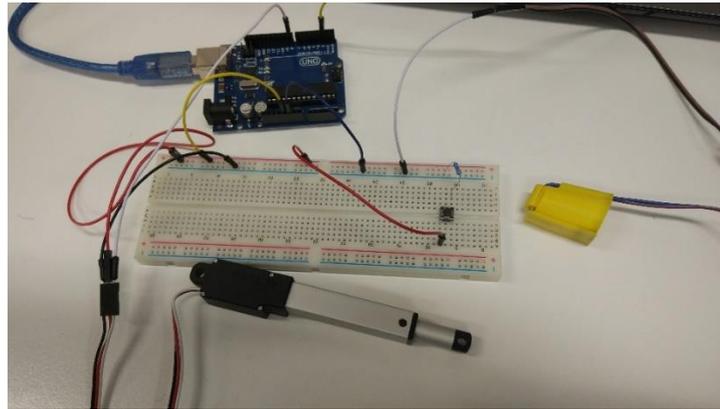
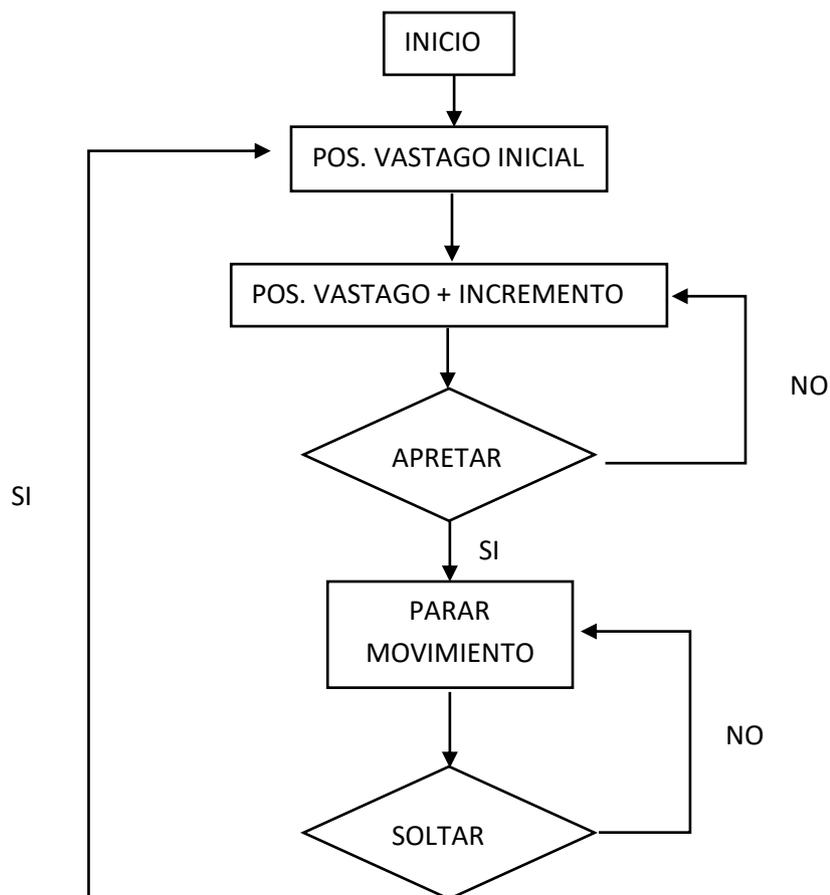


Figura 71 Montaje real del banco de prueba

El código Arduino cargado, Figura 69, para este banco de pruebas realiza el siguiente ciclo de forma esquemática:



El funcionamiento es sencillo, rápido y de aplicación directa para el objetivo de este proyecto, porque se permite controlar la parada del servomotor ante un esfuerzo en el sensor piezoeléctrico.

A continuación se proceden a realizar pruebas con el exoesqueleto de mano.

5. Integración y pruebas en el exoesqueleto de mano

Una vez diseñado y fabricado el “dedal” y seleccionado el sensor más adecuado para realizar las tareas de prensión de objetos, se procede a integrar todo en el exoesqueleto de mano, rediseñando la envoltura de la electrónica, la identificación de todo el material para su fácil manipulación y reprogramando el código de control del mismo.

5.1. Descripción del exoesqueleto y su sistema de control inicial

Como se comentó al principio de este proyecto, se parte de los resultados de un TFG, [1], en el que se realizaba un primer prototipo de exoesqueleto de mano. De este punto se parte para el proyecto de sensorizar.

Los motores utilizados en el proyecto [1], Figura 72, son de accionamiento lineal donde el desplazamiento en lugar de ser un movimiento rotativo convencional es lineal. Los motores son de la marca Firgelli serie R con la identificación: L12-50-210-6-R. Las características de estos motores se encuentran en el Anexo IV.



Figura 72 Servomotor Firgelli serie L12-R

El controlador empleado es Arduino Atmega 2560, Figura 73, de la marca Velleman programado mediante Visual Studio 2017 junto con el software de Arduino.



Figura 73 Microcontrolador Arduino marca Velleman

La envoltura de la electrónica se divide en varias partes: la base, la tapa y una plataforma. La base está diseñada y fabricada para que encaje la placa de Arduino y posee una apertura para conectar el cable que comunica con el ordenador.

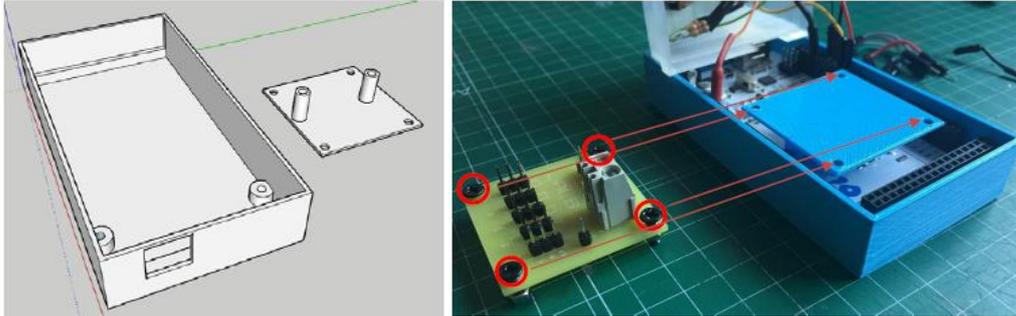


Figura 74 Caja para la electrónica

En la Figura 74 se muestra la caja fabricada. Se aprecia una base diseñada para albergar la placa de conexiones de los servomotores. Esta base va sujeta al Arduino mediante dos tornillos M3x10 y a su vez a la placa con 4 tornillos M3x8.

La tapa contiene dos orificios que permiten incorporar dos interruptores y una serie de agujeros para insertar los cables de alimentación del distribuidor, podemos atornillarlos sin necesidad de abrir la caja y conectar los motores en los pines rápidos como se muestra en la Figura 75.



Figura 75 Tapa de la electrónica

Por último, en la Figura 75, se ve la regleta de conexiones de los motores ubicada en el exterior, garantizan una unión rápida de cada dedo gracias a la serigrafía de la placa de distribución donde se marca del 1 al 5 cada dedo con este orden preestablecido:

- 1->Pulgar
- 2->Índice
- 3->Dedo medio
- 4->Anular
- 5-> Meñique

En cuanto a la programación se divide en clases: tenemos la clase mano y la clase dedo, que colaboran con el programa encargado de realizar las funciones que se le mandan.

La estructura que compone el software está desarrollada atendiendo al modo de funcionamiento mediante dos interruptores, Figura 76.

- Función bucle coger: este modo de funcionamiento abre y cierra todos los dedos de la mano una y otra vez de manera continua y automática (abrir, cerrar, abrir, cerrar...)
- Función bucle contar: este modo de funcionamiento va abriendo los dedos de uno en uno para ir contando del uno al cinco con la siguiente secuencia: índice>corazón>anular>meñique>pulgar, que va repitiéndose automáticamente de forma continua y automática.
- Función estática abrir: este modo de funcionamiento abre todos los dedos de la mano y se mantendrá así hasta no cambiar de modo.
- Función estática cerrar: este modo de funcionamiento cierra todos los dedos de la mano y se mantendrá así hasta no cambiar de modo.



Figura 76 Interruptores del proyecto inicial

5.2. Rediseño de la caja de alojamiento del sistema de control y del exoesqueleto de mano

Se ha diseñado y construido una nueva envoltura para el sistema de control. Ésta nueva envoltura está formada por dos partes, en la parte inferior se integrará la estructura del proyecto anterior, fácilmente desmontable y sin cambios en el cableado, una protoboard, Figura 78, en la que realizar las conexiones de los componentes y una cavidad para futuras expansiones. En la parte superior se incluirán los interruptores para el manejo del dispositivo mecatrónico, la serigrafía de identificación de cada botón, el nombre del autor del proyecto, el icono de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid y un diodo LED para indicar que está todo conectado y listo para usarse.

Todos los planos acotados de las piezas que se muestran a continuación se encuentran en el Anexo IX de este proyecto.

La parte inferior, como se puede ver en la Figura 77, posee una serie de orificios, uno para la conexión USB de Arduino, otro para el conector de la alimentación, introduciendo el terminal correspondiente según la serigrafía. Otros dos orificios más para futuras expansiones del proyecto y un rectángulo

por el que se conectan los servomotores y el dedal a la placa Arduino. En la parte opuesta se alojara una placa protoboard para realizar el conexionado de los componentes con Arduino y entre ellos, permitiendo la fácil comprensión del circuito eléctrico, la reparación de componentes y su sustitución.

Como se puede ver en la Figura 77, la caja, realizada en Inventor 2018, es el producto de extrusiones, vaciados, empalmes y repujados. En el Anexo X de este proyecto se encuentra acotada.

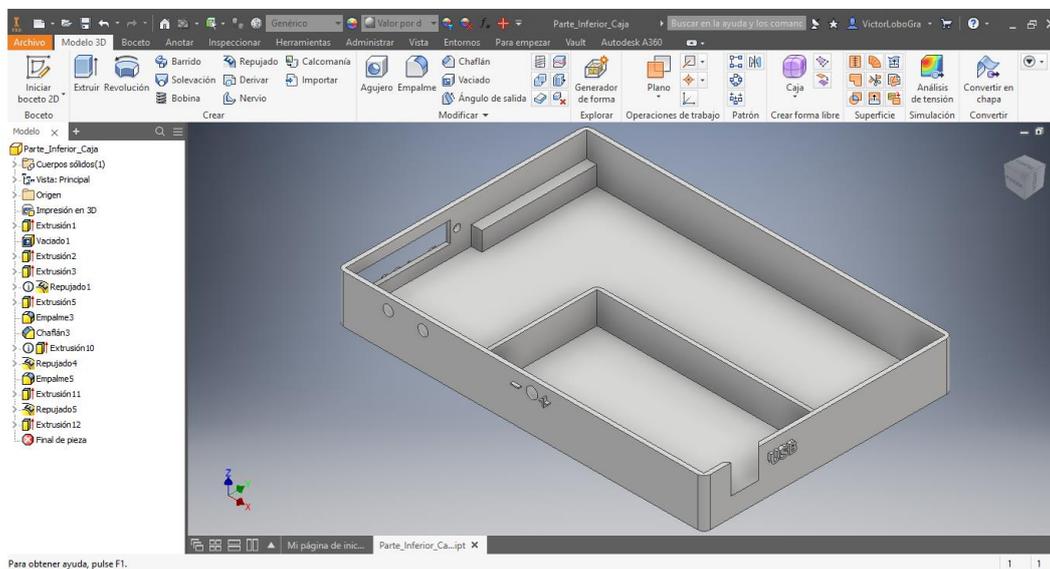


Figura 77 Parte inferior de la envoltura de la electrónica en Autodesk Inventor

Como se ha comentado anteriormente, se va a introducir una protoboard en la parte alargada de la caja. Se trata de una protoboard de 63 filas con 10 columnas y dos segmentos para la alimentación y toma de tierra. Cabe destacar la orientación de este protoboard dentro de la caja, ya que el conexionado posterior depende de los números de filas y columnas. La forma correcta de colocarla es siguiendo el orden ascendente de números de derecha a izquierda.

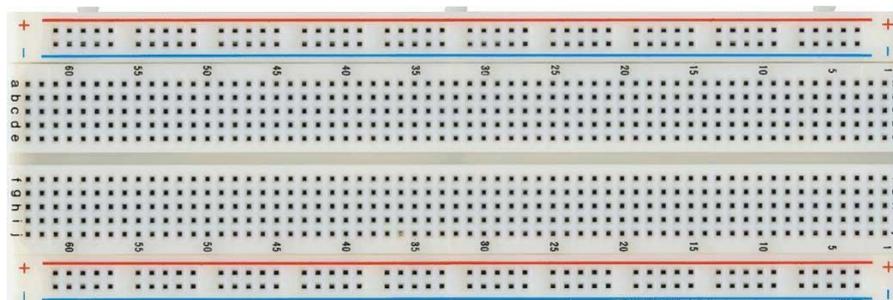


Figura 78 Protoboard de conexiones empleada en el proyecto

Junto a esta protoboard, se incorpora un espacio cuadrado en el que se va a introducir una caja que albergara a la placa de Arduino. Posee unos orificios que le permiten sacar la entrada USB y la entrada de la alimentación de los

servomotores. En el Anexo X de este proyecto se encuentra acotada. Una imagen del diseño de dicha caja es la Figura 79:

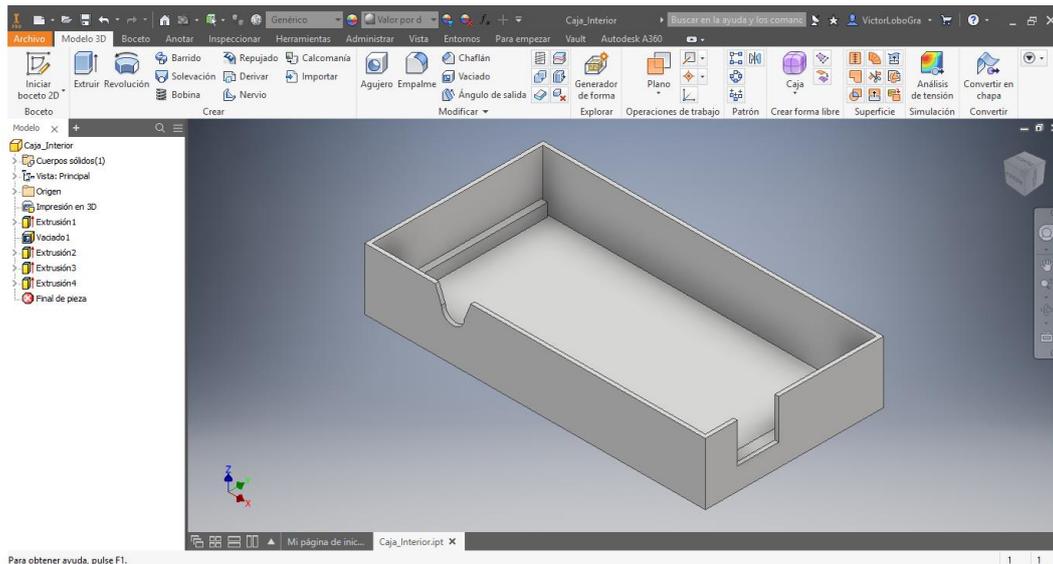


Figura 79 Caja interna para la placa de Arduino en Autodesk Inventor

Esta parte inferior también incorpora una placa en la que se van a realizar las conexiones de todos los servomotores, para ello se han tomado las medidas de los pines de conexión y se ha impreso en 3D. También incorpora la entrada del dedal. Una imagen del diseño es la Figura 80. Una imagen real es la Figura 88.

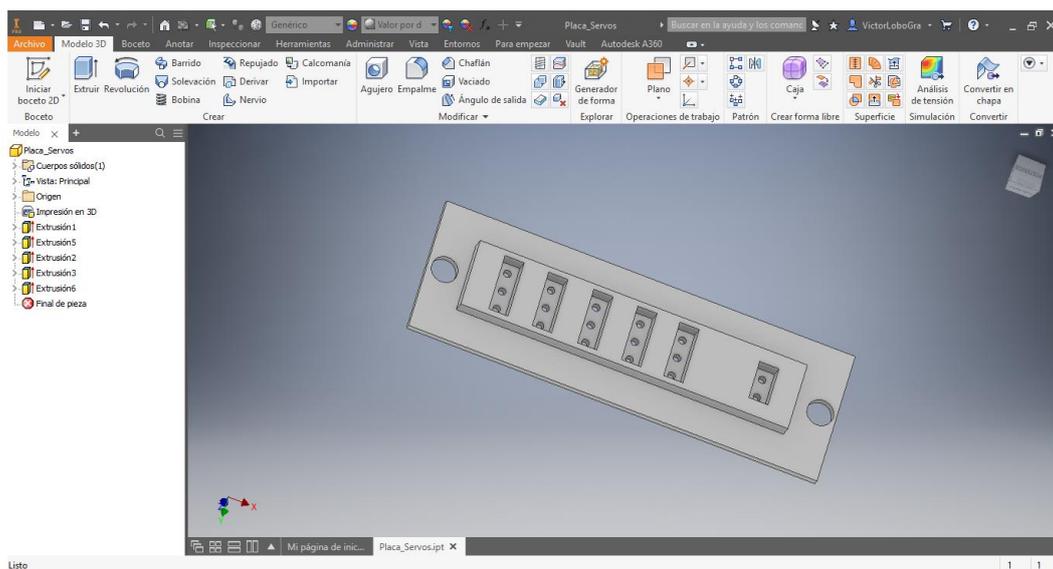


Figura 80 Placa de conexión de servomotores y dedal en Autodesk Inventor

La parte superior incorpora una serie de interruptores que permiten al usuario realizar diferentes movimientos como abrir y cerrar la mano si se ha elegido el modo estático, y contar o coger objetos si se ha elegido el modo ejercicio. Además incorpora un interruptor extra que puede ser empleado en

futuras mejoras del proyecto. También tiene un pulsador cuya función es la de soltar el objeto cogido cuando se activa. Tanto los interruptores como el pulsador quedan fuertemente ajustados. La parte superior tiene pequeñas aberturas para no tapar la serigrafía de la parte inferior ni los orificios. En el Anexo X de este proyecto se encuentra acotada.



Figura 81 Parte superior de la envoltura de la electrónica en Autodesk Inventor

En los orificios rectangulares del frontal, se anclan debidamente los interruptores. Se han elegido interruptores grandes, fáciles de manipular y compatibles con Arduino. Más información acerca del interruptor en [22] en la bibliografía del proyecto. Una imagen del interruptor es la Figura 82:



Figura 82 Interruptor RLEIL RL3-3 empleado en el proyecto

En el orificio sobre la palabra soltar, se va a incluir un pulsador que será el encargado de abrir la mano cuando se tenga un objeto cogido. Se ha elegido un pulsador grande, fácil de sustituir y compatible con Arduino. Más información del pulsador en [23] en la bibliografía del proyecto. Una imagen del pulsador es la Figura 83:



Figura 83 Pulsador Ermec empleado en el proyecto

Se le ha modificado el embellecedor, dado que el color era amarillo, y se ha diseñado una pieza para imprimirla en 3D de un color acorde al proyecto.

La pieza es sencilla de modelar y se resume en una extrusión de un cuadrado y un vaciado para obtener la forma necesaria.

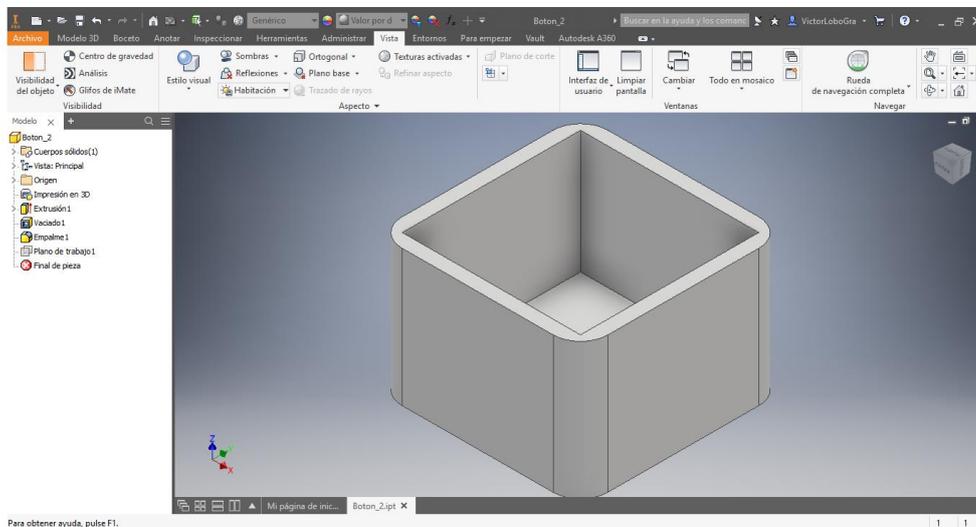


Figura 84 Embellecedor diseñado para el pulsador

Como se verá en el apartado 5.3 de este proyecto, el principio de funcionamiento no ha variado respecto al proyecto anterior, pero se ha cambiado, ordenado y mejorado la envoltura de la electrónica. Posteriormente se variará parte de la programación.

A continuación se muestran imágenes reales, Figura 85 a Figura 87, de las diferentes partes que forman la envoltura de la electrónica.



Figura 85 Parte de arriba de la caja de la electrónica



Figura 86 Parte inferior de la caja de la electrónica

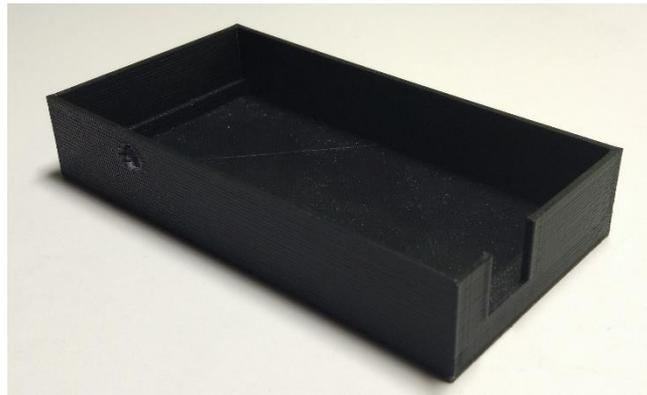


Figura 87 Caja interna para Arduino

Todos los archivos de esta envoltura de la electrónica se encuentran junto a la documentación del proyecto con las extensiones de Autodesk Inventor y en formato .stl con los nombres de:

<i>Nombre</i>	<i>Extensión 1</i>	<i>Extensión 2</i>
<i>Parte_Inferior_Caja</i>	.ipt	.stl
<i>Caja_Interior</i>	.ipt	.stl
<i>Parte_Superior_Caja_2</i>	.ipt	.stl
<i>Boton_2</i>	.ipt	.stl
<i>Placa_Servos</i>	.ipt	.stl
<i>Soporte_Servos</i>	.ipt	.stl

5.2.1. Identificación del material

Como se posee gran cantidad de conectores se va a proceder a marcar e identificar con números los extremos de cada conector. El criterio es el siguiente:

- GND, tierra o común: se identifica como 00.
- VCC, alimentación: se identifica como 55 o 33.
- Conexión a un pin de Arduino: se identifica con el número del pin.
- Conexión intermedia: se identifica con tres números, dos para marcar la fila en el protoboard y uno para marcar la columna, identificando de la letra "a" como 1 hasta la letra "j" como 10.

Se realiza la numeración con identificadores de cables amarillos perfectamente distinguibles y reemplazables colocados sobre los extremos de cada conector.



Figura 88 Identificadores de cables empleados en el proyecto

Además, aparte de toda la identificación del cableado, se identifican los conectores de los servomotores del exoesqueleto con etiquetas y la forma en la que se deben conectar a la caja con un sencillo dibujo de colores. Solo se debe hacer coincidir el número de la etiqueta con el número serigrafiado en la caja y con la orientación indicada en el dibujo.



Figura 89 Identificación del cableado y conexión a la envoltura

5.3. Modos de funcionamiento del exoesqueleto de mano

En base a la Figura 90, y dependiendo de la posición de los interruptores, se van a explicar los diferentes modos de funcionamiento que tiene el exoesqueleto de mano. Una guía de usuario se encuentra en el Anexo IX.



Figura 90 Parte de arriba de la caja de la electrónica

Lo primero que se debe hacer es la selección del MODO, empezando por la parte izquierda de la Figura 90 es el primer interruptor. Seleccionaremos el modo que queramos pulsando el interruptor. Podremos seleccionar el MODO EJERCICIO si pulsamos la parte superior del interruptor, con la marca del punto blanco. Para seleccionar el MODO FIJO pulsamos la parte inferior del interruptor, sin la marca del punto blanco.

Si se selecciona el MODO FIJO, pasamos a usar el segundo interruptor, con dos posibles posiciones, ABRIR y CERRAR. Del mismo modo, si pulsamos la parte superior del interruptor, con la marca del punto blanco, seleccionamos CERRAR, cerrando el exoesqueleto de mano. Si pulsamos la parte inferior del interruptor, sin la marca del punto blanco, seleccionamos ABRIR, abriendo el exoesqueleto de mano.

Si se selecciona el MODO EJERCICIO, pasamos a usar el tercer interruptor, con dos posibles posiciones, CONTAR y COGER. Del mismo modo, si pulsamos la parte superior del interruptor, con la marca del punto blanco, seleccionamos CONTAR, contando con el exoesqueleto de mano de 0 a 5, abriendo la mano, desde el dedo índice al meñique y terminando con el dedo pulgar, de manera consecutiva e individual todos los dedos. Si pulsamos la parte inferior del interruptor, sin la marca del punto blanco, seleccionamos COGER, cerrando progresivamente el exoesqueleto de mano hasta que detecte un objeto. Este modo SOLO se puede usar junto al dedal y su sensor. Para soltar una pieza cogida, basta con pulsar el pulsador de SOLTAR.

El cuarto botón, EXTRA, no tiene función asignada pero se incorporó para nuevas ampliaciones del proyecto.

5.4. Desarrollo de software para el control del exoesqueleto con el sensor piezoeléctrico. Terapias programadas.

En este proyecto se va a emplear una placa de Arduino Mega de la marca Velleman, debido a la gran cantidad de pines de la que dispone, del número de interrupciones programables y de la potencia de procesamiento de datos que resultara más adecuada.



Figura 91 Placa de Arduino Mega de la marca Velleman

Se recomienda ver el código “Mano_1” incluido en el Anexo I de este proyecto a la vez que se leen los siguientes párrafos.

El código, como todo programa en este lenguaje Arduino, consta de dos procesos fijos, el setup y el loop. También se encuentran las declaraciones de variables globales y funciones.

Al comienzo de este código podemos ver la inclusión de la librería Mano.h, librería que incluye las funciones que realizan los objetos de la clase Mano. A continuación se crea un objeto de esa clase. También se definen como variables globales dos vectores, uno con los pines de los interruptores y otro con las posiciones iniciales de los dedos en la opción de coger objeto. Le siguen las declaraciones de dos variables booleanas para las dos interrupciones programadas.

Ya en el módulo setup, iniciamos el puerto serie y mostramos por ese puerto el comienzo de la actividad. Después están las declaraciones de las interrupciones, el pin correspondiente, la función que se ejecutará cuando se produzca la interrupción y la condición de disparo.

MODELO ARDUINO	INT 0	INT 1	INT 2	INT 3	INT 4	INT 5
UNO	Pin 2	Pin 3				
MEGA	2	3	21	20	19	18
DUE	Todos los pines del DUE pueden usarse para interrupciones.					
Leonardo	3	2	0	1	7	

Figura 92 Interrupciones existentes en las placas de Arduino

Como los pines 2 y 3 están ocupados por los servomotores, se van a emplear los pines 18 y 19, y sus interrupciones que son las 5 y la 4 respectivamente.

La interrupción asignada al pin 18 ejecutará la función `Pieza_Cogida`, que se encarga de cambiar el valor de la variable cogiendo a 0, siempre que en ese pin entre un 1 o HIGH. Este pin es el asignado al sensor piezoeléctrico que, como hemos dicho anteriormente, se emplea como un interruptor todo/nada.

La interrupción asignada al pin 19 ejecutará la función `Soltar_Pieza`, que se encarga del cambiar el valor de la variable soltando a 1, siempre que haya un flanco ascendente en ese pin, un cambio de 0 a 1 o RISING. Este pin es el asignado al pulsador por lo que cuando procedamos al pulsarle es cuando dispara la interrupción.

Tras estas las declaraciones de variables, se encuentran la asignación de los pines de los servomotores y la asignación de los interruptores como entradas.

Dentro del loop vamos a tener la evaluación del primer interruptor, el selector del modo de uso del exoesqueleto. Si es esta desactivado, LOW o 0, entramos en el modo fijo, que quiere decir que solo abre o cierra la mano completamente. Si el segundo interruptor, el asignado al modo fijo, esta desactivado, LOW o 0, la mano se abre. En caso contrario, la mano se cierra.

En caso de que el primer interruptor este activado, HIGH o 1, entramos en el modo ejercicio, que quiere decir que o cuenta hasta 5 con los dedos o permite la detección de objetos a coger. Se el tercer interruptor, el asignado al modo ejercicio, esta desactivado, LOW o 0, podemos coger objetos y soltarlos. En caso contrario, la mano cuenta hasta 5 de uno en uno.

A la hora de coger objetos, se llaman a dos funciones, `Coger_Pieza` y `Soltando_Pieza`. Como bien dicen sus nombres nos van a permitir coger el objeto y soltarlo.

`Coger_Pieza` es una función que ejecutará hasta que salte la interrupción asignada al sensor del dedal. En cada ejecución del bucle while, se va incrementando la posición de los servomotores, aproximando cada vez más los dedos al objeto deseado. Como medida de seguridad se ha limitado la posición

máxima de cierre del exoesqueleto en caso de no detectarse con el sensor hasta tener 1mm de distancia entre dedo índice y pulgar.

La variable que controla la posición de los servomotores se llama “posición”, con un valor inicial de 60, que corresponde a tener todos los dedos extendidos. En el bucle while se va incrementando en una unidad este valor de la variable, si se desea cerrar los dedos más rápido basta con cambiar el valor de este incremento y el valor del delay de ese bucle, por defecto 100 milisegundos para tener una pequeña pausa.

Una vez salte la interrupción del sensor, se introduce la siguiente posición de los servomotores, dado que la rapidez de ejecución del bucle while permite actualizar el valor de la variable posición, permitiendo apretar más fuerte la pieza. Únicamente se introduce la siguiente posición, aproximadamente 1mm más de la posición que tienen en ese momento los servomotores, porque es suficiente para tener la pieza lo suficientemente sujeta.

Entonces saldrá de la ejecución de esta función y se pasará a ejecutar la función Soltando_Pieza. Esta función desactiva la interrupción del sensor por seguridad y se quedara esperando hasta que se active el pulsador de soltar. En ese momento, se abre la mano, se reestablecen las variables que controlan las interrupciones y se activa de nuevo la interrupción del sensor.

Un esquema de los modos de uso del exoesqueleto de mano, junto a la explicación del capítulo 5.3, es el siguiente:

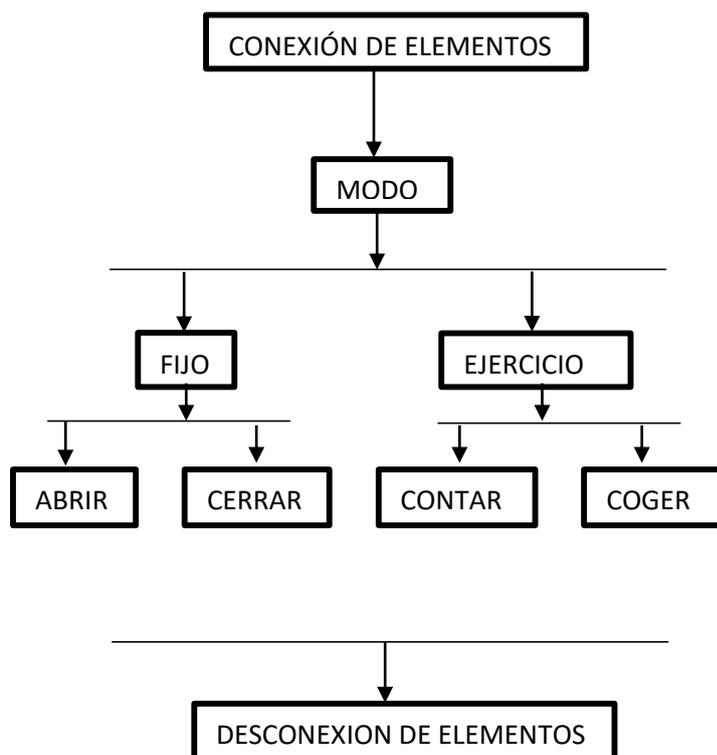


Ilustración 1 Esquema de los modos de uso del exoesqueleto de mano

5.5. Manual de instalación, conexionado y puesta en funcionamiento

Con todos los materiales ya identificados se va a proceder a realizar el montaje y conexionado sobre el Arduino, la protoboard, los botones y pulsadores y las placas de los servomotores.

El siguiente esquema realizado en Fritzing muestra las conexiones y los pines a los que van los elementos. No son los elementos reales ya que no estaban disponibles en la galería de objetos, pero se entiende correctamente el conexionado y el elemento al que hacen referencia. En caso de no entenderse, se explica después de la Figura 93.

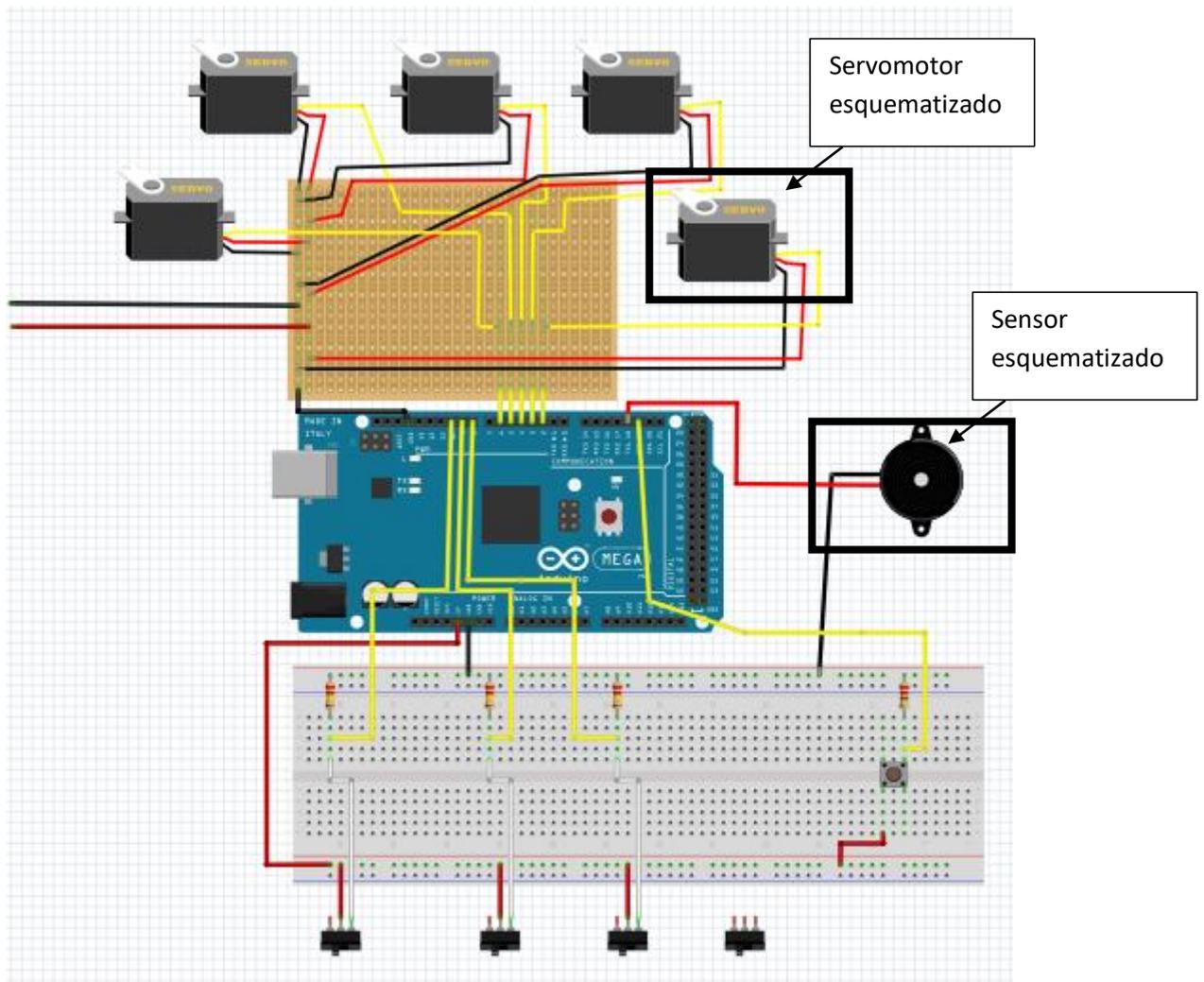


Figura 93 Esquema de montaje de la electrónica del proyecto

En la Figura 93 podemos ver, desde la parte de inferior a la parte superior, los interruptores. En el esquema, como en el montaje real, solo hay dos terminales conectados, ya que el tercero es para la luz del propio interruptor. Un terminal va a alimentación y el otro a una resistencia de 2.2K Ω . Entre medias, se encuentra un conector que va al pin asociado en la programación

Arduino, pines 10,9 y 8. Hay un interruptor sin conectar porque en la realidad no está conectado, pero el esquema sería similar al del resto de interruptores.

Ascendiendo en la imagen, vemos un pulsador, que está conectado por un terminal a la alimentación y por otro lado a una resistencia de 220 Ω . Entre la conexión del pulsador y la resistencia hay un conector que va al pin 19, encargado de la interrupción programada.

El siguiente elemento es el sensor piezoeléctrico, en el esquema no se refleja el sensor real pero los dos extremos del sensor van a GND y al pin número 18. Al mismo nivel se encuentra la placa de Arduino MEGA.

Los pines 2, 3, 4, 5 y 6 de esta placa van a una placa de circuito impreso en la que se conectan los terminales de los servomotores. En el esquema se ha representado de manera aproximada, pero en la realidad se tiene una placa como la siguiente, con las siguientes conexiones:

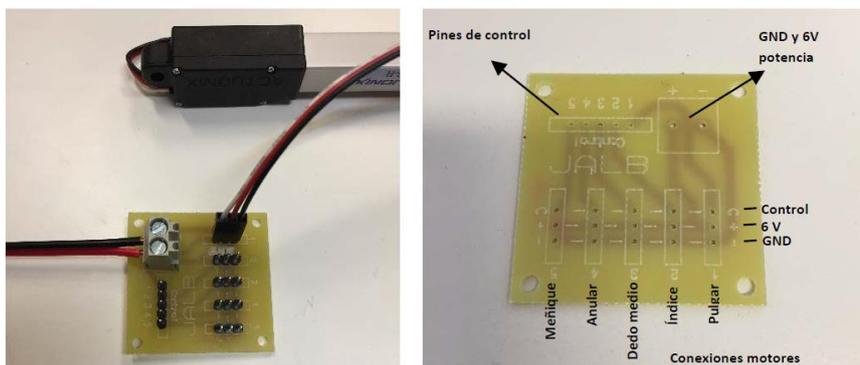


Figura 94 Placa de circuito impreso para la conexión de servomotores

Una tabla resumen de la conexión de todos los pines es la siguiente:

Elemento	Pin Arduino	Elemento	Pin Arduino
Interruptor 1	10	Servomotor 1	2
Interruptor 2	9	Servomotor 2	3
Interruptor 3	8	Servomotor 3	4
Interruptor 4	-	Servomotor 4	5
Pulsador	29	Servomotor 5	6
Dedal	18	LED	11

El montaje real final es el mostrado en la Figura 96 que se encuentra a continuación:

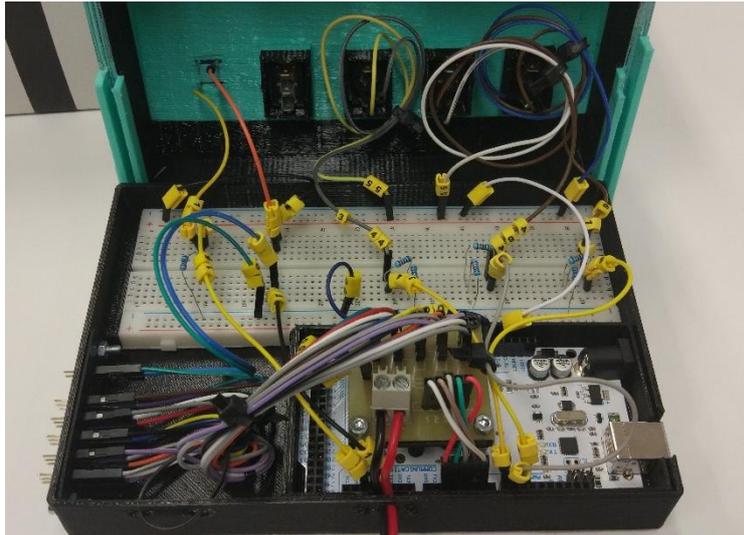


Figura 95 Montaje real de la electrónica del proyecto

Para conectar la electrónica de control con la fuente de alimentación, basta con introducir los extremos rojo y negro en los orificios que tienen los mismos colores. Una imagen de la conexión es la Figura 95.

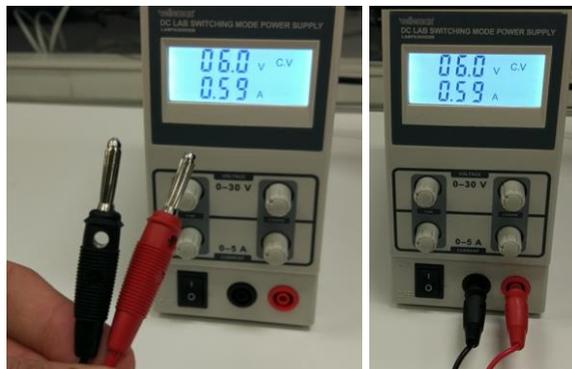


Figura 96 Conexión con la fuente de alimentación

Para conectar la electrónica de control con el ordenador, basta con introducir un extremo en un USB del ordenador y el otro extremo en la caja como se muestra en la Figura 97.



Figura 97 Conexión con el ordenador

Para conectar el exoesqueleto de mano y el dedal con la electrónica de control, basta con unir los extremos de los cables, con la orientación y respetando la serigrafía que hay, a los pines de la caja de la electrónica de control.

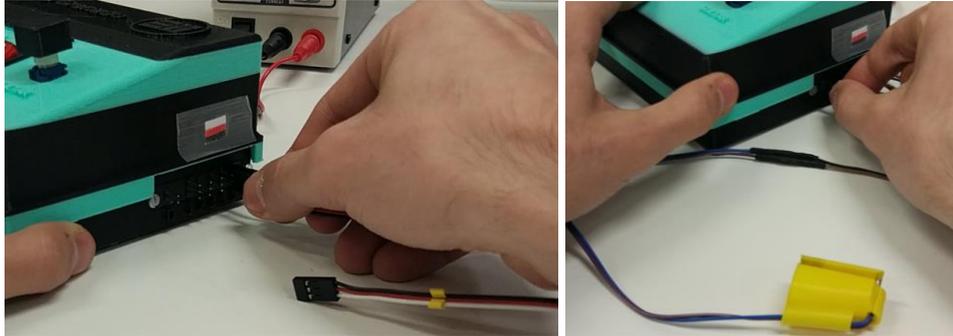


Figura 98 Conexionado con el exoesqueleto y con el dedal

Una vez que todo esté conectado, el resultado debe ser similar al mostrado en la Figura 99.

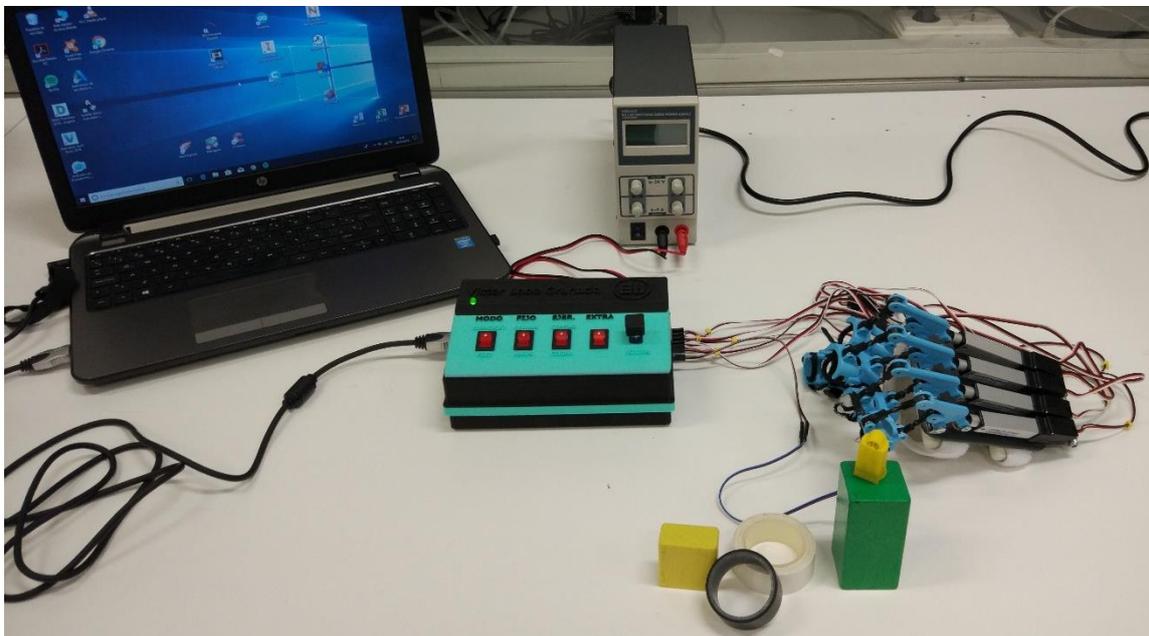


Figura 99 Conexionado final de todos los elementos

5.6. Pruebas realizadas. Resultados

Con todo el exoesqueleto conectado, el programa de Arduino cargado en la placa del controlador y ajustado a la mano del usuario, se realizaron una serie de pruebas para comprobar el correcto funcionamiento del dispositivo.



Figura 100 Panel de interruptores para el control del exoesqueleto

En primer lugar se van a realizar las pruebas del MODO FIJO, dado que esa programación no se ha modificado, solamente se han cambiado los interruptores y el modo de accionarlos.

Se selecciona el MODO FIJO en el primer interruptor. Dentro de este modo, en el segundo interruptor se selecciona CERRAR y se comprueba que el funcionamiento es el esperado, el exoesqueleto cierra todos los dedos de la mano a la vez. El resultado es el mostrado en la Figura 101.

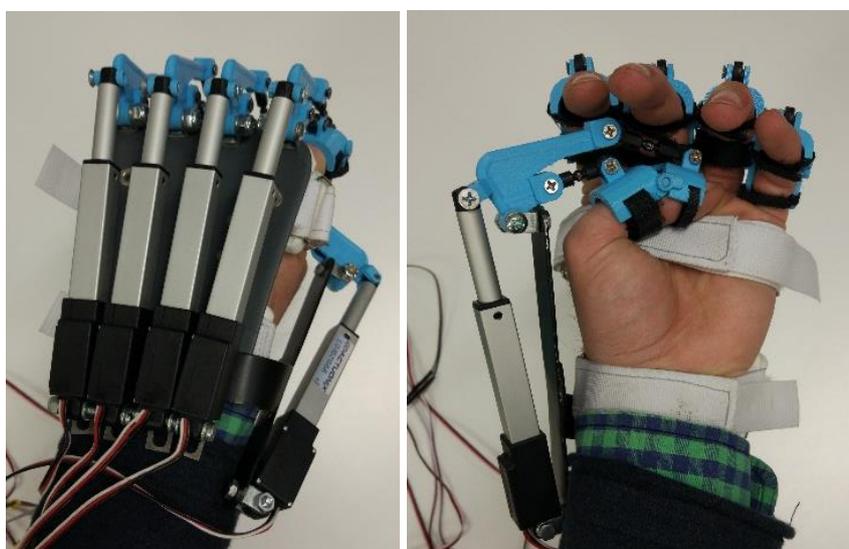


Figura 101 Exoesqueleto en posición FIJA CERRADO

Se selecciona el MODO FIJO en el primer interruptor. Dentro de este modo, en el segundo interruptor se selecciona ABRIR y se comprueba que el funcionamiento es el esperado, el exoesqueleto abre todos los dedos de la mano a la vez. El resultado es el mostrado en la Figura 102.

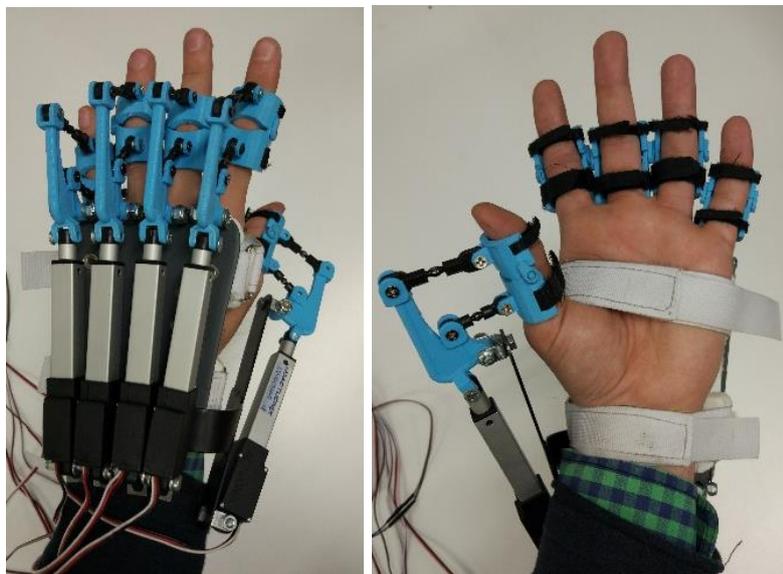


Figura 102 Exoesqueleto en posición FIJA ABIERTO

A continuación se realizan las pruebas del modo EJERCICIO, el modo CONTAR no se ha modificado, por lo que debería funcionar correctamente. El modo que se ha modificado es el de COGER, modo que tendrá unas pruebas más extensas.

Se selecciona el MODO EJERCICIO en el primer interruptor. Dentro de este modo, en el tercer interruptor se selecciona CONTAR y se comprueba que el funcionamiento es el esperado, el exoesqueleto cierra la mano y va extendiendo los dedos de uno en uno empezando por el índice hasta acabar con el pulgar. El resultado es del proceso es el mostrado en la Figura 103 y Figura 104.



Figura 103 Exoesqueleto en MODO CONTAR

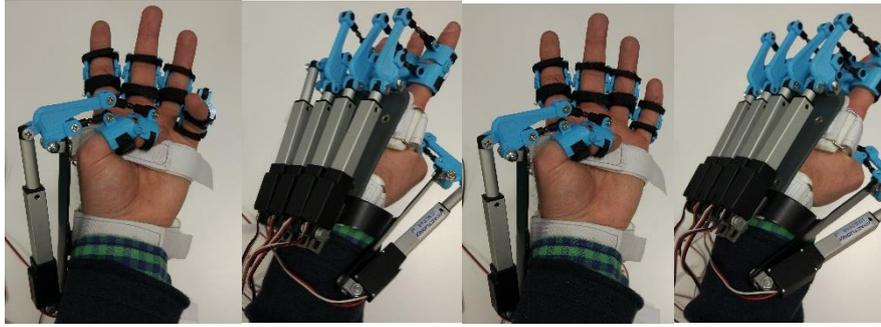


Figura 104 Exoesqueleto en MODO CONTAR

Se selecciona el MODO EJERCICIO en el primer interruptor. Dentro de este modo, en el tercer interruptor se selecciona COGER y se van a realizar diferentes pruebas con objetos con distintas formas, prismas, cilindros, esferas y bolígrafos como se muestra en la Figura 105.

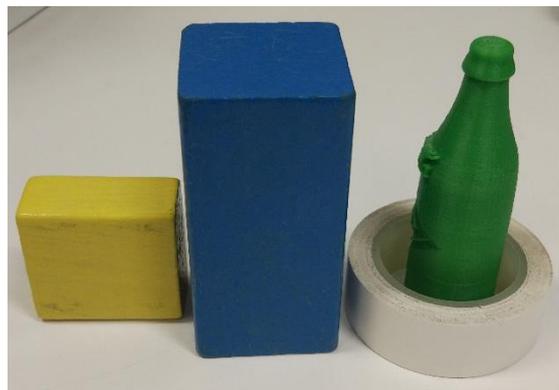


Figura 105 Diferentes piezas para la realización de pruebas con el exoesqueleto

Las dimensiones de los objetos con los que se realizan pruebas son:

Objeto	Dimensiones (mm)
Pieza amarilla	37x20x37
Pieza azul	37x80x37
Cinta adhesiva blanca	56 (diámetro)
Cinta adhesiva negra	46 (diámetro)
Botella verde	28 (diámetro)
Esfera azul	90 (diámetro)
Bolígrafo BIC	8

Comienzo las pruebas con las piezas prismáticas de diferentes grosores y compruebo que el agarre es óptimo, las piezas quedan fuertemente sujetas. Por el momento responde bien a los diferentes grosores de las mismas, detecta bien el inicio del contacto y para el avance de los servomotores. Hay que decir que el agarre tiene que ser lo más plano posible, el dedal paralelo a la superficie a tocas, una pequeña inclinación puede hacer que el dedal no detecte la pieza y siga su avance, pero eso solo ha ocurrido en contadas ocasiones. En la Figura 106 y la Figura 107 se puede ver el resultado de coger las piezas prismáticas.

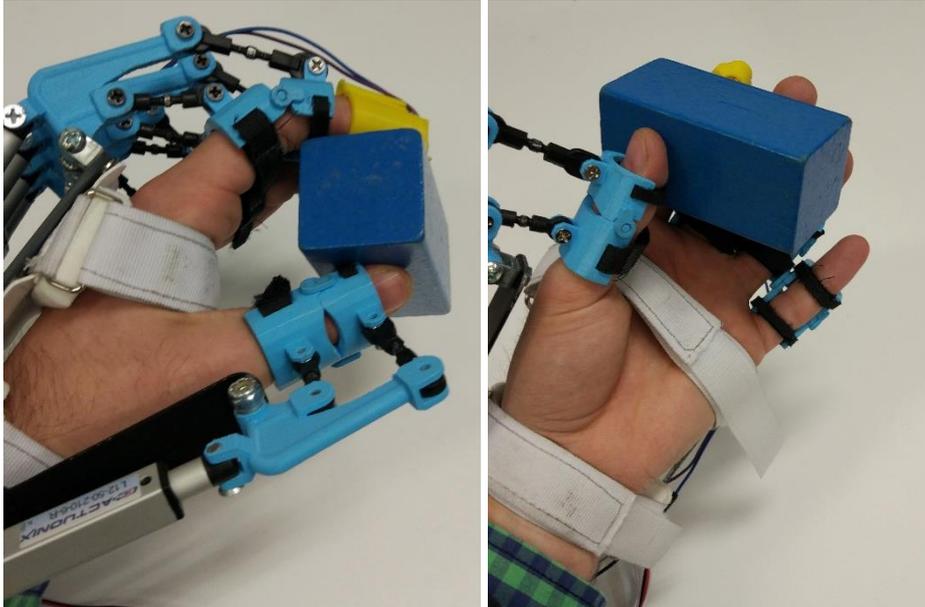


Figura 106 Pieza prismática grande cogida

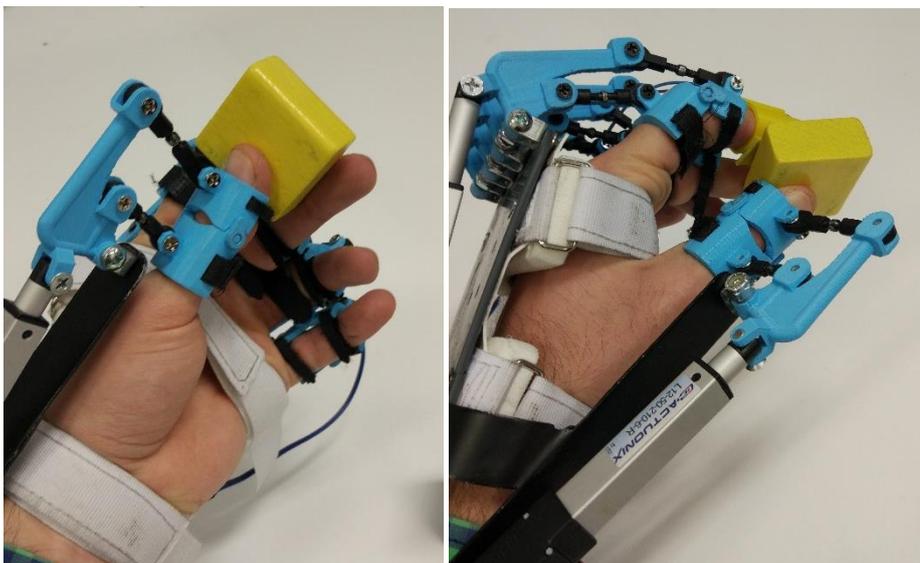


Figura 107 Pieza prismática pequeña cogida

Siguiendo con las piezas cilíndricas, el resultado es el esperado. Las piezas están firmemente agarradas y el dedal responde bien a la curvatura del objeto. Igual que en el caso de los prismas, el sensor responde correctamente ante diferentes grosores de cilindros. Hay que decir que el agarre debe ser por una zona lisa del cilindro, si tiene algún tipo de relieve o serigrafía, como es el caso de una de las pruebas, el agarre no termina de ser lo fuerte que se desearía, pero se sujeta igualmente la pieza. En la Figura 108 y la Figura 109 se puede ver el resultado de coger las piezas cilíndricas.



Figura 108 Piezas cilíndricas cogidas



Figura 109 Pieza cilíndrica cogida

Seguimos con las piezas esféricas y el resultado no es del todo satisfactorio, puede ser por las dos esferas tomadas, al tener una superficie pulida, pero a la hora de tomar la esfera se para al detectar la pared del objeto, pero al hacer algo más de fuerza la pieza se escurre y se suelta del agarre. Con estos resultados se puede concluir que las esferas no son el tipo de objetos que puede coger el exoesqueleto. La Figura 110 muestra un resultado de coger piezas esféricas.

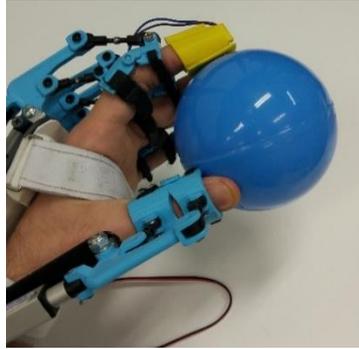


Figura 110 Pieza esférica cogida

Por último se prueba a tomar un bolígrafo y a escribir algo en un papel. El resultado es correcto, se toma el bolígrafo de manera natural, con fuerza y se puede escribir moviendo toda la mano. El resultado es el mostrado en la Figura 111.



Figura 111 Bolígrafo cogido para escritura

Una fotografía final del proyecto es la Figura 112.

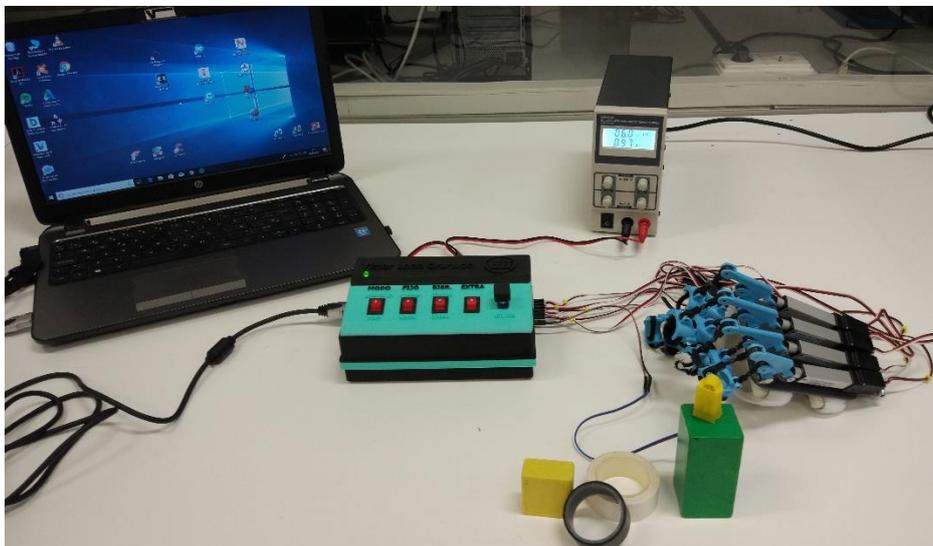


Figura 112 Proyecto montado y preparado para usarse

6. Conclusiones

En el presente TFG se ha realizado el modelado, fabricación, montaje y programación de un dedal con sensor de presión para un exoesqueleto de mano para su aplicación a personas con discapacidad motora. El prototipo de dedal desarrollado, junto a la electrónica de control programada, tiene como objetivo contribuir a ayudar a estas personas a que puedan realizar las tareas de coger y dejar objetos.

El objetivo de este proyecto era dotar al exoesqueleto de la capacidad de coger objetos y se ha conseguido, permitiendo prensar objetos de diferentes formas.

Se ha puesto especial interés en la búsqueda de un sensor que cumpliera los requisitos para ponerlo en un dedo de una mano. Se realizó una búsqueda profunda por los diferentes distribuidores de sensores y se seleccionaron varios para la realización de pruebas.

Para poder hacer pruebas con estos sensores, ha sido necesario realizar varias etapas de: diseño de “dedales”→ fabricación 3D→ análisis del modelo→ rediseño hasta dar con un dedal adecuado. Se diseñaron y fabricaron varios tamaños del modelo final del dedal para que pueda ser utilizado por cualquier persona con distinto tamaño de dedo.

Se realizaron pruebas de estos sensores con el dedal realizado, y se seleccionó un sensor piezoeléctrico cuya flexibilidad, tamaño y señal de salida lo hacían perfecto para esta aplicación. Se realizó una prueba final con el sensor seleccionado en un banco de pruebas, con elementos similares al exoesqueleto de mano y se corroboró la elección de este sensor.

Una vez seleccionado el sensor, se incorporó al exoesqueleto de mano, modificando la electrónica de control del mismo, la envoltura de dicha electrónica de control y la identificación del material.

Con todo el material incorporado, programado y conectado se realizaron varias pruebas con diferentes objetos y formas para garantizar la buena elección del sensor y los resultados fueron satisfactorios.

La motivación que me ha llevado a realizar este TFG se basa en mi interés por los dispositivos mecatrónicos, ya que concentran todas las capacidades que debe tener un ingeniero: análisis de un problema, búsqueda de soluciones, realización de pruebas con materiales y presentación de resultados. Además, me ha permitido aplicar una tecnología actual como la impresión 3D en este proyecto puesto que tengo gran interés por este tipo de fabricación, diseño de piezas y las aplicaciones que tiene en la actualidad y tendrá en el futuro.

7. Bibliografía

- [1]. López Beloso, J. A. –“Diseño mecánico y primer prototipo de un robot de rehabilitación de mano”. Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid
- [2]. <http://biorobotics.snu.ac.kr/rehabilitation-robot/exo-glove-poly/> Consultado: Octubre 2017.
- [3]. <https://www.xataka.com/investigacion/este-sensor-flexible-y-transparente-se-adapta-a-los-dedos-y-sirve-para-diagnosticar-cancer> Consultado: Octubre 2017.
- [4]. <http://www.mundodigital.net/exoesqueleto-3d-que-reproduce-el-movimiento-de-los-dedos-de-la-mano/> Consultado: Octubre 2017.
- [5]. <https://pressureprofile.com/fingertps/?locale=en> Consultado: Octubre 2017.
- [6]. <http://www.cyberglovesystems.com/> Consultado: Octubre 2017.
- [7]. <http://saluddelcuerpo12.blogspot.com.es/2016/11/exoesqueleto-ayuda-personas-con.html> Consultado: Octubre 2017.
- [8]. http://cmas.siu.buap.mx/portal_pprd/wb/comunic/estudiantes_de_la_buap_disenan_sistema_para_la_reh Consultado: Octubre 2017.
- [9]. Tema 2-Transductores. Asignatura: Instrumentación Electrónica. Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid
- [10]. <http://es.farnell.com/omron-industrial-automation/e2kf10mc1/interruptor-de-proximidad-capacitivo/dp/1603020> Consultado: Noviembre 2017.
- [11]. <http://es.farnell.com/sick-optic-electronic/cq35-25npp-kc1/sensor-capacitivo-25mm-10-36vdc/dp/2776990> Consultado: Noviembre 2017.
- [12]. <http://es.farnell.com/honeywell/fss1500nsb/sensor-force-1-5kg/dp/3107620> Consultado: Noviembre 2017.
- [13]. <http://es.farnell.com/honeywell/fsagpnxx003lcac5/sensor-de-fuerza-anal-gico-3-lb/dp/2532258> Consultado: Noviembre 2017.
- [14]. <http://es.farnell.com/honeywell/fsg15n1a/force-sensor-1-5kg/dp/7216671> Consultado: Noviembre 2017.
- [15]. <https://es.rs-online.com/web/p/galgas-extensiométricas/8656235/> Consultado: Noviembre 2017.
- [16]. <https://www.electronicaembajadores.com/es/Productos/Detalle/SSPZ001/sensores/sensores-piezoeléctricos/sensor-piezoeléctrico-vibraciones-golpes-flexibilidad-tacto-ldt0-028k> Consultado: Noviembre 2017.
- [17]. <https://store.bq.com/es/bobina-pla-bq/> Consultado: Diciembre 2017.

- [18]. <https://recreus.com/blog/acerca-de-filaflex/> Consultado: Diciembre 2017.
- [19]. http://documentation.fffworld.com/guias-filamentos-3d/ES_FlexiSMART_Guide.pdf Consultado: Diciembre 2017.
- [20]. <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=64> Consultado: Diciembre 2017.
- [21]. <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2016/09/25/ques-arduino/> Consultado: Diciembre 2017.
- [22]. <http://www.ermec.com/catalogos/2013/pulsadores-cuadrados-iluminados-1KS.pdf> Consultado: Diciembre 2017.
- [23]. http://www.rleil.com/rocker_switch_rl3_3.htm Consultado: Diciembre 2017.

Anexo I

En el siguiente anexo se adjunta el código Arduino final.

Mano_1.ino

```
1. /*
2.  Name:           Mano.ino
3.  Created:      17/11/2017 11:20:00 PM
4.  Author:       Victor Lobo Granado
5.  */
6.
7. #include "mano.h"
8.
9. Mano;
10.
11.  int boton[3] = { 10,9,8 };
12.  unsigned int posicion[5] = {60,60,60,60,60};
13.
14.  volatile bool cogiendo=1;
15.  volatile bool soltando=0;
16.
17.  void setup() {
18.      Serial.begin(9600);
19.      Serial.println("Iniciar");
20.      pinMode(12,OUTPUT);
21.      digitalWrite(12,HIGH);
22.      /*Interrupcion para detectar pieza cogida*/
23.      attachInterrupt(5,Pieza_Cogida,HIGH);
24.      /*Interrupcion para soltar pieza cogida*/
25.      attachInterrupt(4,Soltar_Pieza,RISING);
26.      /*Inizializacion Mano*/
27.      mano.set_pines(6,5,4,3,2);
28.      /*Inicializacion interruptores*/
29.      for (unsigned i = 0; i < 2; i++)
30.          pinMode(boton[i], INPUT);
31.  }
32.  void loop() {
33.      /*Eleccion de MODO, dependiendo de si el interruptor
34.      esta LOW o HIGH*/
35.      if (digitalRead(boton[0])==0){
36.          Serial.println("SELECCION: POSICION FIJA");
37.          /*Dentro de MODO FIJO, dependiendo de si el interruptor
38.          es LOW o HIGH*/
39.          if (digitalRead(boton[1])==0){
40.              Serial.println("Abriendo...");
41.              mano.abrir_dedos();
42.          }else{
43.              Serial.println("Cerrando...");
44.              mano.cerrar_dedos();
45.          }
46.          /*Dentro de MODO EJERCICIO, dependiendo de si el
47.          interruptor es LOW o HIGH*/
48.          if (digitalRead(boton[2])==0){
49.              Serial.println("Cogiendo pieza...");
50.              Coger_Pieza();
51.          }
52.          Soltando_Pieza();
53.      }
54.  }
```

```

51.             }else{
52.                 Serial.println("Contando...");
53.                 mano.contar();
54.             }
55.         }
56.     }
    /*Funcion que permite detectar un objeto cuando se va a coger*/
57.     void Coger_Pieza(){
58.         /*Mientras nos se haya detectado pieza, se van
           incrementando las posiciones de los servomotores, y en caso de
           no tomar pieza, parar en la posicion 105*/
59.         while(cogiendo==1){
60.             mano.asignar_posicion_dedos(posicion);
61.             delay(100);
62.             for(int i=1;i<5;i++){
63.                 if(posicion[i]<=105){
64.                     posicion[i]=1+posicion[i];
65.                 }
66.             }
67.         }
68.         /*Una vez detectado el objeto, se introduce la posicion
           para apretar mas la pieza*/
69.         mano.asignar_posicion_dedos(posicion);
70.     }
71.
72.     /*Funcion que permite soltar un objeto cogido*/
73.     void Soltando_Pieza(){
74.         /*Una vez tomada la pieza, se esperara hasta que se
           pulse el boton de soltar*/
75.         detachInterrupt(5);
76.         while(soltando==0){
77.             }
78.         /*Una vez pulsado, devuelve la mano a la posicion
           inicial y se reestablecen las variables pertinentes*/
79.         if(soltando==1){
80.             Serial.println("Soltando pieza");
81.             mano.abrir_dedos();
82.             attachInterrupt(5,Pieza_Cogida,HIGH);
83.             soltando=0;
84.             cogiendo=1;
85.             for(int i=1;i<5;i++){
86.                 posicion[i]=60;
87.             }
88.         }
89.     }
90.     /*Funcion asignada a la interrupcion del dedal y cambia la
           variable de Coger_Pieza*/
91.     void Pieza_Cogida(){
92.         cogiendo=0;
93.     }
94.     /*Funcion asignada a la interrupcion del boton de soltar y
           cambia la variable de Soltando_Pieza*/
95.     void Soltar_Pieza(){
96.         soltando=1;
97.     }

```

Mano.h

```
1. #pragma once
2. #include <Servo.h>
3. #include "dedo.h"
4.
5. //PULGAR
6. #define PULGAR_ABIERTO 60
7. #define PULGAR_CERRADO 107
8. //INDICE
9. #define INDICE_ABIERTO 56
10.     #define INDICE_CERRADO 101
11.     //CORAZON
12.     #define CORAZON_ABIERTO 57
13.     #define CORAZON_CERRADO 96
14.     //ANULAR
15.     #define ANULAR_ABIERTO 58
16.     #define ANULAR_CERRADO 98
17.     //MENIQUE
18.     #define MENIQUE_ABIERTO 57
19.     #define MENIQUE_CERRADO 105
20.
21.     class Mano {
22.     public:
23.         void set_pines(unsigned pin[5]);
24.         void set_pines(unsigned pin_pulgar, unsigned
pin_indice, unsigned pin_corazon, unsigned pin_anular, unsigned
pin_menique);
25.         void abrir_dedos();
26.         void cerrar_dedos();
27.         void coger_objeto();
28.         void soltar_objeto();
29.         void contar(unsigned iteraciones = 1);
30.         void indice_pulgar();
31.         void asignar_posicion_dedos(unsigned posiciones[5]);
32.         void calibrar_dedos();
33.     //private:
34.         Dedo pulgar;
35.         Dedo indice;
36.         Dedo corazon;
37.         Dedo anular;
38.         Dedo menique;
39.     };
```

Mano.cpp

```
1. #include "Arduino.h"
2. #include "mano.h"
3.
4. void Mano::set_pines(unsigned pin[5])
5. {
6.     pulgar.iniciar(pin[0], PULGAR_CERRADO, PULGAR_ABIERTO);
7.     indice.iniciar(pin[1], INDICE_CERRADO, INDICE_ABIERTO);
8.     corazon.iniciar(pin[2], CORAZON_CERRADO, CORAZON_ABIERTO);
9.     anular.iniciar(pin[3], ANULAR_CERRADO, ANULAR_ABIERTO);
10.    menique.iniciar(pin[4], MENIQUE_CERRADO,
    MENIQUE_ABIERTO);
11. }
12.
13. void Mano::set_pines(unsigned pin_pulgar, unsigned
    pin_indice, unsigned pin_corazon, unsigned pin_anular, unsigned
    pin_menique)
14. {
15.     unsigned pin[] = { pin_pulgar, pin_indice,
    pin_corazon, pin_anular, pin_menique };
16.     set_pines(pin);
17. }
18.
19. void Mano::abrir_dedos()
20. {
21.     pulgar.abrir(false);
22.     indice.abrir(false);
23.     corazon.abrir(false);
24.     anular.abrir(false);
25.     menique.abrir(false);
26.     delay(6000);
27. }
28.
29. void Mano::cerrar_dedos()
30. {
31.     pulgar.cerrar(false);
32.     indice.cerrar(false);
33.     corazon.cerrar(false);
34.     anular.cerrar(false);
35.     menique.cerrar(false);
36.     delay(6000);
37. }
38.
39. void Mano::contar(unsigned interacciones)
40. {
41.     for (unsigned iter = 0; iter < interacciones; iter++)
42.     {
43.         cerrar_dedos();
44.         indice.abrir();
45.         corazon.abrir();
46.         anular.abrir();
47.         menique.abrir();
48.         pulgar.abrir();
49.     }
50. }
51.
52. void Mano::indice_pulgar()
53. {
```

```

54.     }
55.
56.     void Mano::coger_objeto() {
57.         }
58.
59.     void Mano::soltar_objeto() {
60.         }
61.
62.     void Mano::asignar_posicion_dedos(unsigned posiciones[5])
63.     {
64.         pulgar.write(posiciones[0]);
65.         indice.write(posiciones[1]);
66.         corazon.write(posiciones[2]);
67.         anular.write(posiciones[3]);
68.         menique.write(posiciones[4]);
69.     }
70.
71.     void Mano::calibrar_dedos()
72.     {
73.         Serial.println("Calibrando dedos...");
74.         unsigned dedo = 0;
75.         bool siguiente_dedo = false;
76.         unsigned posicion = 80;
77.         unsigned input;
78.         while (dedo < 5)
79.         {
80.             while (!siguiente_dedo)
81.             {
82.                 if (Serial.available()) {
83.                     input = Serial.read();
84.                     if (input == 43)
85.                     {
86.                         posicion++;
87.                     }
88.                     else if (input == 45)
89.                     {
90.                         posicion--;
91.                     }
92.                     else if (input == 42)
93.                     {
94.                         siguiente_dedo = true;
95.                     }
96.                     switch (dedo)
97.                     {
98.                         case 0:
99.                             pulgar.write(posicion);
100.                            break;
101.                         case 1:
102.                            indice.write(posicion);
103.                            break;
104.                         case 2:
105.                            corazon.write(posicion);
106.                            break;
107.                         case 3:
108.                            anular.write(posicion);
109.                            break;
110.                         case 4:
111.                            menique.write(posicion);
112.                            break;

```

```
113.         }
114.         Serial.print("Dedo: ");
115.         Serial.print(dedo);
116.         Serial.print(" --- Posicion: ");
117.         Serial.println(posicion);
118.     }
119. }
120.     siguiente_dedo = false;
121.     dedo++;
122. }
123. }
```

Dedo.h

```
1. #pragma once
2. #include <Servo.h>
3.
4. #define DELEY_APERTURA_DEDO 7000
5. #define DELEY_CERRAR_DEDO 7000
6.
7. class Dedo :public Servo {
8. public:
9.     void iniciar(unsigned, unsigned, unsigned);
10.    void abrir(bool delay = true);
11.    void cerrar(bool delay = true);
12.    unsigned get_posicion_abierto() { return
    posicion_abierto; };
13.    unsigned get_posicion_cerrado() { return
    posicion_cerrado; };
14.    enum _estado { abierto, cerrado, desconocido };
15.    _estado get_estado() { return estado; };
16.
17. private:
18.    unsigned posicion_abierto;
19.    unsigned posicion_cerrado;
20.    _estado estado;
21. };
```

Dedo.cpp

```
1. #include "Arduino.h"
2. #include "dedo.h"
3. void Dedo::iniciar(unsigned pin, unsigned apertura_maxima,
    unsigned apertura_minima)
4. {
5.     attach(pin);
6.     posicion_abierto = apertura_minima;
7.     posicion_cerrado = apertura_maxima;
8. }
9.
10. void Dedo::abrir(bool _delay)
11. {
12.     this->write(posicion_abierto);
13.     if (_delay)
14.         delay(DELEY_APERTURA_DEDO);
15. }
16.
17. void Dedo::cerrar(bool _delay)
18. {
19.     this->write(posicion_cerrado);
20.     if (_delay)
21.         delay(DELEY_APERTURA_DEDO);
22. }
```


Anexo II

En el siguiente anexo se adjuntan los perfiles de impresión 3D en Cura 2.4.0

Perfil de impresión: FlexiSmart

```
fdmprinter_flexismart_victor[general]
version = 2
name = FlexiSmart_Victor
definition = fdmprinter
[metadata]
quality_type = normal
type = quality_changes
[values]
bottom_thickness = 1.2
cool_min_layer_time = 8
material_bed_temperature = 60
material_print_temperature = 210
retraction_amount = 6.5
retraction_enable = False
retraction_speed = 22
speed_layer_0 = 30
speed_print = 40
speed_topbottom = 35
speed_travel = 150
speed_wall = 35
support_angle = 60
support_enable = False
top_bottom_thickness = 1.2
top_thickness = =top_bottom_thickness
wall_thickness = 1.2
```

Perfil de impresión: BQ PLA, calidad normal

bq_hephestos_normal_calidad

[general]

version = 2

name = Normal_Calidad

definition = fdmprinter

[metadata]

quality_type = normal

type = quality_changes

[values]

bottom_layers = 4

material_bed_temperature = 60

material_print_temperature = 220

retraction_amount = 4

retraction_speed = 40

speed_infill = 60

speed_layer_0 = 50

speed_print = 60

speed_topbottom = 50

speed_travel = 130

speed_wall = 50

support_z_distance = 0.2

top_bottom_thickness = 0.6

top_layers = 4

wall_thickness = 1.2

Anexo III

En el siguiente anexo se adjuntan las características de Arduino MEGA.

- Microcontrolador: ATmega2560
- Tension de alimentación: 5V
- Tension de entrada (valor recomendado): 7-12V
- Tension de entrada (valores limite): 6-20V
- Pines de E/S digitales: 54, 14 de ellos proporcionan salida PWM
- Pines de entrada analógica: 16
- Corriente CC por pin de E/S: 40mA
- Corriente CC para 3.3V pin: 50mA
- Memoria Flash: 265KB, 8KB utilizados por bootloader
- SRAM: 8KB
- EEPROM: 4KB
- Velocidad de reloj: 16MHz

Anexo IV

En el siguiente anexo se adjuntan las características del servomotor lineal L12-R.

La serie L12-R de pequeños servos lineales funciona como un reemplazo directo de los servos rotativos estándar. Utilizan el mismo conector estándar de tres hilos: alimentación, tierra y control.

Estos servos se les puede manejar, ya sea con un receptor RC, una tarjeta Arduino o un microcontrolador VEX, el servo L12-R funcionará en lugar de un servo rotatorio regular, pero le brinda el beneficio adicional del movimiento lineal.

Nuestra línea L12 se construye utilizando un eje de aluminio anodizado, caja de engranajes de metal, tornillo de latón y rodamientos de bolas de acero. Estos servos lineales de calidad no sólo están contruidos para durar.

Tiene además un peso ligero de apenas 42 gramos y en el caso de este proyecto una longitud de 50 mm de rango útil. Hay que destacar también que estos motores ofrecen mucha fuerza ya que poseen grandes reducciones en su interior, por esa razón pueden hacer hasta 210 newtons de fuerza.



Figura 113 Reductora empleada en el actuador lineal L12-R

Si nos fijamos en la Figura veremos las características que tiene los motores de esta gama y redondeado la de nuestros motores en concreto.

L12 Specifications

Gearing Option	50:1	100:1	210:1	
Peak Power Point	17N @ 14mm/s	31N @ 7mm/s	62N @ 3.2mm/s	
Peak Efficiency Point	10N @ 19mm/s	17N @ 10mm/s	36N @ 4.5mm/s	
Max Speed (<i>no load</i>)	25mm/s	13mm/s	6.5mm/s	
Max Force (<i>lifted</i>)	22N	42N	80N	
Back Drive Force (<i>static</i>)	12N	22N	45N	
Stroke Option	10 mm	30mm	50mm	100mm
Mass	28 g	34 g	40 g	56 g
Repeatability (<i>-I,-R,-P&LAC</i>)	±0.1 mm	±0.2 mm	±0.3 mm	±0.5 mm
Max Side Load (<i>extended</i>)	50N	40N	30N	15N
Closed Length (<i>hole to hole</i>)	62mm	82mm	102mm	152mm
Potentiometer (<i>-I,-R,-P</i>)	1kΩ±50%	3kΩ±50%	6kΩ±50%	11kΩ±50%
Voltage Option	6VDC	12VDC		
Max Input Voltage	7.5V	13.5V		
Stall Current	460mA	185mA		
Standby Current (<i>-I/-R</i>)	7.2mA	3.3mA		
Operating Temperature	-10°C to +50°C			
Potentiometer Linearity	Less than 2.00%			
Max Duty Cycle	20 %			
Audible Noise	55dB @ 45cm			
Ingress Protection	IP-54			
Mechanical Backlash	0.2mm			
Limit Switches (<i>-S</i>)	Max. Current Leakage: 8uA			
Maximum Static Force	200N			

Figura 114 Tabla de características de los motores L12-R

Los actuadores utilizados tienen el motor de la figura 74 dentro de la caja negra que podemos ver en la figura 76 donde se ve el actuador lineal completo.



Figura 115 Servomotor Firgelli serie L12-R

Anexo V

En el siguiente anexo se adjunta la hoja de características del sensor de fuerza.

Force Sensors

FSS Low Profile Force Sensors

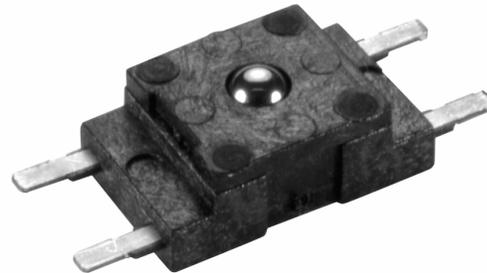
FS Series

FEATURES

- True Surface Mount Technology
- Maximum peak reflow temperature of 260 °C [500 °F]
- Compact, commercial grade package
- Robust performance characteristics
- Adaptable package design
- Precision force sensing
- Reliability rated at 20 million MCTF at 25 °C [77 °F]
- Electrically ratiometric output
- Extremely low deflection (30 microns typ. @ Full Scale)
- High ESD resistance 8 kV
- Available signal conditioning
- Optional terminal configurations

TYPICAL APPLICATIONS

- Medical infusion pumps
- Ambulatory noninvasive pump pressure
- Occlusion detection
- Kidney dialysis machines
- Load and compression sensing
- Variable tensions control
- Robotic end-effectors
- Wire bonding equipment



The FS Series sensors provide precise reliable force sensing performance in a compact commercial grade package at a cost effective price. The sensor features a proven sensing technology that uses a specialized piezoresistive micromachined silicon sensing element. The low power, unamplified, uncompensated Wheatstone bridge circuit design provides inherently stable mV outputs over the force range.

Force sensors operate on the principle that the resistance of silicon-implanted piezoresistors will increase when the resistors flex under any applied force. The sensor concentrates force from the applications, through the stainless steel ball, directly to the silicon-sensing element. The amount of resistance changes in proportion to the amount of force being applied. This change in circuit resistance results in a corresponding mV output level change.

The sensor package design incorporates patented modular construction. The use of innovative elastomeric technology and engineered molded plastics result in load excitation capacities of 4.5/5.5 kg over-force. The stainless steel ball provides excellent mechanical stability and is adaptable to a variety of applications. The FSS sensor delivered 20 million operations in Mean Cycles to Failure (MCTF) reliability testing at 50 °C [122 °F]. This test determines the number of possible sensor operations at full scale until failure. Various electric interconnects can accept prewired connectors, printed circuit board mounting, and surface mountings. The unique sensor design also provides a variety of mounting options that include mounting brackets, as well as application specific mounting requirements.

⚠ WARNING

PERSONAL INJURY

DO NOT USE these products as safety or emergency stop devices or in any other application where failure of the product could result in personal injury.

Failure to comply with these instructions could result in death or serious injury.

⚠ WARNING

MISUSE OF DOCUMENTATION

- The information presented in this product sheet is for reference only. Do not use this document as a product installation guide.
- Complete installation, operation, and maintenance information is provided in the instructions supplied with each product.

Failure to comply with these instructions could result in death or serious injury.

Force Sensors

FSS Low Profile Force Sensors

FS Series

PERFORMANCE CHARACTERISTICS @ 5.0 ± 0.01 Vdc Excitation*, 25 °C [77 °F]

Parameter	Min.	Typical	Max.	Units
Null Offset	-15	0	+15	mV
Operating Force	0	-	1500	grams
Sensitivity.	0.1	0.12	14	mV/gram
Linearity (B.F.S.L.)**	-	± 1.5	-	% span
Repeatability @ 300 g	-	± 10	-	grams
Null Shift				
25 °C to 2 °C [77 °F to 35.6 °F]	-	± 0.5	-	mV
25 °C to 40 °C [77 °F to 104 °F]	-	± 0.5	-	mV
Sensitivity Shift				
25 °C to 50 °C [77 °F to 122 °F]	-	5.5	-	% span
25 °C to 0 °C [77 °F to 32 °F]	-	5.5	-	% span
Input Resistance	4.0 K	5.0 K	6.0 K	Ohms
Output Resistance	4.0 K	5.0 K	6.0 K	Ohms
Overforce	-	-	4,500	grams
ESD (direct contact, terminals and plunger)	8	-	-	kV

* Non-compensated force sensors, excited by constant current (1.5 mA) instead of voltage, exhibit partial temperature compensation of Span.

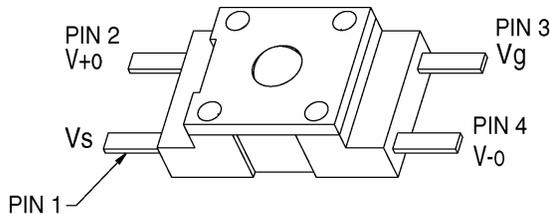
** B.F.S.L.: Best Fit Straight Line

ENVIRONMENTAL SPECIFICATIONS

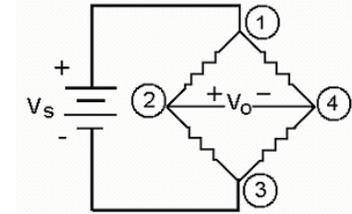
Operating temperature	-40 °C to 85 °C [-40 °F to 185 °F]
Storage temperature	-40 °C to 100 °C [-40 °F to 212 °F]
Shock	Qualification tested to 150 g
Vibration	Qualification tested to 0 to 2 kHz, 20 g sine
MCTF	20 million at 25 °C [77 °F]
Solderability	5 sec at 315 °C [599 °F] per lead
Output ratiometric	Within supply range

Note: All force related specifications are established using dead weight or compliant force.

SENSOR PINOUT



EXCITATION SCHEMATIC Excitation 5 Vdc Typ., 12 Vdc Max.



FS SERIES CIRCUIT

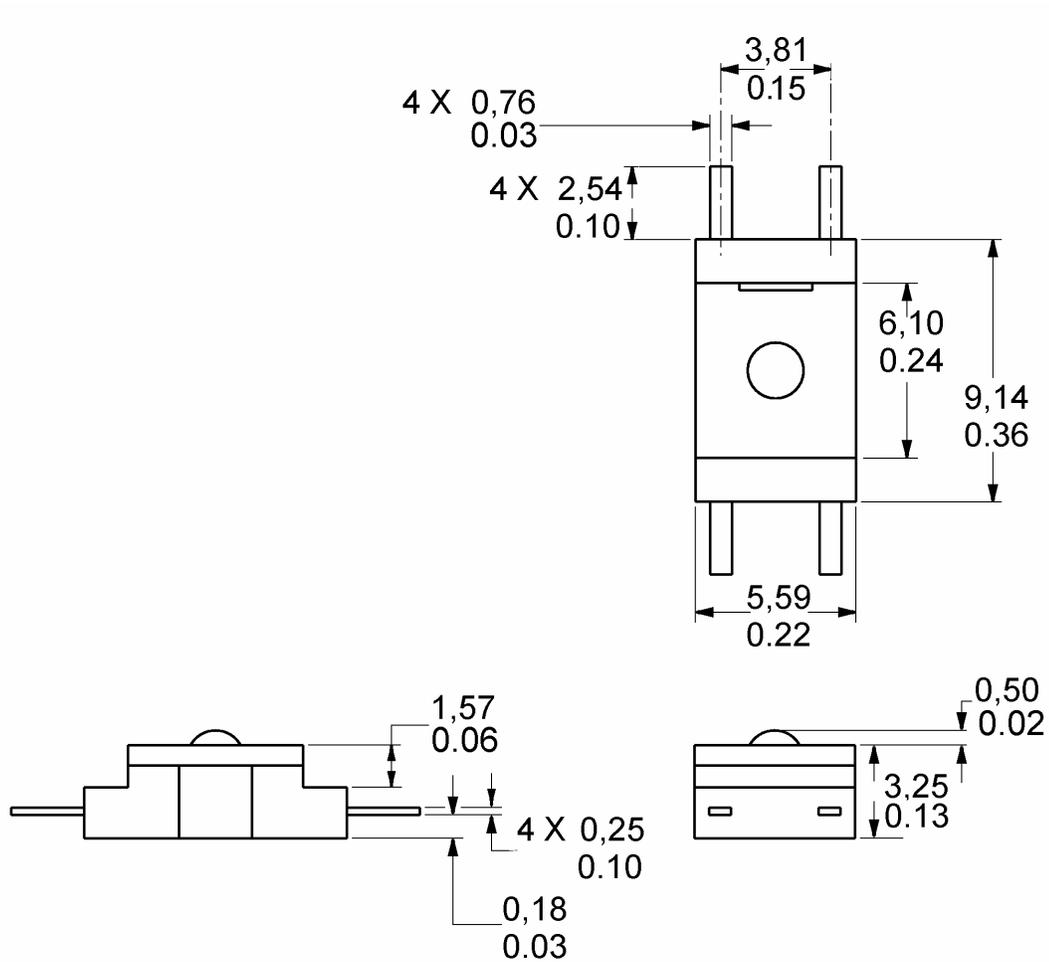
1. Circled numbers refer to sensor terminals (pins).
Pin 1 = Supply V_s (+)
Pin 2 = Output V_o (+)
Pin 3 = Ground V_g (-)
Pin 4 = Output V_o (-)
2. The force sensor may be powered by voltage or current. Maximum supply voltage is not to exceed 12 volts. Maximum supply current is not to exceed 1.6 mA. Power is applied across Pin 1 and Pin 3.
3. The sensor output should be measured as a differential voltage across Pin 2 and Pin 4 ($V_o = V_2 - V_4$). The output is ratiometric to the supply voltage. Shifts in supply voltage will cause shifts in output. Neither Pin 2 nor Pin 4 should be tied to ground or voltage supply.

Force Sensors

FSS Low Profile Force Sensors

FS Series

MOUNTING DIMENSIONS (for reference only) mm/in



DESCRIPTION

Catalog Listing	Packing Style
FSS1500NST	Tube
FSS1500NSB	Bubble Pack
FSS1500NSR	Tape and Reel

Force Sensors

FSS Low Profile Force Sensors

FS Series

WARRANTY/REMEDY

Honeywell warrants goods of its manufacture as being free of defective materials and faulty workmanship. Contact your local sales office for warranty information. If warranted goods are returned to Honeywell during the period of coverage, Honeywell will repair or replace without charge those items it finds defective. **The foregoing is Buyer's sole remedy and is in lieu of all other warranties, expressed or implied, including those of merchantability and fitness for a particular purpose.**

Specifications may change without notice. The information we supply is believed to be accurate and reliable as of this printing. However, we assume no responsibility for its use.

While we provide application assistance personally, through our literature and the Honeywell web site, it is up to the customer to determine the suitability of the product in the application.

For application assistance, current specifications, or name of the nearest Authorized Distributor, contact a nearby sales office. Or call:

1-800-537-6945 USA

1-800-737-3360 Canada

1-815-235-6847 International

FAX

1-815-235-6545 USA

INTERNET

www.honeywell.com/sensing

info.sc@honeywell.com

Honeywell

Sensing and Control

Honeywell

11 West Spring Street

Freeport, Illinois 61032

0080809-1-EN ILS0 GLO 803 Printed in USA

Copyright 2003 Honeywell International Inc.

www.honeywell.com/sensing

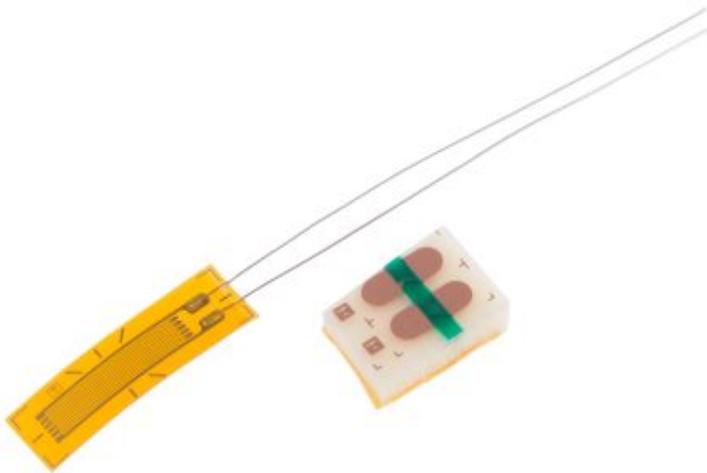
Anexo VI

En el siguiente anexo se adjunta la hoja de características de la galga de deformación.

Datasheet

RS Pro Wire Lead Strain Gauge 4mm, 120 Ω -30°C +180°C

RS Stock No: **865-6235**



Product Details

RS Pro wire lead strain gauge has a gauge resistance of 120 Ω and 4 mm wide with the operating temperature range from -30 to +180°C. It has foil type polyester backed gauge with integral 30 mm flying lead. It is supplied with 2 self adhesive terminal pads.

Features and Benefits

- Fatigue life >10⁶ reversals at 1000 μ strain
- Temperature compensation for steel with red backing
- Temperature compensation for aluminium with blue backing
- Gauge resistance 120 Ω
- 13 mm long

**Specifications:**

Dimensions	13 x 4 mm
Gauge Factor	2
Gauge Length	8 mm
Gauge Resistance	120 Ω
Length	13 mm
Maximum Operating Temperature	+180°C
Minimum Operating Temperature	-30°C
Terminal Type	Wire Lead
Width	4 mm

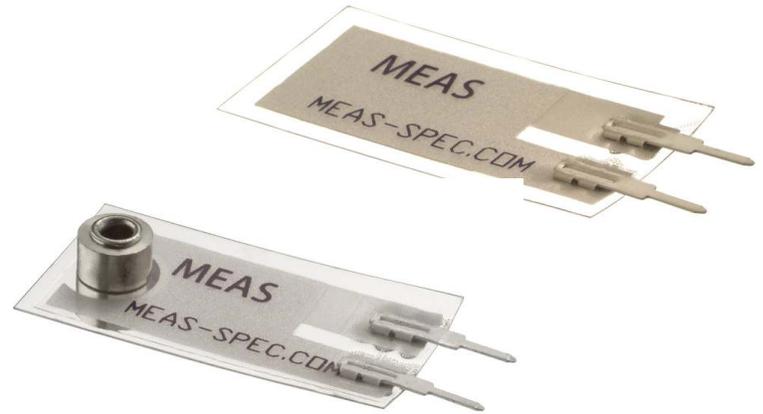
Anexo VII

En el siguiente anexo se adjunta la hoja de características del sensor piezoeléctrico de deformación.

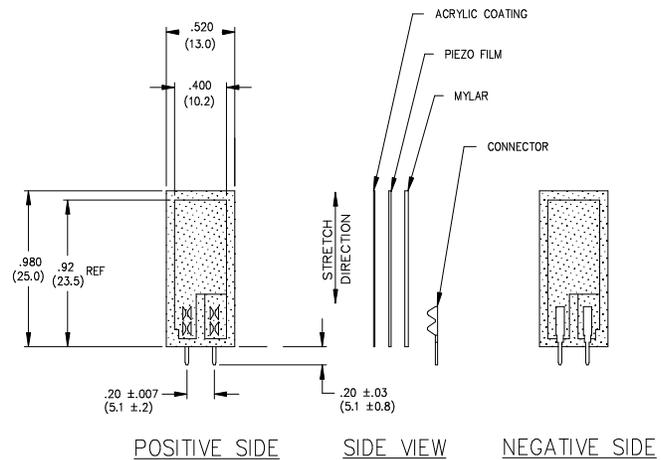
LDT with Crimps Vibration Sensor/Switch

- Piezo Film Sensors
- High Sensativity
- AC Coupled
- Laminated
- Robust

The **LDT0-028K** is a flexible component comprising a 28 µm thick piezoelectric PVDF polymer film with screen-printed Ag-ink electrodes, laminated to a 0.125 mm polyester substrate, and fitted with two crimped contacts. As the piezo film is displaced from the mechanical neutral axis, bending creates very high strain within the piezopolymer and therefore high voltages are generated. When the assembly is deflected by direct contact, the device acts as a flexible "switch", and the generated output is sufficient to trigger MOSFET or CMOS stages directly. If the assembly is supported by its contacts and left to vibrate "in free space" (with the inertia of the clamped/free beam creating bending stress), the device will behave as an accelerometer or vibration sensor. Adding mass, or altering the free length of the element by clamping, can change the resonant frequency and sensitivity of the sensor to suit specific applications. Multi-axis response can be achieved by positioning the mass off center. The LDTM-028K is a vibration sensor where the sensing element comprises a cantilever beam loaded by an additional mass to offer high sensitivity at low frequencies.



dimensions

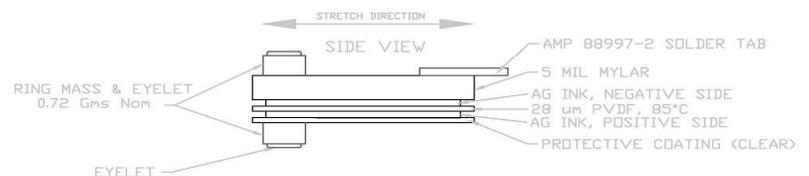
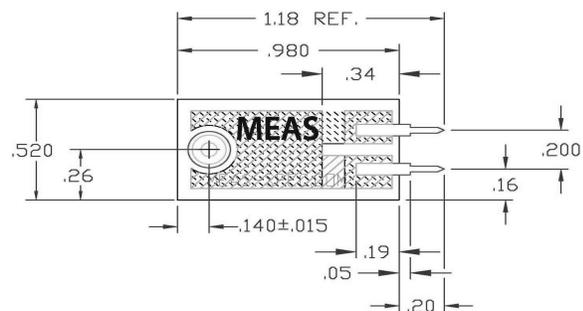


FEATURES

- Solder Tab Connection
- Both No Mass & With Mass Version
- Withstands High Impact
- Operating Temperature: 0°C to 85°C
- Storage Temperature: -40°C to 85 °C
- Higher Temperature Version up to 125 °C available on a Custom Basis

APPLICATIONS

- Vibration Sensing in Washing Machine
- Low Power Wakeup Switch
- Low Cost Vibration Sensing
- Car Alarms
- Body Movement
- Security Systems



LDT with Crimps Vibration Sensor/Switch

examples of properties

Four different experiments serve to illustrate the various properties of this simple but versatile component.

Experiment #1

LDT0 as Vibration Sensor - with the crimped contacts pushed through a printed-circuit board, the LDT0 was soldered carefully in place to anchor the sensor. A charge amplifier was used to detect the output signal as vibration from a shaker table was applied (using a charge amplifier allows a very long measurement time constant and thus allows the "open-circuit" voltage response to be calculated). Small masses (approximately 0.26g increments) were then added to the tip of the sensor, and the measurement repeated. Results are shown in Table 1 and the overlaid plots in Fig. 1. Without adding mass, the LDT0 shows a resonance around 180 Hz. Adding mass to the tip reduces the resonance frequency and increases "baseline" sensitivity.

LDT0 Sensitivity: Effect of Added Mass
(Figure 1)

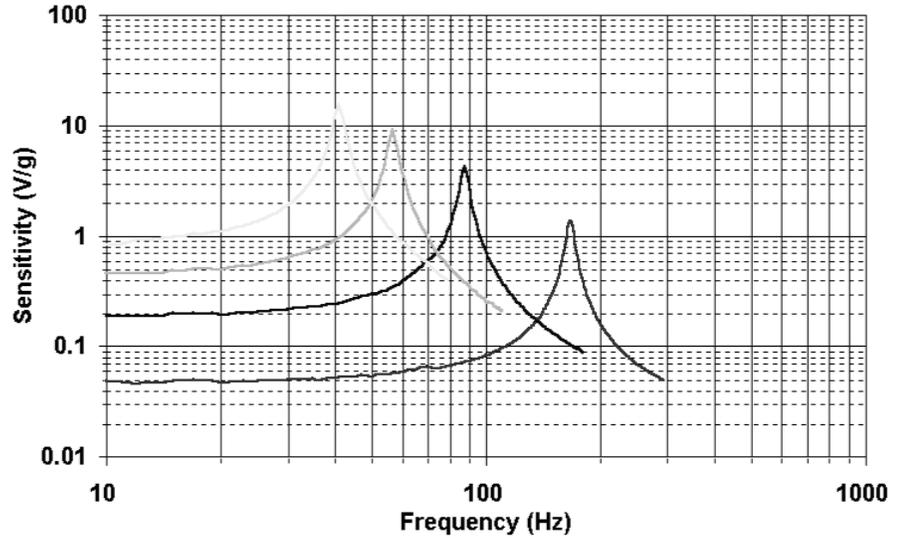


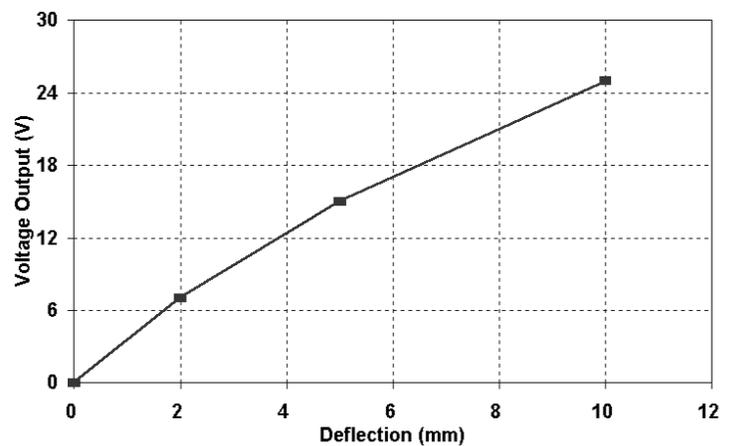
TABLE 1: LDT0 as Vibration Sensor (see Fig 1)

Added Mass	Baseline Sensitivity	Sensitivity at Resonance	Resonant Frequency	+3 Db Frequency
0	50 mV/g	1.4 V/g	180 Hz	90 Hz
1	200 mV/g	4 V/g	90 Hz	45 Hz
2	400 mV/g	8 V/g	60 Hz	30 Hz
3	800 mV/g	16 V/g	40 Hz	20 Hz

Experiment #2

LDT0 as Flexible Switch - using a charge amplifier to obtain "open-circuit" voltage sensitivity, the output was measured for controlled tip deflections applied to the sensor (supported by its crimped contacts as described above). 2 mm deflection was sufficient to generate about 7 V. Voltages above 70V could be generated by bending the tip of the sensor through 90° (see Table 2, Fig. 2).

LDT0: Voltage Output vs Tip deflection
(Figure 2)



LDT with Crimps Vibration Sensor/Switch

examples of Properties (continued)

TABLE 2: LDT0 as Flexible Switch (see Fig 2)

Tip Deflection	Charge Output	o/c Voltage Output
2 mm	3.4 nC	7 V
5 mm	7.2 nC	15 V
10 mm	10 - 12 nC	20 - 25 V
max (90E)	> 30 nC	> 70 V

Experiment #3

LDT0 Electrical Frequency Response -

when the source capacitance of around 480 pF is connected to a resistive input load, a high-pass filter characteristic results. Using an electronic noise source to generate broad-band signals, the effect of various load resistances was measured and the -3 dB point of the R-C filter determined (see Table 3, Fig. 3).

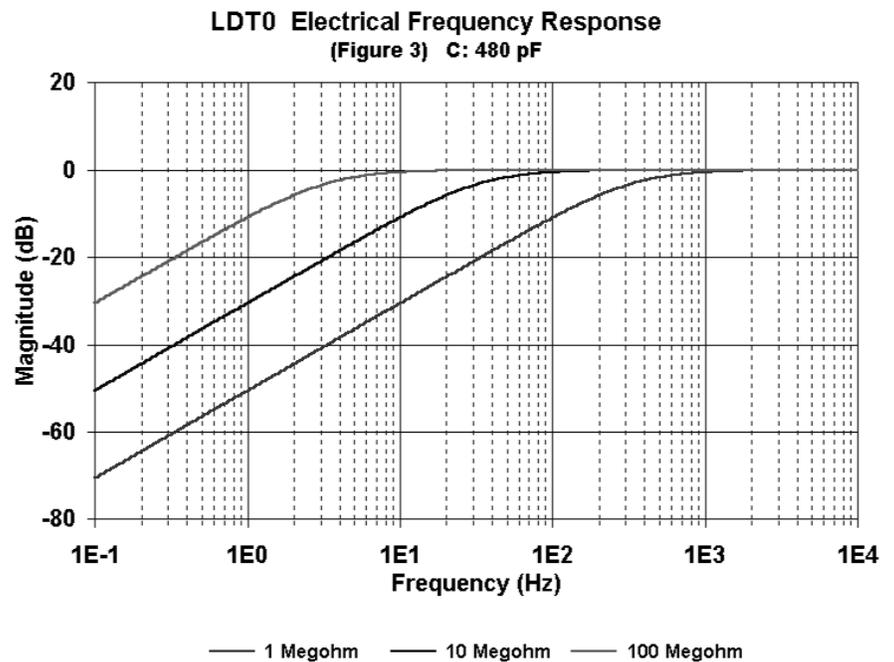


TABLE 3: LDT0 Electrical Frequency Response
(see Fig 3)
(480 pF source capacitance)

Load Resistance	-3 db Frequency
1 Megohm	330 Hz
10 Megohm	33 Hz
100 Megohm	3.3 Hz

LDT with Crimps Vibration Sensor/Switch

Experiment #4

LDT0 Clamped at Different Lengths -

using simple clamping fixture, the vibration sensitivity was measured (as in (1) above) as the clamp was moved to allow different "free" lengths to vibrate. The sensor may be "tuned" to suit specific frequency response requirements (see Table 4, Fig. 4).

LDT0: Resonant Freq vs Clamped Length
(Figure 4)

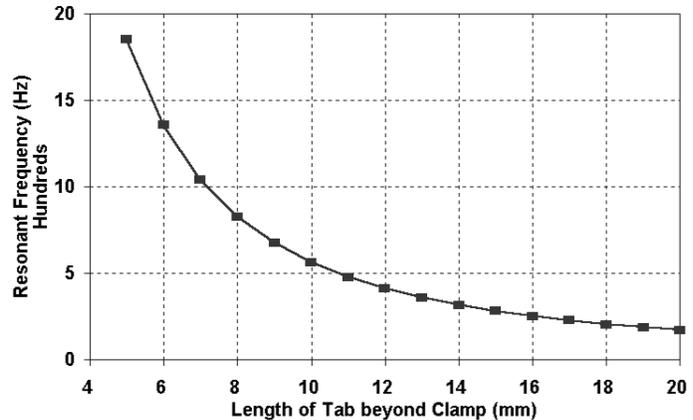


TABLE 4: LDT0 Clamped at Different Lengths (See Fig. 4)

Length Beyond Clamp	Resonant Frequency	Settling Time (5 cyc)
20 mm (no clamp)	180 Hz	28 msec
16 mm	250 Hz	20 msec
11 mm	500 Hz	10 msec
7 mm	1000 Hz	5 msec

The information in this sheet has been carefully reviewed and is believed to be accurate; however, no responsibility is assumed for inaccuracies. Furthermore, this information does not convey to the purchaser of such devices any license under the patent rights to the manufacturer. Measurement Specialties, Inc. reserves the right to make changes without further notice to any product herein. Measurement Specialties, Inc. makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its product for any particular purpose, nor does Measurement Specialties, Inc. assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. Typical parameters can and do vary in different applications. All operating parameters must be validated for each customer application by customer's technical experts. Measurement Specialties, Inc. does not convey any license under its patent rights nor the rights of others.

ordering information

Description	Part Number
LDT0-028K	1002794-0
LDTM-028K	1005447-1

North America

Measurement Specialties, Inc.
1000 Lucas Way
Hampton, VA 23666
Sales and Customer Service
Tel: +1-800-745-8008 or
+1-757-766-1500
Fax: +1-757-766-4297
Technical Support
Email: piezo@meas-spec.com

Europe

MEAS Deutschland GmbH
Hauert 13
44227 Dortmund
Germany
Sales and Customer Service
Tel: +49 (0)231 9740 21
Technical Support
Tel: +49 (0)6074 862822
Email: piezoeurope@meas-spec.com

Asia

Measurement Specialties (China), Ltd.
No. 26 Langshan Road
Shenzhen High-Tech Park (North)
Nanshan District
Shenzhen, China 518107
Sales and Customer Service
Tel: +86 755 3330 5088
Technical Support
Email: piezo@meas-spec.com

Anexo VIII

En el siguiente anexo se adjunta la hoja de características del Push-Button Small.



Tactile Switches 6mm × 6mm Top Push

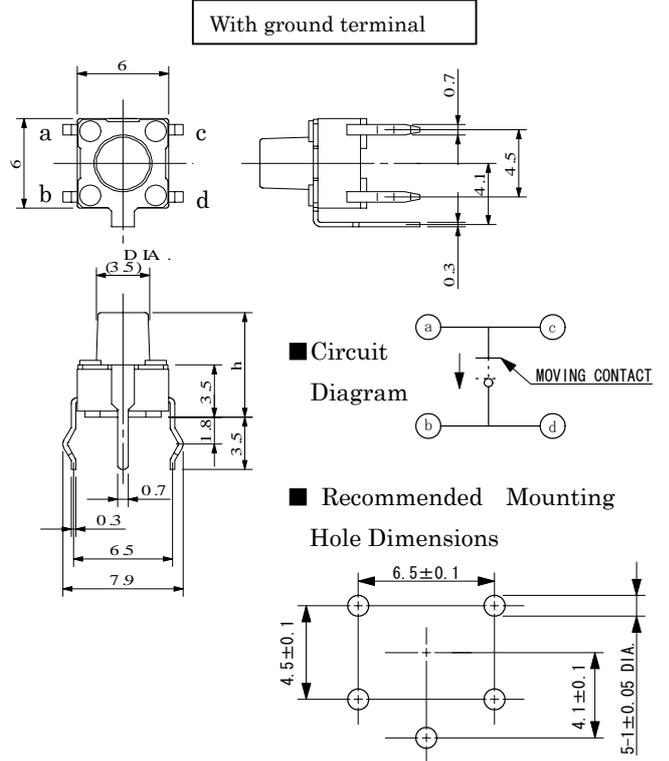
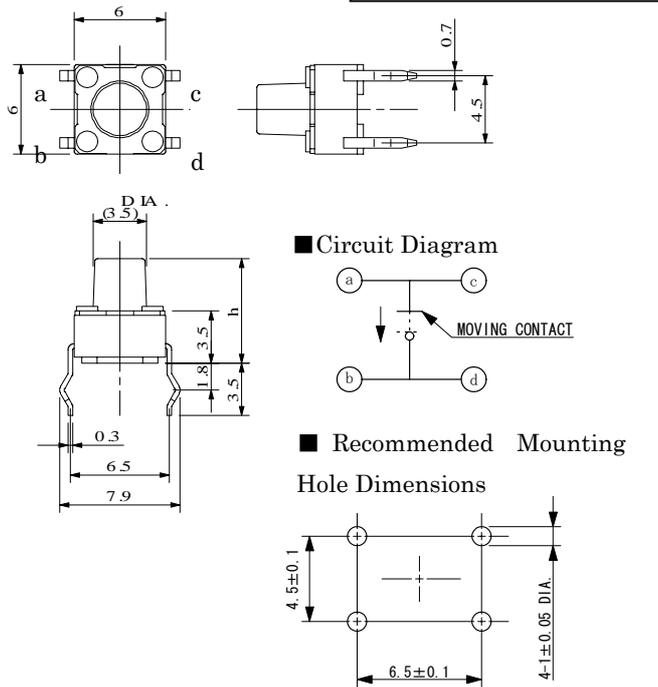
General

■ Features

- Crisp clicking by tactile feedback
- Prevent flux rise by insert-molded terminal
- Ground terminal is attached
- Snap-in mount terminal



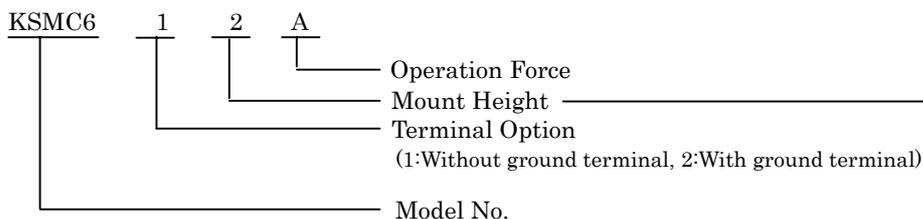
■ Dimensions (Unit : mm)



■ Specifications

Item	Specification	Unit	Note
Operating Temperature Range	-20~+70	°C	
Storage Temperature Range	-40~+85	°C	
Type of Operation	Tactile Feedback		
Circuit Configuration	Push-On Momentary, 1 pole·1 throw		
Power Rating	MAX 50mA 24VDC		
Contact Resistance	MAX 100	mΩ	
Insulation Resistance	100MΩ Min. at 100VDC		
Dielectric Withstanding Voltage	250VAC for 1 minute		
Contact Bounce	MAX 5	ms	
Operating Force	0.98±0.49	N	A type
	1.57±0.49	N	B type
Return Force	MIN 0.10	N	A type
	MIN 0.49	N	B type
Travel	0.25 +0.2/-0.1	mm	

■ Model Designation



	h (mm)
1	4.3
2	5
3	7
4	9.5



Tactile Switches 6mm × 6mm Top Push

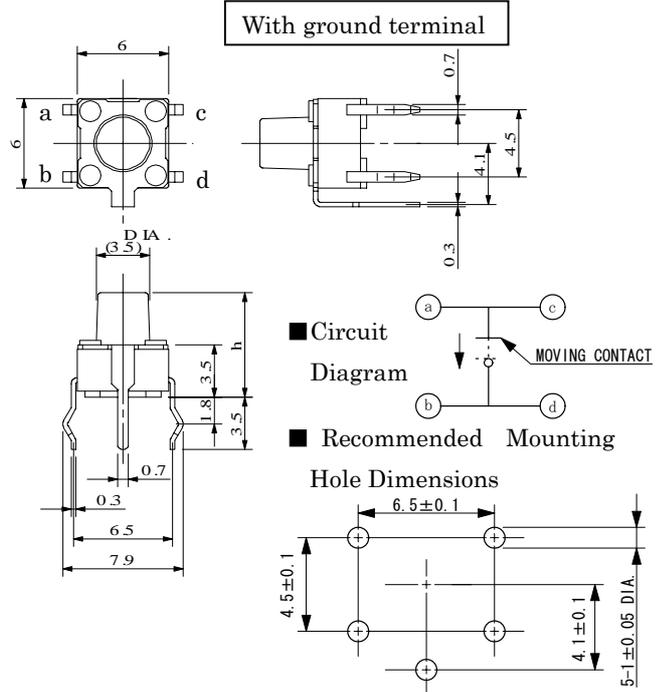
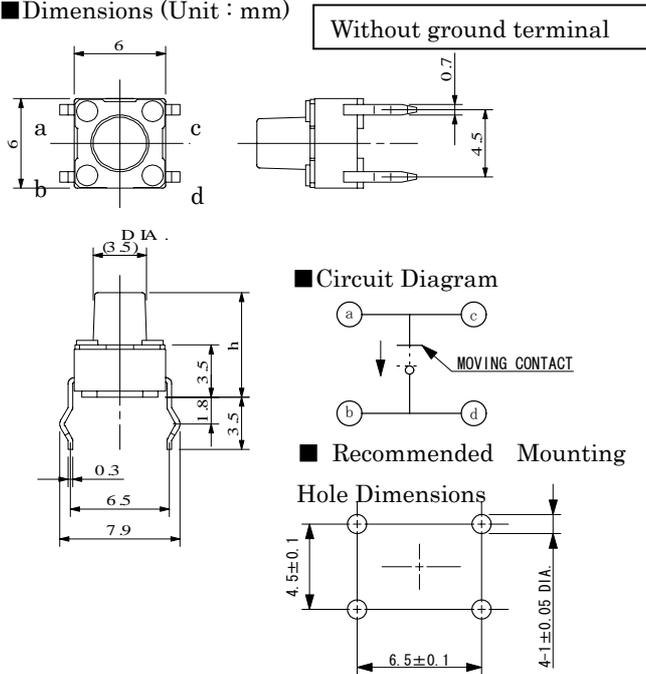
Operating Force 2.55N

■ Features

- Crisp clicking by tactile feedback
- Prevent flux rise by insert-molded terminal
- Ground terminal is attached
- Snap-in mount terminal



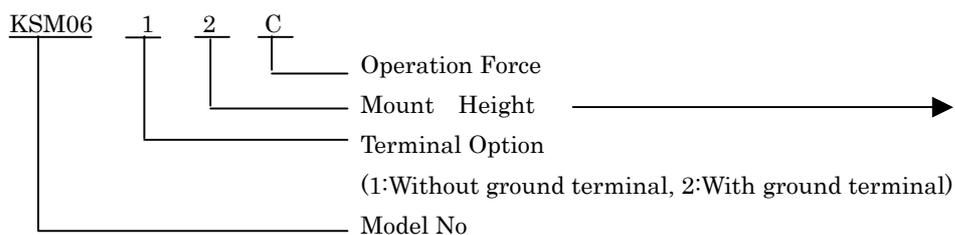
■ Dimensions (Unit : mm)



■ Specifications

Item	Specification	Unit	Note
Operating Temperature Range	-20~+70	°C	
Storage Temperature Range	-40~+85	°C	
Type of Operation	Tactile Feedback		
Circuit Configuration	Push-On Momentary, 1 pole-1 throw		
Power Rating	MAX 50mA 24VDC		
Contact Resistance	MAX 100	mΩ	
Insulation Resistance	100MΩ Min. at 100VDC		
Dielectric Withstanding Voltage	250VAC for 1 minute		
Contact Bounce	MAX 5	ms	
Operating Force	2.55±0.69	N	
Return Force	MIN 0.49	N	
Travel	0.25 +0.2/-0.1	mm	

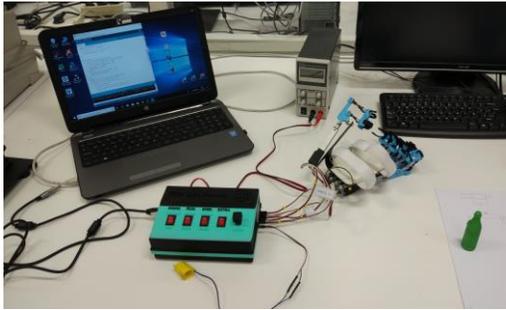
■ Model Designation



	h (mm)
1	4.3
2	5
3	7
4	9.5

Anexo IX

En el siguiente anexo se adjunta el manual de puesta en marcha y el manual de usuario.

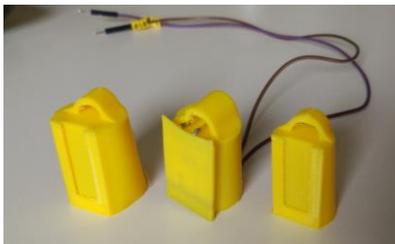


Electronica y exoesqueleto junto a ordenador y fuente de alimentacion

Material necesario

Para usar correctamente el dispositivo es necesario tener los siguientes elementos:

- Dispositivo mecatronico tipo exoesqueleto
- Caja con la electronica
- Dedal con sensor
- Fuente de alimentacion de 6V
- Ordenador con un puerto USB
- Cable USB tipo A/B



Dedal con sensor y terminales de conexion

Proyecto, guia y objetivos

La siguiente guia de usuario tiene por objetivo mostrar de manera clara y concisa la conexión, el empleo y la solución de problemas sobre el dispositivo mecatronico tipo exoesqueleto realizado en el Trabajo de Final de Grado de Victor Lobo Granado, supervisado por el tutor Juan Carlos Fraile Marinero.

El objetivo del proyecto es el de facilitar la recuperacion de la extremidad de la mano en personas que han sufrido un accidente cerebro vascular durante el proceso de rehabilitacion. El dispositivo consta de servomotores lineales, piezas impresas en 3D y una programacion en Arduino.

Colocacion del dispositivo

Con el exoesqueleto sobre la mesa, es necesario despegar las tiras de velcro si tirar de ellas hasta tener el hueco necesario para introducir los dedos. Cuidado con tirar demasiado y sacar el velcro de su lugar, la colocacion puede ser costosa.

Las tiras de velcro blancas se deben abrir enteras e iran colocadas a la altura de la palma de la mano y de la muñeca.

Se recomienda empezar con la fijacion de los dedos, empezando por el pulgar, siguiendo del indice y terminando por el meñique. Primero fijar la falange mas proxima a la mano y luego la mas alejada. Cuando se haya acabado, fijar la palma de la mano y la muñeca.



Exoesqueleto diseñado en el proyecto

Guia de usuario.

Dispositivo mecatronico tipo exoesqueleto.



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Conexionado

Con todo el material necesario, se procede a la conexión de componenetes. Mirando la caja de la electronica de forma que tengamos las letras al derecho, se conectan:

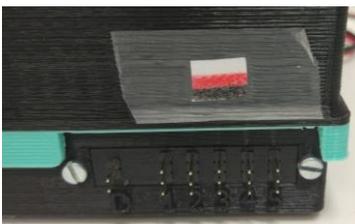
Por la parte izquierda, el cable USB a un ordenador con un puerto USB y el otro extremo a la placa de Arduino.

Por la parte trasera, los terminales rojo y negro a una fuente de alimentacion de 6 V. El cable rojo al terminal positivo y el cable negro al terminal negativo.

Por la parte derecha, los terminales del exoesqueleto con sus respectivas etiquetas con los terminales de la caja, haciendo coincidir el numero de la etiqueta con el de la serigrafia y con la orientacion que especifica la pegatina. Los terminales del dedal tambien se conectan con su extremo en el lugar.



Ubicación del puerto USB



Ubicación de los pines del exoesqueleto y el dedal



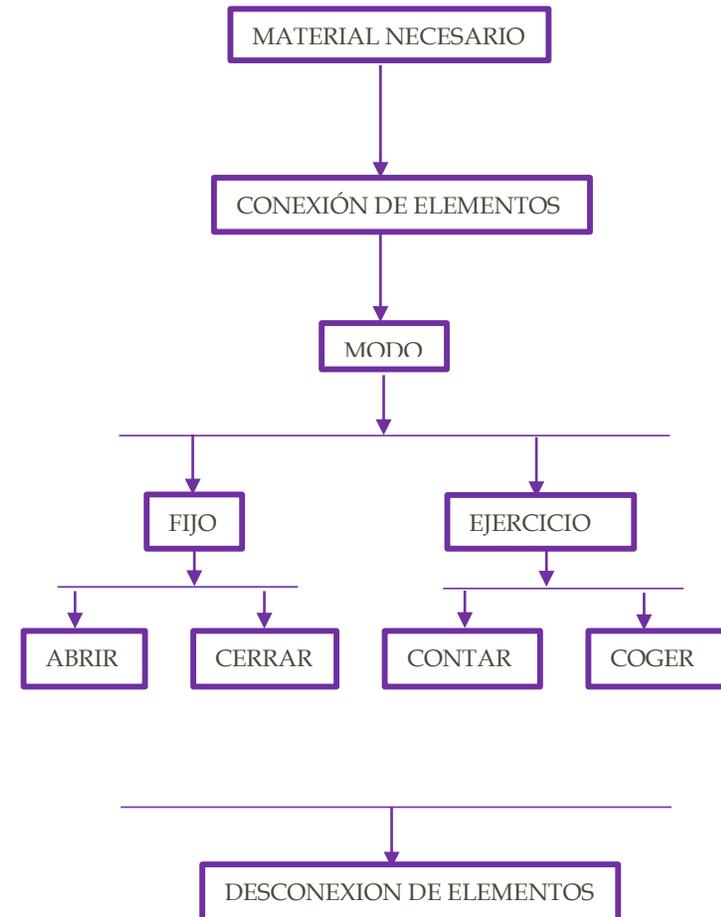
Botonera del proyecto

Modos de uso

Con las conexiones realizadas correctamente, se explican los modos de uso del exoesqueleto. Como se puede ver en el frontal de la caja, hay cuatro interruptores y un pulsador, cada uno con una indentificacion.

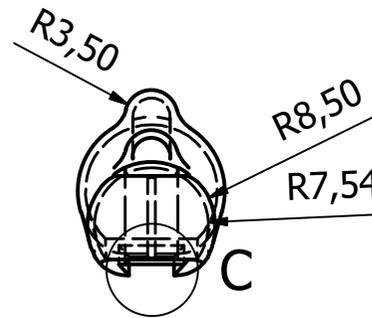
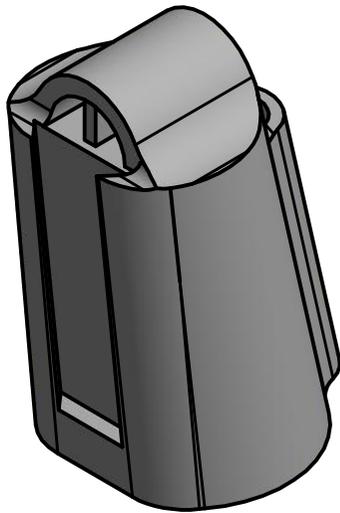
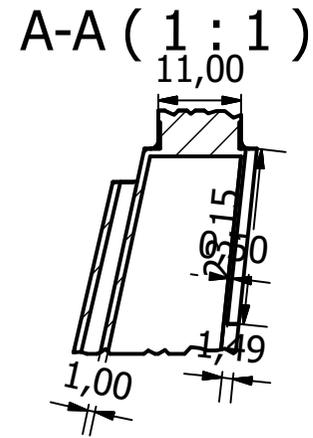
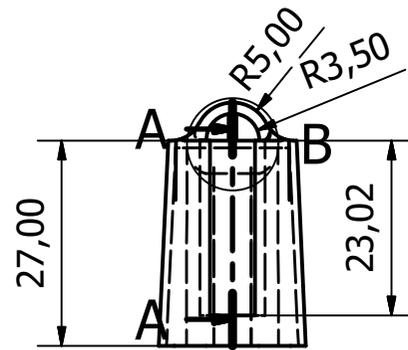
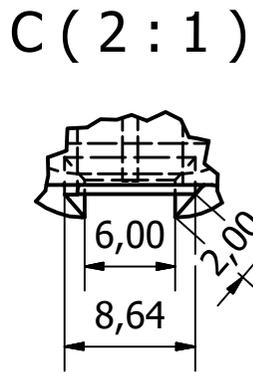
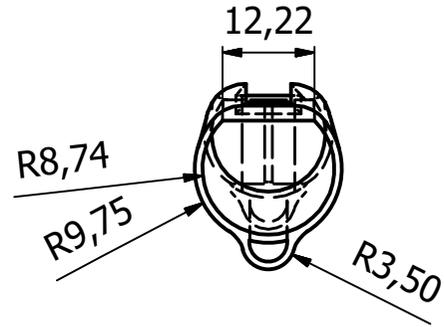
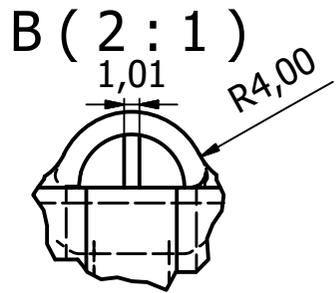
Empezando de izquierda a derecha:

- Interruptor de Modo: permite seleccionar el modo de uso, o modo fijo o modo ejercicio.
- Interruptor de Fijo: con el interruptor de modo en Modo Fijo, podemos elegir ABRIR completamente la mano o CERRAR completamente la mano.
- Interruptor de Ejercicio: con el interruptor de modo en Modo Ejercicio, podemos elegir entre CONTAR, que cerrara la mano y contara de uno en uno hasta cinco, y COGER, que, junto al dedal en el dedo indice, permite tomar y agarrar objetos.
- Interruptor de Extra: este boton por el momento no tiene funcion asignada.
- Pulsador de Soltar: con el Modo Ejercicio seleccionado y la funcion COGER, una vez agarrado el objeto, pulsar el interruptor para soltar la pieza.



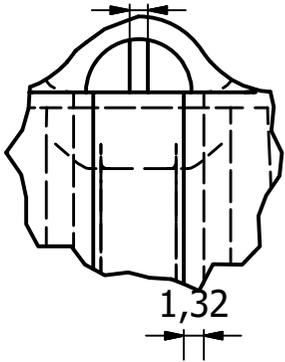
Anexo X

En el siguiente anexo se adjuntan los planos de las piezas acotadas empleadas en el proyecto.

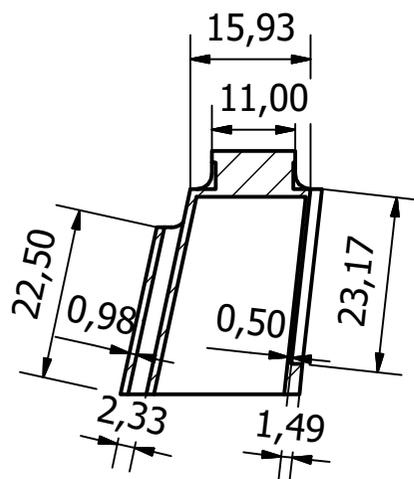
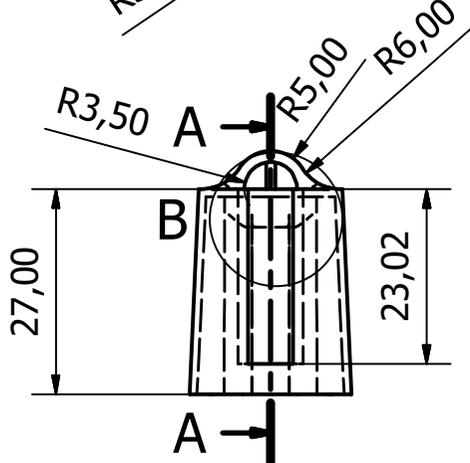
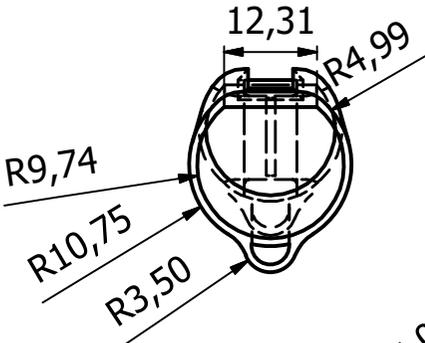
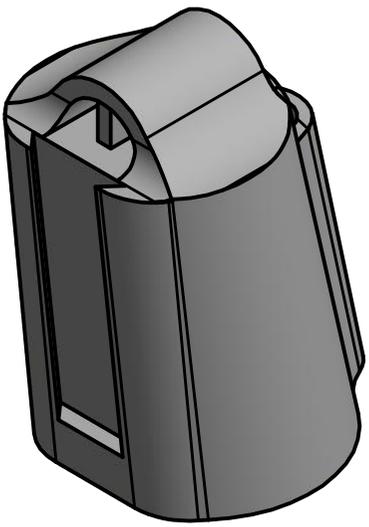
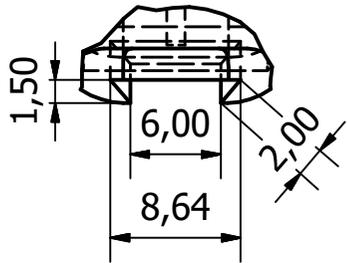


Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	
Victor Lobo Granado		J. C. Fraile		18/12/2017	
Escuela de Ingenierias Industriales.Universidad de Valladolid			Dedal_18mm		
			Dedal_18mm	Edición	Hoja 1 / 1

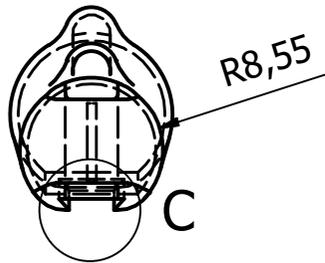
B (2 : 1)



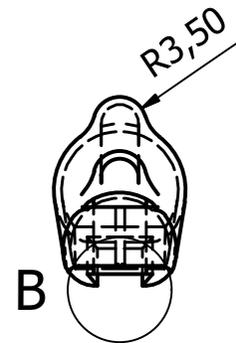
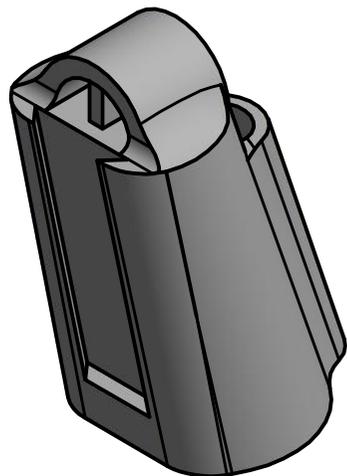
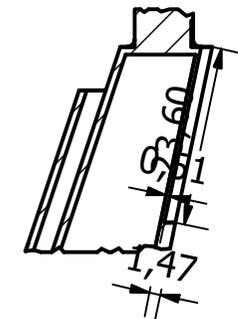
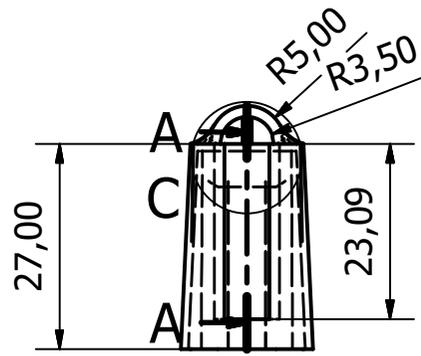
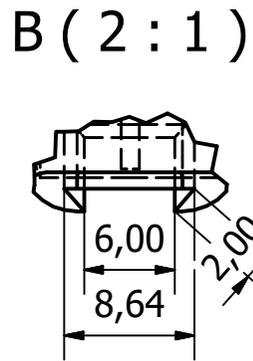
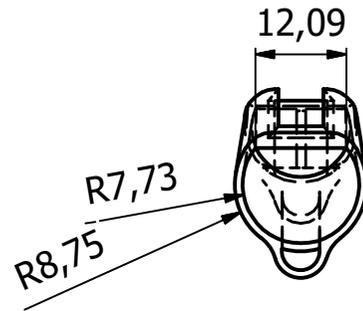
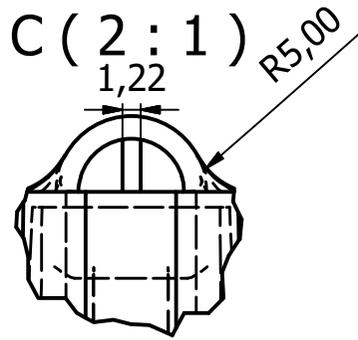
C (2 : 1)



A-A (1 : 1)

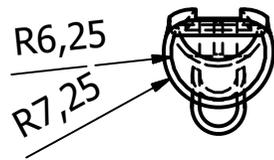
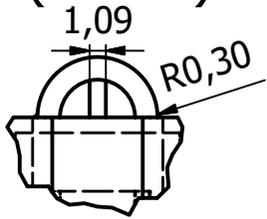


Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	
Victor Lobo Granado		J. C. Fraile		18/12/2017	
Escuela de Ingenierias Industriales.Universidad de Valladolid			Dedal_20mm		
			Dedal_20mm	Edición	Hoja
					1 / 1

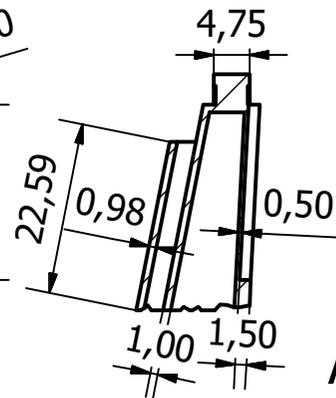
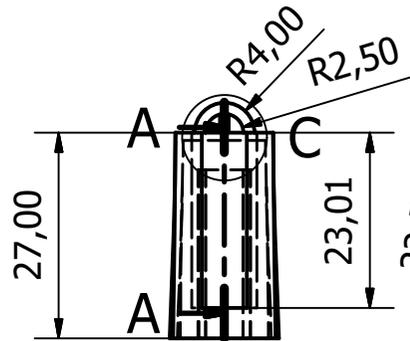
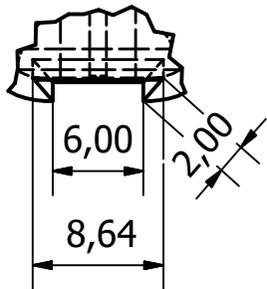


Diseño de Victor Lobo Granado	Revisado por	Aprobado por J. C. Fraile	Fecha	Fecha 18/12/2017	
Escuela de Ingenierias Industriales.Universidad de Valladolid			Dedal_15mm		
			Dedal_15mm	Edición	Hoja 1 / 1

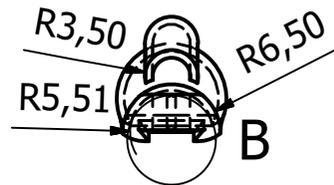
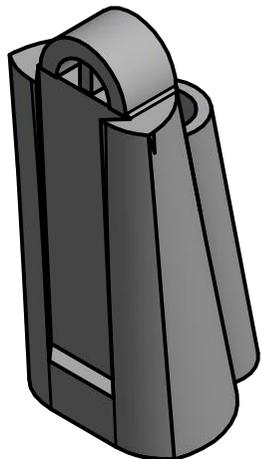
C (2 : 1)



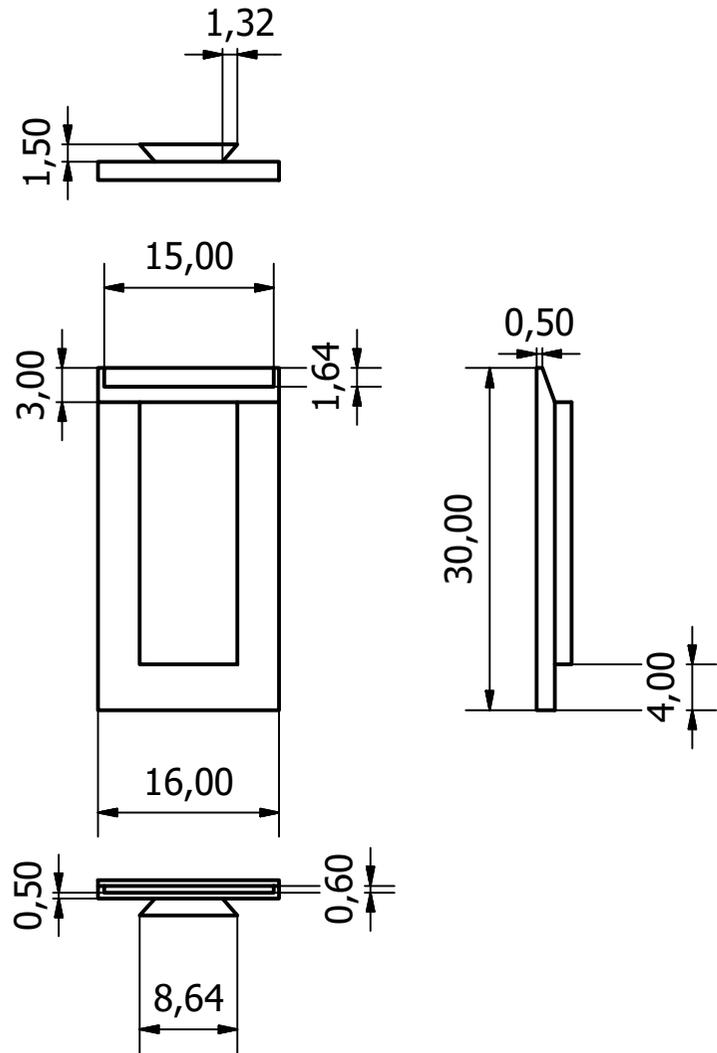
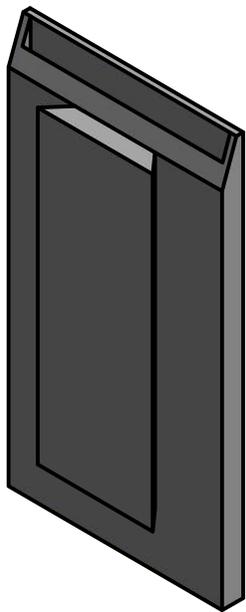
B (2 : 1)



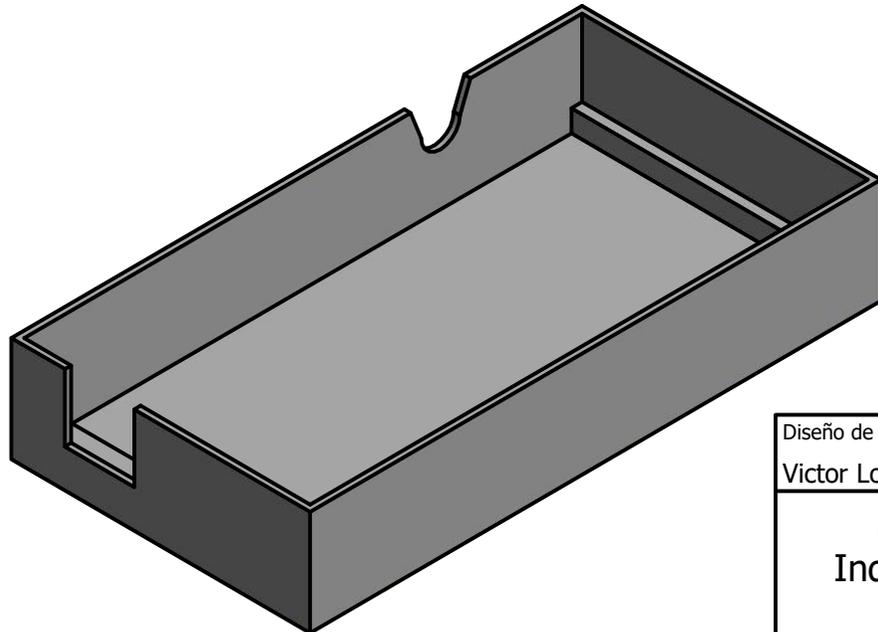
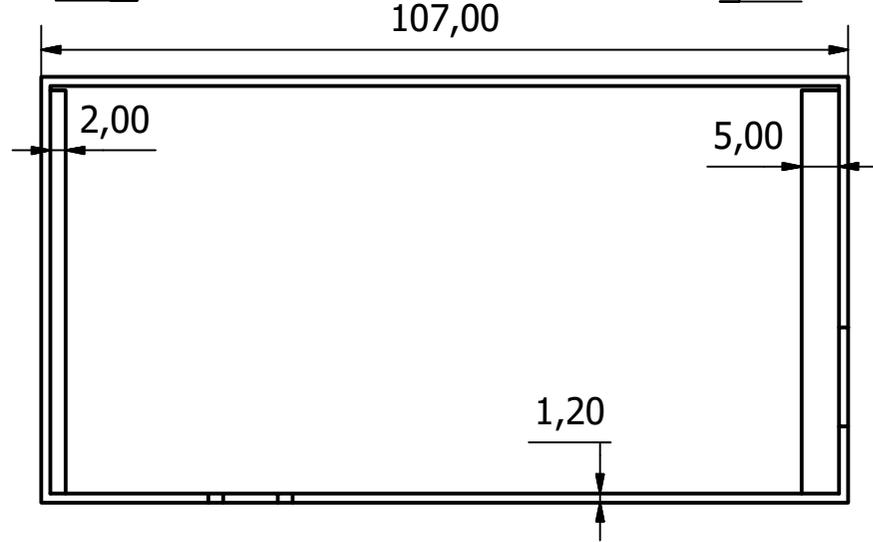
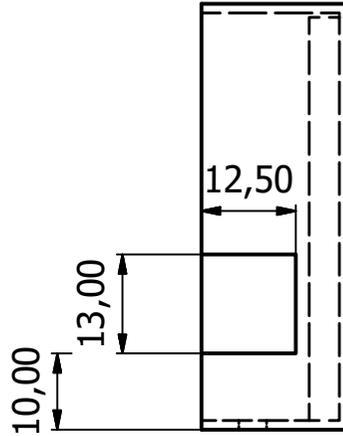
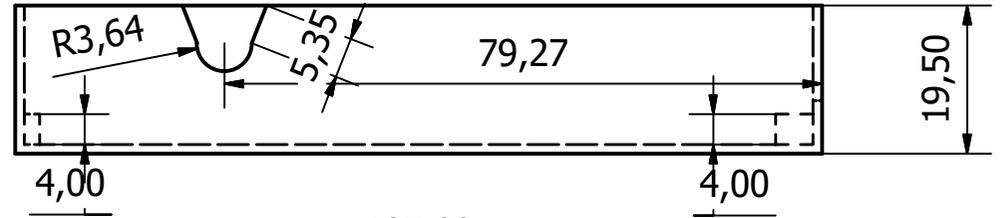
A-A (1 : 1)



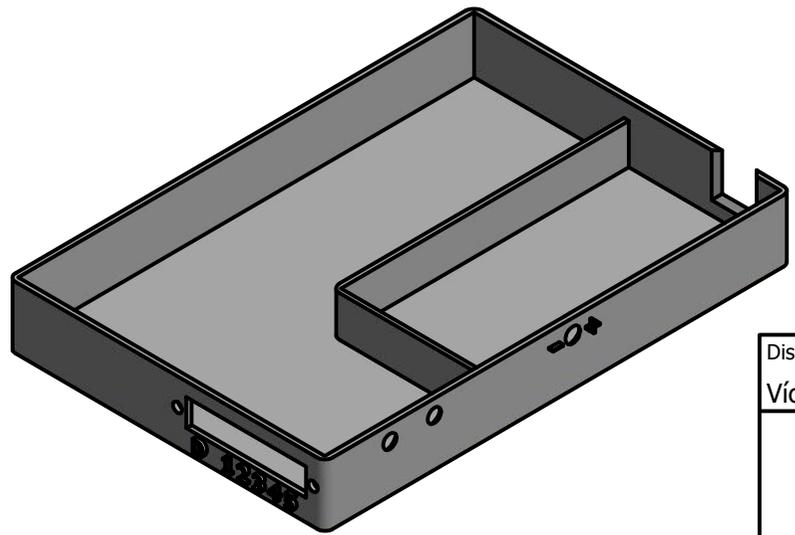
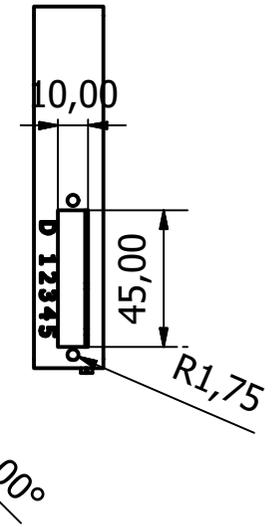
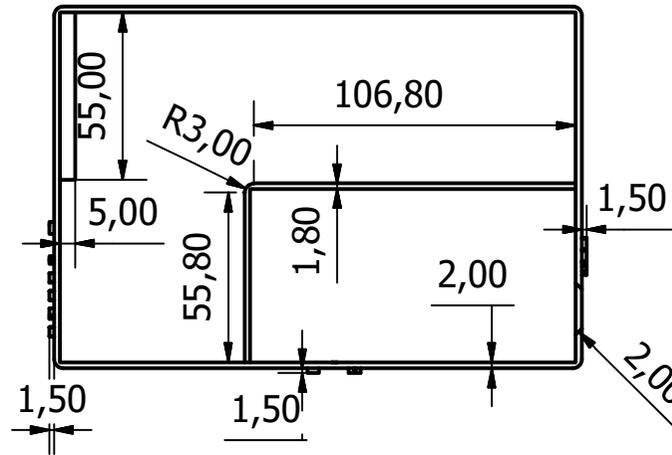
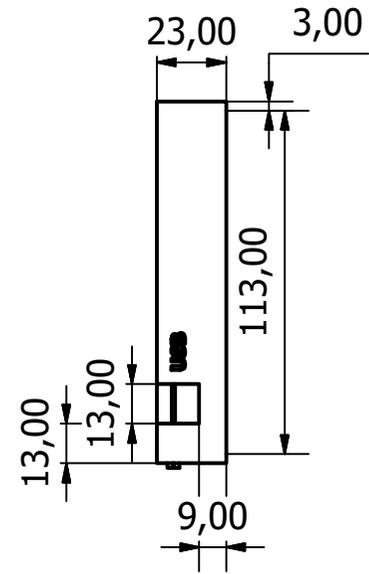
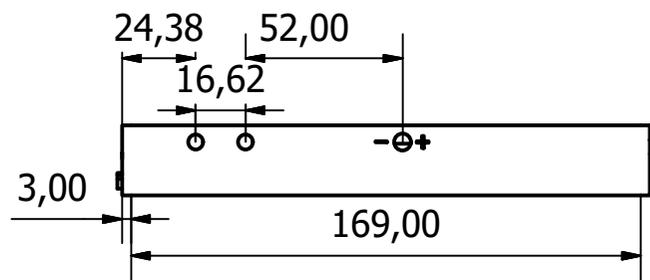
Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	
Victor Lobo Granado		J. C. Fraile		18/12/2017	
Escuela de Ingenierias Industriales.Universidad de Valladolid			Dedal_12mm		
			Dedal_12mm	Edición	Hoja
					1 / 1



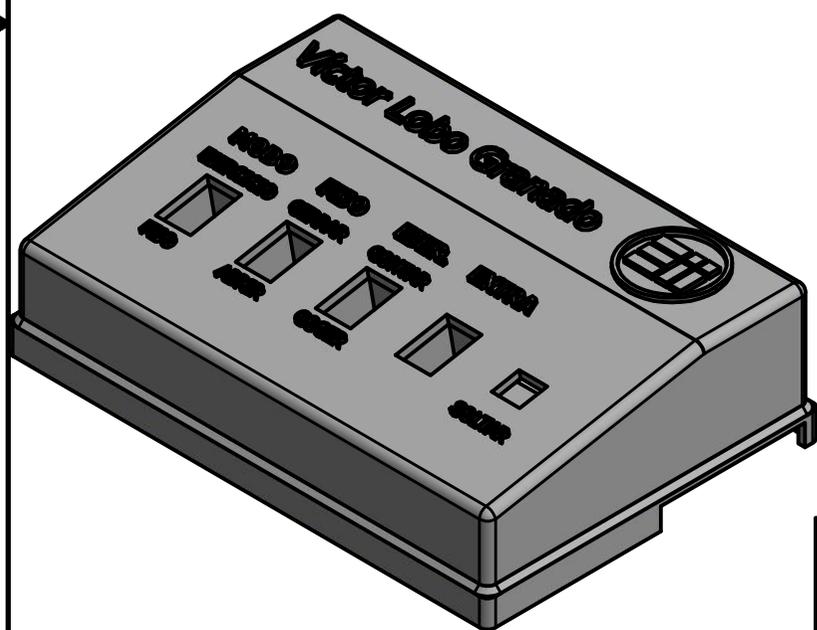
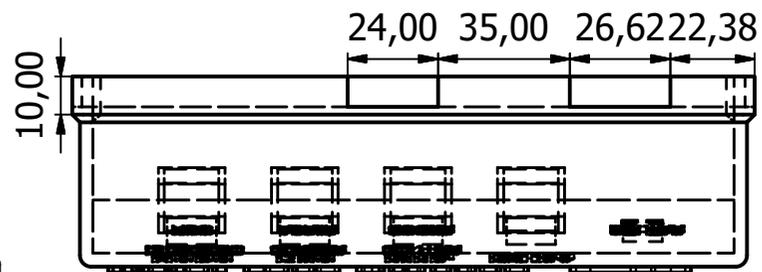
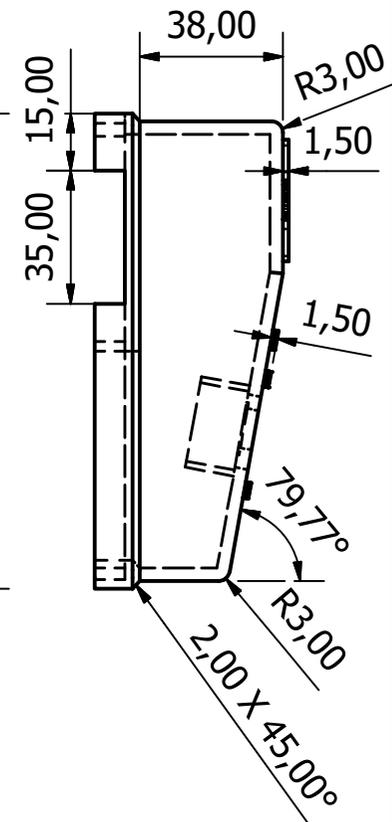
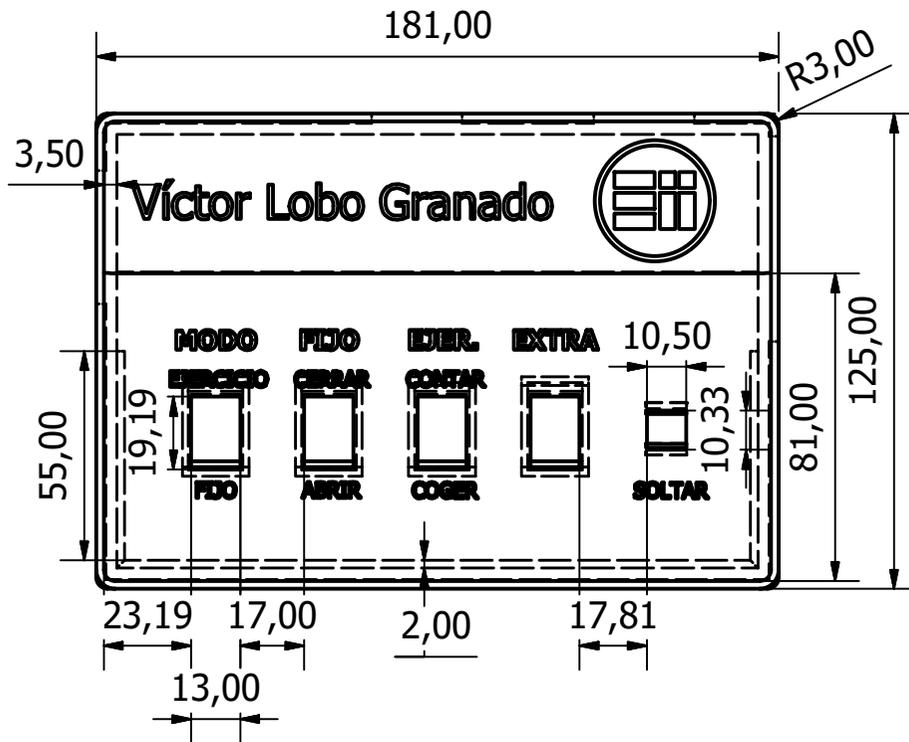
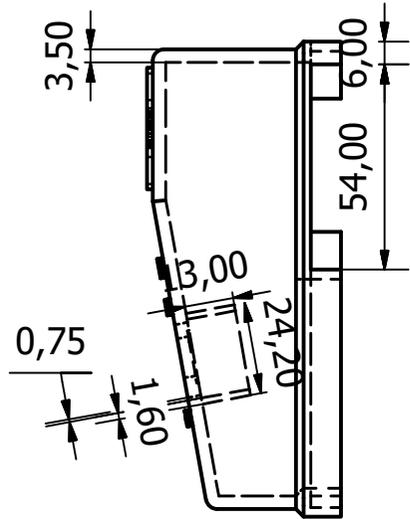
Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	
Victor Lobo Granado		J. C. Fraile Marinero		09/12/2017	
Escuela de Ingenierias Industriales.Universidad de Valladolid			Pieza_Sensor		
			Piezoelectrico_3	Edición	Hoja
					1 / 1



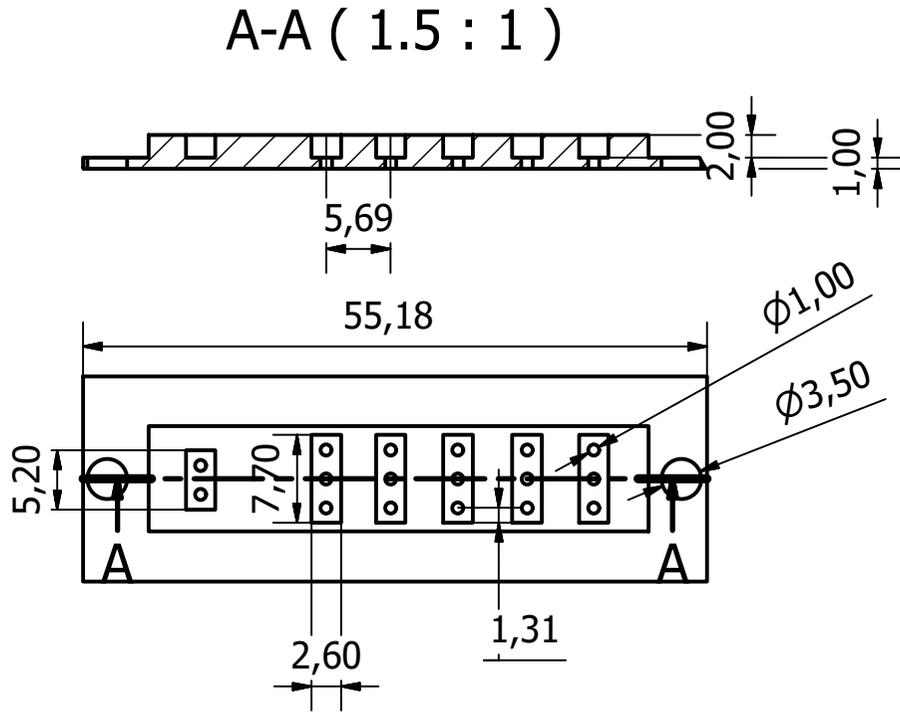
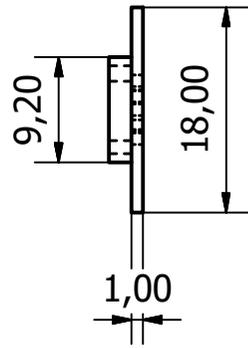
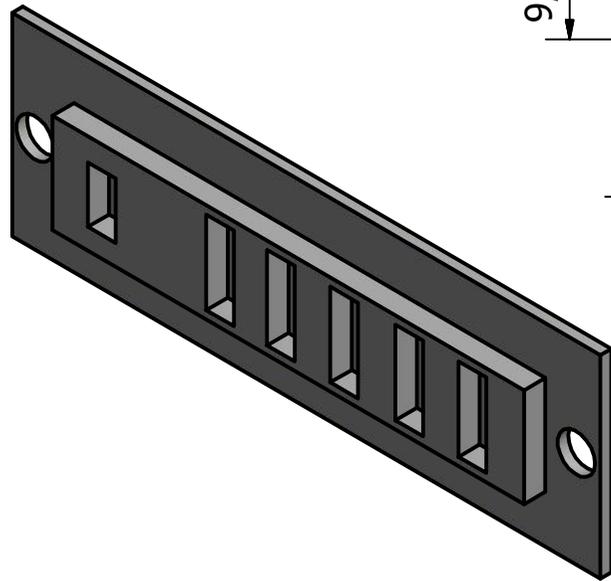
Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	
Victor Lobo Granado		J. C. Fraile Marinero		09/12/2017	
Escuela de Ingenierias Industriales. Universidad de Valladolid			Caja_Interior		
			Caja_Interior	Edición	Hoja 1 / 1



Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	
Víctor Lobo Granado		J. C. Fraile Marinero		09/12/2017	
Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid			Parte_Inferior_Caja		
			Parte_Inferior_Caja	Edición	Hoja
					1 / 1

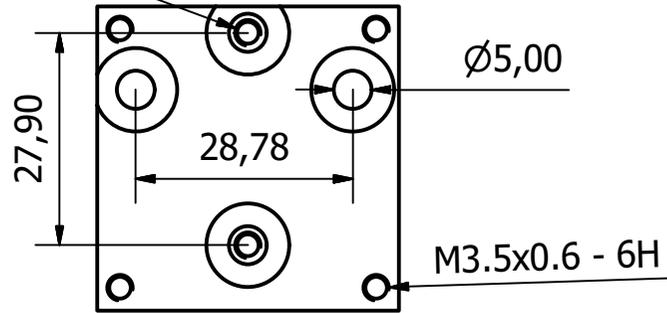


Diseño de	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	
Victor Lobo Granado		J. C. Fraile Marinero		15/12/2017	
Escuela de Ingenierias Industriales.Universidad de Valladolid			Parte_Superior_Caja		
			Parte_Superior_Caja	Edición	Hoja
					1 / 1

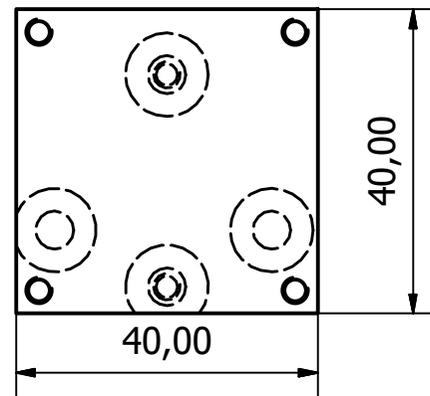
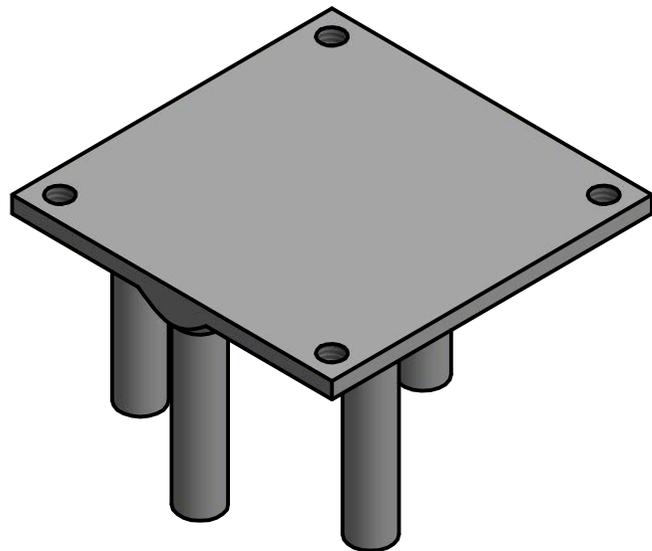
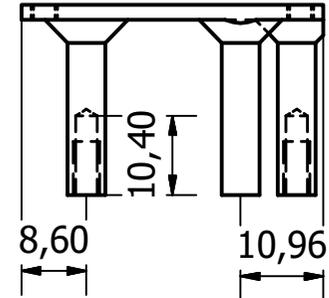
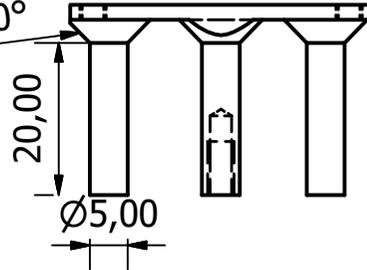


Diseño de Victor Lobo Granado	Revisado por	Aprobado por J. C. Fraile Marinero	Fecha	Fecha 10/12/2017	
Escuela de Ingenierias Industriales.Universidad de Valladolid			Placa_Servos		
			Placa_Servos	Edición	Hoja 1 / 1

M3.5x0.6 - 6H



2,61 X 45,00°



Diseño de Victor Lobo Granado	Revisado por	Aprobado por J. C. Fraile Marinero	Fecha	Fecha 09/12/2017	
Escuela de Ingenierias Industriales. Universidad de Valladolid			Soporte_Servos		
Soporte_Servos				Edición	Hoja 1 / 1