



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Prototipado y programación de una mano articulada para la mímesis mediante microcontrolador Arduino

Proyecto Final de Grado

ETSID

Universidad Politécnica de Valencia

Autor: Francisco Doménech Clar

Tutor: Roberto Capilla Lladro

Especialidad: Grado en Ingeniería Mecánica

Prototipado y programación de una mano articulada para la mimesis mediante microcontrolador Arduino

Resumen	6
Resum	7
Abstract	8
Introducción.....	9-10
Proyecto inMoov	11-12
Impresión 3D	13-14
Diseño del proyecto	15-27
<u>Brazo</u>	15-22
Mano.....	16-17
Antebrazo	17-18
Caja de servos.....	18-19
Extras	20-22
Discos.....	20
Guías de cableado.....	20-21
Embellecedores	21-22
<u>Guante</u>	22-25
Sensores de flexión	23-24
Circuito.....	24-25
<u>Interconexión</u>	25-27
Arduino.....	26-27
Fuente de alimentación	27
Fabricación	28-34
Bandeja ‘Dedos’	28-29
Bandeja ‘Piezas bajas’	29-34

Bandeja ‘Piezas grandes’	29-30
Bandeja ‘Piezas pequeñas’	30-31
Bandeja ‘Últimas piezas’	31
Bandeja ‘Caja circuito’	31-32
Impresión total	32-33
Post-impresión	33-34
Ensamblaje	35-53
<u>Guante</u>	35-39
Sensores de flexión	35-36
Circuito	36-39
<u>Brazo</u>	39-53
Programación	54-58
Programa principal	54-55
Programa de ‘Calibración de servos’	56
Programa de ‘Medición de sensores’	56-58
Presupuesto	59-60
Conclusión	61-62
Bibliografía	63-65

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1: 'MODELO PROYECTO INMOOV'	12
ILUSTRACIÓN 2: 'IMPRESORA ZORTRAX M-200'	14
ILUSTRACIÓN 3: 'MONTAJE COMPLETO'	15
ILUSTRACIÓN 4: 'MODELO DEL DEDO ÍNDICE'	16
ILUSTRACIÓN 5: 'MODELO 1 DE PALMA'	17
ILUSTRACIÓN 6: 'MODELO 2 DE PALMA'	17
ILUSTRACIÓN 7: 'ENSAMBLAJE ANTEBRAZO'	18
ILUSTRACIÓN 8: 'MODELO 1 DE CAJA DE SERVOS'	19
ILUSTRACIÓN 9: 'MODELO 2 DE CAJA DE SERVOS'	19
ILUSTRACIÓN 10: 'MODELO DE DISCOS'	20
ILUSTRACIÓN 11: 'MODELO DE GUÍA DELANTERA'	21
ILUSTRACIÓN 12: 'MODELO DE GUÍA TRASERA'	21
ILUSTRACIÓN 13: 'DISPOSICIÓN DE EMBELLECEDORES'	22
ILUSTRACIÓN 14: 'P5 GLOVE'	22
ILUSTRACIÓN 15: 'DISPOSICIÓN DE SENSORES DE FLEXIÓN'	23
ILUSTRACIÓN 16: 'PERFBOARD'	24
ILUSTRACIÓN 17: 'PROTOBOARD'	24
ILUSTRACIÓN 18: 'CONEXIONADO SENSORES DE FLEXIÓN'	25
ILUSTRACIÓN 19: 'MODELO CAJA DE CIRCUITO'	25
ILUSTRACIÓN 20: 'RASPBERRY PI 3'	26
ILUSTRACIÓN 21: 'ARDUINO UNO'	26
ILUSTRACIÓN 22: 'ARDUINO MEGA'	26
ILUSTRACIÓN 23: 'FUENTE DE ALIMENTACIÓN CONMUTADA'	27
ILUSTRACIÓN 24: 'BATERÍA NIMH'	27
ILUSTRACIÓN 25: 'BANDEJA 'DEDOS''	28
ILUSTRACIÓN 26: 'BANDEJA 'PIEZAS BAJAS''	29
ILUSTRACIÓN 27: 'BANDEJA 'PIEZAS GRANDES''	30
ILUSTRACIÓN 28: 'BANDEJA 'PIEZAS PEQUEÑAS''	30
ILUSTRACIÓN 29: 'BANDEJA 'ÚLTIMAS PIEZAS''	31
ILUSTRACIÓN 30: 'BANDEJA 'CAJA CIRCUITO''	32
ILUSTRACIÓN 31: 'MONTAJE SENSOR DE FLEXIÓN'	36
ILUSTRACIÓN 32: 'CIRCUITERÍA SENSOR DE FLEXIÓN'	37
ILUSTRACIÓN 33: 'CIRCUITO'	38
ILUSTRACIÓN 34: 'CAJA DE CIRCUITO'	38
ILUSTRACIÓN 35: 'MONTAJE FINAL GUANTE'	39
ILUSTRACIÓN 36: 'BOCETO DE LA MANO'	40
ILUSTRACIÓN 37: 'MONTAJE DE UN DEDO'	41
ILUSTRACIÓN 38: 'TORNILLOS ANTES DE MODIFICARLOS'	42
ILUSTRACIÓN 39: 'TORNILLOS DESPUÉS DE MODIFICARLOS'	43
ILUSTRACIÓN 40: 'ENSAMBLAJE 1 DE PALMA'	44
ILUSTRACIÓN 41: 'ENSAMBLAJE 2 DE PALMA'	44
ILUSTRACIÓN 42: 'RESULTADO FINAL MANO (VISTA DE PALMA)'	45
ILUSTRACIÓN 43: 'RESULTADO FINAL MANO (VISTA DORSO)'	45
ILUSTRACIÓN 44: 'MONTAJE ANTEBRAZO'	46

ILUSTRACIÓN 45: 'MONTAJE CAMA DE SERVOS'	47
ILUSTRACIÓN 46: 'MONTAJE SERVOS'	48
ILUSTRACIÓN 47: 'MONTAJE GUÍAS DEL CABLEADO'	48
ILUSTRACIÓN 48: 'MONTAJE DISCOS'	49
ILUSTRACIÓN 49: 'MONTAJE CABLEADO'	50
ILUSTRACIÓN 50: 'CIRCUITERÍA SERVOS'	51

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: 'CARACTERÍSTICAS DE IMPRESIÓN DE BANDEJA 'DEDOS''	29
TABLA 2: 'CARACTERÍSTICAS DE IMPRESIÓN DE BANDEJA 'PIEZAS BAJAS''	29
TABLA 3: 'CARACTERÍSTICAS DE IMPRESIÓN DE BANDEJA 'PIEZAS GRANDES''	30
TABLA 4: 'CARACTERÍSTICAS DE IMPRESIÓN DE BANDEJA 'PIEZAS PEQUEÑAS''	31
TABLA 5: 'CARACTERÍSTICAS DE IMPRESIÓN DE BANDEJA 'ÚLTIMAS PIEZAS''	31
TABLA 6: 'CARACTERÍSTICAS DE IMPRESIÓN DE BANDEJA 'CAJA CIRCUITO''	32
TABLA 7: 'CARACTERÍSTICAS DE IMPRESIÓN GENERAL'	32
TABLA 8: 'MEDICIONES CON LA MANO ABIERTA'	57
TABLA 9: 'MEDICIONES CON LA MANO CERRADA'	58
TABLA 10: 'INTERVALOS DE CONFIGURACIÓN DE LOS DEDOS'	58

1. RESUMEN

El objetivo del siguiente proyecto es el desarrollo de una mano articulada capaz de imitar de forma simultánea los movimientos realizados por otra mano.

A grandes rasgos podemos diferenciar tres partes del proyecto. En primer lugar, nos encontramos ante el diseño, modelización y fabricación de la mano que realizará la mimesis y los complementos necesarios para ésta. A posteriori, se realiza el montaje y ajuste de ésta para que los movimientos sean lo más precisos posibles. En tercer y último lugar se trabajará con la programación del hardware equipado al sistema y sus consiguientes pruebas de funcionamiento.

Una vez ensamblado, el prototipo estará preparado para captar el movimiento de nuestra mano, a través de un guante dotado con los sensores necesarios. Dicho movimiento será traducido a señales eléctricas gracias a nuestro hardware, el cual hará llegar dicha información a los servos, éstos y un sistema de juego de cuerdas serán los encargados de que la mano sea capaz de realizar la mimesis.

1. RESUM

L'objectiu d'aquest projecte és el desenvolupament d'una mà articulada capaç d'imitar de forma simultània els moviments d'altra mà.

A grans trets podem diferenciar-ne tres parts al projecte. En primer lloc trobaríem el disseny, modelització y fabricació de la mà que realitzarà la mímesi, a més dels complements necessaris per a aquesta. Seguidament, tindrem el muntatge i ajust de la mà per tal que els moviments siguin lo més precisos possibles. En tercer i últim lloc, treballarem amb la programació del hardware equipat al sistema i farem les consegüents proves de funcionament.

Una vegada ho tenim tot acoblat, el prototip estarà preparat per a captar el moviment de la nostra mà, per mig d'un guant dotat amb els sensors necessaris. Aquest moviment es traduirà en senyals elèctriques gràcies al nostre hardware, que al mateix temps farà arribar la informació als servos i juntament amb un joc de cordes, seran els encarregats de que la mà siga capaç de dur a terme la mímesi.

1. ABSTRACT

The goal of this project is the development and building of an articulated hand that mimics the movement of a real one.

By looking at the big picture, we can differentiate three big modules that make up the entirety of the project. The first one includes the designment, modeling, printing of the hand itself, aswell as acquiring all the other parts. The second module comprises both the building of the hand, and performing the necessary adjustments for it to work as smoothly and precisely as posible. Lastly, in the third module, programming, testing, and fixing the possible errors take place.

After these modules are completed, the prototype is ready to track the movement of our hand through sensors placed on a glove in certain key spots. This movement will then be translated into electrical signals by our hardware, sending this information to the servomotors afterwards. Those and a series of strings will move the hand depending on the information received.

2. INTRODUCCIÓN

Si preguntásemos a la gente cuál creen que fue el primer robot construido, seguramente la imagen mental que más nos vendría a la mente sería una especie de humanoide al estilo 'Terminator' o 'C3PO', y si lo situáramos en el tiempo, no pensaríamos que pudiera ser anterior al siglo XX. Aunque la ciencia ficción y los efectos especiales de la compañía de George Lucas nos hagan pensar en robots brillantes y actuales, los primeros autómatas de los que tenemos constancia datan del siglo I a.C. Eran mecanismos relativamente simples: estatuas de dioses que despedían fuego de sus ojos, como la estatua de Osiris, divinidades con brazos mecánicos que emitían sonidos cuando los rayos de sol los iluminaban, como la estatua del templo de Memon en Etiopía, e incluso mecanismos alimentados con energía hidráulica basados en el principio de Arquímedes, el ejemplo más representativo es "el automaton theatre".

Desde sus inicios, el concepto de "autómata", concebido como un mecanismo, normalmente con aspecto humanoide era más una idea con carácter artístico. Sin embargo, ya en el siglo XIII, grandes científicos e ingenieros como Alberto Magno o Al-Jazari, inventor del cigüeñal, construyeron autómatas humanoides que eran capaces de desplazarse, abrir la puerta y servir bebida. Con la entrada en el siglo XVIII y los consiguientes avances en materia de relojería se llega a la que se considera la época donde podemos encontrar los autómatas más complejos de la historia. Su desarrollo, dominado por el carácter científico, ponía de manifiesto la obsesión por intentar reproducir lo más fielmente posible los movimientos y comportamientos de los seres vivos. Desde el "canard digérateur" de Jacques de Vaucanson, aclamado en 1739 como el primer autómata capaz de hacer la digestión, hasta "El escritor" de Pierre Jaquet-Droz, compuesto por más de 6000 piezas y capaz de escribir con pluma pequeños textos de unas cuarenta palabras, realizando movimientos propios de un ser humano como mojar la tinta y escurrir el sobrante para no manchar el papel, levantar la pluma como si estuviera pensando, ...

Por otra parte, desde la generalización del uso de la tecnología en procesos de producción con la Revolución Industrial se intentó la construcción de dispositivos automáticos que ayudasen o sustituyesen al hombre. Entre ellos destacaron los Jaquemarts, muñecos de dos o más posiciones que golpean campanas accionados por mecanismos de relojería china y japonesa.

Por otro lado, cabe mencionar que hasta principios de siglo XX solo se puede hablar de autómatas pues no es hasta esta fecha que se acuña el término "robot".

La palabra surge en la obra de Karel Čapek, llamada "R.U.R." (Rossum's Universal Robots). Del checo "robota", traducido como esclavo o servidumbre, deja claro que, en la era moderna, los robots dejan de ser meramente decorativos y se han convertido en diseños capaces de desarrollar y construir nuevos mecanismos, cuyo propósito sea el de facilitar la vida humana.

Otro hecho que cabe destacar es el tipo de locomoción y diseño de los autómatas, en los siglos anteriores se pretendían conseguir modelos que pudieran imitar a los humanos, incluyendo la estructura y movimientos. En esta época, dejando atrás los intentos de una locomoción bípeda y por tanto alejándose de la idea humanoide, originando robots que imitaban a insectos y artrópodos en funciones y forma, por tener un esqueleto más estable y adaptable, etc.

Una vez hecho este breve recorrido histórico del concepto y objetivo del autómatas/robot, podemos definir en la actualidad la robótica como una rama de la mecatrónica, que tiene como objetivo diseñar y desarrollar maquinaria compleja que facilite las actividades del ser humano a través de procesos electrónicos y sistemas de control. A día de hoy, las aplicaciones de la robótica son infinitas y las encontramos en cualquier área, desde cintas de montaje automatizadas como mecatrónica en el campo de la automática, hasta robots quirúrgicos, de rehabilitación o protésicos dentro del campo de la medicina.

Dentro de este último campo, se encuentra el objeto de estudio de este trabajo, una prótesis de mano robótica que sea capaz de suplir a una mano auténtica. En mi caso, el proyecto se basa en la mimesis, es decir, copia los movimientos de la misma mano, aunque se podría programar para que actúe como espejo de la otra mano. De hecho, el proyecto en el que me he basado inicialmente pretendía ser artístico, una estructura capaz de asimilar el movimiento de un sujeto y copiarlo. Este proyecto recibe el nombre de "InMoov".

3. PROYECTO INMOOV

Cuando hablamos del proyecto InMoov, hacemos referencia a un proyecto de código abierto y libre, basado en la aportación de una comunidad de gran tamaño que ofrece soporte continuo, aportando ininterrumpidamente mejoras de prototipo, aportaciones técnicas e incluso enseñanza online. Una vez dicho esto, profundizaré en el objetivo de dicha comunidad.

La base de este proyecto es la construcción de un robot humanoide, como ya hemos dicho, de código abierto, llamado 'InMoov'. Dicho robot está formado por piezas impresas en 3D, cuyos componentes electrónicos se apoyan en otra compañía de hardware libre llamada Arduino.

Echando la vista atrás, el propósito inicial de este proyecto era meramente artístico, una escultura inmóvil con apariencia humana sin ningún tipo de aplicación, construida por el escultor francés Gaël Langevin en el año 2011. Sin embargo, su potencial en el desarrollo de modelos protésicos, la facilidad de impresión y bajo coste de sus piezas, motivó que en unos cuantos años, InMoov se convirtiese en una gran plataforma de aprendizaje y desarrollo de la robótica.

En cuanto a particularidades del proyecto, como ya hemos dicho con anterioridad, se trata de un humanoide cuyas piezas pueden ser fabricadas por cualquier impresora 3D, de unas dimensiones mínimas de 12x12x12 cm (12 cm³). Con respecto al software, el programa que da vida a este humanoide es MyRobotLab, totalmente basado en Java, el cual permite modificar y añadir los comportamientos de los componentes. Al tratarse de una tecnología abierta y libre, muchos desarrolladores han realizado numerosas modificaciones del robot para mejorar sus funciones, entre las cuales encontramos la posibilidad de ver, moverse independientemente, hablar y percibir sonidos.

El avance más importante han sido los programas de reconocimiento facial desarrollados para el robot, dotándolo de cámaras, sistemas de rastreo de movimiento y diversos sensores. Además de éstos, el humanoide tiene incorporados sensores de presión, sensores tridimensionales e infrarrojos, además de la cámara Kinect, la cual dota al robot de análisis espacial y visión tridimensional de su entorno.

Dejando a un lado la parte electrónica y centrándonos en la mecánica, nos encontramos ante un ejemplar de, actualmente, 6 GDL en la cabeza, 5 GDL en cada brazo, 16 GDL en cada mano y 10 dedos independientemente motorizados. Todo esto se resume en un robot humanoide de una altura equivalente a la

estatura de un humano medio. Cabe mencionar que el proyecto se encuentra sin acabar, pero en constante desarrollo, en el que a día de hoy el proyecto está desarrollando el sistema inferior, en concreto las extremidades inferiores.

Para finalizar, hacer mención que todas las piezas se encuentran en la página web oficial (adjunta en la bibliografía) en donde además existen foros, galería de imágenes y tienda (en caso de no tener una impresora 3D). Además, como dato significativo, puedes encontrar un mapa interactivo donde encontrar todos los proyectos InMoov activos actualmente, para así poder ponerte en contacto con ellos y saber dónde están siendo desarrollados.

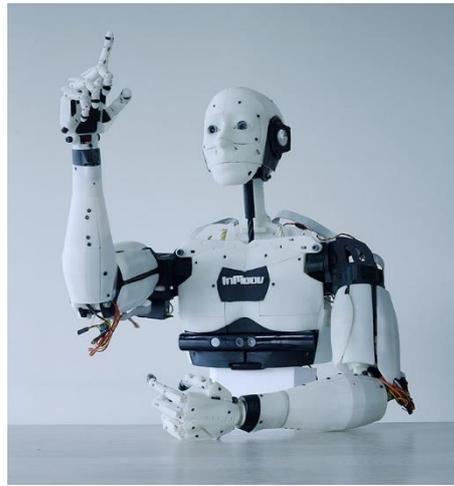


ILUSTRACIÓN 1: 'MODELO PROYECTO INMOOV'

4. IMPRESIÓN 3D

Puesto que las piezas del prototipo las he obtenido utilizando impresoras 3D, voy a explicar el tipo de impresión que hice, ventajas frente a otros procesos y la elección de materiales.

En primer lugar, definimos la impresión 3D, o manufactura aditiva, como un conjunto de técnicas de fabricación que, partiendo de un modelo digital, permiten manipular distintos materiales para construir, capa a capa, objetos en tres dimensiones.

El inicio de estas nuevas tecnologías se remonta a 1976 con la impresora de inyección de tinta, pues basándose en el mismo principio, pero cambiando la tinta por materiales, nacen las impresoras 3D. Este descubrimiento se patentó en 1976, aunque curiosamente, se le atribuye erróneamente el mérito de la invención de esta nueva técnica a Charles Hull, quién en 1984, sí inventó la estereolitografía o SLA (forma de tecnología de manufactura utilizada en la producción de modelos, prototipos y patrones, mediante el curado de fotopolímeros, como la resina, con láser de luz UV) y el formato STL, ampliamente aceptado por el software de impresión 3D actual.

A partir de esto, podemos encontrar un gran número de técnicas de impresión 3D, sus principales diferencias se encuentran en la forma de usar las capas. Algunos métodos se basan en el fundido o ablandamiento del material para producir las capas, mientras que otros depositan materiales líquidos que son curados posteriormente con diversas tecnologías.

En mi caso, la impresión que yo he utilizado produce capas mediante ablandamiento e inyección; en concreto el modelado por deposición fundida o MDF. Este método se usa, sobre todo, en la producción a pequeña escala y comienza con un proceso de software, que parte de un fichero estereolitográfico (STL) o de algún proyecto diseñado con software CAD. El fichero es orientado para poder ser impreso, dividido en capas y se calculan las trayectorias que la boquilla deberá seguir para depositar el material, capa a capa, para conformar la pieza. Se escoge el material más adecuado y se configura la impresora para el mismo, se introduce el material en la boquilla que se encuentra por encima de la temperatura de fusión y ésta empieza el capeado desplazándose en los 3 ejes. Si son necesarias, se pueden generar estructuras de soporte que, si la máquina es capaz, imprimirá en otro material que, tras finalizar la creación de la pieza, será retirado.

En concreto mis piezas han sido impresas con una impresora ZORTRAX M-200 (*Ilustración 2*), usando el termoplástico Z-UltraT, un material de alta dureza y baja deformación muy resistente.



ILUSTRACIÓN 2: 'IMPRESORA ZORTRAX M-200'

En cuanto a ventajas e inconvenientes del MDF, el método de fundido que yo he empleado, la ventaja de usar esta tecnología es que se pueden construir piezas funcionales en plásticos estándar y es muy útil para prototipado rápido, además cuenta con una gran variedad de materiales que soportan este método. Por contra, esta tecnología ofrece distintas propiedades cuando la examinas en varias direcciones, en concreto anisotropía en la dirección z, es decir, que las capas suelen ser visibles; por tanto, necesitan de un procedimiento posterior para alisar sus capeados y mejorar el acabado, que, en mi caso, fue el raspado con lija.

5. DISEÑO DEL PROYECTO

El prototipo se puede dividir en tres grandes bloques, tanto si hablamos de diseño como si lo hacemos de montaje, los cuales detallaré a continuación:

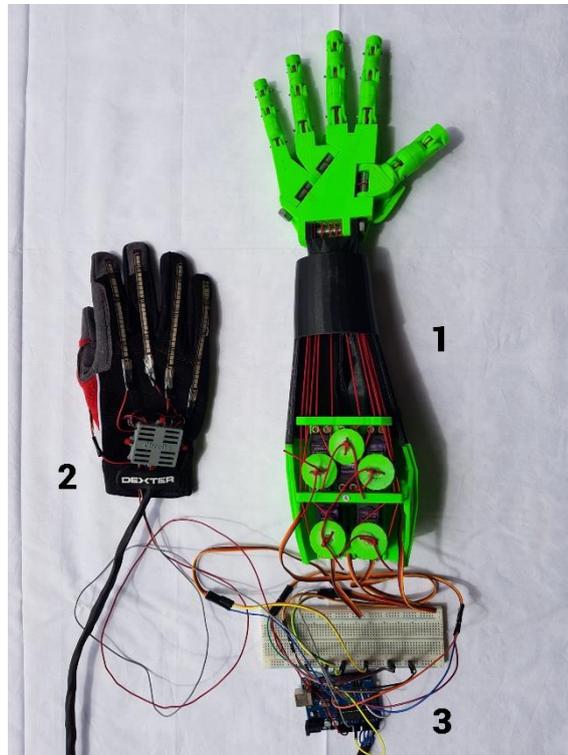


ILUSTRACIÓN 3: 'DIAGRAMA DEL MONTAJE COMPLETO'

5.1. Brazo

En el primer bloque se trata la parte más mecánica del proyecto, la parte que realizará los movimientos, y que por lo tanto lleva más desempeño a la hora de montar y ajustar.

Respecto al diseño, en un primer momento, la idea principal era que sus materiales fuesen PVC y tubos de goma flexibles, de modo que éste primero me ofrecería unas buenas resistencias sin dejar de lado un peso relativamente pequeño, en el caso del antebrazo, y, por otro lado, la flexibilidad deseada para realizar los movimientos de los dedos, en el caso de los tubos.

Después de pensar en la idea general del proyecto, decidí informarme al respecto y fue cuando descubrí el proyecto InMoov, un proyecto llevado al alcance de "todos" gracias a la impresión 3D. El hecho de basarme en este proyecto fue, en primer lugar, la calidad de sus modelos y diseños, y, en segundo lugar, el hecho de poder elegir la densidad de las piezas, pudiendo así modificarla en función de si quería mayor o menor relación en cuanto a

resistencia y/o peso. Así pues, fue como accedí al sistema de impresión de la escuela para la realización de mi prototipo.

Respecto a la impresión y lo que ello conlleva dedicaré más adelante un apartado, explicando pros y contras que me he encontrado, añadiendo a su vez los modelos de las bandejas que más tarde fueron impresos. Dejando a un lado este punto, paso a explicar los siguientes subconjuntos que nos encontramos dentro del brazo.

5.1.1. Mano

En primer lugar, viendo el diagrama 3 adjuntado anteriormente, se pueden diferenciar perfectamente los componentes que forman el brazo en su totalidad.

Haciendo referencia a la primera de las tres partes, podemos observar cómo la anatomía de la mano es muy similar a una humana, pudiendo diferenciar la palma de los cinco dedos.

Con respecto a los dedos, éstos se encuentran divididos por lo que serían las articulaciones, fraccionándolos así en sus respectivas falanges. En las uniones entre éstas, podemos situar el par R, el cual imitará el movimiento natural del dedo, permitiéndonos así realizar la articulación en caso de querer cerrar la mano cuando cerremos el puño.

Tal y como podemos ver en la ilustración 4, encontramos situadas las diferentes partes mencionadas anteriormente. En concreto de trata del dedo índice, donde gracias a la leyenda (*Leyenda 1*) adjuntada a su respectiva imagen podemos identificar las falanges y los pares R.

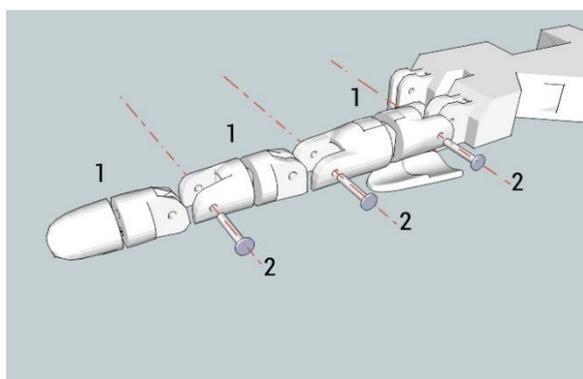


ILUSTRACIÓN 4: 'MODELO DEL DEDO ÍNDICE'

LEYENDA 1

Número	Nombre
1	Falange
2	Par R

Haciendo referencia a la palma, ésta se encuentra dividida en dos grupos. El primero, formado por tres piezas (*ilustración 5*), servirá de

sujeción para los cuatro dedos de la parte superior, y el segundo, hará de enganche únicamente del pulgar (*ilustración 6, número 4*). El hecho de estar seccionado permite el movimiento independiente entre ambas partes, dotándole así de la movilidad necesaria para hacer un cerrado de palma más realista, además de añadirle agarre a la hora de coger algún objeto.

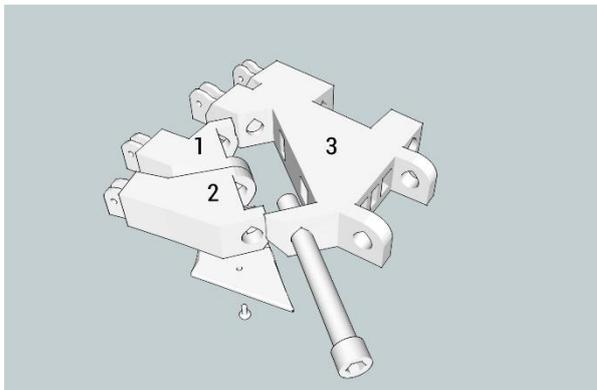


ILUSTRACIÓN 5: 'MODELO 1 DE PALMA'

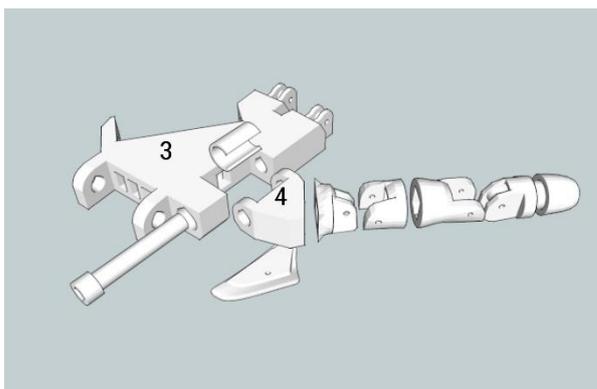


ILUSTRACIÓN 6: 'MODELO 2 DE PALMA'

LEYENDA 2

<i>Número</i>	<i>Nombre</i>
1	Sujeción Anular
2	Sujeción Meñique
3	Sujeción Índice/Corazón
4	Sujeción Pulgar

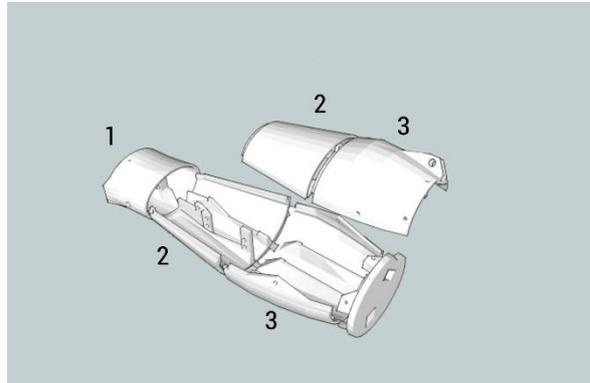
Si observamos las imágenes anteriores (*Ilustración 5 y 6*), podemos ver indicadas las partes mencionadas anteriormente junto a su leyenda correspondiente (*Leyenda 2*).

5.1.2. Antebrazo

Podemos decir que nos hallamos ante el grupo de piezas cuya función principal es estructural y estética, para así hacer un prototipo de mayor similitud con respecto a un brazo humano.

Como función secundaria, estas piezas sirven para tensar las cuerdas, las cuales explicaremos a posteriori, y así poder separarlas para que cuando lleguen a los servos éstas tengan una mejor distribución y no interfieran unas con otras.

Tal y como podemos observar en la imagen adjuntada (*Ilustración 7*), se diferencian dos partes, la primera que simula la muñeca, y la segunda a la parte inferior del antebrazo. Respecto a la tercera, ya se explicará más adelante.



LEYENDA 3

Número	Nombre
1	Muñeca
2	Antebrazo
3	Caja de servos

ILUSTRACIÓN 7: 'ENSAMBLAJE ANTEBRAZO'

Cabe añadir que la muñeca tiene una función añadida, ésta sirve de sujeción entre la mano y la segunda parte parte inferior del antebrazo. En cambio, la segunda parte, hará de unión entre la muñeca y la caja de servos. Ambas partes se encuentran indicadas en la respectiva leyenda (*Leyenda 3*).

5.1.3. Caja de servos

Con respecto a la tercera y última parte estructural del prototipo, nos encontramos con la caja de servos. Esta zona es donde se alojarán los servomotores, protegidos por dos cubiertas de filamento Z, situados sobre un asiento diseñado especialmente para la fijación de éstos, y, además, encontraremos dos guías cuya función será redirigir el cableado para una mejor distribución.

Si observamos las imágenes (*Ilustración 8 y 9*) adjuntadas más adelante y analizamos las partes que componen este último tramo del brazo de forma individual, podemos destacar lo siguiente:

En cuanto a los servos, se trata de cinco motores de corriente continua orientados de forma alternada, de modo que los acoples atornillados a ellos no colisionen. Dichos acoples en forma de disco, al igual que las guías de los cables, se encuentran explicados en el apartado 'Extras' (*5.1.4*).

Estos servomotores serán los encargados de estirar de los cables, de forma que, dependiendo de la dirección de giro y de la tensión, el dedo se contraerá o expandirá.

Si hablamos de las cubiertas, nos podemos percatar de que simplemente son la estructura sobre la que irá apoyada y atornillada la cama, en la que a su vez irán fijados los servos.

Todos los elementos nombrados los podemos ver reflejados en las imágenes adjuntadas (*Ilustración 8 y 9*) junto a su respectiva leyenda (*Leyenda 4*) donde se encuentran indicadas cada una de las partes.

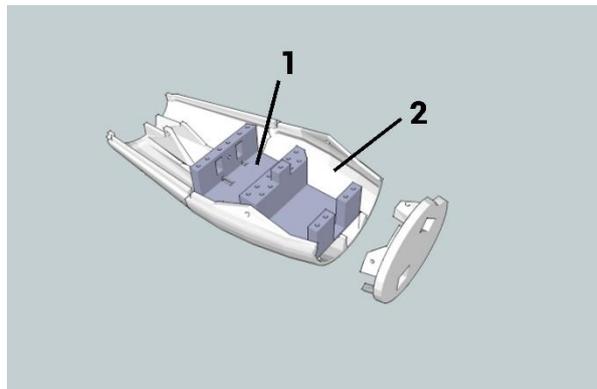


ILUSTRACIÓN 8: 'MODELO 1 DE CAJA DE SERVOS'

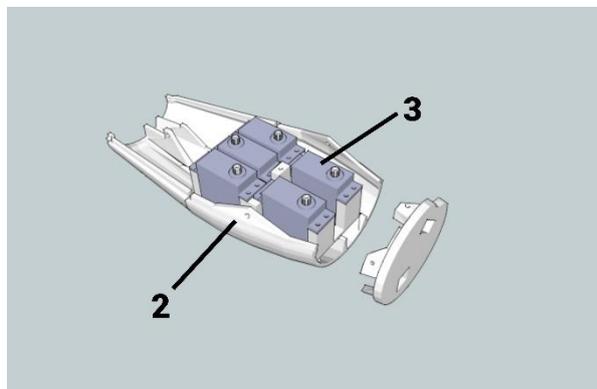


ILUSTRACIÓN 9: 'MODELO 2 DE CAJA DE SERVOS'

LEYENDA 4

Número	Nombre
1	Cama de servos
2	Cubierta
3	Servos

5.1.4. Extras

Con respecto este último apartado, lo he dedicado únicamente a aquellos elementos que cumplen una función estructural nula, es decir, realizan una aportación puramente mecánica y/o estética.

5.1.4.1. Discos

Como ya he explicado anteriormente, estos discos se encuentran fijos al servomotor de forma que cuando éste produzca un giro, el par le será transmitido al disco. Una vez se produzca el giro, se producirá una tensión a lo largo del cable debido a que éste se encuentra fijado a los lados del tornillo del disco, ejerciendo así una flexión o contracción en el dedo, dependiendo del sentido de giro del servo.

Podemos observar en la imagen adjunta (*Ilustración 10*) que se trata de cinco discos, uno por cada dedo. Éstos llevan un agujero pasante en la posición central para así poder ser fijado, al igual que dos perforaciones parciales a los lados para realizar la sujeción del cable.

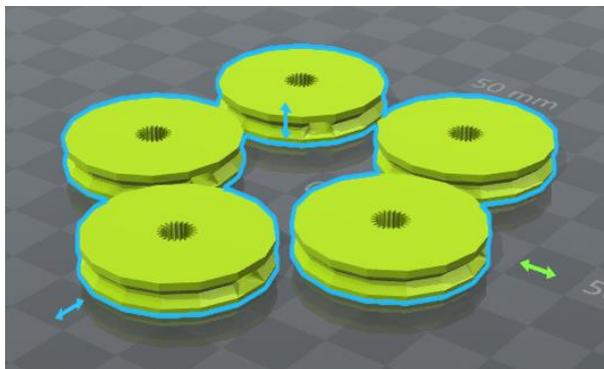


ILUSTRACIÓN 10: 'MODELO DE DISCOS'

5.1.4.2. Guías de cableado

Nos hallamos ante una de las piezas más simples, pero a la vez más útiles a la hora de organización en el proyecto. Se trata de dos barras perforadas con un ángulo de salida específico para que así los cables no puedan entrecruzarse unos con otros.

Su disposición es muy sencilla, una primera barra, situada al principio de la cama de servos, que ajusta y distribuye los cables de los motores delanteros y traseros, y una segunda, posicionada en el punto medio entre los actuadores de la primera y segunda

línea, que sirve de organizador únicamente para los servos traseros.

Tal y como podemos observar en la imagen adjunta (*Ilustración 11*) y hemos explicado con anterioridad, la primera barra sirve a los motores delanteros y traseros, siendo los agujeros más centrales para los servos de delante, y los laterales para los traseros.

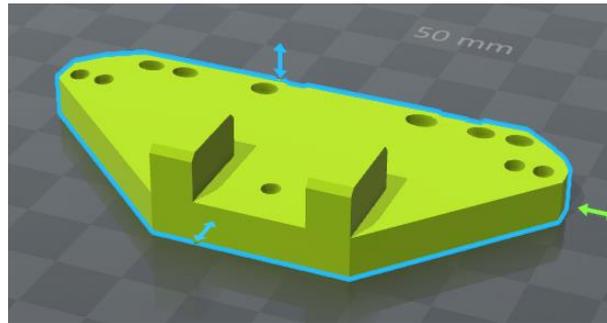


ILUSTRACIÓN 11: 'MODELO DE GUÍA DELANTERA'

Si nos fijamos en el modelo 12, ésta representa la barra trasera, en donde tan solo tiene agujeros laterales para encarar los cables a los actuadores, para que así estos puedan funcionar de la mejor forma posible.

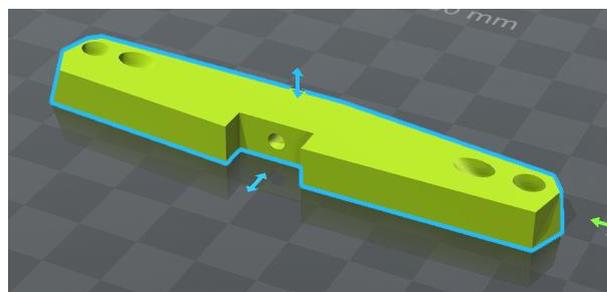


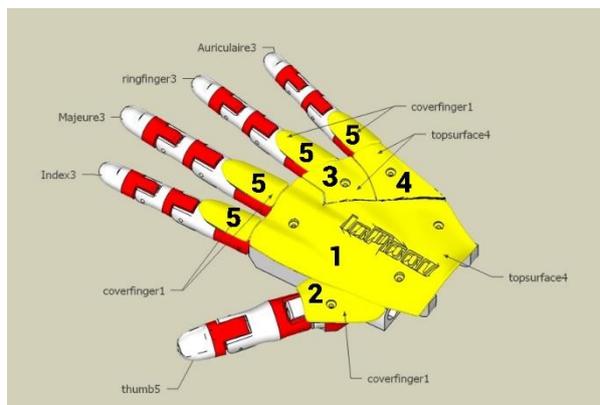
ILUSTRACIÓN 12: 'MODELO DE GUÍA TRASERA'

5.1.4.3. Embellecedores

Sin duda nos hallamos ante las piezas menos importantes en cuando a nivel funcional, pero, sin embargo, hace un papel muy importante en cuanto a lo estético.

Con respecto a estos embellecedores no hay mucho que añadir, tan solo que nos encontramos con cuatro piezas cuya función es simular el dorso de la mano.

Tal y como vemos en la imagen 13 con su respectiva leyenda (Leyenda 5), podemos ver que pieza corresponde a cada dedo.



LEYENDA 5

Número	Nombre
1	Dorso
2	Pulgar
3	Anular
4	Meñique
5	Cubiertas nudillos

ILUSTRACIÓN 13: 'DISPOSICIÓN DE EMBELLECEDORES'

Como dato a destacar, podemos observar (IMAGEN), como en la pieza más grande se encuentra grabado el logo de InMoov.

5.2. Guante

En el segundo bloque se trata una de las partes electrónicas del proyecto, la parte que realizará las lecturas de los movimientos mediante los sensores, los cuales tendremos que calibrar de forma precisa para que los datos captados sean los adecuados.

Con respecto al origen de la idea, me basé en un modelo de guante antiguo desarrollado principalmente para el mundo de los videojuegos. Su nombre es 'P5 Glove' (Ilustración 14), cuyo principio de funcionamiento es muy similar al mío, el cual se encuentra explicado a continuación.



ILUSTRACIÓN 14: 'P5 GLOVE'

Mi sistema de captación de movimiento se basa en el acople de un sensor de flexión a cada uno de los dedos. Al realizar el movimiento del dedo, se producirá una variación en la resistencia, y que, a su vez, al producirse ésta,

el hardware, en nuestro caso Arduino, a través de un pin analógico, realizará la lectura de dicho cambio. Una vez se ha realizado la medición, a través del código programado, esta información será traducida y llevada a los servos para que imiten el movimiento realizado.

El guante fabricado está formado por dos partes destacables, como son los sensores de flexión y el circuito necesario para las mediciones. Además de éstas dos, se encuentra el propio guante. A continuación, detallaré el funcionamiento y el diseño de las partes mencionadas anteriormente.

5.2.1. Sensores de flexión

Al igual que con respecto al brazo, en cuanto a sensores empleados, la idea final ha acabado siendo totalmente distinta a la idea inicial. En un principio me informé vía internet como gracias a materiales de “ir por casa” podía conseguir unos sensores de flexión totalmente caseros, haciendo uso de papel de plata, mina de lápiz, papel, cinta adhesiva y dos cables. En cambio, tras seguir informándome decidí comprarme unos sensores de flexión que me asegurasen una calidad decente a la hora de realizar las mediciones. Además, elegí los sensores de manera que midieran unos milímetros más que mi dedo más largo para asegurarme que captara la información de flexión de las dos articulaciones y del nudillo.

Como ya he explicado de forma breve, su función es producir una resistencia variable en función del grado al que esté doblada, es decir, convierte la curvatura en valores de resistencia eléctrica.



ILUSTRACIÓN 15: 'DISPOSICIÓN DE SENSORES DE FLEXIÓN'

Tal y como podemos ver en la imagen 15, se vinculará cada uno de los sensores a su respectivo dedo. Estas varillas estarán conectadas mediante dos cables (positivo y negativo) al circuito. Con respecto a su

posición mencionar que deberá estar centrado para así captar el movimiento de la forma más precisa.

5.2.2. Circuito

Podríamos considerar al circuito como la conexión necesaria entre los sensores y el microcontrolador. El hecho de hacer un circuito viene motivado por la necesidad de hacer un “centro de conexiones” compacto, para así facilitar la movilidad del guante reduciendo el riesgo de que se suelte algún cable o que se pueda producir algún fallo a la hora de mover el proyecto, ya que nos encontramos ante cinco sensores con sus conexiones pertinentes. En caso de no hacerlo, hubiese quedado una cantidad enorme de cables sin ningún tipo de distribución, por ello, evité usar una protoboard (de conexiones temporales) y decidí hacer uso de una perfboard, con su respectiva soldadura. A continuación, podemos ver dos imágenes ilustrativas de cada una de ellas (*ilustración 16 y 17*).

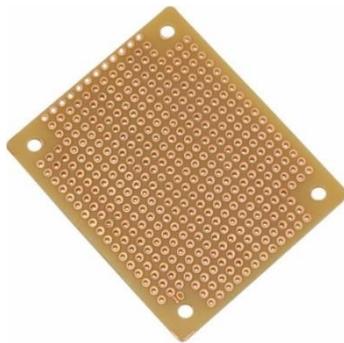


ILUSTRACIÓN 16: 'PERFBOARD'

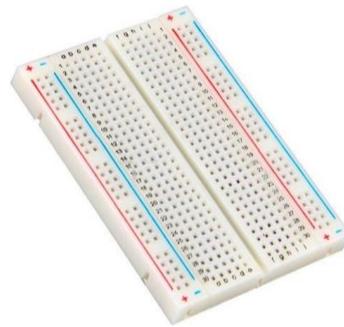


ILUSTRACIÓN 17: 'PROTOBOARD'

Con respecto al diseño de la placa, se trata de la conexión individual entre un sensor de flexión y un Arduino, añadiendo su respectiva resistencia de $22\text{ k}\Omega$, pero repetida cinco veces, una por dedo.

El hecho de añadir esa resistencia se debe a que necesitamos un divisor de tensión, para así dividir el voltaje entre el sensor y la resistencia. Una vez añadidos los $22\text{ k}\Omega$ de resistencia fija, ya se podrá medir el cambio de resistencia haciendo uso de uno de los pines analógicos del Arduino.

En la imagen adjuntada (*Ilustración 18*), podemos ver claramente lo explicado con anterioridad. Se trata de cinco conexiones normales entre el sensor y Arduino, con su resistencia respectiva, y la alimentación correspondiente. Para facilitar su entendimiento, en el apartado

Ensamblaje he añadido una leyenda donde, de forma más visual, se puede identificar cada cable y su función.

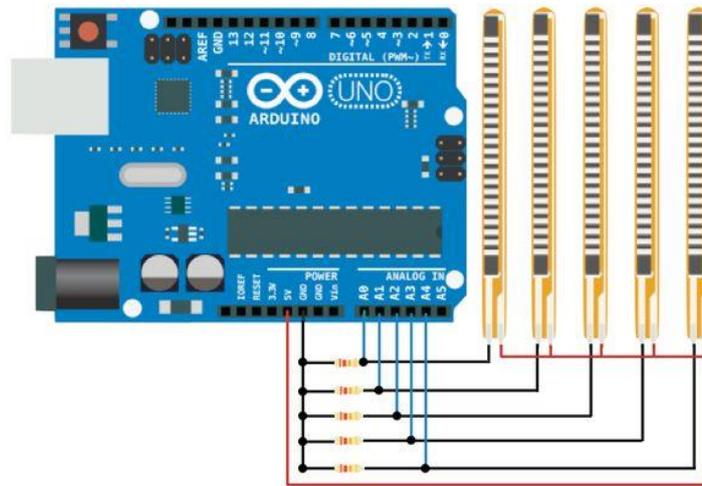


ILUSTRACIÓN 18: 'CONEXIONADO SENSORES DE FLEXIÓN'

Cabe mencionar que, como buscamos la comodidad y la movilidad, he realizado un cosido del circuito en el dorso del guante.

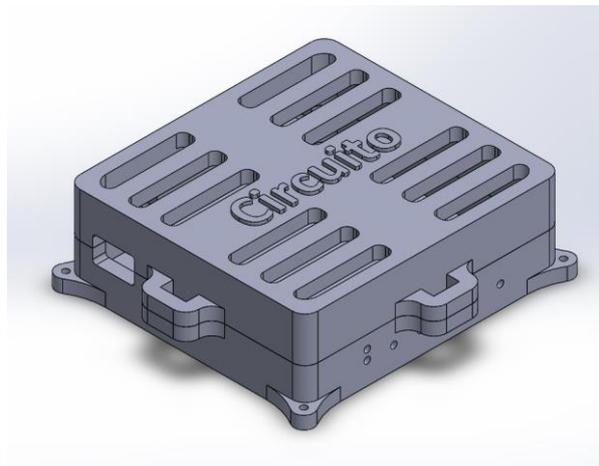


ILUSTRACIÓN 19: 'MODELO CAJA DE CIRCUITO'

Para concluir con el apartado diré que el modelo mostrado (*Ilustración 19*) no ha sido aportado por el proyecto InMoov, sino que lo diseñé yo como añadido a su portabilidad y una mejor presentación.

5.3. Interconexión

En el tercer y último bloque, nos encontramos ante la otra parte electrónica del proyecto. Por un lado, nos encontramos con la parte destinada al procesamiento de datos, y por otro lado, está la parte dedicada a la alimentación de todo el sistema. A continuación, se explicarán de forma más detallada e individual.

5.3.1. Arduino

Cuando hablamos de este dispositivo, hacemos referencia al corazón del proyecto, en donde se realiza el procesamiento de datos y la transformación de éstos, gracias a los cuales, a posteriori, se moverán los servos a las posiciones adecuadas.

Con respecto al modelo empleado, la elección fue Arduino UNO, ya que con los pines que éste poseía eran suficientes para todas las conexiones necesarias.

Surgieron dos alternativas con respecto al microcontrolador, la primera fue un Arduino MEGA, pero su coste era mayor y, por tanto, no iba a ser rentable. Como segunda opción, pensé en usar unas Raspberry Pi, pero descarté la idea ya que uno de los objetivos que me propuse al principio del proyecto era mantenerme en la línea de un proyecto totalmente libre y de fácil reproducción (debido a la impresión 3D). Además, que la diversidad que ofrecía Arduino en cuanto módulos y accesorios, junto al soporte de la comunidad, me pareció mucho mayor.

En las siguientes imágenes adjuntas se muestran las fotos de dichas placas, para que, a posteriori, se pueda realizar una mejor identificación del dispositivo.



ILUSTRACIÓN 20: 'RASPBERRY PI 3'

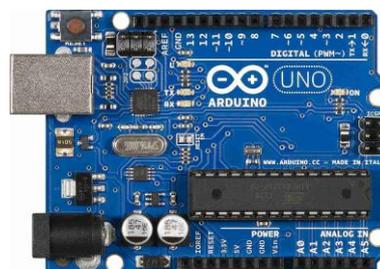


ILUSTRACIÓN 21: 'ARDUINO UNO'



ILUSTRACIÓN 22: 'ARDUINO MEGA'

Como último añadido, otro motivo importante de mi decisión con respecto a Arduino es que, en el cuarto curso del grado, asistí a la asignatura de 'Aplicaciones Electrónicas para la Ingeniería Mecánica',

impartida por mi tutor del proyecto, en donde rompí mano con dicho dispositivo y realicé dos proyectos con éste.

5.3.2. Fuente de alimentación

Nos hallamos ante uno de los puntos más delicados del proyecto, ya que es donde más inconvenientes me han surgido, junto al ajuste del cableado del brazo.

Con respecto a su diseño, surgieron varios cambios desde la idea principal, la cual en un primer momento iba a ir conectada a una batería de NiMH de 7,2 V y 4000 mAh. El problema apareció al probar el sistema, que al disminuir su carga aparecían irregularidades, y por lo tanto, constantemente ruido eléctrico, haciendo vibrar los servos, y como consecuencia, temblores en los dedos.

Mi siguiente propuesta y con la que finalmente me he quedado para el proyecto es un cable de alimentación de voltaje variable, en donde en el dorso de éste puedes regular la cantidad proporcionada al sistema. El rango de voltajes que éste puede proporcionar parte de 5 V a 12 V.

El único inconveniente es la conexión entre la fuente y la protoboard, ya que ésta no tiene un conector para alimentar el sistema. Por ello, decidí quitar el adaptador que llevaba acoplado, pelar los cables, y finalmente, conectarlo a la board, alimentando así a los servos sin ruido eléctrico, proporcionando la estabilidad deseada.



ILUSTRACIÓN 23: 'FUENTE DE ALIMENTACIÓN CONMUTADA'



ILUSTRACIÓN 24: 'BATERÍA NIMH'

Con respecto a las dos imágenes anteriores, cada una corresponde a una de las alternativas pensadas. En la primera (*Ilustración 23*), el cable de alimentación que utilizaré en el prototipo, y en la segunda (*Ilustración 24*), la batería mencionada anteriormente.

6. FABRICACIÓN

Todo prototipo debe tener su propio proceso de fabricación, el objetivo de ese apartado es explicar el método seguido para llegar a donde he llegado. Además, comentaré los inconvenientes que me han ido surgiendo al respecto para que, en caso de querer replicar este proyecto, ten un soporte desde mi propia experiencia.

Antes de comenzar, diré que, todas las decisiones tomadas han sido estudiadas y optimizadas, bajo mi criterio y siguiendo los consejos del departamento de impresión 3D. Desde mi punto de vista, éste ha sido el mejor método a seguir, a su vez digo que puede que existan alternativas igual de viables en cuanto optimización de tiempo y/espacio.

Una vez explicado esto, detallaré el proceso de impresión, además de los retoques realizados en las piezas de limpiado y pulido (*Apartado 6.8*). Todo ello irá acompañado de tiempos de fabricación y el modelo de la bandeja impresa. Los nombres de las secciones en las cuales he dividido el proceso de fabricación hacen referencia a los nombres asignados a las bandejas cuando se fue a llevar a cabo la impresión.

6.1. Bandeja ‘Dedos’

Como su propio nombre indica, se trata de la bandeja en la que se encuentran todos los dedos, divididos en sectores, en los cuales se agrupan las partes de falanges correspondientes a cada uno de ellos.

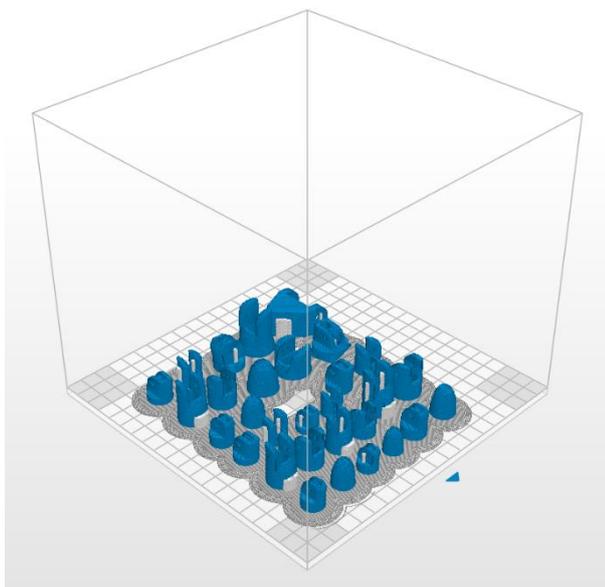


ILUSTRACIÓN 25: 'BANDEJA 'DEDOS''

Tabla 1: 'Características de impresión de bandeja 'Dedos''

<i>Nombre</i>	<i>Tiempo (h)</i>	<i>Material</i>	<i>Cantidad (m)</i>	<i>Capa (mm)</i>	<i>Relleno</i>
<i>Dedos</i>	12 h 59 min	Z-UltraT	30,7 m (73 g)	0,14 mm	Medio

6.2. Bandeja 'Piezas bajas'

En esta bandeja encontraremos las piezas de menor altura, ya que según me recomendaron en el departamento, al realizarse la impresión por alturas, es recomendable que todos los elementos tengan aproximadamente las mismas capas.

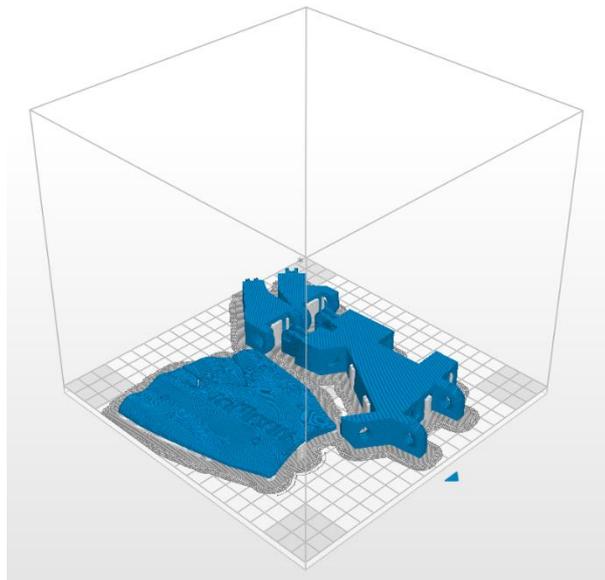


ILUSTRACIÓN 26: 'BANDEJA 'PIEZAS BAJAS''

TABLA 2: 'CARACTERÍSTICAS DE IMPRESIÓN DE BANDEJA 'PIEZAS BAJAS''

<i>Nombre</i>	<i>Tiempo (h)</i>	<i>Material</i>	<i>Cantidad (m)</i>	<i>Capa (mm)</i>	<i>Relleno</i>
<i>Piezas bajas</i>	14 h 53 min	Z-UltraT	43,79 m (104 g)	0,14 mm	Medio

6.3. Bandeja 'Piezas grandes'

Con respecto a la tercera bandeja, aplicamos el mismo principio de impresión que en la anterior, sólo que en este caso las piezas seleccionadas son las piezas de mayor altura.

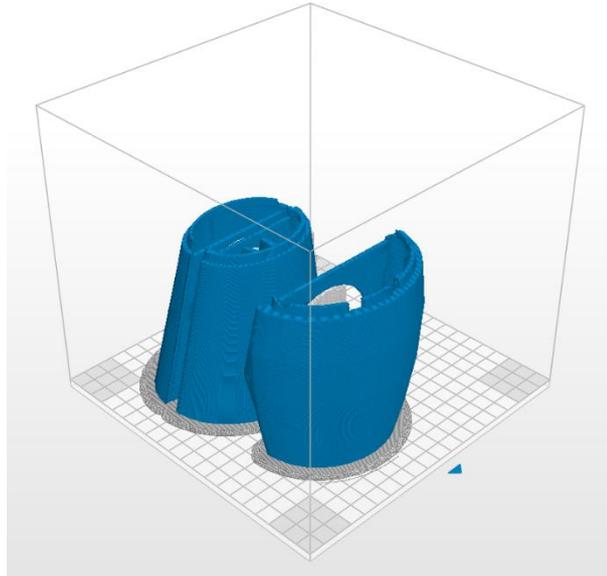


ILUSTRACIÓN 27: 'BANDEJA 'PIEZAS GRANDES''

TABLA 3: 'CARACTERÍSTICAS DE IMPRESIÓN DE BANDEJA 'PIEZAS GRANDES''

<i>Nombre</i>	<i>Tiempo (h)</i>	<i>Material</i>	<i>Cantidad (m)</i>	<i>Capa (mm)</i>	<i>Relleno</i>
<i>Piezas grandes</i>	33 h 39 min	Z-UltraT	77,94 m (186 g)	0,14 mm	Medio

6.4. Bandeja 'Piezas pequeñas'

Tal y como podemos deducir, se trata de las piezas de menor tamaño, exceptuando la caja de servos. Debido a que ésta no cabía en la bandeja de 'Piezas bajas', llegué a la conclusión que en donde mejor acoplaría sería en ésta, ya que es en donde la diferencia de alturas será menor.

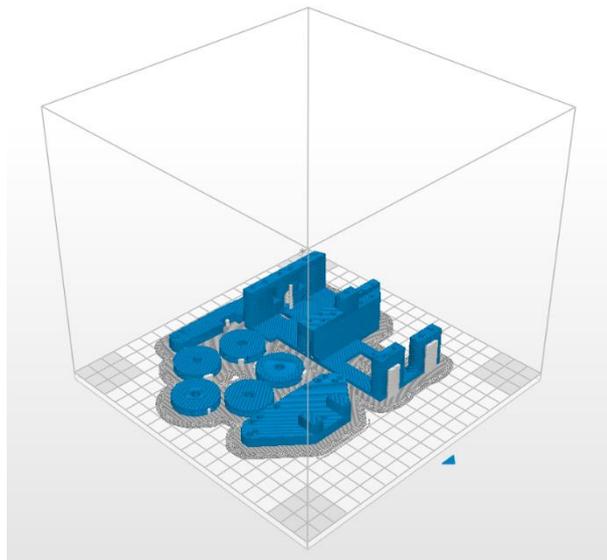


ILUSTRACIÓN 28: 'BANDEJA 'PIEZAS PEQUEÑAS''

TABLA 4: 'CARACTERÍSTICAS DE IMPRESIÓN DE BANDEJA 'PIEZAS PEQUEÑAS''

<i>Nombre</i>	<i>Tiempo (h)</i>	<i>Material</i>	<i>Cantidad (m)</i>	<i>Capa (mm)</i>	<i>Relleno</i>
<i>Piezas pequeñas</i>	11 h 21 min	Z-UltraT	31,98 m (77 g)	0,14 mm	Medio

6.5. Bandeja 'Últimas piezas'

Debido al espacio reducido del que disponíamos, unas cuantas piezas se quedaron sin emparejar, por lo tanto, es la bandeja más dispar. Cabe añadir que existía la posibilidad de cambiar una de estas piezas por otra, sin embargo, esta distribución permitía que una vez se hubiese hecho el capeo de las cubiertas de los dedos, la impresora se pudiese centrar en un único modelo, como es la otra cubierta de la caja de servos.

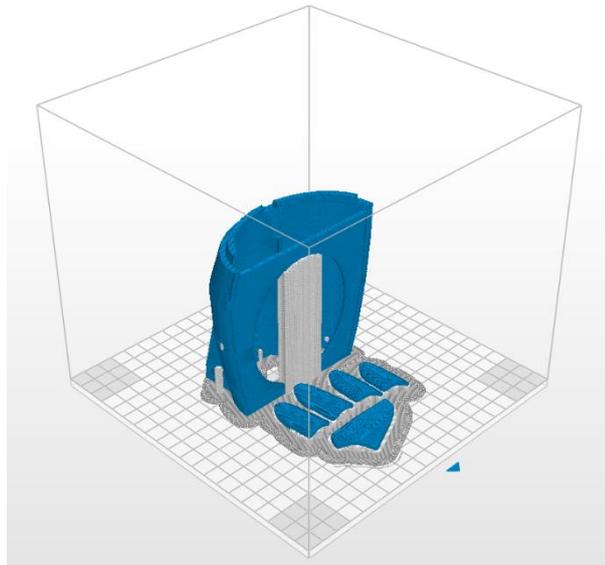


ILUSTRACIÓN 29: 'BANDEJA 'ÚLTIMAS PIEZAS''

TABLA 5: 'CARACTERÍSTICAS DE IMPRESIÓN DE BANDEJA 'ÚLTIMAS PIEZAS''

<i>Nombre</i>	<i>Tiempo (h)</i>	<i>Material</i>	<i>Cantidad (m)</i>	<i>Capa (mm)</i>	<i>Relleno</i>
<i>Últimas piezas</i>	14 h 39 min	Z-UltraT	35,33 m (84 g)	0,14 mm	Medio

6.6. Bandeja 'Caja circuito'

El hecho de realizar una única bandeja para la impresión de este modelo se debe a que en un principio el circuito no iba a estar dentro de ninguna caja. Sin embargo, a posteriori me di cuenta de que aportaría un gran valor estético y a su vez le otorgaría protección.

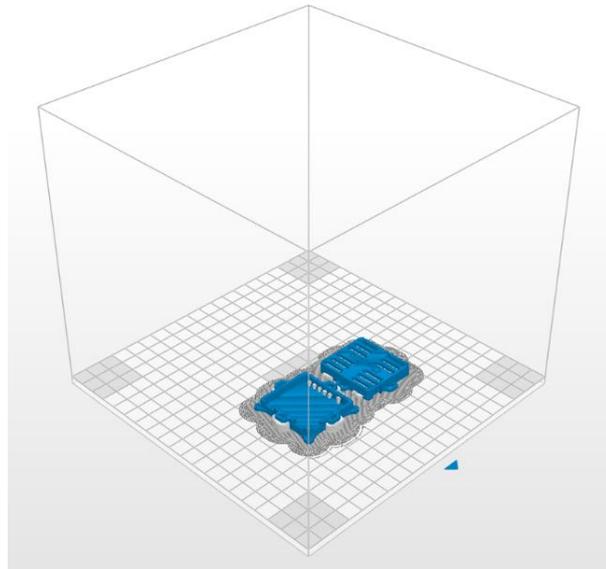


ILUSTRACIÓN 30: 'BANDEJA 'CAJA CIRCUITO''

TABLA 6: 'CARACTERÍSTICAS DE IMPRESIÓN DE BANDEJA 'CAJA CIRCUITO''

<i>Nombre</i>	<i>Tiempo (h)</i>	<i>Material</i>	<i>Cantidad (m)</i>	<i>Capa (mm)</i>	<i>Relleno</i>
<i>Caja circuito</i>	2 h 7 m	Z-UltraT	6,78 m (16 g)	0,14 mm	Medio

6.7. Impresión total

Una vez mostradas todas las bandejas junto a sus tiempos de impresión y sus características, ahora realizaré una síntesis de todo lo anterior, de forma que podamos comparar cómo influyen las dimensiones de los modelos.

TABLA 7: 'CARACTERÍSTICAS DE IMPRESIÓN GENERAL'

<i>Nombre</i>	<i>Tiempo (h)</i>	<i>Material</i>	<i>Cantidad (m)</i>	<i>Capa (mm)</i>	<i>Relleno</i>
<i>Dedos</i>	12 h 59 min	Z-UltraT	30,7 m (73 g)	0,14 mm	Medio
<i>Piezas bajas</i>	14 h 53 min	Z-UltraT	43,79 m (104 g)	0,14 mm	Medio
<i>Piezas pequeñas</i>	11 h 21 min	Z-UltraT	31,98 m (77 g)	0,14 mm	Medio
<i>Piezas grandes</i>	33 h 39 min	Z-UltraT	77,94 m (186 g)	0,14 mm	Medio
<i>Últimas piezas</i>	14 h 39 min	Z-UltraT	35,33 m (84 g)	0,14 mm	Medio
<i>Caja circuito</i>	2 h 7 min	Z-UltraT	6,78 m (16 g)	0,14 mm	Medio
<i>TOTAL</i>	89 h 38 min	-	226,52 m (540 g)	-	-

Como podemos observar, y como dato a destacar de la tabla anterior (*Tabla 7*), mostramos que el tiempo de impresión no depende únicamente de la cantidad de material utilizado, sino también de la distribución de las piezas.

En el caso de ‘Dedos’, con un metraje de 30.7 metros de filamento y 73 gramos de material, el tiempo empleado es 12 horas y 59 minutos, siendo éste mayor al de ‘Piezas pequeñas’, en el que habiendo usado 31.98 metros y 77 gramos de filamento, el tiempo se reduce a 11 horas y 21 minutos.

Para finalizar esta parte de la fabricación, mencionar que, para todas las bandejas, deberemos llevar una supervisión de la impresión, ya que podría producirse un error, obligándonos así a reiniciar todo el proceso.

6.8. Post-impresión

Una vez tengamos todas las piezas impresas en sus respectivas bandejas, los siguientes pasos serán la separación, el vaciado y el pulido de éstas.

En primer lugar, para la separación, lo que haremos será doblar la bandeja de forma que, de forma automática, deberían saltar las piezas. En caso de que esto no ocurriese, haremos uso de una paleta para rascar sobre la superficie de modo que las uniones pieza-bandeja empiecen a romperse y despegarse.

Cabe mencionar que muchas veces las piezas se encuentran sujetas por unos soportes, los cuales no tienen ningún valor, ya que han sido creados por la impresora con una función estructural, así que éstos pueden ser quitados sin miedo a que se rompan.

Con respecto al vaciado, lo que haremos es eliminar el material sobrante que se encuentra en el interior de los agujeros o volúmenes vacíos. En mi caso, hice uso de un destornillador fino para ir rompiendo poco a poco todo el material interno e ir extrayéndolo.

Sin duda alguna, este paso ha sido uno de los más costosos en cuando a dedicación, ya que había que sacar mucho material por orificios muy pequeños, haciendo hincapié en las falanges de los dedos.

Con respecto a la post-impresión de los dedos, decir que todos los agujeros de las falanges, los cuales serán los pares R o articulaciones, tuvieron que ser ampliados mediante un taladro *Dremel* con una broca de 2 milímetros. Gracias a esta ampliación, posteriormente en el ensamblaje, pude introducir los ejes que he elegido, ya que la impresora que utilicé no era suficientemente precisa y los dientes que acoplaban con el servo no estaban bien acabados.

Para finalizar con las piezas, realizaremos un pulido de las zonas que veamos más desmejoradas, pero en especial, a las superficies en las que, más tarde, pegaremos alguna pieza. El hecho de hacer esto se debe a que una superficie lijada siempre gana adherencia y, por lo tanto, la unión de las piezas pegadas será más fuerte.

Un dato importante en cuanto al acabado final de los dedos es que el roce entre las partes de las articulaciones tiene que ser mínimo, en caso de ser así, deberemos lijar ambas superficies y reducir un poco el espesor, reduciendo así el rozamiento. Además, deberemos lijar las curvas de dichas articulaciones, para que así quede una superficie totalmente regular, en vez de escalonada. Estos diminutos escalones se producen al no haber impreso las piezas a máxima calidad y por la anisotropía en la dirección Z, explicada anteriormente en el apartado de la impresión 3D (*Apartado 4*).

7. ENSAMBLAJE

Una vez hemos trabajado y preparado todas las piezas, el siguiente paso es el ensamblaje del prototipo. Al igual que en los apartados anteriores, dividiré la explicación por bloques según los pasos que he seguido.

7.1. Guante

Como ya mencioné anteriormente, el guante consta de dos partes, una que contendrá todo lo referente a sensores, y otra lo referente al circuito. A continuación, explicaré como he llegado a conseguir el dispositivo de captación de movimiento.

7.1.1. Sensores de flexión

Para el montaje de los sensores lo primero que tenemos que tener claro es el guante que queremos usar, uno que se acople bien a tu mano, sin quedar suelto, ya que no captaría bien el movimiento, ni demasiado ceñido, por el hecho de poder dañar los sensores o estropear el montaje, tanto al ponértelo como al quitártelo.

Una vez hemos elegido el guante, tenemos que realizar las medidas para más tarde realizar el cosido del sensor. Para ello, nos lo pondremos y apoyaremos los sensores sobre el guante, de uno en uno. Cuando ya lo hayamos puesto, cerraremos el dedo correspondiente e intentaremos que el sensor acompañe el movimiento. Ahora, devolveremos el dedo a la posición inicial, marcando el inicio del sensor, aproximadamente a la altura de la mitad de la uña.

Teniendo el inicio marcado, y habiendo probado un par de veces que cuadre con el movimiento, realizaremos marcas a los laterales siguiendo la trayectoria que deberá seguir y el ancho del sensor. Al igual que hemos marcado el primer dedo, realizaremos el mismo procedimiento con el resto.

Este paso es muy subjetivo ya que no hay una posición exacta para que vaya perfecto, eso sí, más tarde tendremos que realizar los ajustes necesarios en el código del programa haciendo lecturas de los dedos en las diferentes posiciones. Además, debemos tener en cuenta que las posiciones y referencias que yo he escogido han sido tomadas respecto a mi mano y al tamaño del sensor que yo he escogido.

Una vez tengamos todas las marcas hechas, realizaremos el cosido basándonos en las referencias pintadas. Algo importante que cabe mencionar es que dicho cosido es recomendable que se encuentre en las articulaciones, para que así capte éstas con la mayor precisión posible. Además, deberemos añadir un punto de hilo al inicio del sensor, a mitad de la uña, para darle un añadido en cuanto a fijación y para evitar que se mueva lateralmente. Es decir, tendremos en cada dedo una sutura al inicio de la banda en la punta del dedo, otra en la primera y segunda articulación y la última a la altura del nudillo.

En mi caso, tendremos la banda sujeta en cuanto a desplazamientos laterales y esta solo podrá resbalar hacia delante y hacia detrás puesto que tendremos un poco de exceso de banda en el nudillo.



ILUSTRACIÓN 31: 'MONTAJE SENSOR DE FLEXIÓN'

Adjunto la imagen correspondiente a las costuras (*Ilustración 31*). Más adelante, al acabar el apartado, se adjuntará una foto de cómo ha quedado mi diseño final (*Ilustración 35*).

7.1.2. Circuito

Haciendo referencia a la parte electrónica del ensamblaje, decir que a continuación adjuntaré el modelo hecho por ordenador (*Ilustración 32*), con sus respectivas conexiones, y en el cual me basaré para la explicación. Además, adjunto una leyenda (*Leyenda 6*) para poder identificar los componentes con mayor facilidad.

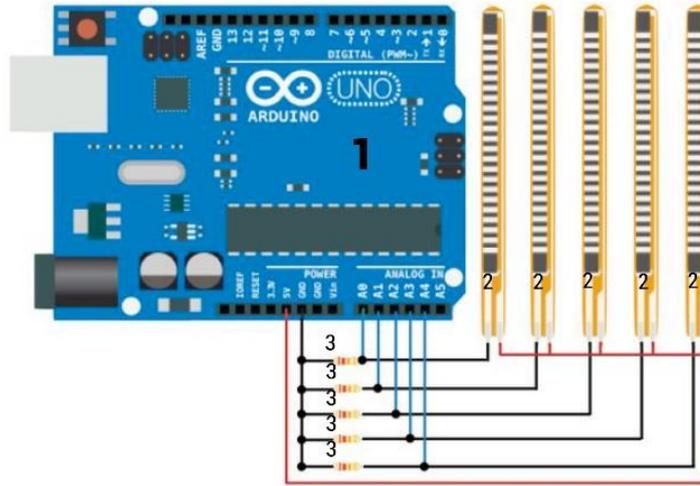


ILUSTRACIÓN 32: 'CIRCUITERÍA SENSOR DE FLEXIÓN'

Tal y como expliqué en el apartado de Diseño del prototipado (*Apartado 4*), las conexiones son iguales que para un único sensor, pero en este caso, para cinco, una por dedo.

LEYENDA 6

Número	Nombre
1	Arduino UNO
2	Sensores de flexión
3	Resistencias 22 kΩ

En primer lugar, como podemos observar, los sensores están alimentados por la placa Arduino Uno, de forma que como es lógico, realizaremos la conexión entre la salida de 5 V y el polo positivo de dicho sensor.

Con respecto al polo negativo, éste podríamos decir que hace la transferencia de los datos, por lo tanto, deberá ir conectado a una entrada analógica y a su vez al ground (GND). Como expliqué anteriormente (5.2.2), para poder hacer la medición de la resistencia, necesitaríamos un divisor de tensión, en este caso haciendo uso de una resistencia de 22 kΩ, el cual situaremos entre el ground del sensor y el ground que conectaremos al microcontrolador.

Los pines seleccionados para las entradas analógicas serán los A0, A1, A2, A3 y A4, de forma que cada conexión reciba los datos de los movimientos de cada dedo.

Existe la posibilidad de realizar las conexiones en una board temporal, sin embargo, yo decidí realizar la soldadura en una perfboard. Haciendo referencia a la ésta, el procedimiento se divide en cuatro pasos. En primer lugar, calentaremos la pata del componente con el soldador. A

continuación, calentaremos el material, en nuestro caso estaño, dejándolo caer sobre la pata y la placa, formando así la unión. En tercer lugar, retiraremos el soldador del material de soldadura, a ser posible dejando ésta en forma de cono para disipar el calor. Por último, dejaremos que se enfríe y se solidifique (apenas 1 ó 2 segundos).

Una vez hemos realizadas todas las soldaduras, tendremos el circuito hecho. Las siguientes imágenes (*Ilustración 33*) hacen referencia a cómo quedó mi circuito tras soldarlo.

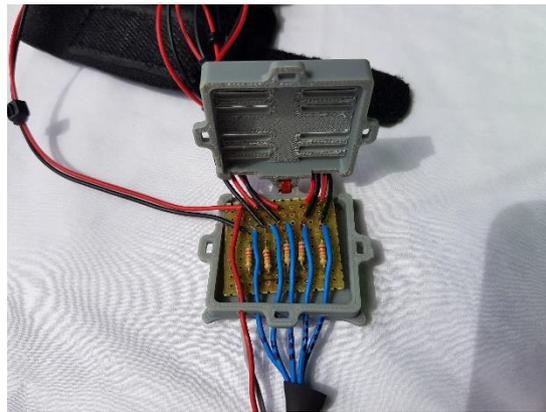


ILUSTRACIÓN 33: 'CIRCUITO'

Como añadido, aunque ya lo expliqué con anterioridad (5.2.2), diseñé una caja donde resguardar dicho circuito y a su vez darle un añadido estético. Ahora, lo único que tendremos que hacer una vez ésta haya sido impresa, es introducir el circuito extrayendo los cables correspondientes por los orificios pertinentes, de forma que éstos no se crucen. Para finalizar con la caja, pondremos la tapa de y la cerraremos con bridas. El resultado final del circuito se puede ver en la *ilustración 34*.

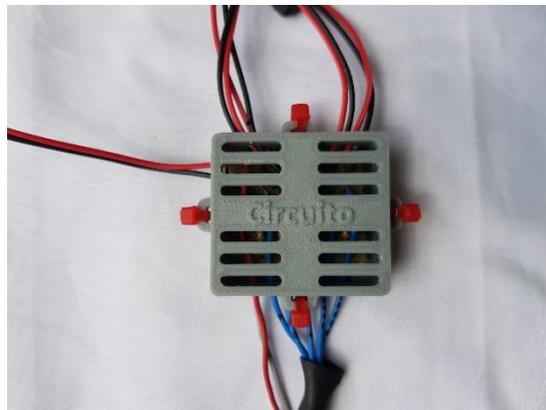


ILUSTRACIÓN 34: 'CAJA DE CIRCUITO'

Con respecto a la distribución, no tiene porqué ser exactamente así, sin embargo, yo quise darle espacio entre los componentes simplemente porque era la primera vez que soldaba y quería mantener una distancia de seguridad por si la soldadura se agrandara.

Para concluir esta parte del montaje, lo único que nos quedará por hacer es situar la caja del circuito sobre el dorso de la palma y realizar un cosido, haciendo uso de los agujeros de las esquinas, para así asegurarnos de que esté fijo y no se mueva mientras usamos el prototipo. En caso de que los cables que posteriormente uniremos a los sensores sean muy largos, siempre podremos optar por realizar el cosido de dicha caja a una muñequera o goma textil, para acoplárnosla a la muñeca o antebrazo.

Una vez todos los pasos hayan sido realizados, habremos conseguido el sistema de captación de movimiento. A continuación, adjunto la imagen (*Ilustración 35*) del resultado final de esta parte del prototipo.



ILUSTRACIÓN 35: 'MONTAJE FINAL GUANTE'

7.2. Brazo

La siguiente parte que montaremos será el conjunto del brazo. Para ello, enunciaré los pasos que yo seguí e iré explicando el método llevado a cabo.

Antes de nada, nos aseguremos que todas las piezas están bien impresas, y a su vez que hemos limpiado bien todo el material sobrante de la impresión, como pueden ser soportes o material que simplemente ha sido creado por exceso de material. Todo ello lo encontraremos mejor explicado en el apartado anterior (*Apartado 6*) donde ya expliqué su fabricación y acabado.

Ahora sí, los pasos a seguir son:

Con respecto a la longitud, lo que hice fue introducir cada barra en su articulación y realizar marcas en la varilla, para a posteriori, cortar el sobrante con una sierra, sujetándolo con una pinza de mesa.

Para finalizar realizaremos pruebas en todas las articulaciones y modificaremos cada uno de los ejes para que se acople a cada dedo, como lijar las puntas de las varillas, acortarlas y darle un poco de holgura entre las piezas que forman la articulación para favorecer el movimiento de abrir/cerrar el dedo.

3) Ensamblar los dedos

Ahora que ya tenemos las falanges y los ejes preparados, tan solo deberemos organizar las partes dependiendo del dedo al que pertenezcan y empezar a acoplar las articulaciones.

Una vez estemos seguros de a que parte corresponde cada pieza, cerraremos los pares con las barras de los remaches, creando así un eje fijo de dicha articulación.

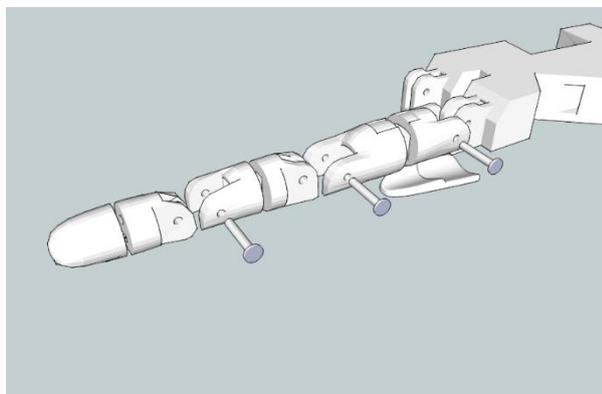


ILUSTRACIÓN 37: 'MONTAJE DE UN DEDO'

Una vez hayamos hecho esto, ya podemos apreciar como anatómicamente el dedo funciona y se articula de la misma manera que un dedo humano.

4) Modificar los ejes de la palma y muñeca

Al igual que para los dedos, en la palma tenemos varias articulaciones a las cuales hay que darles un eje, además de la muñeca.

Para este caso en concreto, InMoov nos proporciona unas barras de la longitud y diámetro adecuado, para así imprimirlas en 3D. Tras

probar esta opción, fue descartada por completo, ya que éstas se partían con facilidad, así que tomé las medidas adecuadas y opté por usar tres tornillos, uno para las sujeciones de los dedos anular y meñique, otro para el pulgar y otro para la muñeca.

El inconveniente de mi método fue que, tras buscar en varias tiendas, en ninguna de ellas tenían dos de los tornillos que necesitaba, ya que uno de ellos tenía una longitud no muy común, y el otro debería tener una cabeza hexagonal más pequeña.

Visto que no podía conseguirlos de forma convencional, decidí modificarlos de forma que se acoplaran a mi modelo. A continuación, adjunto una imagen (*Ilustración 38*) con la numeración de los tornillos, para poder referirme a ellos con propiedad.

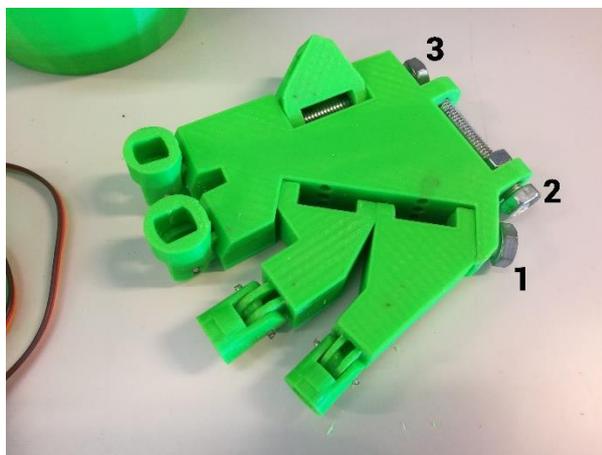


ILUSTRACIÓN 38: 'TORNILLOS ANTES DE MODIFICARLOS'

Las soluciones para adaptar los tornillos al diseño fueron:

- Tornillo 1: Al introducirlo en el agujero correspondiente, podía observar cómo le sobraban unos cm. de longitud, así que lo introduje hasta llegar a la tuerca, hice una medición de la distancia sobresalida, extraje el tornillo, trasladé la medida al final, y serré dicho trozo sobrante. De esta forma obtuve el tornillo con la longitud deseada.
- Tornillo 2: No tuve que realizar ninguna modificación, ya que la longitud no me influía para nada y el tornillo que necesitaba estaba totalmente normalizado.
- Tornillo 3: El problema que me surgió con este tornillo fue que la cabeza de éste era más grande que el agujero que InMoov había designado para las barras, de modo que, como máximo, la cabeza

hexagonal podía estar inscrita en una circunferencia de 12 mm de diámetro. Mi solución para esto fue serrar la cabeza, de modo que el único inconveniente que me aparecería sería la incomodidad de no haber agarre a la hora de atornillar y desatornillar.

A continuación, adjunto una tabla (*Tabla 8*) que sintetiza las operaciones hechas para obtener los tornillos deseados y así poderlos usar como ejes de las articulaciones de la palma. Además, una imagen de cómo quedaría el resultado final (*ilustración 39*).

TABLA 8: 'OPERACIONES TORNILLOS'

<i>Tornillo</i>	ANTES	Operación	DESPUÉS
1	D8 L80	Serrar longitud sobrante	D8 L77
2	D8 L55	Ninguna acción realizada	D8 L55
3	D8 L60	Serrar cabeza hexagonal	D8 L60 (Sin cabeza hexagonal)

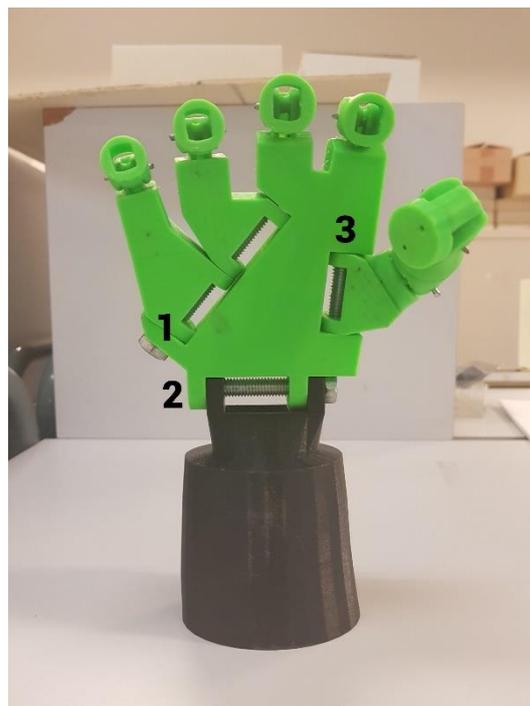


ILUSTRACIÓN 39: 'TORNILLOS DESPUÉS DE MODIFICARLOS'

5) Ensamblar la palma

Al igual que con los dedos, una vez tenemos los ejes, ensamblaremos la muñeca, de forma que dotaremos a ésta con dos pares R. En las siguientes ilustraciones se muestra dónde y cómo deben ir insertados los tornillos, en este caso los tornillos 1 y 3.

Antes de nada, deberemos introducir dos tuercas de diámetro 8 (D8) en los agujeros correspondientes para ellas. Para identificar los agujeros sólo hace falta observar el dorso de la palma y los localizaremos fácilmente.

Para la colocación del tornillo 1, debemos insertarlo por la parte izquierda de la mano, de forma que atraviese las sujeciones de los dedos anular y meñique, hasta llegar a la tuerca, la cual evitará que este tornillo se salga.

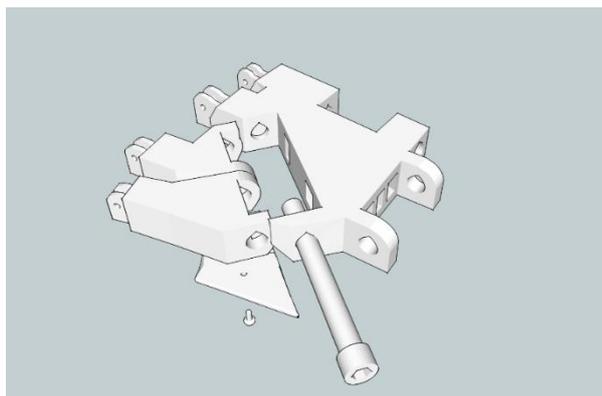


ILUSTRACIÓN 40: 'ENSAMBLAJE 1 DE PALMA'

En el caso del tornillo 3, lo introduciremos de forma vertical por la parte derecha, ayudándonos con unos alicates, hasta que se introduzca por completo y quede sujeto por la tuerca. Este eje deberá atravesar la primera pieza del dedo pulgar, de forma que simula su correspondiente articulación.

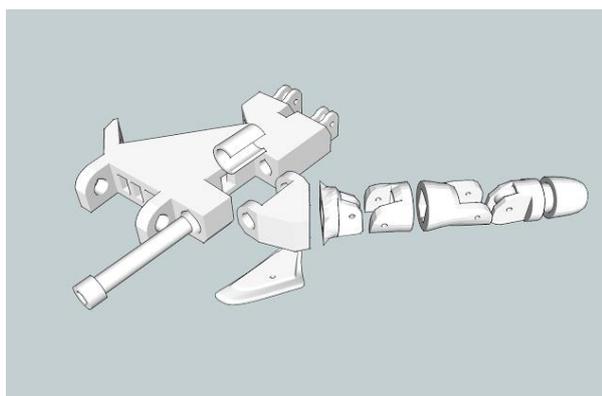


ILUSTRACIÓN 41: 'ENSAMBLAJE 2 DE PALMA'

6) Unir los ensamblajes de los dedos y la palma

Una vez tengamos la palma y los dedos ensamblados, lo único que deberemos hacer será, haciendo uso de los ejes hechos a partir de los

remaches (*Paso 2*), introduciremos cada dedo en su correspondiente articulación de la palma.

A continuación, encajaremos las varillas, que teníamos preparadas con anterioridad, en los agujeros, de forma que creemos el par R existente entre cada uno de los dedos y la palma, que formarán el nudillo.

Como añadido, podemos atornillar los embellecedores en sus sitios correspondientes, al igual que pegar los protectores de los nudillos. Es importante, que no peguemos las puntas de los dedos, ya que si lo hacemos no podremos realizar el siguiente paso.

En la siguiente imagen podemos observar el modelo de cómo debería quedar la mano, tanto por la palma como por el dorso, a excepción de que la primera pieza de cada dedo (yema) no deberá ser pegada aún.

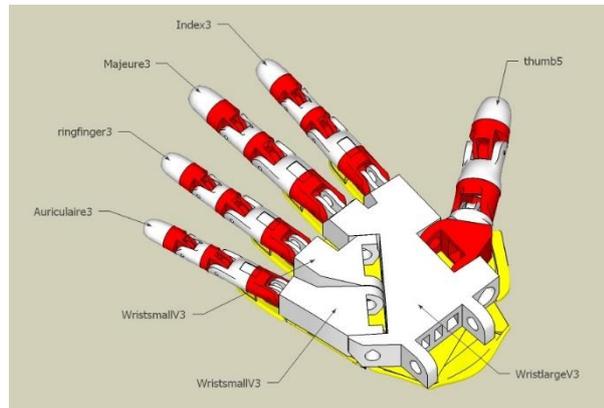


ILUSTRACIÓN 42: 'RESULTADO FINAL MANO (VISTA DE PALMA)'

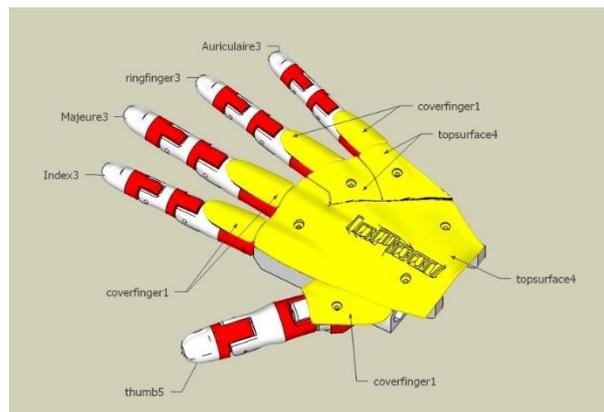


ILUSTRACIÓN 43: 'RESULTADO FINAL MANO (VISTA DORSO)'

7) Pasar el cableado por la mano

En este paso, lo que haremos será pasar todo el cableado desde la punta de la mano hasta la muñeca, pasándolo por los orificios correspondientes.

Para ello, introduciremos un cable, desde la punta del dedo, a través de los agujeros, hasta extraerlos por la muñeca. El camino a seguir es muy intuitivo, además debemos evitar en todo momento que las cuerdas se crucen, pues será importante más adelante saber qué extremo de la cuerda contrae o extiende el dedo y anclarlo correctamente a la rueda del servo.

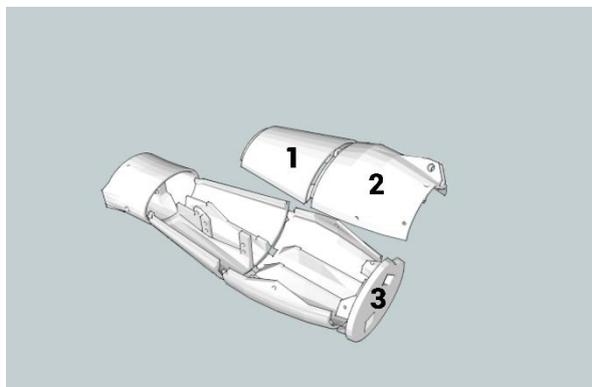
Con respecto al cable utilizado, en mi caso he usado una cuerda textil fina, ya que el cable de pescar con los usos cede y se va desajustando poco a poco, de forma que se iría descalibrando el sistema, y que, por lo tanto, con el tiempo dejaría de ser tan fiable.

8) Pegado de la estructura del brazo

Dejando la mano de lado, procederemos al pegado de las tres partes estructurales del prototipo, como son la muñeca, la caja de servos, y la unión entre ambas.

Para una buena fijación, primero lijaremos las superficies que vayamos a pegar. A continuación, aplicaremos el pegamento, y rápidamente, uniremos las partes y lo dejaremos reposar unas cuantas horas para que se seque y quede totalmente fijo.

Con respecto al orden de pegado, es indiferente, aunque en mi caso primero pegué el antebrazo a la caja de servos y, posteriormente, a la muñeca.



LEYENDA

Número	Nombre
1	Cub. Antebrazo
2	Cub. Caja de servos
3	Cub. trasera

ILUSTRACIÓN 44: 'MONTAJE ANTEBRAZO'

En la imagen anterior (*Ilustración 44*), podemos observar cómo debe quedar el brazo. Además, tal y como se ilustra, las cubiertas del antebrazo, la caja de servos y la trasera, no las debemos pegar, de forma que, si quisiésemos acceder a su contenido para ajustar los servos o cualquier otra cosa, podríamos sin ningún problema. Posteriormente, éstas estarán fijadas mediante tornillos.

9) Montar el soporte en la caja de los servos

Una vez tenemos la estructura base, pasaremos a trabajar con los servos, donde en primer lugar atornillaremos la cama sobre la que irán sujetos.

Para ello, la posaremos sobre la caja de servos y enseguida identificaremos cuales son los agujeros correspondientes a cada tornillo.

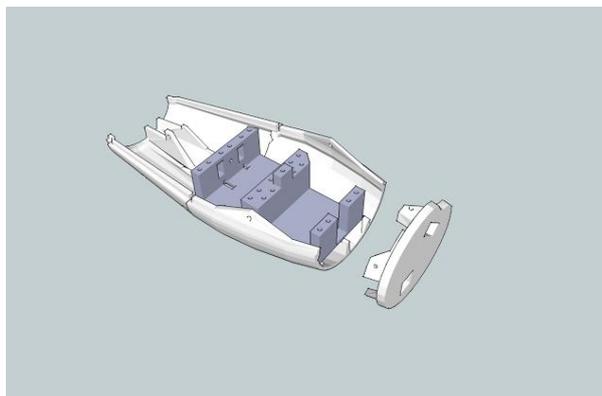


ILUSTRACIÓN 45: 'MONTAJE CAMA DE SERVOS'

En la anterior ilustración (*Ilustración 45*) podemos ver cómo debe quedar dicho soporte.

10) Montar los servos en el soporte

Ahora que ya tenemos la cama unida a la caja, atornillaremos los servos en ésta. Haremos uso de cuatro tornillos D3 L20 mm por cada motor, por lo tanto, usaremos un total de 20. El objetivo de éstos será la fijación de los actuadores, impidiendo que vibren y se muevan cuando realicen la fuerza.

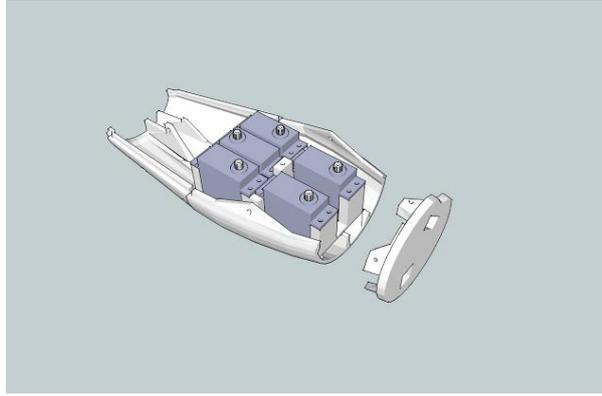


ILUSTRACIÓN 46: 'MONTAJE SERVOS'

Como podemos observar en la imagen 46, deberemos poner los servos de forma alternada, para así evitar que choquen los discos cuando los acoplemos.

11) Montar las guías del cableado

A continuación, deberemos realizar el montaje de las guías, para a posteriori, poder conectar todo el cableado. La función será distribuir los cables por grupos, dependiendo de al dedo que corresponda cada uno. Para el ensamblaje de las guías, éstas van ancladas a la cama de los servos con 2 tornillos D3 L20 mm, uno en cada guía.

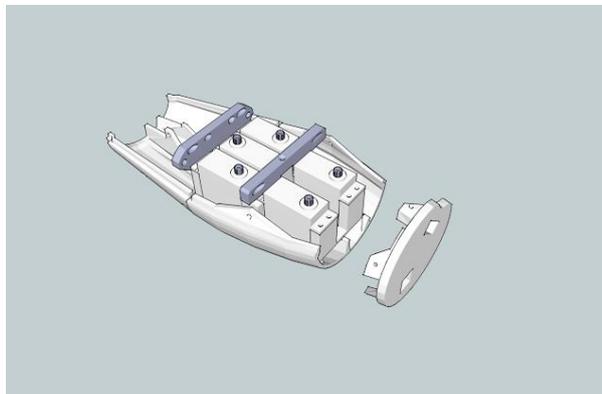


ILUSTRACIÓN 47: 'MONTAJE GUÍAS DEL CABLEADO'

Tal y como podemos ver en la ilustración anterior, la primera guía, se encarga de distribuir los cables de la primera fila de servos, correspondientes a los dedos índice, corazón y anular. La segunda es la encargada de los dedos pulgar y meñique, distribuyendo así, la siguiente fila de motores.

12) Montar los discos en los servos

Como último paso preparatorio para poder montar el cableado será acoplar los discos en los servos, haciendo uso de los tornillos proporcionados por el fabricante del propio servo.

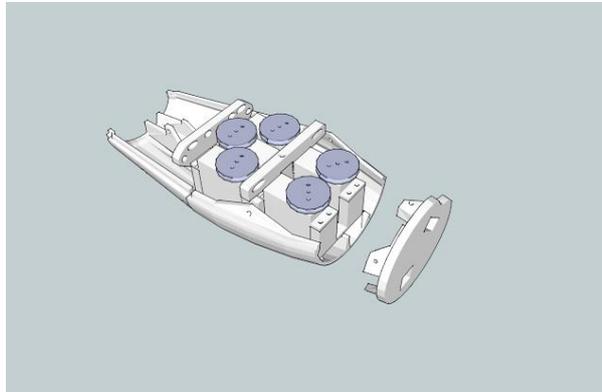


ILUSTRACIÓN 48: 'MONTAJE DISCOS'

Como ya expliqué con anterioridad y podemos ver en la imagen anterior (*Ilustración 48*), gracias a la distribución empleada los discos no se tocan y pueden girar libre e independientemente.

Con respecto a la posición de los agujeros, no existe una orientación exacta para que los discos funcionen mejor, sin embargo, en mi caso, la disposición fue la mostrada en la imagen 48, ya que, en mi opinión, es como mejor se ajusta a la hora de estirar el cable y más estético queda.

Cabe mencionar que, antes de montar los discos, realicé un ajuste en los servos mediante un programa de calibración (8.2). Mediante este ajuste, puse todos los servos en la posición de 0 grados, de forma que, a la hora de introducir cada disco en su respectivo motor, podamos conocer exactamente la posición en la que se encuentra el servo.

Como ultima sugerencia, recomiendo que una vez el disco este en la posición que deseamos, se le aplique unas gotas de pegamento en la unión, para realizar una especie de 'soldadura' entre el tornillo y el disco, de forma que lo que gire uno lo hará el otro, evitando así cualquier posibilidad de deslizamiento entre ellos, evitando así que se desajusten las posiciones.

13) Instalación del cableado

Nos encontramos ante uno de los pasos más delicados y laboriosos, en el que instalaremos el cableado del *Paso 7*, pero esta vez desde la muñeca hasta los servos, pasando por las guías y acabando en los discos.

Antes de nada, adjuntaré una imagen ilustrativa (*Ilustración 49*) de cómo se debe hacer la distribución del cableado. Añadir que no tenemos que tener en cuenta el servo que se muestra azul, ya que yo no he motorizado la muñeca.

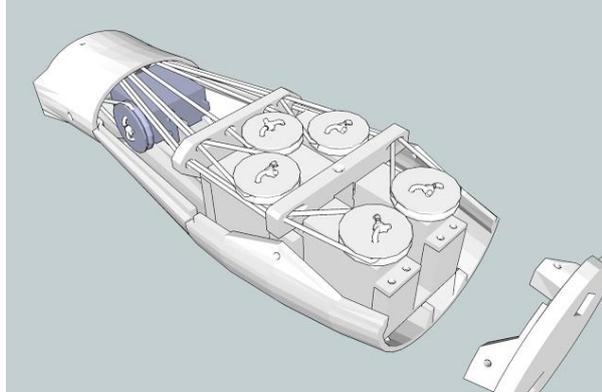


ILUSTRACIÓN 49: 'MONTAJE CABLEADO'

Antes de introducir las cuerdas debemos, en primer lugar, hacer unas pruebas en el servo, teniendo en cuenta que el servo central está orientado hacia delante y los otros cuatro están orientados hacia atrás. Ahora bien, nuestros servos tienen un rango de giro que va de 0 a 180 grados, primero colocaremos cada servo a 0 y procederemos al cableado. Teniendo en cuenta que el giro que debe hacer la contracción es el antihorario, uniremos el extremo de la cuerda que haga la contracción al agujero que se encuentre más a la izquierda.

En cuanto al montaje en sí, las cuerdas deben ir tensas, sin entrecruzarse y cada una por su respectivo agujero. Viendo la imagen y sabiendo lo anterior, este paso es muy intuitivo e ilustrativo, en donde tan solo debemos tener en cuenta el sentido del servo y el extremo de contracción.

A continuación, las cuerdas deben ser introducidas por los agujeros que hay a los laterales de los discos, las cuales acabarán en la parte superior de éstos. Después, tensaremos los cables tanto como veamos oportunos, de forma que no cuelguen y los dedos queden parcialmente rígidos. Para finalizar, una vez tengamos la configuración deseada, realizaremos un nudo sobre el tornillo, evitando así que se pueda salir la cuerda del disco.

Más adelante, le aplicaremos una gota de pegamento en el nudo para asegurar que no se deshaga ni se mueva, sin embargo, no lo haremos

ahora para, a posteriori, poder realizar un ajuste más fino una vez tengamos el prototipo acabado y el programa listo.

A la altura a la que nos encontramos, mientras nuestro prototipo quede como la imagen anterior (*Ilustración 49*) es suficiente. El ajuste correcto se hará más adelante mediante prueba y error, una vez el programa funcione correctamente.

14) Realizar el conexionado del guante

Este paso es muy sencillo, ya que lo más importante de éste se realizó previamente en el ensamblaje del guante (7.1).

Ahora lo que único que deberemos hacer es conectar cada uno de los cables asignados para la transferencia de datos en cada uno de los pines analógicos mencionados con anterioridad. Los pines que yo seleccioné fueron A0, A1, A2, A3 y A4, donde cada uno corresponde a un sensor asociado a cada uno de los dedos.

15) Realizar el conexionado de los servos

Realizaré el mismo método que en el apartado dedicado al ensamblaje del circuito del guante (7.1.2), adjuntaré el modelo hecho por ordenador (*Ilustración 50*), y basándome en él, explicaré las conexiones llevadas a cabo.

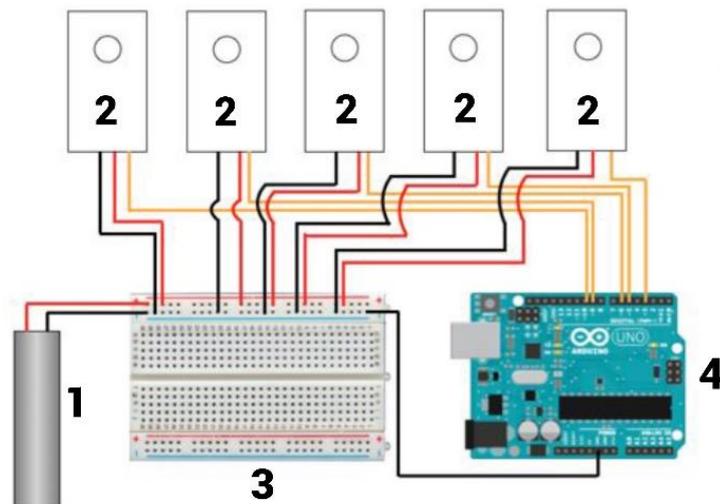


ILUSTRACIÓN 50: 'CIRCUITERÍA SERVOS'

Las conexiones, en este caso, son mucho más fáciles, pero más numerosas. Partimos de que las únicas conexiones necesarias son dos, las correspondientes a la alimentación, y las de datos.

Si nos referimos a las de alimentación, necesitaremos una board, a la cual podamos conectar la

alimentación externa, la alimentación de cada servo y todas sus respectivas conexiones ground, incluyendo la del Arduino. Para una mejor comprensión véase el modelo 50.

En cuanto a datos nos referimos, tan sólo deberemos hacer las conexiones desde cada uno de los servos a las entradas digitales de nuestra placa. En nuestro caso, hemos seleccionado los pines 4, 6, 7, 9 y 10.

Para identificar dónde debe ir cada uno de los cables de las conexiones de los servos, tan sólo tenemos que conocer cada uno de los colores. Para los datos, usaremos el color amarillo, y para la alimentación, usaremos los colores estándar, rojo como positivo y negro como negativo.

16) Realizar las pruebas y los ajustes

Una vez el montaje ha concluido, y el Arduino tiene el programa cargado, realizaremos las pruebas pertinentes.

En primer lugar, conectaremos la fuente de alimentación, e iremos contrayendo los dedos uno a uno, comprobando que la respuesta por parte de la mano es correcta. No tienen porque funcionar perfectamente los dedos, ya que aún no hemos ajustado las cuerdas, sin embargo, los servos sí tienen que responder de forma inmediata imitando al dedo flexionado.

En segundo lugar, y una vez ya hemos comprobado que todo funciona como debe, extenderemos nuestra mano, con el guante puesto, hasta una posición natural. Ahora, aflojaremos los nudos y dejaremos los dedos del prototipo en la posición más parecida a nuestra mano, recordando que la cuerda no debe estar tirante. Una vez consideremos que ambas tienen

LEYENDA 7

Número	Nombre
1	Fuente de alimentación
2	Servos
3	Protoboard
4	Arduino UNO
-	Cable de alimentación (+)
-	Cable de datos
-	Cable GND

el parecido suficiente, hacemos el nudo de nuevo, dejando esa posición acorde a nuestra posición de mano abierta.

Por último, volveremos a realizar las comprobaciones pertinentes, poniéndonos el guante y volviendo a probar dedo por dedo. Si todo concuerda perfectamente, pondremos un poco de pegamento sobre el nudo para que éste no se mueva.

En caso de que no concuerde el movimiento, se realizará una calibración a través del programa, comprobaremos en primer lugar que las cuerdas contraen el dedo a favor del servo, para evitar forzarlo o romperlo, si ésta no fuera la causa, comprobaríamos que los cables estén bien conectados a las boards y que éstos no hagan contacto con otros. Una vez comprobado esto, cargaremos de nuevo el programa y repetiremos los pasos de calibración con el programa de ayuda. Este procedimiento lo explicaré en el siguiente apartado llamado *Programación (8)*.

8. PROGRAMACIÓN

A diferencia de otros compiladores, el de Arduino te ofrece ventajas que otros no pueden darte. Con respecto al lenguaje, mucha gente piensa que este hardware libre trabaja con uno propio, pero no es así, ya que la programación se hace en C++.

La gran ventaja de usar su propio software, es el hecho de que éste te proporciona las librerías básicas de los pines de entrada y salida, al igual que de los puertos de comunicación, además de otras dedicadas a operaciones específicas. A su vez, puede parecer diferente al lenguaje estándar ya que su estructura es algo diferente.

Una vez os he introducido un poco en su entorno, en este apartado, adjuntaré los programas utilizados a lo largo del proyecto, desde el programa principal, hasta cada uno de los empleados para la calibración y medida de los dispositivos.

8.1. Programa principal

Este programa es el que ha sido cargado en el microprocesador para así poder convertir los movimientos de mi mano, en movimientos angulares de los servos, de modo que éstos realicen el movimiento de los dedos del prototipo.

```
#include <Servo.h> //Incluimos la librería del servo

//Definimos los sensores y los servos, al igual que los pines de cada
entrada.

Servo dedo1, dedo2, dedo3, dedo4, dedo5;

int servoPin1 = 3; //Pulgar
int servoPin2 = 5; //Índice
int servoPin3 = 6; //Corazón
int servoPin4 = 9; //Anular
int servoPin5 = 10; //Meñique

int flexPin1 = A0; //Pulgar
int flexPin2 = A1; //Índice
int flexPin3 = A2; //Corazón
int flexPin4 = A3; //Anular
int flexPin5 = A4; //Meñique

void setup()
{
  //Asignamos los servos a sus respectivos pines
  dedo1.attach(servoPin1); //Pulgar
  dedo2.attach(servoPin2); //Índice
  dedo3.attach(servoPin3); //Corazón
  dedo4.attach(servoPin4); //Anular
  dedo5.attach(servoPin5); //Meñique
}
```

```

    //Configuramos los pines de los servos como pines de salida
    pinMode(servoPin1, OUTPUT);
    pinMode(servoPin2, OUTPUT);
    pinMode(servoPin3, OUTPUT);
    pinMode(servoPin4, OUTPUT);
    pinMode(servoPin5, OUTPUT);

    //Configuramos los pines de los sensores de flexión como pines de
    entrada
    pinMode(flexPin1, INPUT);
    pinMode(flexPin2, INPUT);
    pinMode(flexPin3, INPUT);
    pinMode(flexPin4, INPUT);
    pinMode(flexPin5, INPUT);

}

void loop()
{
    //Definimos las variables mediante la lectura de las entradas
    analógicas (analog input variables)
    int flex1 = analogRead(flexPin1);
    int flex2 = analogRead(flexPin2);
    int flex3 = analogRead(flexPin3);
    int flex4 = analogRead(flexPin4);
    int flex5 = analogRead(flexPin5);

    // Definimos las variables 'pos' como nos interese, de forma
    proporcional a los datos que recibamos de los flexores de tensión
    (input).
    // El rango [400,700] lo he definido basándome en las lecturas de
    los sensores de flexión, mediante el programa adjuntado más adelante.
    Más tarde éstos han sido ajustados mediante prueba y error,
    dependiendo principalmente de cómo posicionemos las barras flexoras.

    int pos1 = map(flex1, 400, 700, 0, 180);
    pos1 = constrain(pos1, 0, 180);
    int pos2 = map(flex2, 400, 700, 0, 180);
    pos2 = constrain(pos2, 0, 180);
    int pos3 = map(flex3, 400, 700, 180, 0);
    pos3 = constrain(pos3, 0, 180);
    int pos4 = map(flex4, 480, 640, 0, 180);
    pos4 = constrain(pos4, 0, 180);
    int pos5 = map(flex5, 400, 700, 0, 180);
    pos5 = constrain(pos5, 0, 180);

    //Escribimos la posición de las variables 'pos' en los servos para
    realizar el movimiento que nos interesa.
    dedo1.write(pos1);
    dedo2.write(pos2);
    dedo3.write(pos3);
    dedo4.write(pos4);
    dedo5.write(pos5);
}

```

8.2. Programa de ‘Calibración de servos’

Este programa únicamente fue empleado para la colocación de todos los servos en la misma posición, de forma que, a la hora de realizar el montaje de los discos, podamos saber el ángulo en que se encontraban.

```
// Incluimos la librería para poder controlar el servo
#include <Servo.h>

// Declaramos la variable para controlar el servo
Servo servoMotor;

void setup() {
  // Iniciamos el monitor serie para mostrar el resultado
  Serial.begin(9600);

  // Iniciamos el servo para que empiece a trabajar con el pin 9
  servoMotor.attach(5);
}

void loop() {
  // Desplazamos a la posición 0°
  servoMotor.write(0);
  // Esperamos 1 segundo
  delay(1000);
}
```

8.3. Programa de ‘Medición de sensores’

El objetivo de este programa es determinar el intervalo en el que se encontraban los valores correspondientes a la mano abierta y la mano cerrada, de forma que éstos sean luego convertidos a ángulos de los servos mediante el programa principal (8.1)

```
//Declaro los pines analógicos que voy a usar
int flexPin1 = A0;
int flexPin2 = A1;
int flexPin3 = A2;
int flexPin4 = A3;
int flexPin5 = A4;

void setup() {
  //Configuro el pin del sensor como pin de entrada
  pinMode(flexPin1, INPUT);
  pinMode(flexPin2, INPUT);
  pinMode(flexPin3, INPUT);
  pinMode(flexPin4, INPUT);
  pinMode(flexPin5, INPUT);

  // Iniciamos el monitor serie para mostrar el resultado
  Serial.begin(9600);
}
```

```

void loop() {
  //Definimos las variables mediante las lecturas de las entradas
  analógicas (analog input variables)
  int flex1 = analogRead(flexPin1);
  int flex2 = analogRead(flexPin2);
  int flex3 = analogRead(flexPin3);
  int flex4 = analogRead(flexPin4);
  int flex5 = analogRead(flexPin5);

  //Muestro en pantalla los valores medidos por los sensores
  Serial.print(flex1);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(flex2);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(flex3);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(flex4);
  Serial.print(" ");
  Serial.println(flex5);
  //Pausa
  delay(100);
}

```

Una vez hemos cargado y ejecutado el programa, tomamos las medidas pertinentes, de forma que obtenemos las dos tablas siguientes:

TABLA 9: 'MEDICIONES CON LA MANO ABIERTA'

<i>ABIERTA</i>	<i>DEDOS</i>				
<i>Medición</i>	Pulgar	Índice	Corazón	Anular	Meñique
1	668	676	694	648	683
2	667	679	697	647	685
3	668	681	697	649	687
4	668	680	700	649	688
5	667	683	700	649	687
6	668	680	700	651	689
7	667	682	702	650	689
8	666	683	703	650	689
9	667	683	702	651	689
10	670	682	701	652	689
MAXIMO	670	683	703	652	689

La tabla anterior (*Tabla 9*), hace referencia a los valores medidos en la posición de la mano abierta, de forma que el valor límite que tomaremos será el más alto de cada uno de los dedos.

Esto se debe a que el intervalo que nos interesa para ajustar el programa principal debe estar acotado por, en el caso de estar la mano cerrada, el valor mínimo, y en el caso de estar abierta, el máximo.

Al igual que en la primera tabla, en la siguiente (*Tabla 10*), se hace referencia a los valores obtenidos en la posición de la mano cerrada, de forma que el valor límite que tomaremos será el más bajo de cada uno de los dedos.

TABLA 10: 'MEDICIONES CON LA MANO CERRADA'

<i>CERRADA</i>	DEDOS				
	Pulgar	Índice	Corazón	Anular	Meñique
1	575	421	418	392	379
2	572	425	419	390	380
3	574	421	419	392	377
4	577	425	418	393	378
5	577	423	417	392	380
6	576	423	419	395	381
7	575	424	420	393	382
8	576	423	422	395	379
9	574	423	420	393	382
10	577	423	420	396	379
MINIMO	572	421	417	390	377

Ahora, que tenemos los valores máximos y mínimos, crearemos un intervalo para cada uno de los dedos, tal y como se muestra en la siguiente tabla (*Tabla 11*). Éstos serán los utilizados para determinar el intervalo final dentro del programa principal.

TABLA 11: 'INTERVALOS DE CONFIGURACIÓN DE LOS DEDOS'

<i>Nº Intervalos</i>	DEDOS				
	Pulgar	Índice	Corazón	Anular	Meñique
<i>Intervalo 1</i>	[572,670]	[421,683]	[417,703]	[390,652]	[377,689]
-	Si aplicamos un margen de seguridad:				
<i>Intervalo 2</i>	[580,680]	[430,690]	[425,710]	[400,660]	[385,695]

9. PRESUPUESTO



Proyecto Final de Grado

Camí de Vera, s/n, 46022, València
627927838
fradocla@etsid.upv.es
www.upv.es

Factura

Factura n.º: 1
Fecha: 11/09/2017
Condiciones: 0 días
Vencimiento: 11/09/2017

Facturado a:

Descripción	Cantidad	Tarifa	IVA	Importe
Servo MG996	5	7,70 €	21%	38,50 €
Resistencia 22 kOhm (100 Uds.)	1	0,86 €	21%	0,86 €
Fuente de alimentación conmutada 30W 3V-12V AC/DC	1	13,88 €	21%	13,88 €
Arduino UNO (Oficial)	1	21,00 €	21%	21,00 €
Guantes Dexter	1	9,95 €	21%	9,95 €
Remaches D3x6 mm (100 Uds.)	1	2,40 €	21%	2,40 €
Tornillo D8 L80	1	1,22 €	21%	1,22 €
Tornillo D8 L55	1	1,22 €	21%	1,22 €
Tornillo D8 L60	1	1,22 €	21%	1,22 €
Tornillo D3 L20	20	0,17 €	21%	3,40 €
Sensor de flexión 4.5" (UPS Worldwide Shipping incluido)	5	16,69 €	21%	83,45 €
Kit de Cables para Arduino (120 Uds.)	1	7,69 €	21%	7,69 €
Placa Perfboard (50x70 mm)	1	0,50 €	21%	0,50 €
Placa Protoboard (400 Ptos.)	1	1,59 €	21%	1,59 €
Cuerda textil fina (6 m)	1	3,75 €	21%	3,75 €
Bandeja "Dedos"	73	0,20 €	21%	14,60 €
Bandeja "Piezas bajas"	104	0,20 €	21%	20,80 €
Bandeja "Piezas pequeñas"	77	0,20 €	21%	15,40 €
Bandeja "Piezas grandes"	186	0,20 €	21%	37,20 €

Descripción	Cantidad	Tarifa	IVA	Importe
Bandeja "Últimas piezas"	84	0,20 €	21 %	16,80 €
Bandeja "Caja circuito"	16	0,20 €	21 %	3,20 €
Departamento técnico [450 h]	18,75 días	204,00 €	21 %	3.825,00 €
Amortización de software [24 h]	1 día	6,05 €	21 %	6,05 €
Amortización de útiles [450 h]	18,75 días	0,03 €	21 %	0,56 €
Amortización de equipos 3D [89,6 h]	3,73 días	0,83 €	21 %	3,10 €

Subtotal (sin IVA)	4.133,34 €
Descuento	108,00 €
Incluye IVA 21 % (3.326,72 €)	698,62 €
Total	4.025,34 €
Pagado	4.025,34 €

Pagado

Total a pagar 0,00 €

10. CONCLUSIÓN

A estas alturas, tras muchos trabajos entregados, prácticas con sus respectivas memorias, informes, entre otras, sé que lo que diferencia de un buen trabajo a uno sin más es aquello que has podido aprender al realizarlo, los conocimientos que has podido absorber, recapacitar e interiorizar. Por lo tanto, ahora procederé, entre otras cosas, a explicar aquellas destrezas adquiridas, además del futuro que este proyecto podría tener a título personal.

En primer lugar, hablaré de las dificultades que he podido encontrar como futuro ingeniero mecánico y cómo he podido enfrentarme a ellas. Para ello, empezaré mencionado que, como ingeniero mecánico que seré, he encontrado bastantes dificultades en cuanto al apartado electrónico, ya que a lo largo del grado no es de las destrezas que más se desarrolla, aunque en mi opinión, no debería ser así. Sin embargo, es un campo que, al igual que la robótica y la programación, me apasiona, pero más aún si los campos mencionados anteriormente se entremezclan con lo impartido a lo largo de estos cuatro años.

Por tanto, con dedicación, trabajo y ayuda de gente que conoce del ámbito, he sido capaz de sobrepasar dichas dificultades, destacando complicaciones como insuficiencia de voltajes, ruido eléctrico, temperaturas en el cableado, entre otras.

En segundo lugar, hablaré sobre el apartado de fabricación del proyecto, en donde gracias a éste, he aprendido muchísimo sobre el campo de la impresión 3D, llegando al punto de que posiblemente realice el montaje de una impresora para uso propio. También he aprendido mucho en cuanto a sus materiales, mantenimiento de éstas, pasos a seguir para realizar una buena pieza, entre otras cosas, ya que he participado íntegramente dentro de dicho departamento para fabricar mis piezas.

En tercer lugar, todo lo aprendido sobre Arduino y el enorme mundo que gira a su alrededor, ya que existen miles de dispositivos y módulos compatibles con él, junto a la gigantesca comunidad que éste abarca, lo cual hace que constantemente estés aprendiendo y que puedas desarrollar tus ideas sobre la mesa.

Con respecto al futuro de este proyecto, sé que no va a quedar en lo mostrado, ya que a título personal me gustaría seguir trabajando en él e ir mejorándolo paulatinamente. Además, si pudiese en un futuro, junto a la impresora que tengo en mente montar, estaría dispuesto a avanzar con el resto del humanoide. Pero dejando los motivos personales a un lado, este proyecto

podría evolucionar en prototipos tan interesantes como prótesis de efecto espejo, para acciones que requieran dos manos y en las que ambas realicen los mismos movimientos, como sujetar una bandeja, entre otras muchas opciones. Además, si fuésemos capaces de hacer lectura de los estímulos nerviosos, tras un proceso de adaptación, podríamos obtener una prótesis impresa en 3D, de bajo coste, fácil reparación y reposición, de modo que, si algo te fallase o se rompiese, tú mismo podrías auto reproducir la parte de la prótesis que te interesase.

Para concluir el trabajo, me gustaría decir que sin duda puedo asegurar que éste me ha ayudado a aprender y desarrollar capacidades muy interesantes dentro del ámbito mecánico, pero también electrónico. Ambos campos muy interesantes por separado, pero que, si eres capaces de unirlos y aprovechar todo lo que éstos pueden darte, podrás ser capaz de hacer realidad casi cualquiera de tus ideas.

Tan pronto como acaben de leer esta frase, acabará mi proyecto final de grado, y con ello una gran etapa de aprendizaje. Pero eso sí, empieza una mucho más larga y satisfactoria como ingeniero mecánico, en la que ojalá nunca deje de aprender.

11. BIBLIOGRAFÍA

Wikipedia.org. (2017). Robot. [online] Recuperado de: <<https://es.wikipedia.org/wiki/Robot>> [Acceso 1 Jul. 2017].

Viso, E. (2017). El origen de la palabra robot. [online] Xatakaciencia.com. Recuperado de: <<https://www.xatakaciencia.com/robotica/el-origen-de-la-palabra-robot>> [Acceso 1 Jul. 2017].

ROBOTICA. (2017). EL PRIMER ROBOT DE LA HISTORIA. [online] Recuperado de: <<https://robotica902.wordpress.com/2013/05/19/el-primer-robot-de-la-historia/>> [Acceso 1 Jul. 2017].

Wikipedia.org. (2017). Autómata (mecánico). [online] Recuperado de: <[https://es.wikipedia.org/wiki/Aut%C3%B3mata_\(mec%C3%A1nico\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Aut%C3%B3mata_(mec%C3%A1nico))> [Accessed 1 Jul. 2017].

M.monografias.com. (2017). Aplicaciones de Robots en el campo de la Medicina - Monografias.com. [online] Recuperado de: <<http://m.monografias.com/trabajos93/aplicaciones-robots-campo-medicina/aplicaciones-robots-campo-medicina.shtml>> [Acceso 1 Jul. 2017].

Wikipedia.org. (2017). Estereolitografía. [online] Recuperado de: <<https://es.m.wikipedia.org/wiki/Estereolitografía>> [Acceso 20 Jun. 2017].

Wikipedia.org. (2017). Modelado por deposición fundida. [online] Recuperado de: <https://es.m.wikipedia.org/wiki/Modelado_por_deposici%C3%B3n_fundida> [Acceso 20 Jun. 2017].

Wikipedia.org. (2017). Impresión 3D. [online] Recuperado de: <https://es.m.wikipedia.org/wiki/Impresi%C3%B3n_3D> [Acceso 20 Jun. 2017].

Centro de análisis y prospectiva del gabinete técnico de la Guardia Civil. (2016). Impresoras 3D (Nota de futuro 2/2016). Recuperado de: <http://intranet.bibliotecasgc.bage.es/intranet-tmpl/prog/local_repository/documents/17854.pdf>

M200, Z. (2017). Impresora 3D: Zortrax M200. [online] Impresora 3D. Recuperado de: <<http://www.impresora3dalia.com/es/impresoras-3d/zortrax-m20>> [Acceso 21 Jun. 2017].

Makemike.com. (2017). Z-ULTRAT NUDE | Make Mike. [online] Recuperado de: <<https://makemike.com/z-ultrat-nude.html>> [Acceso 30 Jun. 2017].

Hxx.es. (2017). Tecnologías de impresión 3D (III): Extrusión de material | HXX. [online] Recuperado de: <<http://hxx.es/2014/12/20/tecnologias-de-impresion-3d-iii-extrusion-de-material/>> [Acceso 30 Jun. 2017].

Thingiverse.com. (2017). Hand robot InMoov by Gael_Langevin. [online] Recuperado de: <<https://www.thingiverse.com/thing:17773>> [Acceso 21 May. 2017].

Instructables.com. (2017). DIY Robotic Hand Controlled by a Glove and Arduino. [online] Recuperado de: <<http://www.instructables.com/id/DIY-Robotic-Hand-Controlled-by-a-Glove-and-Arduino/>> [Acceso 21 May. 2017].

Inmoov.fr. (2017). Hand and Forarm | InMoov. [online] Recuperado de: <<http://inmoov.fr/hand-and-forarm/>> [Acceso 23 May. 2017].

Shin, M. (2017). Proyecto Arduino I: Lectura limpia de potenciómetro para control de servomotor. [online]. Recuperado de: <<https://masamuneshin.wordpress.com/2011/04/30/proyecto-arduino-i-lectura-limpia-de-potenciometro-para-control-de-servomotor/>> [Acceso 1 Jun. 2017].

Thingiverse.com. (2017). InMoov Right Hand Solidworks Model by GadgetGuru314. [online] Recuperado de: <<https://www.thingiverse.com/thing:239361>> [Acceso 3 Jun. 2017].

Moebyus.com. (2017). ¿Cuánto cuesta imprimir tu idea en 3D? Ésta es mi experiencia. [online] Recuperado de: <<https://www.moebyus.com/blog/69-decuclis>> [Acceso 6 Jul. 2017].

Tabla de años y porcentajes de amortización para sociedades | Ayuda y Documentación de Cuéntica. (2017). Ayuda de Cuéntica., Recuperado de: <<https://ayuda.cuentica.com/anos-y-porcentaje-de-amortizacion-para-sociedades/>> [Acceso 11 Sept. 2017]

Imágenes

Ilustración de conector servo. [Figura]. Recuperado de Banggood. <<https://img.banggood.com/images/oaupload/banggood/images/5E/54/139f3635-ae6e-d7d5-01c7-70838f0f4105.jpg>>

Ilustración de Guante P5 Glove. [Figura]. Recuperado de TheVirtualRealityHQ. <<http://www.thevirtualrealityhq.com/wp-content/uploads/2016/05/Essential-Reality-P5-Gaming-Glove-Design.jpg>>

Ilustración de Protoboard. [Figura]. Recuperado de Nòmada-e. <<https://nomada-e.com/store/396/protoboard-mini-400-puntos-.jpg>>

Ilustración de perfboard. [Figura]. Recuperado de CircuitSpecialist. <<https://www.circuitspecialists.com/content/image/111731/600/64-8932-0.jpg>>

Ilustración de Arduino. [Figuras]. Recuperado de Tecnopatafisica. <http://tecnopatafisica.com/images/robotica/arduino_intro/arduino_uno_large-comp.jpg>

Ilustración de Arduino mega. [Figuras]. Recuperado de Paruro. <https://paruro.pe/sites/default/files/ArduinoMega2560_R3_Front.jpg>

Ilustración de Raspberry. [Figuras]. Recuperado de Wikipedia. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6f/Raspberry_Pi_B%2B_top.jpg>

Ilustración de fuente de alimentación. [Figuras]. Recuperado de Amazon. <https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/61jjMboZfHL._SL1000_.jpg>

Ilustración de la batería. [Figuras]. Recuperado de Amazon. <https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/61RDcuVOxaL._SL1001_.jpg>

Ilustración de Zortrax-200. [Figuras]. Recuperado de Repro3DShop. <http://repro3dshop.com/124-thickbox_default/zortrax-m200.jpg>