PRUEBA DE CONCEPTO SOBRE LA CONSTRUCCIÓN DE PRÓTESIS ACCESIBLES

Javier Simancas Ruesgas

Tutor: Raúl Martín Gómez

IES PINTOR ANTONIO LÓPEZ
Departamento de Tecnología
2º de Bachillerato
Curso 2018/2019

Índice

Resumen 2

Abstract 2

Introducción 3

1. Estado del arte de las prótesis 4

1.1. Tecnología actual 4

1.1.1. Electromiografía 4

1.1.2. Impresión 3D 4

1.2. Principales fabricantes 4

1.3. Archivos 3D y código abierto. 5

1.3.1. Elección del prototipo 5

2. Construcción del prototipo 6

2.1. Diseño e impresión 3D 6

2.2. Mecánica 7

2.3. Electrónica 7

3. Limitaciones 9

4. Evolución en el futuro 9

Conclusiones 10

Agradecimientos 11

Bibliografía 12

Anexos 13

A. Tablas 13

B. Ilustraciones 14

C. Código QR 22

Resumen

Gracias a la impresión 3D y a la electromiografía las prótesis se han desarrollado en gran medida y cuentan con numerosas funcionalidades hasta ahora impensables. El problema que presentan es su precio extremadamente elevado.

El objetivo de este proyecto es comprobar si es posible producir una prótesis funcional a partir de la impresión 3D y programación en Arduino y Android. Para ello se ha realizado un estudio del mercado actual y se ha contrastado según su relación calidad-precio. El siguiente paso ha sido seleccionar un modelo 3D gratuito, el cual se ha impreso, y se han ensamblado sus piezas y sus componentes mecánicos. A continuación, se ha elaborado una aplicación Android y un programa en Arduino que permite controlar los movimientos de la prótesis.

El desarrollo del proyecto ha resultado ser exitoso: se ha conseguido construir una prótesis con características similares a las comercializadas, con lo que se ha comprobado que es posible hacerlas accesibles mediante la impresión 3D.

Palabras clave: Android, Arduino, Brazo, Electromiografía, Impresión 3D, Prótesis.

Abstract

Thanks to the 3D printouts and the electromyography, prosthetics have developed intensely and had made a huge variety of movements possible. The problem is that their price is extremely high.

The aim of this project is to prove whether is possible to produce a low-cost prosthetic hand by using 3D printouts and Arduino code and Android app. In order to do that, a market study has been carried out and it has been contrasted with the price and quality relation. The next step was selecting a free 3D model to print and connect all his mechanical parts. Once all the pieces were joined, an Android app and an Arduino code were assembled to control the prosthetic hand.

The project proved to be successful: a prosthetic hand was made with similar characteristics to those prosthetics' products commercialized. This proves that it is possible to make them affordable to the society.

Key-words: 3D printouts, Android, Arduino, Arm, Electromyography, Prosthetic.

Introducción

Las prótesis, al igual que todos los demás productos tecnológicos, se encuentran en un estado de auge continuo. Los avances de los últimos años han provocado un desarrollo sin precedentes que ha ocasionado un aumento de su sofisticación. Esta modernización se debe principalmente a los avances de dos campos en particular: la electromiografía y la impresión 3D.

- La aparición de prótesis mioélectricas[1] ha supuesto una revolución en la biónica, desembocando en una gran variedad de funciones y posibilidades.
- La impresión 3D se ha adaptado de una forma prácticamente perfecta a la producción de estos artículos.

En este sentido lo que se ha conseguido ha sido perfeccionar estos artículos y se han comenzado a fabricar de forma especializada con materiales de alta calidad. La comercialización de estos productos ha supuesto un encarecimiento de la prótesis haciéndolas prácticamente inasumibles por gran parte de la población.

En ocasiones aparecen noticias de cómo, gracias a subvenciones o al *crowdfunding*, se ha conseguido adquirir un producto prostético de última generación. En la mayoría de los casos se trata de niños, que tienen una gran repercusión mediática, pero ¿qué ocurre con las demás personas que no cuentan con tanta difusión en los medios?

Para intentar responder a esta pregunta este proyecto trata de comprobar si es posible hacer accesibles las prótesis, en este caso una mano, a partir de impresiones 3D con un coste bajo. Para ello la construcción se ha dividido en tres fases.

La primera ha consistido en analizar el mercado protésico actual y el margen de beneficios de cada producto. Se han estudiado las principales compañías que los comercializan y se ha comparado sus relaciones de calidad-precio y coste-beneficio

A continuación, se ha seleccionado un modelo 3D gratuito como prototipo a realizar y se ha procedido al montaje de la parte mecánica. La impresión, el ensamblaje y la electrónica engloban la mayor parte de este proceso.

Finalmente se ha realizado un programa en lenguaje Arduino y una aplicación Android para controlar la prótesis. Esta ha sido la parte más laboriosa, puesto que tanto el programa como la aplicación han sido desarrollados desde cero.

Una vez el prototipo ha sido finalizado se han contrastado todos los datos obtenidos para determinar los puntos de mejora y la prospección de futuro para este tipo de prótesis. Para ello se contó con la ayuda de la empresa Autofabricantes[2], que se dedica a la producción de artículos protésicos de bajo coste y de código abierto.

Por último, el proyecto concluye con un pequeño resumen de todas las fases de este y una valoración del resultado final.

---

[1] Prótesis que emplea la electromiografía
[2] http://autofabricantes.org

1. Estado del arte de las prótesis

1.1. Tecnología actual

Como se ha comentado previamente, las dos tecnologías predominantes que impactan sobre este tipo de proyectos son la electromiografía y la impresión 3D.

1.1.1. Electromiografía

La electromiografía se define como una técnica de diagnóstico de la actividad eléctrica producida por los músculos. Este procedimiento surge como una forma de evaluar el estado y funcionamiento de los músculos y los impulsos nerviosos que los controlan. Para detectar estos impulsos es necesario el uso de electrodos, ya sean invasivos o no invasivos, además de un microprocesador para las señales EMG[3].

En el caso de las personas que han sufrido algún tipo de amputación o malformación estos impulsos se siguen produciendo; sin embargo, no hay ningún músculo que reciba esta señal. Las prótesis que emplean la electromiografía detectan estas señales EMG y las convierten en movimiento, habilitando al portador a mover la prótesis como si fuera su propio cuerpo [Fig.1].

Esta tecnología todavía cuenta con algunas limitaciones, como el ruido (interferencias) en el procesado de las señales. Este problema, sumado a la dificultad técnica de este procedimiento y a la falta de medios, ha hecho que se haya descartado a la hora de elaborar el prototipo [Fig.2].

1.1.2. Impresión 3D

La impresión 3D es una tecnología que ha revolucionado la ciencia. Consiste en la impresión de modelos tridimensionales en distintos materiales, siendo el más habitual el ácido poliláctico (PLA). La impresora, en el caso del PLA, calienta el filamento del material hasta llegar a su punto de fusión, y es entonces cuando empieza a construir el modelo 3D superponiendo capas de plástico [Fig.3].

La facilidad que aporta esta tecnología a la hora de producción de piezas es inmensurable. La velocidad de producción y su precisión han contribuido a la fabricación de prótesis, que la ha asimilado rápidamente.

Gracias a la impresión 3D la personalización e individualización de un modelo estándar de prótesis se ha facilitado en gran medida. En Internet podemos encontrar cientos de modelos gratuitos, de entre los cuales se ha seleccionado una prótesis para el prototipo.

Al igual que nuestro prototipo la mayoría de las prótesis que se comercializan no emplean la electromiografía y se basan principalmente en la impresión tridimensional. A continuación, examinaremos el mercado protésico.

1.2. Principales fabricantes

Dado que el objetivo principal del proyecto es el desarrollo de una prótesis de brazo, el análisis de mercado se ha realizado solamente de los llamados “brazos robots”.

En el mercado protésico actual existe un oligopolio entre las principales compañías protésicas, que comercializan sus productos a un precio bastante elevado. El portal *Vocativ* realizó el estudio “What a $100,000 Bionic Arm Can Do” [3] en el que analiza las funcionalidades de las prótesis y su precio.

---

[3] Señales electromiográficas, procedentes del electromiograma.

El modelo más simple, *Robohand* [Fig.4], tiene un precio de 2,000 $ y únicamente permite abrir y cerrar los dedos. Un modelo de gama media como el *bebionic3* [Fig.5] permite una movilidad más completa habilitando el movimiento independiente de los dedos y de la muñeca. Esta prótesis asciende a 30,000 $. Finalmente, el modelo con más funcionalidades es el *DEKA Arm* [Fig.6], que es controlado mediante electrodos situados en el pie y tiene un precio de más de 100,000 $.

1.3. Archivos 3D y código abierto.

Este proyecto tiene como propósito estudiar si es posible hacer una prótesis de bajo coste. Para ello es esencial hacer uso de archivos tridimensionales para la impresión y de código abierto para la programación.

Un archivo tridimensional es un formato de archivo informático que define la geometría de un objeto a partir de la cual se pueden realizar impresiones 3D. En Internet hay numerosas webs en las que podemos descargar estos tipos de archivos de forma gratuita para poder imprimirlos.

El concepto de código abierto es la publicación de códigos de programación ya escritos de forma gratuita. Otra variante es la publicación de un programa sin acabar para que lo termine otro programador. En cualquier caso, el código abierto se basa en la colaboración de la comunidad para desarrollar su funcionalidad.

1.3.1. Elección del prototipo

Para el prototipo se han estudiado varios modelos 3D gratuitos. A la hora de elegir el definitivo se ha tenido en cuenta la cantidad de material que se necesita y los movimientos que permite realizar. El modelo que se ha seleccionado ha sido publicado por Mahdi Elsayed Hussein en su tesis "3D Printed Myoelectric Prosthetic Arm" [1]. Este brazo es una modificación del proyecto *Inmoov* [2], que consiste en la fabricación de un robot a tamaño real mediante la impresión 3D [Fig.7a, Fig.7b, Fig.7c, Fig.7d, Fig.7e].

El código fuente para la programación del prototipo no está publicado en Internet por lo que ha sido necesario implementarlo. Para ello se ha optado por el lenguaje *Arduino*, que es una plataforma de creación de electrónica de código abierto.

Los modelos 3D se descargaron en un formato *stl* [4] de CAD[5], que define la geometría de objetos tridimensionales.

Para procesarlos se ha hecho uso del programa *Ultimaker Cura*[6] [Fig.8]. Una vez procesados se guardaron como formato *gcode*[7], ya listo para ser impreso usando la impresora *Witbox 2*.

El proceso de modificación de los archivso *stl* se explicará más adelante. Una vez seleccionado este prototipo la siguiente fase es su construcción.

---

[4] Standard Triangle Language
[5] Diseño asistido por computadora
[6] https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-cura-software
[7] Conocido como RS-274, lenguaje de programación más usado en control numérico

2. Construcción del prototipo

Tras haber seleccionado el modelo a construir se ha procedido a elaborar un plan de trabajo para su construcción. El montaje ha comenzado con diversas modificaciones en los modelos 3D y su posterior impresión. A continuación, se han ensamblado todas sus piezas y elementos necesarios para su correcto funcionamiento. La última fase se corresponde con la implementación del código Arduino y la elaboración de una aplicación Android para el control del prototipo.

2.1. Diseño e impresión 3D

En primer lugar, se estudiaron los modelos 3D escogidos para maximizar la eficacia de la impresión. Para ello se han tenido en cuenta dos factores relacionados entre ellos: la cantidad de material de soporte y el tiempo de impresión.

El material de soporte consiste en capas finas de la impresión cuya función es sostener las partes de la impresión que no tienen ninguna base, por ejemplo, los orificios que sirven de unión entre las partes articuladas de las manos.

El tiempo de impresión depende en parte de esta variable: a mayor cantidad de material de soporte mayor tiempo de impresión.

Se han modificado los planos para convertir la mano, que era la derecha, en la izquierda y se ha procedido a la impresión [Fig.9a].

Por último, debido a los desperfectos de la impresión se han lijado y pulido las piezas y orificios necesarios para el correcto ensamblaje del prototipo [Fig.9b].

En la siguiente tabla se muestra los componentes de la prótesis en relación con el número de piezas, el tiempo de impresión y el peso correspondiente a cada una.

Tabla 1. Proceso de impresión

PROCESO DE IMPRESIÓN			
Componente	**Número de piezas**	**Tiempo de impresión (hh:mm:ss)**	**Peso (gr)**
Antebrazo	2	10:28:00	120
Muñeca	2	1:47:00	20
Palma	2	5:04:00	56
Pulgar	2	1:39:00	17
Índice	3	1:02:00	13
Corazón	3	1:26:00	12
Anular	3	1:30:00	12
Meñique	3	0:52:00	7
Conectores servomotor	3	0:21:00	4
TOTAL	**23**	**24:09:00**	**261**

2.2. Mecánica

Una vez impresas todas las partes del prototipo se elaboró el mecanismo de movimiento de los dedos. Mediante hilo de nylon se simula el tendón del dedo. El modelo, al contar con tres falanges, permite que haya tres puntos articulables, imitando a un dedo real. Mediante la tensión de un extremo o del otro se realiza la flexión o elongación del dedo [Fig.10]. Una vez completado todo el mecanismo se unieron todas las piezas mediante alambre para minimizar el coste.

Ya concluido el ensamblado se conectaron los tres primeros servomotores[8] al hilo de nylon y el cuarto servomotor a la muñeca. Mediante el giro del servomotor se tensan o se destensan los "tendones" y comunican el movimiento al dedo. El cuarto motor tiene como única función el giro de la muñeca [Fig.11].

Para alimentar los motores inicialmente se probó con 8 pilas alcalinas AAA. Al no aportar el amperaje necesario se optó por emplear una batería de polímero de Litio de 10000mAh. Este tipo de alimentación tiene la ventaja de ser recargable. Posteriormente se conectaron los motores y la batería a la placa Arduino, especificada más adelante.

2.3. Electrónica

Con el ensamblaje y la mecánica ya terminados [Fig.12] se organizó la fase de programación. Los elementos esenciales han sido la placa Arduino y la aplicación Android, componentes sin los que el brazo no podría moverse.

A continuación, se muestra una tabla con las especificaciones técnicas básicas de los componentes electrónicos. Las especificaciones se encuentran desarrolladas en los Anexos [A].

Tabla 2. Especificaciones reducidas

	Servomotor	**Placa Arduino**	**Fuente de alimentación**
Marca	HECXTRONIK	BQ	KINPS
Modelo	HX5010	ZUM Core	KP-S004-2

De cara a obtener una óptima integración entre la placa y la aplicación, se determinó escribir el código en lenguaje Arduino mediante la web *Bitbloq* y la aplicación Android en la web *MIT App Inventor*. Ambos sitios web permiten la programación por bloques, que facilita mucho su compilación y la detección de errores [Fig.13].

El funcionamiento del brazo es sencillo. La app[9] envía información mediante Bluetooth a la placa Arduino, que la transforma en movimiento. Dependiendo de la información que se envíe los movimientos serán distintos. Los datos que se transmiten a la placa pueden ser muy variados.

---

[8] Motor que permite controlar el giro del mecanismo. Está diseñado para moverse una determinada cantidad de grados y luego mantenerse fijo en esa posición.
[9] Aplicación móvil

En la aplicación existen tres modos de control: el primero funciona por botones y *sliders*[10] [Fig.14], cada uno asociado a un dedo y a una acción (abrir o cerrar). El siguiente modo consiste en un control por voz [Fig.15], en el que al acercar el móvil al oído se activa el reconocimiento por voz. Por último, la aplicación también dispone de un control consistente en el uso del giroscopio del móvil [Fig.16]: según la posición del teléfono en las coordenadas X, Y y Z del espacio el prototipo realiza un movimiento acorde a esa posición.

Los tres modos de control se basan en enviar datos a la placa; para simplificar el código, los tipos de datos son semejantes.

El control por voz y el control por botones envían el mismo tipo de información: el dedo que se va a mover y la posición a la que hay que moverlo (abierto o cerrado).

Por otro lado, el *slider* y el control del giroscopio se basan en el mismo principio: la información que se envía consiste en el dedo y la posición parcial a la que hay que moverlo. El ángulo de giro que permite el servomotor es de 180º, por lo que para convertir la posición del *slider* en la posición parcial del dedo se divide el slider en 180 partes.

En el caso del giroscopio la conversión es más complicada [Fig.17]. El eje X se corresponde con el movimiento de la muñeca y el Y con el movimiento de los dedos. El rango de datos que aporta el giroscopio varía entre -10 y 10, lo que implica que hay que convertirlo a un intervalo positivo. Para ello se suma 10 unidades a cualquier dato que se obtenga y el intervalo pasa a ser de 0 a 20. Finalmente, para transformar el dato en un ángulo para el motor hay que multiplicarlo por el cociente de 180 entre 20, es decir, 9.

$$Ángulo = (Dato\ del\ giroscopio + 10) \cdot \frac{180}{20} = (Dato\ del\ giroscopio + 10) \cdot 9$$

Ilustración 18. Ecuación de la extrapolación de los datos del giroscopio

Si, por ejemplo, el giroscopio recibe el dato -7 antes de enviarlo por Bluetooth le suma 10 unidades y lo multiplica por 9. Por tanto, el resultado, 27, sería el equivalente al grado de la posición a la que tendría que girar el servomotor.

Mientras que en el primer caso los datos enviados son caracteres alfabéticos (dos letras, una asociada al dedo y otra a la posición de estirado o abierto) en el segundo se trata de caracteres alfanuméricos (la letra asociada al dedo y el ángulo al que se debe mover el motor).

La placa recibe los datos transmitidos por Bluetooth y los procesa. Si se reciben datos cuya longitud es uno se asocia ese dato con una variable. Estas variables son letras, cada una asociada a un dedo y al movimiento que este realiza. Si la longitud es igual a cuatro los datos están formados por una letra y un número de tres cifras. En este caso la letra está asociada al dedo que se va a mover, y el número a la posición que debe tomar el servomotor.

A continuación, el siguiente diagrama de flujo [Fig.19] explica de manera sintetizada el funcionamiento del programa. En él se representa el tratamiento y procesado de los datos enviados por la aplicación móvil dependiendo del número de caracteres que la componen.

---

[10] Control deslizante con el que un usuario puede establecer un valor moviendo un indicador, generalmente en forma horizontal.

3. Limitaciones

Una vez finalizada la construcción del prototipo se ha procedido a analizar las limitaciones en el proceso.

La implementación de un sistema de procesado de señales EMG es la más clara restricción que se ha encontrado puesto que no se contaba con los conocimientos y la tecnología necesaria, por lo que se ha tenido que optar por desarrollar un sistema informático que simule la generación de estas señales mediante una aplicación móvil.

A su vez, no se contaba con los recursos necesarios para realizar una prótesis individualizada. Para ello se requeriría un escáner 3D que virtualizara las medidas exactas de un brazo concreto y las adaptase a la prótesis.

La implementación de un código escrito desde cero y la programación de una aplicación Android ha supuesto un esfuerzo adicional a la hora de finalizar la prótesis y se ha necesitado una formación en estos lenguajes para poder diseñar el código. Si no se hubiera contado con la programación por bloques habría sido necesario mucho más trabajo a la hora de programar.

El proceso de fabricación mediante impresión 3D también ha provocado alguna complicación. El resultado final de las piezas contaba con pequeños desperfectos que han necesitado de una precaución adicional a la hora de su ensamblaje. Lógicamente, este resultado está en función de la calidad de la impresora que se utilice.

Por último, el mecanismo de movimiento de los dedos ha resultado ser más sofisticado de lo previsto. El tensado de los hilos que transmiten el movimiento a los dedos ha requerido un trabajo de mucha precisión.

4. Evolución en el futuro

Se contó con la colaboración de la empresa Autofabricantes, dedicados a la fabricación de prótesis mediante la impresión 3D y código abierto para conocer de primera mano la situación en la que se encuentran tanto la tecnología como el mercado.

Esta empresa es pionera en España en cuanto a impresión 3D. Según su experiencia, actualmente existen pocas subvenciones para el desarrollo de prótesis y apenas hay inversión en este campo; pero en los últimos años se percibe un cambio de tendencia y se nota un pequeño crecimiento en dichas ayudas e inversiones. A medida que se vayan perfeccionando las tecnologías empleadas en la fabricación de prótesis y potencialmente la productividad aumente es probable que las subvenciones incrementen.

La electromiografía permite multitud de funcionalidades para este tipo de productos. La implementación de sensores térmicos, de presión o de otras tecnologías podría suponer la capacidad de percepción de estímulos del exterior como si lo hicieran los sentidos. Controlar una prótesis mediante esta técnica la haría más semejante respecto a la extremidad reemplazada.

En relación con el mundo de la impresión 3D, los últimos avances permiten actualmente incluso hasta la impresión de tejidos y de células madre. Si se implementara esta tecnología a las prótesis podría ser posible prácticamente replicar un brazo humano.

Tanto la posibilidad de financiación como la evolución tecnológica permitirían acceder a productos de más calidad al mismo coste e incluir características y funcionalidades adicionales. Se podría impermeabilizar el prototipo con materiales hidrófugos, utilizar materiales flexibles y baterías de menor tamaño o sostenibles, incrementar la potencia de los motores, reducir el peso con materiales más ligeros, incluir sensores electromiográficos, e implementar una aplicación de inteligencia artificial para conseguir un control más intuitivo del prototipo.

Conclusiones

La situación actual es bastante prometedora. Las técnicas actuales como la electromiografía y la impresión 3D están siendo cada vez más utilizadas, aportando funcionalidad y reduciendo costes y tiempo de fabricación. Si a esto se le añade el crecimiento de modelos gratuitos que se encuentran disponibles en internet y los códigos de programación de libre uso que se puedan publicar, es previsible que mejore la accesibilidad a procesos de fabricación de prótesis "low cost" perfectamente funcionales.

Esto es lo que se ha querido demostrar y se ha corroborado en este proyecto:

- Se han obtenido gratuitamente modelos 3D y se han modificado según nuestras necesidades.
- Se han imprimido y se ha realizado el ensamblaje de las piezas.
- Se han integrado en el modelo las partes mecánicas y la fuente de alimentación.
- Se ha realizado la programación de la aplicación y el código de control.

Como resultado, se ha conseguido construir una prótesis que presenta las mismas funcionalidades que las que se comercializan en el rango de gama media, con un coste sensiblemente inferior, y con la posibilidad de hacerlas accesibles a personas que no puedan adquirirlas en el mercado.

El coste detallado del prototipo ha sido el siguiente:

Tabla 4. Coste del prototipo

ESTUDIO ECONÓMICO			
Componente	**Unidades**	**Precio Unidad/Kg**	**Importe**
Servomotor	4,00	4,96 €	19,84 €
Placa Arduino	1,00	34,90 €	34,90 €
PLA	0,30	11,94 €	3,58 €
Fuente alimentación	1,00	14,99 €	14,99 €
		COSTE TOTAL	**73,31 €**

El gasto energético de la impresora durante el proceso de impresión se ha desestimado puesto que es mínimo (65 céntimos), al igual que el precio del hilo de nylon (46 céntimos) y del alambre (25 céntimos). Tampoco está contemplado el coste de mano de obra.

Agradecimientos

Quiero dar las gracias a Raúl por el apoyo que me ha prestado en todo momento y por la gran dedicación en este proyecto; sin su ayuda no habría sido posible llevarlo a cabo.

A mis padres y hermanos, por haberme soportado a lo largo de este trabajo y haber contribuido con sus diversos puntos de vista.

Al IES Pintor Antonio López por haberme facilitado los medios necesarios para la construcción del prototipo.

Por último, a la empresa Autofabricantes que me ha ayudado a comprender la realidad del sector desde la perspectiva empresarial.

Bibliografía

ALVA CORAS, Carlos Arturo, 2012. *Procesamiento de señales de electromiografía superficial para la detección de movimiento de dos dedos de la mano* [en línea]. Tesis para optar el título profesional de ingeniero electrónico. Universidad Ricardo Palma, Facultad de Ingeniería Electrónica [consulta: 13 de octubre de 2018]. Disponible en: <http://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/urp/416/Alva_ca.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[1] ELSAYED HUSSEIN, Mahdi, 2004. 3D Printed Myoelectric Prosthetic Arm [en línea]. Graham Brooker, dir. Tesis doctoral. Australian Centre for Field Robotics, Sydney. [consulta: 11 de abril de 2018]. Disponible en: <https://drive.google.com/file/d/0B70A6QACCyueR3hOSnJBUVk1ZHM/view>

[2] LANGEVIN, Gael (2018). *Inmoov* [en línea]. [consulta: 8 de abril de 2018]. Disponible en: <http://inmoov.fr/>

[3] MARKOWITZ, Eric (2014). *"What a $100,000 Bionic Arm Can Do"* [en línea]. En *Vocativ*. [consulta: 26 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://www.vocativ.com/money/industry/prosthetic-boom-3d-printed-mind-controlled-limbs/index.html>

RAEZ, M; HUSSAIN, M; MOHD-YASIN, F. "Techniques of EMG signal analysis: detection, processing, classification and applications". En *US National Library of Medicine* [en línea]. [consulta: 7 de julio de 2018]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1455479/>

Nota: las imágenes, modelos 3D, diagramas y tablas cuyo origen no está especificado son de fuente propia.

Anexos

A. Tablas

Tabla 3. Especificaciones técnicas desarrolladas

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Prototipo	
Peso	653 gr
Dimensiones	400 x 150 x 90 mm
Impresora 3D	WITBOX 2
Servomotor	
Marca	HECXTRONIK
Modelo	HX5010
Modulación	Analógica
Fuerza de giro	4.8V: 6.91 kg-cm
Velocidad	4.8V:0.16 sec/60°
Dimensiones	38.6 x 20.1 x 38.1 mm
Material	Plástico
Rotación	Doble sentido
Voltaje	4,8 ~ 6v
Peso	39 gr
Placa Arduino	
Marca	BQ
Modelo	ZUM Core
Microprocesador	ATmega328P
Voltaje	3.3V o 5V
Voltaje de entrada	6V- 17V
Corriente a 3.3V	50mA
Corriente a 5V	3.2A continuo
Conexión	Micro USB-B
Interfaz	BluetoothTM 2.1 Clase 2
Entradas/Salidas analógicas	6
Entradas/Salidas digitales	14
Fuente de alimentación	
Marca	KINPS
Modelo	KP-S004-2
Peso	212 gr
Dimensiones	144 x 72 x 17 mm
Composición	Polímero de Litio
Capacidad	10000mAh
Entrada	5V 2.4A
Salida	5V 3.5A
Conexión de entrada	Micro USB
Conexión de salida	USB

B. Ilustraciones

Ilustración 1. Relación señal/ruido, imagen de Miguel Fernández del Olmo

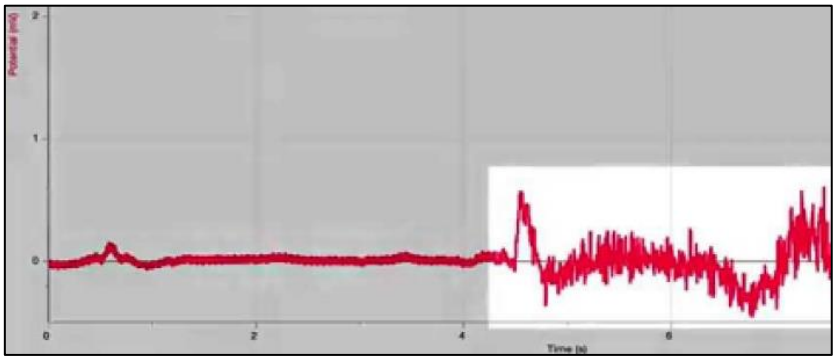


Ilustración 2. Detección de señales EMG, fotografía de arizonapain.com

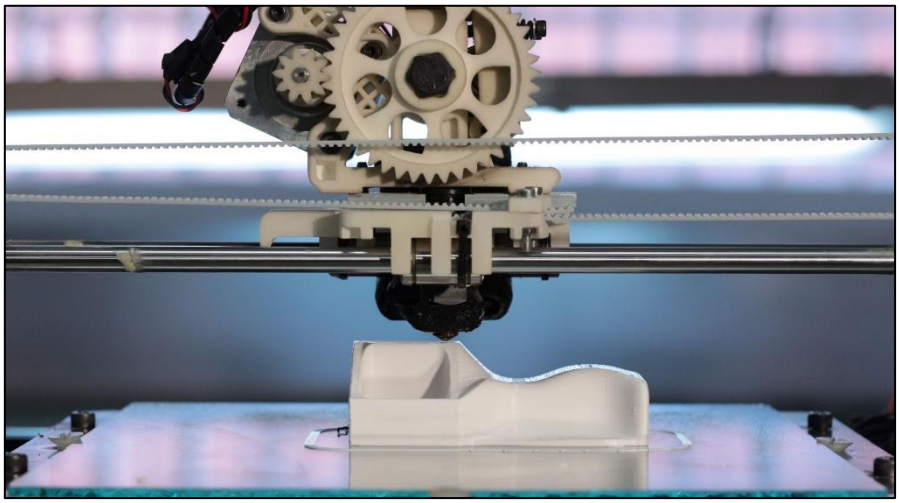


Ilustración 3. Impresión 3D, imagen de formacad.es

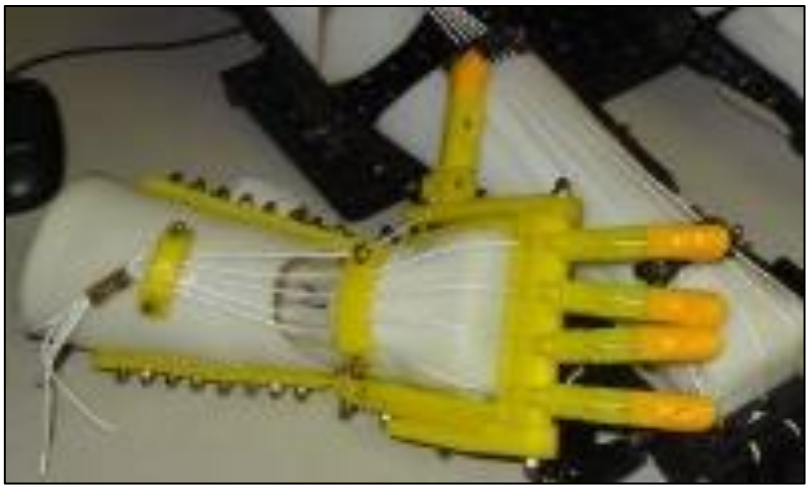


Ilustración 4. Robohand, [3]

Ilustración 5. bebionic3, [3]

Ilustración 6. DEKA Arm, [3]

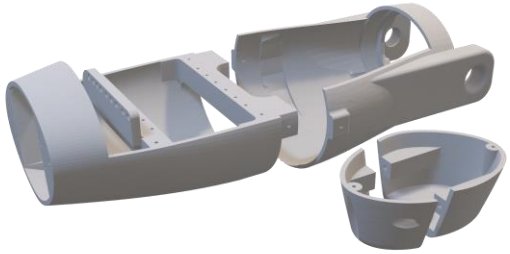


Ilustración 7a. Modelo 3D del antebrazo

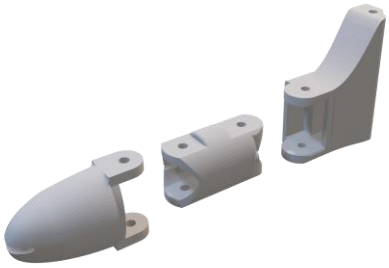


Ilustración 7b. Modelo 3D del pulgar

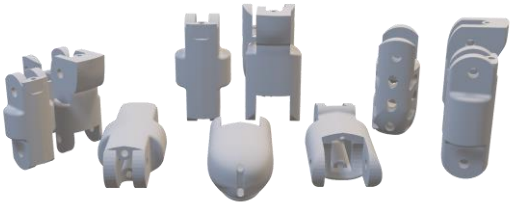
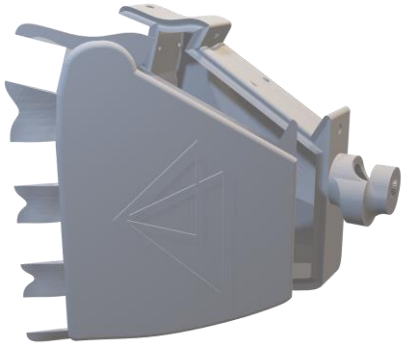
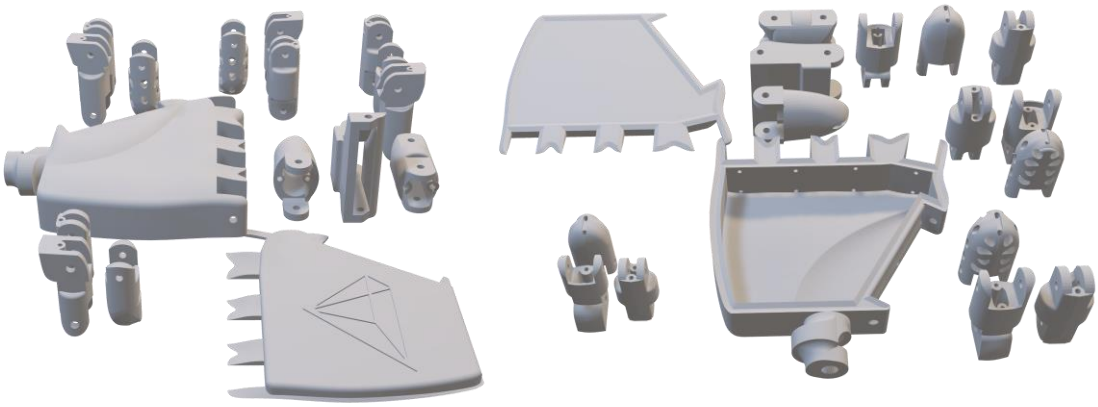


Ilustración 7c. Modelo 3D del índice, corazón, anular y meñique



7d. Modelo 3D de la palma



7e. Modelo 3D de la mano completa

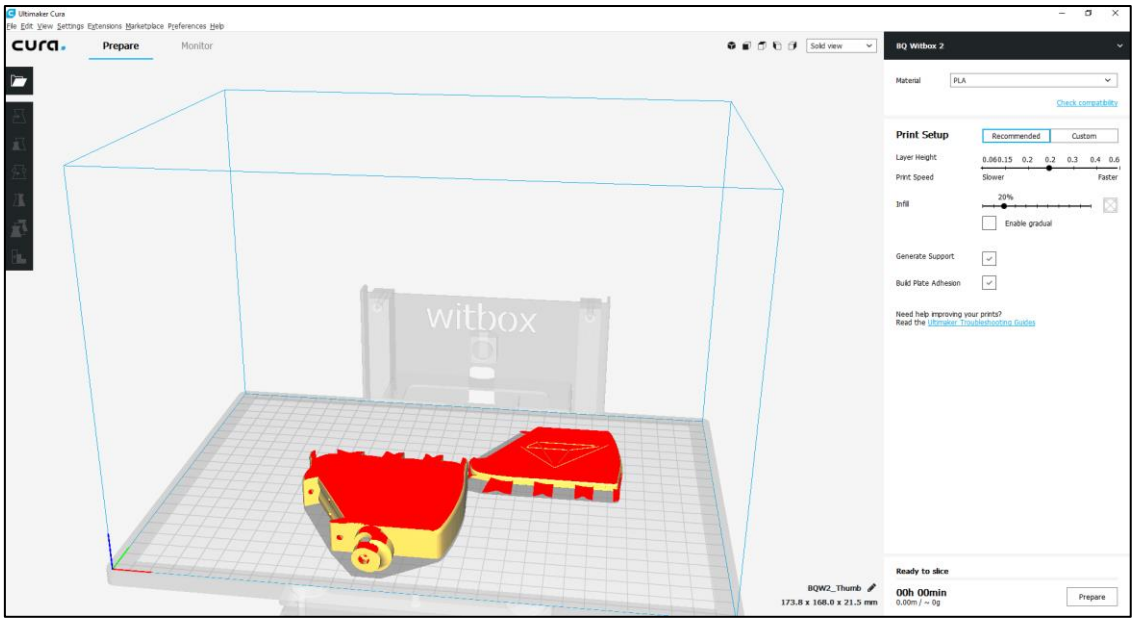


Ilustración 8. Interfaz del programa Ultimaker Cura

Ilustración 9a. Ejemplo piezas impresas

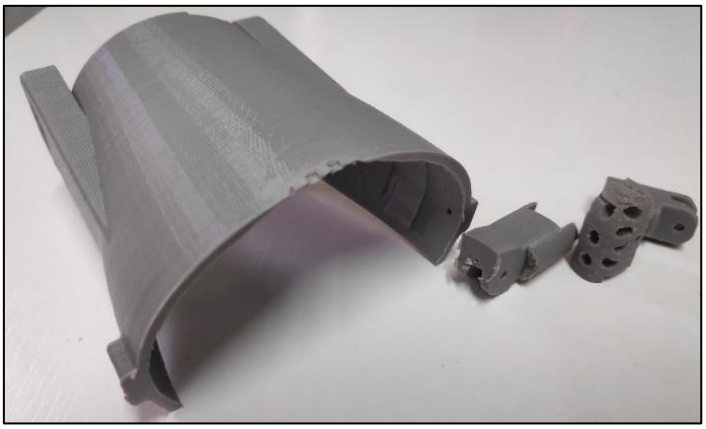


Ilustración 9b. Ejemplo de piezas acondicionadas

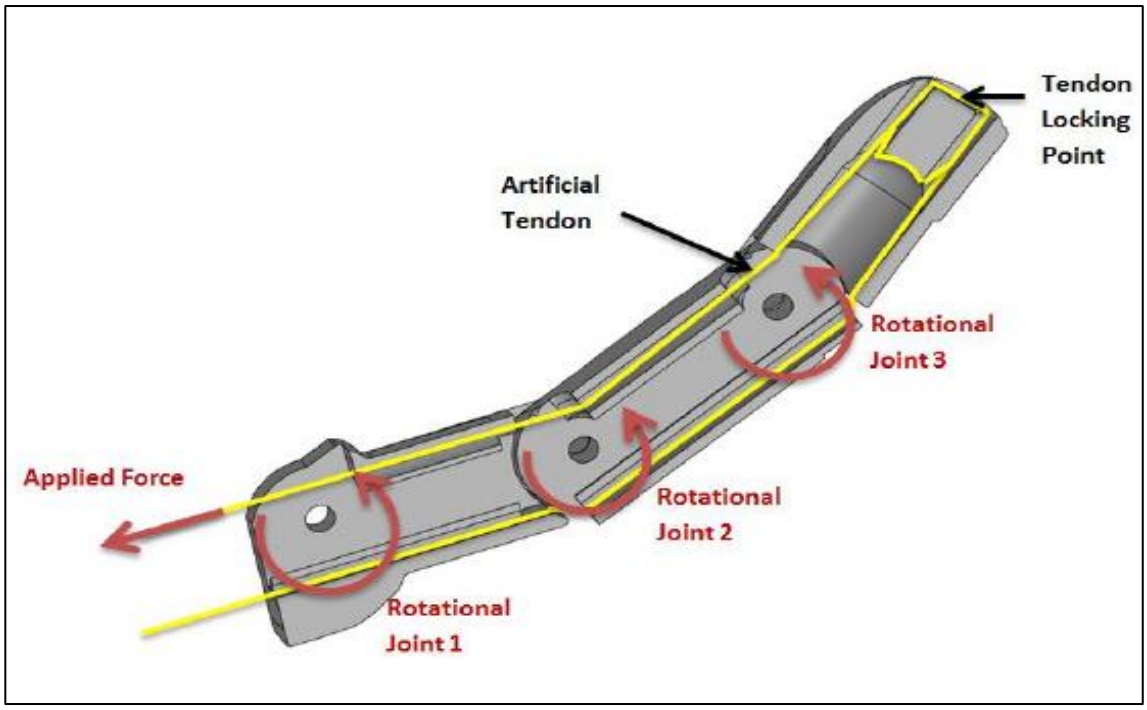


Ilustración 10. Mecanismo del dedo, por Mahdi Elsayed Hussein [1]

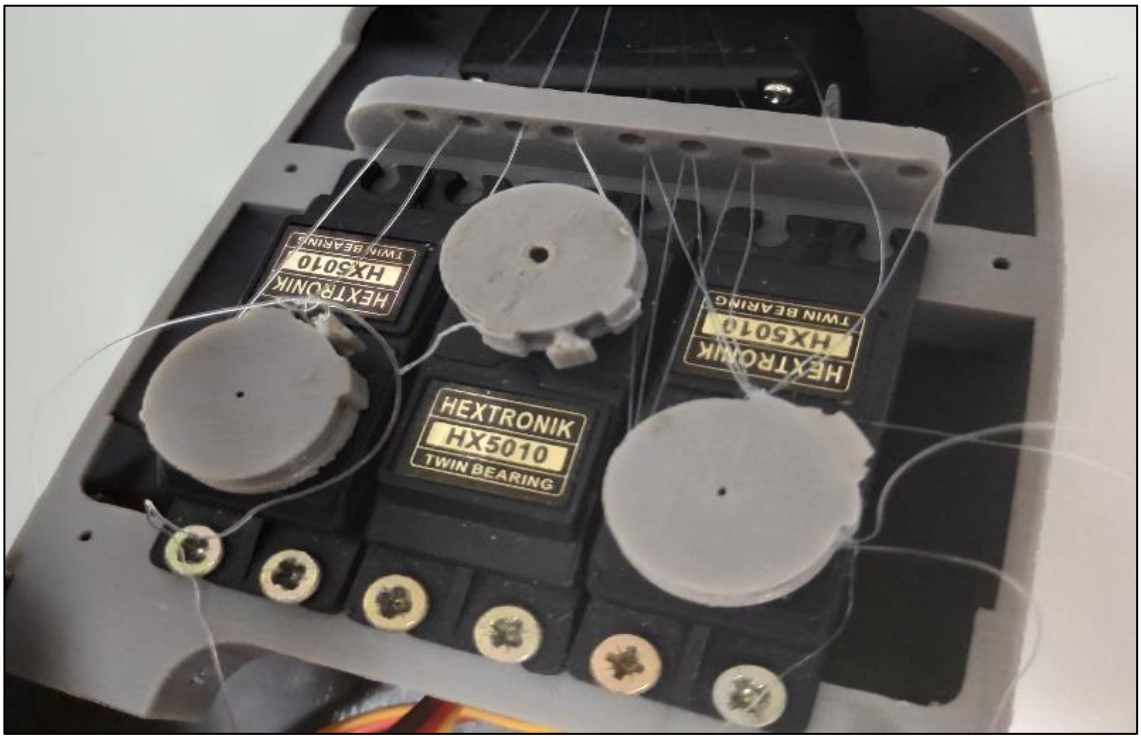


Ilustración 11. Servomotores unidos a los hilos de los dedos

Ilustración 12. Prototipo finalizado

Ilustración 13. Ejemplo de programación por bloques

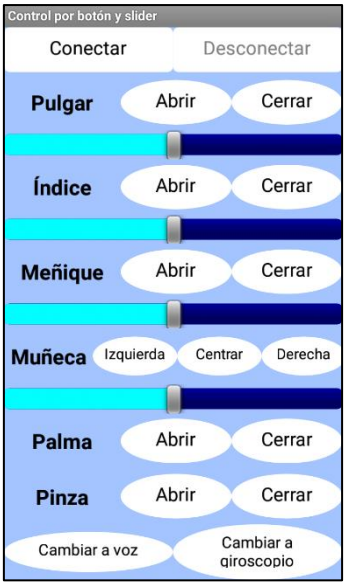


Ilustración 14. Comandos por botones

Ilustración 15. Comandos por voz

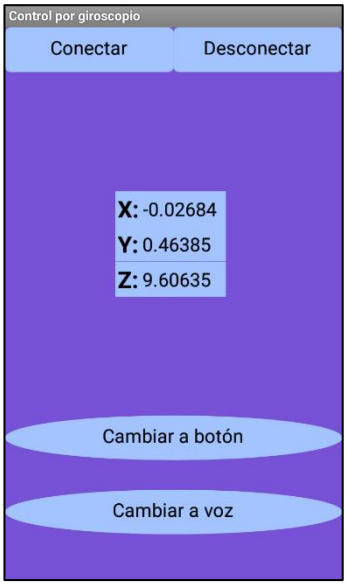


Ilustración 16. Comandos por giroscopio

17. Bloque de programación de la ecuación

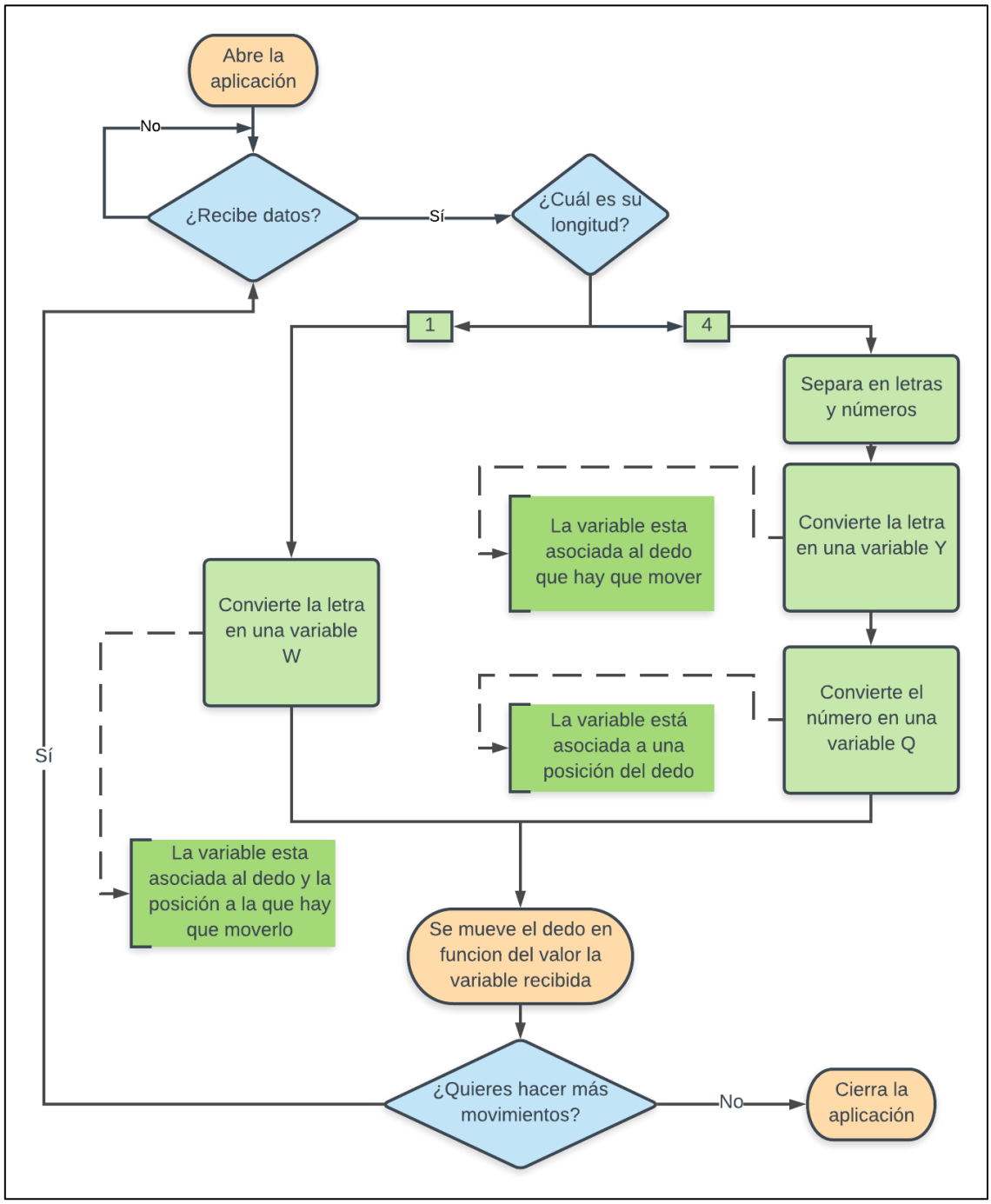


Ilustración 19. Diagrama de flujo del procesado de la información

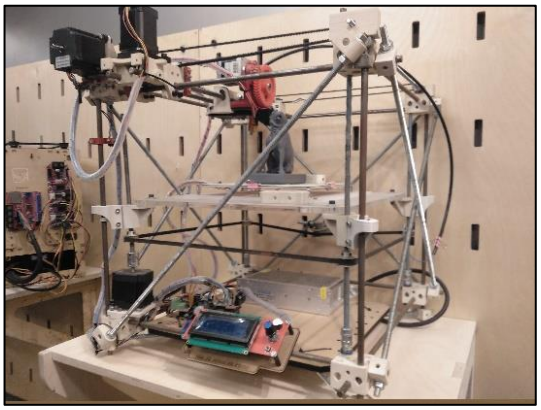


Ilustración 20. Una de las primeras impresoras 3D de España

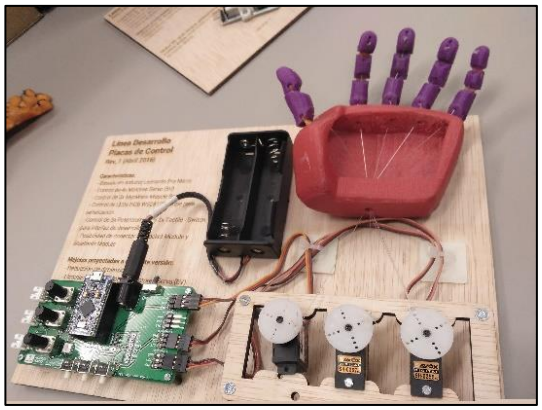


Ilustración 21. Una de las primeras prótesis construidas por Autofabricantes

C. Código QR

A continuación, se adjunta un código QR el cual enlaza a una carpeta de Google Drive en la que se pueden descargar la aplicación Android y el código Arduino. En esa carpeta también se encuentras dos vídeos del funcionamiento de la prótesis, así como el trabajo original presentado en el IES Pintor Antonio López.

Ilustración 22. Código QR