

# Diseño, modelado y construcción de una mano robótica 3D empleando electromiografía

JUAN PABLO RUIZ CEA, CRISTÓBAL ARTURO MEJÍA ROMO, ANTONIO SAÚL ORTEGA RAVELO, BRAULIO ANTONIO DÍAZ LEGARIA.

**Resumen**— En este trabajo se presenta un prototipo de una mano robótica derecha impresa con tecnología 3D para apoyo en la rehabilitación de mano como trabajo futuro, desarrollando la fase de diseño y simulación, modelado y construcción de dicho prototipo, implementando para su control señales electromiografías por medio electrodos musculares y procesando la información en un Arduino. Obteniendo resultados que permiten corroborar el funcionamiento correcto del prototipo robótico.

## I. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años ha existido un incremento considerable en cuanto a sufrir un evento Cerebro – Vascular (ECV) respecta, llegando a cifras que sobrepasan los cuatro millones de casos para el 2030, con un incremento estimado del 24,9% de la prevalencia con respecto a la actual [1]. Ya sea por casos de enfermedad o accidentes donde se ven afectados grupos musculares que se ven involucrados en la realización de tareas cotidianas es que existe un aumento en el diseño de prótesis o aparatos de apoyo que ayuden a mejorar la calidad de vida de las personas.

En el mercado se pueden encontrar distintos modelos robóticos que representan un apoyo importante a la parte de rehabilitación de extremidades motoras, en particular el interés está en los soportes de la muñeca derecha (ver Figura 1), como se describe en [2] los trabajos desarrollados en este campo específicamente son: *HEXXOR*, que consta de dos módulos que permiten controlar por separado los movimientos de los dedos y el pulgar, se adapta a diferentes tamaños de mano y brinda asistencia de fuerza de acuerdo con las necesidades del paciente, también existen dispositivos de tipo guante, como el *GLOREHA* que deja la palma totalmente libre, tiene poco peso y cuenta con un software que permite la representación en 3D de los movimientos realizados. Otros dispositivos como el “*Hand of Hope*” (*HOH*) permiten la autoiniciación del movimiento a través de señales electromiografías (EMG) y ofrece la simulación de diferentes actividades cotidianas [3]. Finalmente, el *AMADEO* brinda diferentes niveles de resistencias de flexión y extensión de cada dedo, a la vez que mide los rangos de movimiento [4], el robot *AMADEO* es aplicable para todas las fases de rehabilitación de manos y dedos y puede ser adaptado a las necesidades de cada paciente [5]. El

dispositivo, *Hand Spring Operated Movement Enhancer* (*HandSOME*), fue diseñado para recuperar el movimiento en músculos rígidos [6], ayuda a abrir la mano del paciente mediante una serie de cordones elásticos que aplican pares de extensión a las articulaciones de los dedos y compensan la hipertonía del flexor [7].



Figura 1. Anatomía general de la mano.

Con base a la revisión del estado del arte y observando las necesidades, en el presente trabajo se plantea el objetivo de crear un prototipo en 3D de una mano usando electromiografía, enfocado a futuras aplicaciones en el campo de la rehabilitación y que sea accesible para todos los potenciales pacientes, además de ayudar no solo a que la persona se sienta mejor si no que, se integre con mayor facilidad en la sociedad y en sus actividades cotidianas. Todo esto con un enfoque de rehabilitación terapéutica para acceder al mercado existente.

JUAN PABLO RUIZ CEA, CRISTÓBAL ARTURO MEJÍA ROMO, ANTONIO SAÚL ORTEGA RAVELO, BRAULIO ANTONIO DÍAZ LEGARIA, pertenecen a la carrera de INGENIERÍA MECATRÓNICA de la FACULTAD DE INGENIERÍA y realizaron el proyecto dentro del curso Fundamentos de Robots Manipuladores. Correo: antonio\_nov1996@hotmail.com.

El proyecto fue asesorado y se agradece a la DRA. ZIZILIA ZAMUDIO BELTRÁN.

## II. ASPECTOS ANATÓMICOS DE LA MANO

A continuación, se presentan los conceptos que permiten establecer el diseño del prototipo propuesto desde la anatomía de la mano.

La muñeca es una articulación que permite realizar movimientos en extensión (hacia arriba), flexión (hacia abajo), desviación radial (hacia el pulgar), desviación cubital (hacia el meñique) y mínimos grados de rotación. Está compuesta por 3 elementos principales:

1. *Huesos.*
2. *Cápsula y ligamentos.*
3. *Tejidos blandos: Tendones, Músculos, Nervios y Vasos.*

Existen tres principales tipos de huesos en la mano, entre los cuales se incluyen [8], [9], los cuales se pueden observar en la Figura 2 y que son:

- Falanges. Los 14 huesos que están en los dedos de cada mano y también en los dedos de cada pie. Cada dedo tiene tres falanges (distal, media y proximal); solamente el pulgar tiene dos.
- Huesos metacarpianos. Los cinco huesos que componen la parte media de la mano.
- Huesos carpianos. Los ocho huesos que forman la muñeca. Los huesos carpianos están conectados a dos huesos del brazo--el hueso cúbito y el hueso radio.

En la mano se pueden encontrar numerosos músculos, ligamentos, y vainas. Los músculos son estructuras que se contraen y permiten el movimiento de los huesos de la mano. Los ligamentos son tejidos fibrosos que ayudan a unir las articulaciones de la mano. Las vainas son estructuras tubulares que rodean parte de los dedos.



Figura 2. Anatomía general de la mano.

## III. ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DEL PROTOTIPO

A continuación, se describen los diferentes componentes los cuales constituyen la propuesta del prototipo que se presenta en el actual trabajo.

**Sensor.** Un sensor es un dispositivo que está capacitado para detectar acciones o estímulos externos y responder en consecuencia. Estos aparatos pueden transformar las magnitudes físicas o químicas en magnitudes eléctricas [10].

**Sensor de gestos.** Es un sensor de alta calidad que tiene la capacidad de poder detectar el gesto (de la mano usualmente) sin tener contacto alguno con el dispositivo. Ocupa el chip

APDS-9960 que incluye tener un LED infrarrojo para poder obtener mediciones para el corto alcance; y con la ventaja de que mediante su sistema de RGB puede tener detección aún en condiciones de luminosidad baja. Trabaja bajo 4 fotodiodos direccionales, convirtiendo los datos ambientales físicos en datos digitales [11].

**Servomotor.** El servomotor (Figura 3), es un dispositivo electromecánico que consiste en un motor eléctrico, un juego de engranes y una tarjeta de control, todo dentro de una carcasa de plástico. Un servo tiene la capacidad de ser controlado en posición. Es capaz de ubicarse en cualquier posición dentro de un rango de operación generalmente de 180° pero puede ser fácilmente modificado para tener un giro libre de 360°. Los servos se suelen utilizar en robótica, automática y modelismo (vehículos por radiocontrol, RC) debido a su gran precisión en el posicionamiento. [12]



Figura 3. Servomotor comercial.

**PLA (Impresión 3D):** En la Figura 4 se puede observar el filamento PLA (ácido poliláctico), que es un polímero biodegradable derivado del ácido láctico. Se fabrica a partir de recursos renovables al 100%, es resistente al agua, estable a la luz UV, no descolora, inflamabilidad muy baja, ideal para objetos que estén en contacto con alimentos, cucharas, vasos, tazas, biberones, juguetes para niños, contenedores de Agua. Algunas aplicaciones pueden ser la manufactura de piezas mecánicas y esculturas [13].



Figura 4. Filamento PLA para impresoras 3D.

**Electrodos musculares EMG:** La electromiografía (EMG) consiste básicamente en la adquisición, registro y análisis de la actividad eléctrica generada en nervios y músculos a través del uso de electrodos (superficiales, de aguja, implantados). Las mediciones extraídas de EMG proporcionan una información valiosa acerca de la fisiología y los patrones de activación muscular (ver Figura 5). Las primeras aplicaciones del estudio mi eléctrico fueron por el bio meteorólogo Reinhold Reiter; el funcionamiento para la lectura muscular consiste en la medición de la intensidad de una señal, pero en función del tiempo o más específicamente de la frecuencia. Para la gama del tiempo se emplean los métodos de desviación estándar, raíz cuadrada media, entre otros. Para el dominio de

frecuencia se censa la dispersión de la señal mí eléctrica en potencia. La señal que se le es equivalente a la perturbación generada por las fibras de los músculos al realizar cualquier movimiento. Los electrodos para el EMG tienen como base como dependencia de la lectura al potencial de acción de los músculos del antebrazo. Este potencial de acción se da por la distribución de sustancias de transmisión en las terminales de fibras nerviosas del brazo [14].



Figura 5. Kit de electrodos musculares EMG con placa para Jack.

*Mecanismo de transmisión por poleas:* Usualmente es empleado para reducir las fricciones y tener pocos deslizamientos para que el motor acoplado al final del cable de la junta o falange pueda ocasionar la acción de retracción y elongación de cada dedo de la mano. Como se observa en la Figura 6 el motor al tener el giro en su eje, la polea atada a este tiene el equivalente movimiento a lo largo de ella (polea conducida). Entre lo que se le atribuye esta que reduce el peso de la mano [15].

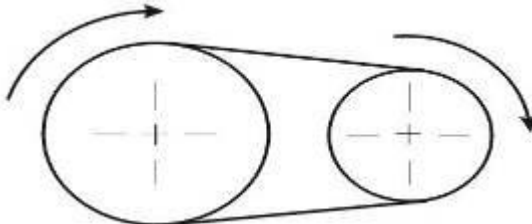


Figura 6. Mecanismo de poleas.

#### IV. FASE DE DISEÑO Y SIMULACIÓN

Se realizó el diseño de las articulaciones correspondientes a la mano mediante el uso del software SolidWorks, paquetería con la que cuenta la Facultad de Ingeniería de la Universidad La Salle, a continuación, se presenta el diseño de las falanges.

##### **Pasos:**

- Primeramente, se elige un plano a elección del editor y se hace un *sketch* de un rectángulo con las medidas lo más próximas posibles a la anatomía de cada falange del mismo diseñador (medidas en mm). Se realiza una extrusión de 1.8 cm aproximadamente dependiendo de la falange del dedo a diseñar (falange media, distal, proximal y metacarpiano).
- Se trazan 2 diagonales con 10 mm de cateto sobre lo largo del rectángulo y se procede a la extrusión de corte (Figura 7).
- Se le añade en la parte inferior de la base una extrusión de 5 mm como soporte y para posteriormente introducir los barrenos para el cable o hilo de nylon (Figura 8).

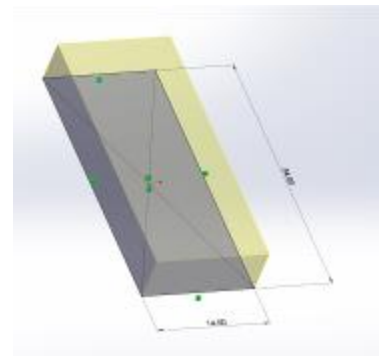


Figura 7. Base del dedo.

- Se le añade en la parte inferior de la base una extrusión de 5 mm como soporte y para posteriormente introducir los barrenos para el cable o hilo de nylon (Figura 8).

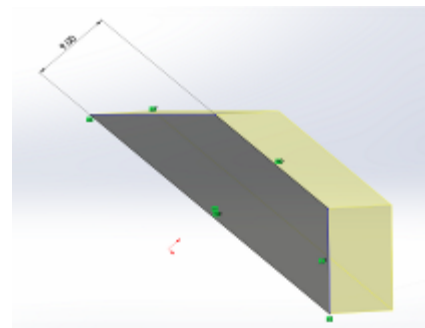


Figura 8. Articulación parte superior

- Se muestra el proceso de acabado de forma de dicha falange del dedo para implementar ahora los 2 barrenos para el nylon y a su vez el diseño de detalle para un mejor acabado (Figura 9 y 10).

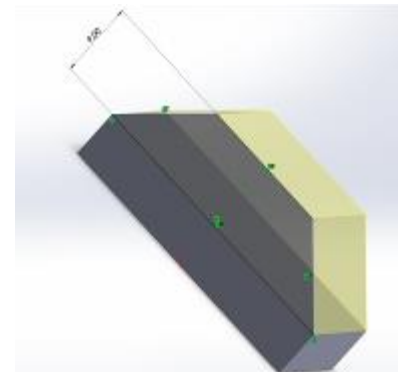


Figura 9. Unión de base con articulación superior

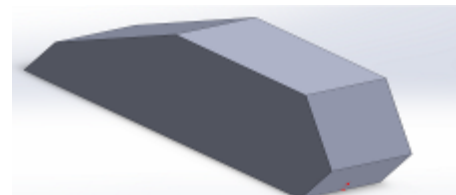


Figura 10. Resultado de la forma base.

- Ocupando la vista frontal del plano, se procede a la realización de 2 círculos de 3 mm de diámetro con una separación de 7.26 mm, suficiente para introducir hilo de

nylon para el funcionamiento del mecanismo de polea (Figura 11).

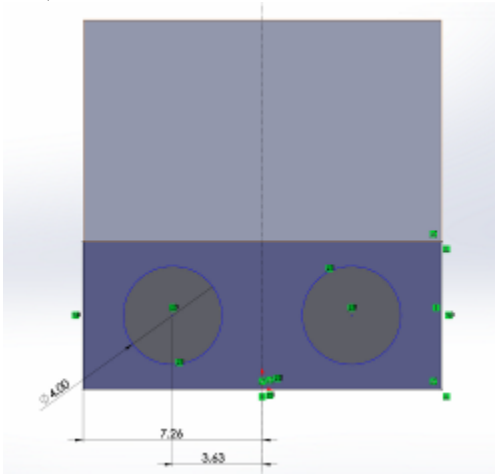


Figura 11. Creación de orificios para unión con articulaciones.

- Se realiza una extrusión de corte con afinación de sobre toda la pieza para obtener los barrenos correspondientes (Figura 12).

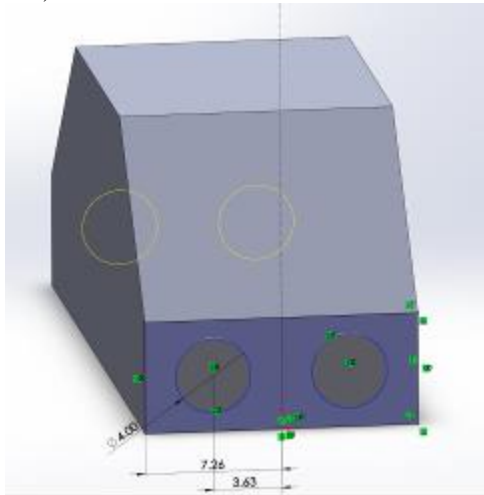


Figura 12. Extrusión del corte

- Subsecuentemente se realiza en cuanto al diseño de detalle, el redondeo de las aristas para un mejor acabado y buena presentación con el fin de asimilar lo más posible a los dedos de una mano (Figura 13).

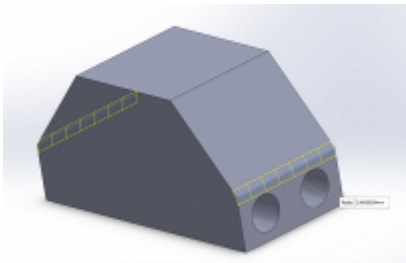


Figura 13. Primer redondeo parte inferior.

- El redondeo se hace por partes sobre cada arista de dicha articulación (Figura 14).

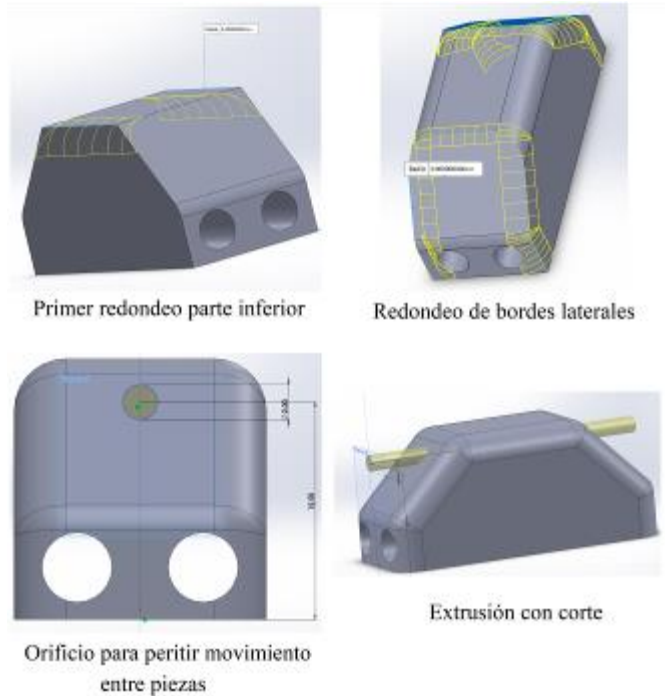


Figura 14. Redondeo de la Articulación.

Los materiales que integran el prototipo son los siguientes:

- ❖ Servomotores SG90.
- ❖ ARDUINO UNO.
- ❖ Protoboard.
- ❖ Jumpers.
- ❖ Sensor EMG.
- ❖ Electrodo.
- ❖ Hilo Nylon.
- ❖ Hilo resorte.

#### V. MODELADO DEL PROTOTIPO ROBÓTICO

En la Tabla 1 se muestran los parámetros Geométricos de la mano en donde:

Los parámetros  $\theta_j$  hacen referencia a las variables rotacionales de cada Falange.

$d_j$  Es la longitud de cada falange

$\alpha_j$  Es el ángulo entre ejes  $x_j$

$b_j$  Es la distancia entre los ejes de cada dedo

$r_j$  es la distancia entre los ejes  $z_j$

$\gamma_j$  representa el ángulo del dedo pulgar respecto a los otros.

$\sigma_j$  Determina que el tipo de las articulaciones utilizadas son en su totalidad rotacionales.

El bosquejo de la dinámica del movimiento general de las falanges de los dedos excepto del pulgar se muestran en la Figura 15. El pulgar cuenta con 2 eslabones para la opulencia (Figura 16).

TABLA 1. PARÁMETROS GEOMÉTRICOS PARA LA MANO

LINK	$\theta$	$\alpha$	Ai	Di
1	$\theta_1$	0	A1	O1
2	$\theta_2$	0	A2	O2
3	$\theta_3$	0	A3	O3

TABLA 2. PARÁMETROS GEOMÉTRICOS CON VALORES EXACTOS

j	$\sigma_j$	$\gamma_j$	$b_j$	$\alpha_j$	$d_j$	$\theta_j$	$r_j$
1	0	0	2cm	0	6.7cm	$\theta_1$	0
2	0	0	2cm	0	8.7cm	$\theta_2$	0
3	0	0	2cm	0	9.4cm	$\theta_3$	0
4	0	0	4.5cm	0	7.9cm	$\theta_4$	0
5	0	0	4.5cm	0	5.9cm	$\theta_5$	0

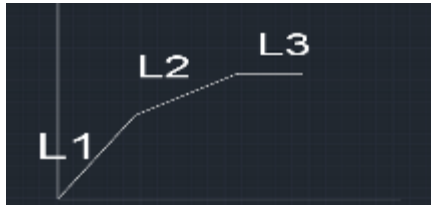


Figura 15. Representación de falanges índice, medio, anular y meñique.



Figura 16. Representación de pulgar.



FIGURA 17. DIAGRAMA DEL ALGORITMO

Algoritmo 1. Código Parcial

```

#include <SERVO.H>
//THRESHOLD PARA EL CONTROL DEL
SERVOMOTOR CON EL SENSOR EMG.
//SE DEFINEN LOS VALORES DE ACUERDO CON LOS
VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS CON LOS CUALES
TRABAJA EL SENSOR.
#define THRESHOLD 150
//NÚMERO DE PIN DONDE LOS MOTORES SERVO
SERÁN CONECTADOS.
#define SERVO_PIN 3
void setup () {
  //BAUDRATE SE DEFINE LA VELOCIDAD DE
  TRANSMISIÓN DE SEÑAL DE ARDUINO.
  SET TO 115200
  SERIAL.BEGIN(9600);
  //SET SERVO MOTOR TO DIGITAL PIN 3
  SERVO_1.ATTACH(SERVO_PIN);
}
void loop () {
  INT VALUE = ANALOGREAD(EMG_PIN);
  //SI EL VALOR QUE EL SENSOR LEE ES MAYOR
  QUE LA FUNCIÓN THRESHOLD EL SERVOMOTOR
  GIRARÁ LOS GRADOS ESTABLECIDOS.
  IF (VALUE > THRESHOLD) {
    SERVO_1.WRITE(360); }
  //SI EL VALOR QUE LEE EL SENSOR ES MENOR A
  THRESHOLD EL SERVO RETORNARA LOS GRADOS
  ESTABLECIDOS.
  ELSE {
    SERVO_1.WRITE(360); }
    SERIAL.PRINTLN(VALUE);
  }
}
    
```

IV. RESULTADOS

Con la metodología que se sigue se obtienen las falanges (Figura 19) modeladas en SolidWorks, junto con la palma de la mano diseñada (Fig. 20). Se ensambla la mano como se ve en la Figura 21. Las conexiones de los servomotores son bastante sencillas (Fig. 22). Juntando todas las piezas del proyecto nos queda como se observa en la figura 23. Se conectan los electrodos al antebrazo del sujeto de pruebas (Figura 25). A continuación, se realizan las pruebas para establecer un *Threshold* con un valor que filtre el ruido y superable para la señal generada por el antebrazo de nuestro sujeto. La efectividad del mecanismo depende del buen contacto entre los electrodos y el antebrazo.



Figura 19. Falanges modeladas.

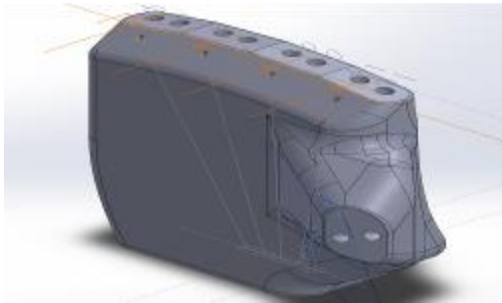


Figura 20. Palma de la mano modelada.



Figura 21. Ensamble de prótesis de mano Como V.



Figura 22. Conexión de circuito para control de servomotores mediante señales mandadas por sensor EMG.



Figura 23. Colocación de los electrodos.

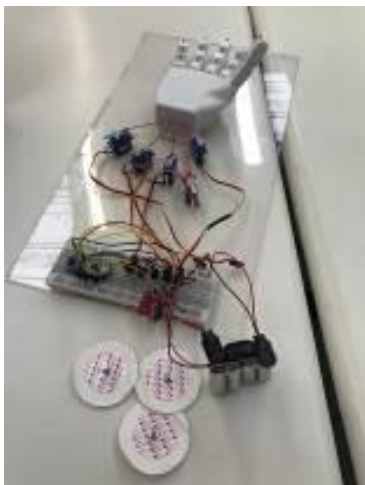


Figura 24. Ensamble completo.



Figura 25. Proyecto en funcionamiento.

TABLA 3. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE SENSORES PARA CALIBRACIÓN.

Prueba	Valores mínimos	Valor media	Valores máximos
1	0	12	24
2	10	94.5	199
3	20	125.5	271
4	4	181.5	367
5	12	192.5	397
6	12	191.5	395
7	9	127	263
Promedio	9.57	132.07	273.71

### V. CONCLUSIONES

Como resultado del modelado de nuestra prótesis para mano se dedujo que es una opción viable para tratar algunos casos en los que se requiera algún tipo de terapia de rehabilitación, esto gracias a que con nuestro método de programación se puede moderar el rango de movimiento de los metacarpianos y las falanges, en adición a esto el diseño de la prótesis tanto en material como en diseño nos permite tener un precio accesible para todos los sectores de población.

### REFERENCIAS

- [1] Heidenreich PA, Trogon JG, Khavjou OA, Butler J, et al, Forecasting the future of cardiovascular disease in the United States: a policy statement from the American Heart Association. *Circulation*. 2011; 123:933-94./.
- [2] Meneses Castaño, C., Peñaloza Peñaranda, Y., Pinzón Bernal, M., & Castellanos Ruíz, J. (2016). Aplicación de la terapia robótica para el tratamiento de la mano espástica del adulto con hemiplejía. *Artículo de revisión. Revista Mexicana De Medicina Física Y Rehabilitación*, 27(3-4), 80-85. Retrieved from <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=66401>.
- [3] Ren Y. Developing a multi-joint upper limb exoskeleton robot for diagnosis, therapy, and outcome evaluation in neurorehabilitation. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. 2013; 21 (3): 490-499. 22.
- [4] Narváz Y, Vivas OA, Enríquez SC, Sabater-Navarro JM, García N, Martínez A. Diseño de un dispositivo neumático para rehabilitación de mano mediante funda termorretráctil. *Actas de las XXXV Jornadas de Automática*. 2014, pp. 423-429.
- [5] Tyromotion. (2018). AMADEO – Five Fingers. One Amadeo. For All Phases of Rehabilitation. 15 octubre 2018, de Tyromotion Sitio web: <https://tyromotion.com/en/products/amadeo>
- [6] C. Schabowsky, S.B. Godfrey, P.S. Lum. (28/07/2010). Development and pilot testing of HEXORR: hand Exoskeleton rehabilitation robot. 20/09/2018, de The Chatolich University of America Sitio web: <http://www.rehabilitacionblog.com/2010/12/hexor-x-y-handsome-dos-proyectos-de.html>
- [7] Pinzón BMY. Alteraciones de la función motora de miembro superior en la hemiplejía. *Modelos de Intervención Fisioterapéutica. Mov Cient*. 2009; Vol. 3 (1): 101-108.

- [8] Anatomy of the Hand. (2019). Healthlibrary.uchospitals.edu. Retrieved 22 June 2019, from <http://healthlibrary.uchospitals.edu/content/adult-diseases-and-conditions-v0/anatomand237a-de-la-mano/>.
- [9] Sam Jacob. (2002). Atlas de Anatomía Humana. Elsevier España: S/D.
- [10] Julián Pérez Porto. (2010). Sensor. 15 octubre 2018, Sitio web: <https://definicion.de/sensor/> Julián Pérez Porto y Ana Gardey. (2010). DEFINICIÓN DE SENSOR. 10/09/2018, de Definición. De Sitio web: <https://definicion.de/sensor/>
- [11] S/D. (2006). Sensor de Gestos con APDS9960. 20/10/2018, de S/D Sitio web: <http://83.56.32.125/sensorgestos.html>. MedinePlus. (31 agosto 2018). Electromiografía. 10/09/2018, de MedinePlus información de salud para usted Sitio web: <https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/003929.htm>
- [12] Antony García González. (2016). ¿Qué es y cómo funciona un servomotor? 15 octubre 2018, de PANAMAHITEK Sitio web: <http://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/servomotor/>
- [13] HXX. (12 marzo, 2015). Materiales de impresión 3D (I): PLA (ácido poliláctico). 10/09/2018, de HXX Sitio web: <http://hxx.es/2015/03/12/materiales-de-impresion-3d-i-pla-acido-polilactico/>
- [14] DATASHEET: Avago Technologies. (November 8, 2013). APDS-9960 Digital Proximity, Ambient Light, RGB and Gesture Sensor. Avago Technologies, 1, 38. 10/09/2018, De [https://cdn.sparkfun.com/assets/learn\\_tutorials/3/2/1/Avago-APDS-9960-datasheet.pdf](https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/3/2/1/Avago-APDS-9960-datasheet.pdf) Base de datos
- [15] Fajardo Belén, Cabrera Gabriel, Pulido Antonio, José Zamorín María. (S/D). Mecanismos de Transmisión del Movimiento. 20/10/2018, de Aprendemos Tecnología Sitio web: <https://aprendemostecnologia.org/maquinas-y-mecanismos/mecanismos-de-transmision-del-movimiento/>