

Prototipo de mano robótica inspirada en la mano humana

Robotic hand prototype inspired by the human hand

Andrés F. García G.

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
afgarciag@correo.udistrital.edu.co

Andrés J. Becerra

Inmel S.A.S.
ajbecerra@correo.udistrital.edu.co

Este artículo describe el diseño y construcción de un prototipo de mano robótica que replica algunas características funcionales presentes en la mano humana. Se determinó el diseño más favorable con base en el estudio propio y del análisis de documentos científicos basados en prototipos similares ya desarrollados en nuestro país y en el mundo. Se realizaron diferentes pruebas y simulaciones con el fin de determinar los materiales a usar y la forma de realizar el ensamble para su construcción. La mano robótica esta compuesta por cinco servomotores los cuales transmiten el movimiento a través de hilos de nailon a cada uno de los dedos, haciendo la función de tendones y músculos de la mano humana real. El prototipo cuenta con un servomotor adicional el cual permite el realizar la extensión y flexión de la mano. Los servomotores se encuentran ubicados en un antebrazo diseñado de forma que se asemeja al antebrazo humano, con el fin de que la forma del conjunto de la mano y el antebrazo se asemejen a la morfología humana.

Palabras clave: Mano, modelado, prototipado, robot

This paper describes the design and construction of a prototype of robotic hand that replicates some functional features present in the human hand. The most favorable design was determined based on the own study and the analysis of scientific documents based on similar prototypes already developed in our country and in the world. Different tests and simulations were carried out in order to determine the materials to be used and the way of assembly. The robotic hand is composed of five servomotors which transmit the movement through nylon threads to each of the fingers, making the tendons and muscles function of the real human hand. The prototype has an additional servomotor which allows the extension and flexion of the hand. The servomotors are located in the forearm, so the design resembles the human forearm, the shape of the whole hand and forearm resemble the human morphology.

Keywords: Hand, modeling, prototyping, robot

Tipología del artículo: Investigación

Fecha recepción del manuscrito: Noviembre 4, 2016

Fecha aceptación del manuscrito: Diciembre 5, 2016

Investigación financiada por: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Edición digital: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/issue/view/798>

Cómo citar: García, A., y Becerra, A. (2016). *Prototipo de mano robótica inspirada en la mano humana*. Revista Tekhnê, 13(2), 27-42.

Introducción

El mundo actual tiene una gran revolución tecnológica con grandes avances científicos, entre estos están los robots, herramientas útiles en la cotidianidad. Estas herramientas ayudan al ser humano con trabajos en fábricas y en hogares. Cada día los empresarios y personas tienen la necesidad de adquirir estos robots para mejorar procesos o hacer la vida un poco más fácil. Teniendo en cuenta estas necesidades, se construyen robots que sustituyan o releven al ser humano total o parcialmente en labores donde hallan ambientes hostiles, contaminados, de alto riesgo de accidentalidad o falta de habilidades que el ser humano no pueda realizar. El prototipo de mano robótica es en sí una plataforma robótica que puede ser de gran ayuda para suplir estas necesidades laborales, así como para reemplazar los movimientos de la mano humana.

El desarrollo de manos robóticas es una de las áreas más estudiadas a nivel mundial, debido a que la mano humana cumple con funciones mecánicas, sensitivas y hasta de comunicación, además es nuestro principal órgano para la manipulación física del entorno (Zuñiga y Andrade, 2011), debido a esto se han desarrollado en el mundo y en nuestro país gran cantidad de prototipos y estudios.

De los prototipos estudiados se considerada de relevancia la mano desarrollada por R. Mahmoud (Mahmoud, Ueno, y Tatsumi, 2011). Este trabajo presenta un robot antropomorfo llamado mano Osaka-Ciudad-Universidad-Mano II. Ellos diseñaron una mano robótica estética que permite su uso como una prótesis de mano. Utilizaron sensores táctiles distribuidos en el prototipo OCU-Mano II con el fin de tomar objetos con firmeza. Una estrategia es que por medio de un guante maestro puedan conducir el prototipo OCU-mano II como un esclavo con el fin de aumentar la resolución de la técnica de conducción maestro-esclavo. El prototipo OCU-Mano II se utiliza como equipo auxiliar que ayuda a los operadores, reduciendo sus cargas en tareas cotidianas de una manera mejor y más rápida.

En cuanto a diseño morfológico de la mano, es de importancia la investigación documentada en *An Anthropomorphic Design Guide line for the Thumb of the Dexterous Hand* (Hairong, Shaowei, y Hong, 2012), donde se analizan las capacidades de manipulación más relevantes que tiene la mano humana, como es el movimiento del dedo pulgar, como antesala para el diseño del robot. En este documento se muestra una guía de diseño antropomórfica para el dedo pulgar de la mano. Con el modelo de articulación del pulgar, se abstraen cinco configuraciones de pulgar que sirven para el diseño de una mano robótica diestra. De acuerdo con el teorema de Euler sobre finito de rotación de cuerpo rígido, se propone un nuevo método para determinar la posición del pulgar en la palma de la mano. Además, se evaluó la destreza de la mano en la manipulación



Figura 1. Mano Osaka-Ciudad-Universidad-Mano II (Mahmoud et al., 2011).

de un objeto, con un método numérico para calcular la oponibilidad del pulgar basado en el método de Monte Carlo.



Figura 2. "The HIT/DLR II hand" (Hairong et al., 2012).

En cuanto a modelamiento, morfología y control es el artículo *Kinematic Modelling of Anthropomorphic Robot Upper Limb with Human like Hands* (Tondu, 2009), toma especial importancia el diseño y la apariencia. Los diseñadores de robots toman interés en la apariencia de la mano humana, y desarrollan modelos cinemáticos para las manos artificiales robóticas.

En cuanto al mecanismo utilizado para realizar el movimiento de los dedos de la mano robótica el artículo *Diseño y construcción de una mano robótica para la enseñanza del alfabeto dactilológico universal para personas sordomudas* (Zuñiga y Andrade, 2011) (Fig. 4) nos muestra un prototipo desarrollado con un mecanismo fácil de replicar, el cual cuenta con servomotores e hilo de nailon

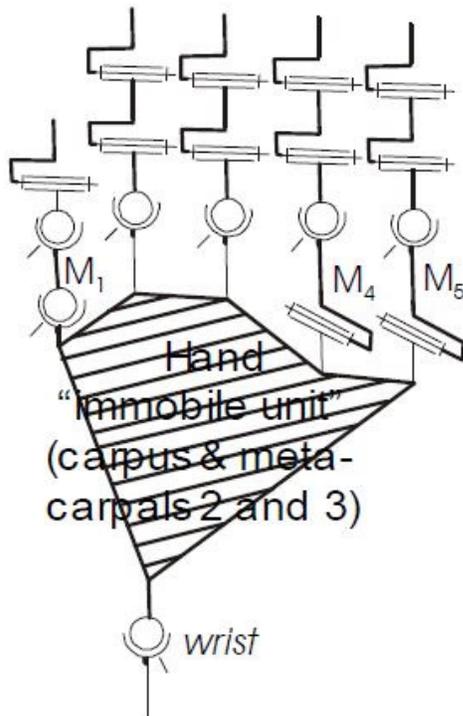


Figura 3. Modelado cinemático de la mano - Integración del carpo y los metacarpianos 2 y 3 en la Mano (Tondy, 2009).

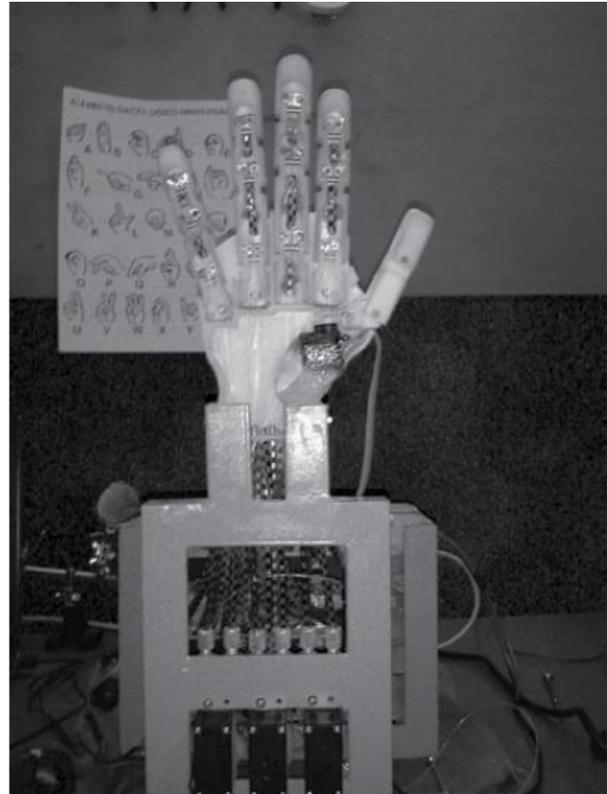


Figura 4. Mano robótica para la enseñanza del alfabeto dactilológico universal (Zuñiga y Andrade, 2011).

para realizar el respectivo movimiento de cada uno de los dedos, el artículo describe como se realizó un programa de interfase donde por medio de una cámara y un programa de adquisición de imágenes se tomaron los patrones del alfabeto dactilológico para personas sordomudas para que luego el prototipo las ejecute.

Buscando realizar una mano robótica antropométricamente más próxima a la mano humana, el prototipo descrito en el artículo *Prototipo de mano robótica antropométrica sub-actuada* (Pérez, 2012) (Fig. 5) fue realizado a partir del análisis y procesamiento de imágenes tomográficas computarizadas generando un modelo en tres dimensiones de la mano humana; con base en esto construyen un modelo en CAD, donde logran obtener las dimensiones y forma de cada uno de los componentes del prototipo, realizando una mano robótica en aspecto muy similar a la mano humana.

Con base en la investigación desarrollada se realiza un prototipo, para dotar al grupo de investigación de un modelo de partida que recrea algunas de las funciones de la mano humana. El proyecto se basó en la construcción de un prototipo de mano robótica, Se encontró y se tuvo en cuenta para la construcción, utilizar materiales livianos, resistentes, de gran calidad y de bajo costo que se encontraran en el

mercado. Todas estas características adaptadas optimizaron las cualidades y capacidades del arquetipo. Uno de los criterios de diseño fue la construcción del prototipo con medidas estándares similares a las de la mano humana. Estas dimensiones adaptadas al prototipo sirvieron para mostrar una parte estética, emular cualidades y capacidades, además de la conexión futura con los otros prototipos. La construcción contiene dispositivos y estructuras que ayudaron a imitar movimientos de articulación buscando alcanzar y posiblemente en un futuro mejorar las capacidades de funcionamiento de la mano humana.

La organización del artículo está conformada de la siguiente manera: en la sección 2, se presentan conceptos de funcionalidad y diseño del modelo de mano robótica. En la sección 3, se describe el diseño estructural del prototipo de mano robótica, incluyendo los criterios y especificaciones aplicados en la construcción. En la sección 4 se muestra la evaluación de funcionamiento y desempeño del prototipo mediante el modelo real, que realiza los movimientos y acciones, para la cuales fue creado. Finalmente la sección 5 concluye el artículo.

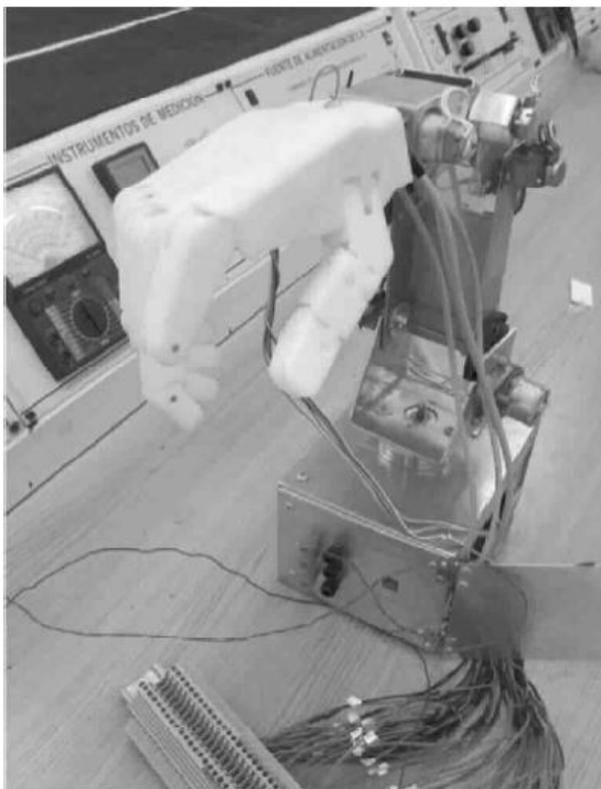


Figura 5. Prototipo de mano robótica antropométrica sub-actuada de la Universidad de Antioquia (Pérez, 2012).

Formulación del problema

Los criterios que se definieron para desarrollar y determinar la mejor forma de realizar el prototipo se basaron en un análisis de necesidades, disponibilidad y costos de los aspectos más importantes encontrados en diversas investigaciones realizadas (Dang, Weisz, y Allen, 2011; Hairong et al., 2012; Hyunhwan y Joono, 2011; Mahmoud et al., 2011; Pérez, 2012; Tondu, 2009; Zuñiga y Andrade, 2011). Este análisis permitió proponer cinco criterios los cuales son: Movimiento de la estructura mecánica, Programación y selección del módulo de control, articulación y Materiales. Con la unión de esto se pudo obtener los mejores resultados; los criterios serán descritos a continuación.

Movimiento

Los requerimientos necesarios para llevar a cabo el movimiento del prototipo fueron apoyados por diversos ejemplos e investigaciones. El principal fue los movimientos naturales de la mano humana y modelos similares realizados en el mundo. Para llevar a cabo estas articulaciones en el prototipo; fue necesario el uso de un conjunto de mecanismos que crean la contracción, estiramiento y giro del arquetipo

estos movimientos son los grados de Libertad. El número de DOF (degrees of freedom) de un robot suele coincidir con el número de articulaciones que posee (Hyunhwan y Joono, 2011)(Tondu, 2009). Como ejemplo de esto está la Fig. 6 que muestra el modelo cinemático de un prototipo de mano con 13 DOF, la Fig. 7 corresponde al prototipo real.

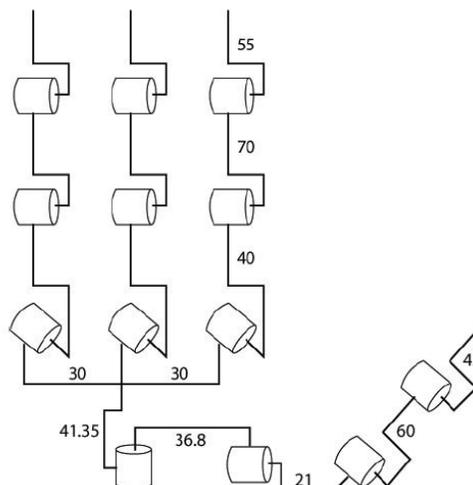


Figura 6. Modelo cinemático de la "KU hybrid HAND"(Hyunhwan y Joono, 2011).

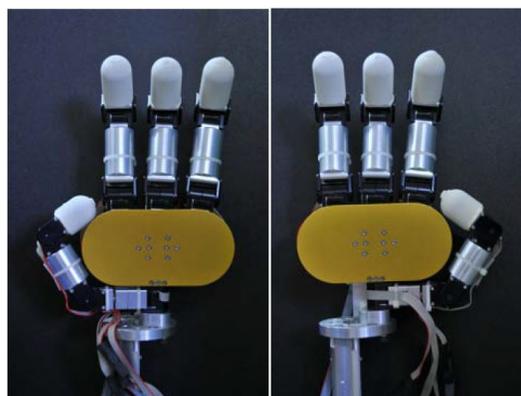


Figura 7. Prototipo real de la "KU hybrid HAND"(Hyunhwan y Joono, 2011).

Con fin de hacer un prototipo más próximo a la mano real se incluirá el cuarto dedo al proyecto, esto para mejorar su apariencia y funcionalidad. Aumentando a 16 DOF, esto será detallado en la sección 3.

Programación y módulo de control

Buscando una plataforma de fácil manejo y bajo costo se optó por trabajar con Arduino que es un hardware libre, está compuesto por una placa con un microcontrolador y cuenta

con puertos de entrada/Salida. El software utiliza un lenguaje de programación llamado Processing/Wiring muy similar al C ANSI (Monk, 2011), con base en esto se selecciona el Arduino nano como módulo de control debido a su tamaño, costo, capacidad, facilidad de programación y montaje en el prototipo final.

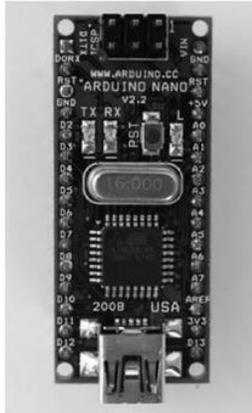


Figura 8. Arduino Nano (Monk, 2011).

Articulación

La función de la mano robótica es la articulación, es ahí donde se tiene el punto de acción principal de esta. Para llevar a cabo esta función se necesitó de un prototipo mecánico que tuviera componentes electrónicos (actuadores) adecuados, además de una correcta morfología y tamaño. Con todas estas características reunidas se permitió generar y ver la articulación real del arquetipo.

De acuerdo a la idea definida en el diseño, se pretendió que la mano robótica tuviera formas reales y dimensiones similares a la mano humana, ya que estas características permiten una buena flexión y deflexión de las coyunturas del prototipo, asimismo un conjunto de articulaciones para emular diferentes tipos de agarres. Estas cualidades adaptadas al arquetipo, dan la ventaja de relacionar y poder comparar la eficiencia en los movimientos con respecto a la mano del ser humano.

Materiales

En la fabricación del prototipo de mano robótica, se utilizó una impresora 3D propiedad de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, cuyo material de impresión puede ser el ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno) como el PLA (poly lactic acid) que por medio de la extrusión de delgadas capas de alguno de estos materiales, se va creando un modelo sólido en tres dimensiones. Estos materiales ofrecen diferentes tipos de características, como que el ABS requiere una mayor temperatura y ofrece una pieza con un mejor

acabado siendo más flexible, mientras que el PLA es más frágil pero más fácil de modificar de ser necesario (Molina, 2016), ambos comparten un bajo costo y ambos cuentan con cualidades que fueron aprovechadas para el correcto ensamble y funcionamiento del prototipo.

Metodología

La metodología de este proyecto fue trazada de forma congruente y ordenada que deriva en cinco fases principales, las cuales se encuentran descritas en el siguiente orden: investigación, diseño, evaluación, construcción y documentación. Este conjunto sirvió para el desarrollo de un prototipo de mano robótica funcional.

Como se ha mostrado a lo largo del artículo este prototipo se apoyó en el estudio de diferentes propuestas ya ejecutadas en el mundo, las cuales se irán describiendo en el diseño de cada una de las partes que componen el prototipo y como determinaron parámetros del mismo.

Diseño

En principio para la construcción de la mano robótica, se utilizó un software CAD (diseño asistido por computadora) llamado Solid Works, en este inicialmente se generan las piezas del prototipo y posteriormente se realizaron las diferentes pruebas, modificaciones y ensamblaje final con cada una de las piezas. El diseño del prototipo se distribuyó entre de los dedos, la palma y el antebrazo descritos a continuación.

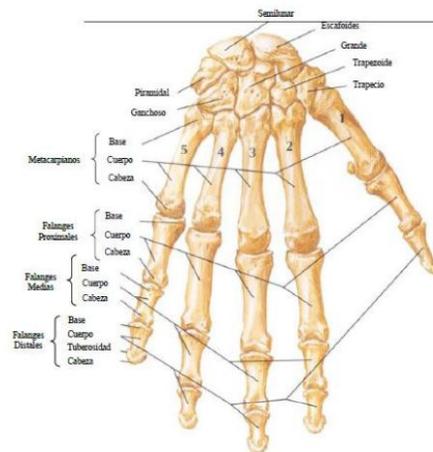


Figura 9. Huesos de la mano (mano derecha, vista dorsal) (Netter, 2011).

La Fig. 9 será usada como referencia inicial debido a que es la mano humana la que se busca asemejar con el prototipo.

Diseño de los dedos. Los dedos están compuestos por las falanges que son distal, media y proximal, son en total catorce huesos, dos en el pulgar (el pulgar no tiene falange media) y tres en cada uno de los otros cuatro dedos (Netter, 2011) como se observa en la Fig. 9, para generar los dedos partimos de la tomografía y el estudio realizado de la mano derecha de un varón de 25 años de edad 1.73 m de altura y 81 kg de peso realizado por la Universidad de Antioquia (Pérez, 2012), con base en esto se generan piezas en Solid Works redondeadas con el fin de obtener un dedo más similar al humano.

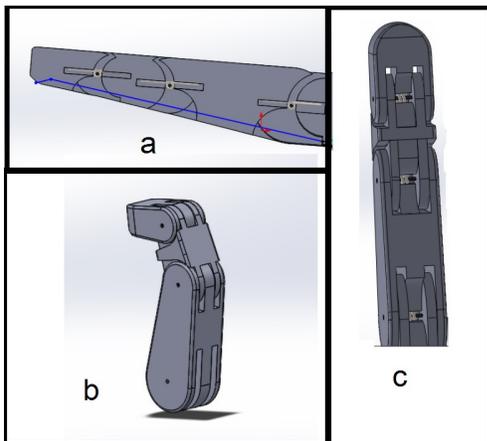


Figura 10. a) dedo corte interno, b) dedo vista frontal, c) dedo vista posterior.

Como se observa en la Fig. 10 (apartado a) el dedo se encuentra conectado por cada una de las falanges a través de eslabones y por medio de resortes estos cumplirán con tener los dedos estirados, esta sería la posición natural de los dedos.

El diseño del dedo pulgar al no contar con una falange media (Netter, 2011); consta de la falange distal, proximal y el metacarpiano el cual permitirá que el pulgar haga el movimiento de abducción y flexión hacia el centro de la palma de la mano, movimiento natural en la mano humana (Cailliet, 2006).

Diseño de la palma. La palma se diseñó con el fin de ser el punto de conexión de cada uno de los dedos, como resultado al ser dirigidos cada uno de los dedos hacia la palma será lo que le permita al prototipo sostener objetos (Hairong et al., 2012), al igual que en la pieza anterior esta es basada en la tomografía y en el trabajo realizado en la Universidad de Antioquia (Pérez, 2012) adaptada al mecanismo de movimiento seleccionado.

Como se observa en la Fig. 12 la pieza intenta reproducir los arcos y la forma de las curvas naturales de una mano humana (Pérez, 2012). Se destaca algo que se observó en los trabajos investigados (Mahmoud et al., 2011) (Pérez, 2012) es que la altura a la que se encuentran conectados los dedos

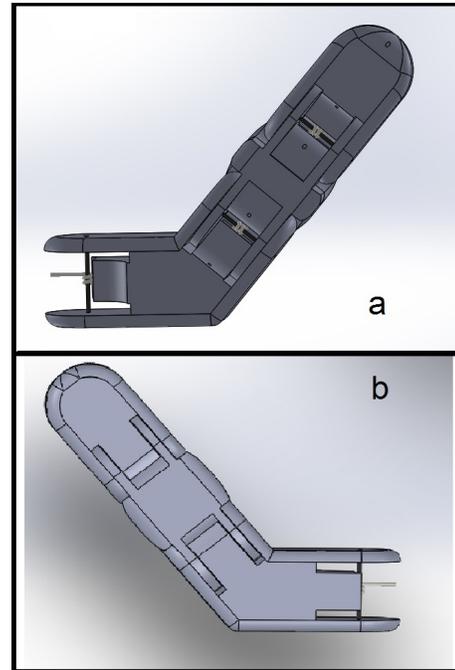


Figura 11. a) Pulgar vista frontal, b) Pulgar vista posterior.

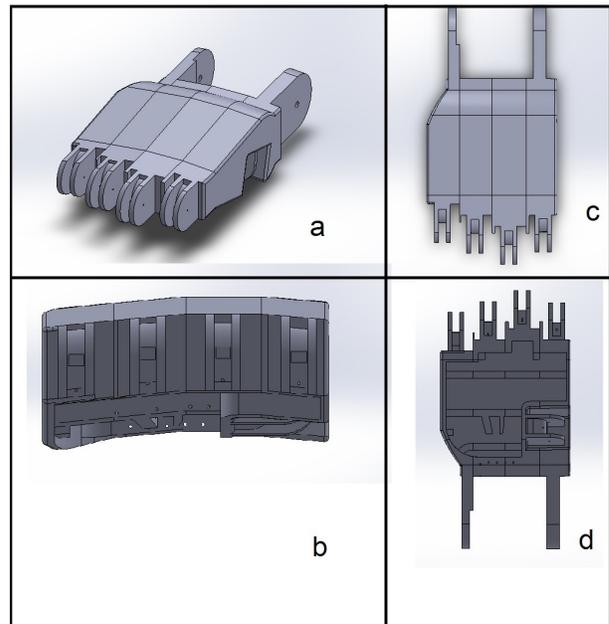


Figura 12. a) Palma, b) Palma frontal, c) Palma vista inferior, d) Palma vista superior.

no es la misma para cada uno de ellos esto se debe a que en la mano humana figura mano los metacarpianos no miden lo mismo para cada uno de los dedos (Netter, 2011). Otra cosa que cabe destacar es que la pieza es hueca esto es porque los dedos son movidos por hilos de nailon uno por cada

dedo, estos hilos necesariamente pasan por la palma como se muestra en la Fig. 13, estos hilos pasan por caminos que fueron diseñados buscando que el movimiento fuera el más óptimo sin presentar demasiada fricción que dificultara el movimiento de los dedos y en caso de que estos caminos fueran errados se lograra modificar la pieza una vez impresa sin necesidad de realizar una nueva impresión, adicional a esto restó peso en la palma facilitando el movimiento a la muñeca.

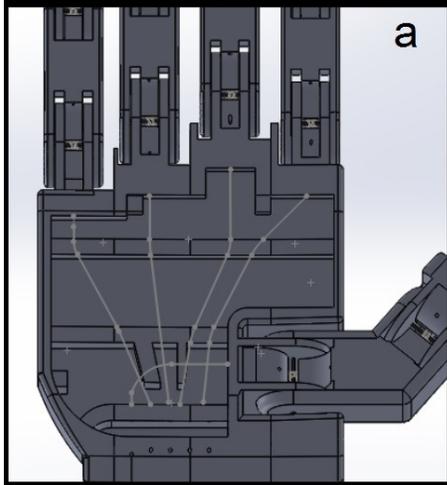


Figura 13. Caminos para el nailon de cada uno de los dedos.

Fue necesario diseñar junto a la palma una tapa debido a que la pieza es hueca esto se realizó con el fin de colocar un punto de apoyo para los objetos y hacerla estéticamente más similar a la mano humana (Pérez, 2012).

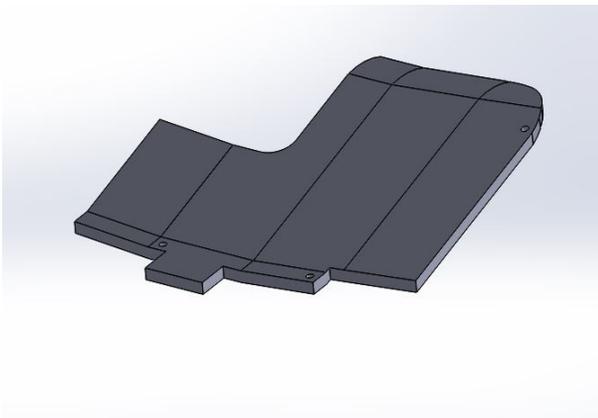


Figura 14. Tapa de la palma.

Diseño del antebrazo. El diseño del antebrazo se da debido al mecanismo que se seleccionó como el más práctico para el movimiento de los dedos, que es el de servomotores transmitiendo su movimiento a través de hilo nailon de cada uno de los dedos ocasionando la flexión de cada uno de estos

(Zuñiga y Andrade, 2011), con base en esto se pensó en un espacio donde se lograran albergar los servomotores y fuera similar al antebrazo humano, también se aprovechó para agregar un DOF adicional al conectar la mano al antebrazo por medio de otro servomotor.

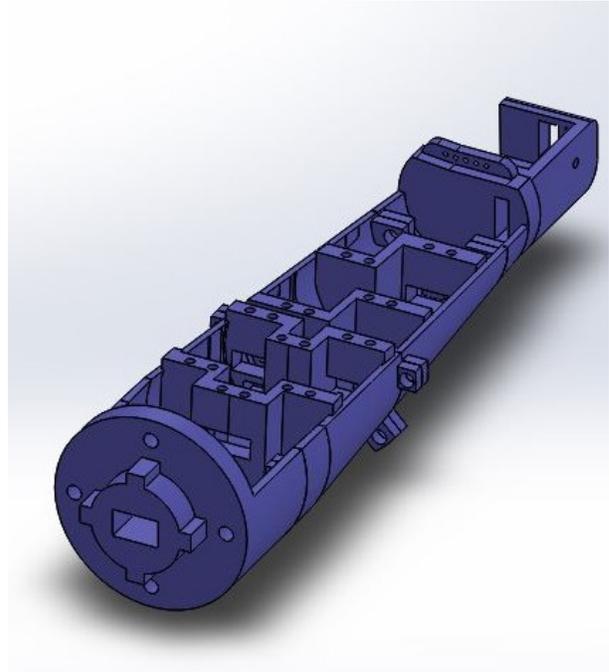


Figura 15. Pieza antebrazo.

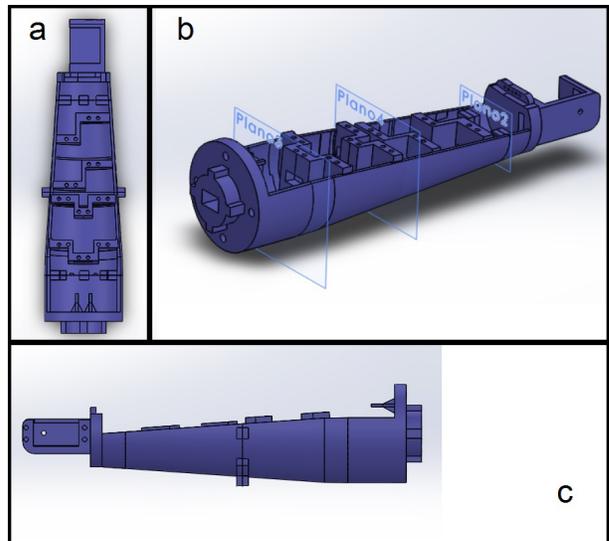


Figura 16. a) Antebrazo vista frontal diseño final, b) Antebrazo sin seccionar, c) Antebrazo vista lateral diseño final.

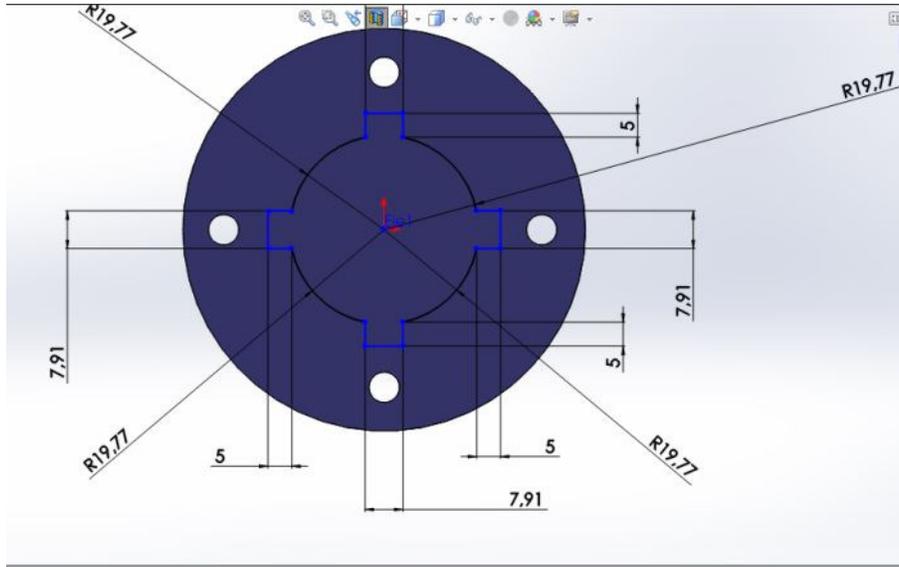


Figura 17. Dimensiones pieza de acople vista inferior del antebrazo.

La pieza se diseñó de forma que con una medida similar al de un antebrazo humano, se lograran ubicar los seis servomotores y ninguno de estos fuera interrumpir el movimiento del otro, para esto se tuvo en cuenta la distancia entre cada uno de estos, adicional como se observa en la Fig. 16 (apartado c) están ubicados de tal forma que los servos de la parte final quedan más altos que los del principio esto con el fin de que los hilos de nailon no se encuentren, en la parte final del antebrazo como se ve en la Fig. 16 (apartado a) se dejó un espacio destinado para la ubicación del módulo control; también como se ve en la Fig. 15 se creó un modo de conexión para implementarse con otros prototipos en futuros proyectos, en la Fig. 17 se observan las dimensiones de este acople.

Evaluación de desempeño

Con el diseño de cada una de las piezas se procede a realizar pruebas y simulaciones en Solid Works para determinar diferentes aspectos sobre el prototipo antes de realizar la impresión de las piezas. En principio se realiza el ensamble de las piezas diseñadas como se muestra en la Fig. 18 para tener una idea de cómo se verá el prototipo, en esta figura también cabe destacar que únicamente se encuentran las piezas diseñadas que posteriormente serán impresas.

De la Fig. 18 se observa lo expresado en la tabla 1 y la tabla 2, donde se muestra la cantidad de grados de libertad DOF y las dimensiones del diseño.

Con el montaje de las piezas como se ve en la Fig. 19, con ayuda de Solid Works se determina el volumen, área de superficie, centro de masa, y el peso del Conjunto total,

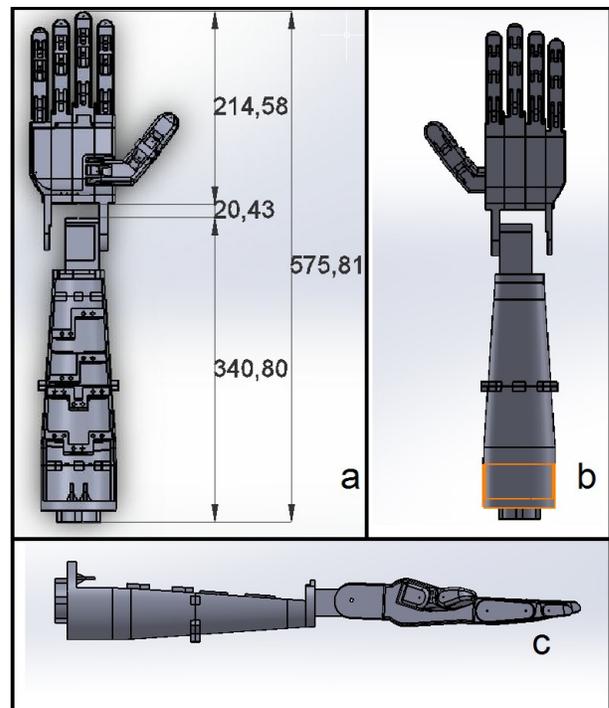


Figura 18. a) Vista frontal del ensamble y medidas en milímetros, b) Vista posterior, c) Vista lateral.

también como se observa en la Fig. 20 podemos ver la proporción de cada uno de los elementos que componen el diseño, junto a los valores individuales de cada una de las piezas para estos ejemplos se tomó el ABS como material.

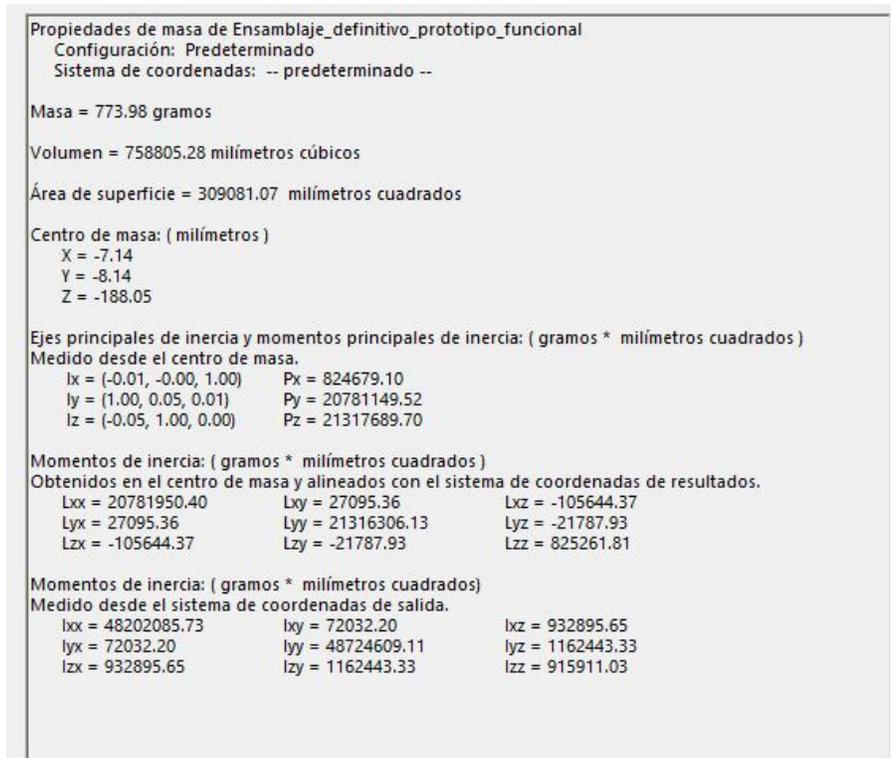


Figura 19. Propiedades de masa del ensamblaje

Tabla 1
 Grados de libertad del prototipo.

CONJUNTO	GRADOS DE LIBERTAD (DOF)
Dedo indice	3
Dedo medio	3
Dedo anular	3
Dedo meñique	3
Dedo pulgar	3
muñeca	1
TOTAL	18

En la tabla 3 se puede observar el peso de cada uno de los elementos tanto para el ABS como para el PLA.

La prueba de mayor importancia que se realizó con el ensamble en Solid Works fue el determinar el Angulo de rotación máximo para los dedos como se observa en las Figs. 21 y 22, y la muñeca como se observa en la Fig. 23. Estos se realizaron manipulando el ensamble a los puntos límites y verificando con la herramienta detección de interferencias que no hubiera contacto entre las piezas, la importancia de la prueba se da debido a que determina

Tabla 2
 Dimensiones del prototipo.

DIMENSION	MEDIDA [mm]
Alto	575.81
Ancho	166.32
Profundo	84.35

los ángulos máximos a los que por diseño puede alcanzar el prototipo.

Adicional se realizan pruebas complementarias con el asistente para análisis Simulation Xpress de Solid Works sobre cada una de las piezas, con este asistente se puede predecir el comportamiento de la pieza bajo cargas, como se observa en la Fig. 24 que es la simulación sobre una de las falanges. Debido al tamaño de las piezas se observa que estas no presentan un gran estrés mecánico o muestran una gran deformación por esto no es necesario el re diseñarlas.

Una vez realizadas las diferentes pruebas en Solid Works se define en que material serán impresas las piezas; teniendo la disponibilidad tanto del ABS como del PLA se determina que los dedos serán impresos en ABS mientras que las demás piezas serán impresas en PLA, se decide realizar de esta manera ya que el ABS es más flexible y ofrece una pieza

Visualización de ensamblajes					
Nombre de archivo	Cantidad	Área de superficie	Volumen	Peso total	
Pieza1_Palma_final	1	70876.08	277719.16	283.27	
Sólido2	1	53244.02	102215.58	104.26	
Sólido3	1	39214.02	69170.24	70.55	
Sólido1	1	34125.56	92557.97	94.41	
Sólido4	1	22672.31	55519.85	56.63	
Pieza1_Tapa_Palma	1	11824.17	15625.33	15.94	
Pieza1_Metacarpiano(Pulgar)test	1	9040.48	21841.37	22.28	
Pieza1_Falange Proximal(Indice.medio,anular,meñiq...	4	7973.65	14416.70	58.82	
Pieza1_Falange Proximal (Pulgar)test	1	6058.18	13093.60	13.36	
Pieza1_Falange distal(Pulgar)test	1	4413.12	10461.91	10.67	
Pieza1_Falange Media(Indice.medio,anular,meñique...	4	3746.28	6001.03	24.48	
Pieza1_Falange distal(Indice.medio,anular)	3	2695.36	4838.46	14.81	
Pieza1_Falange distal(Meñique)test	1	2647.32	4414.00	4.50	

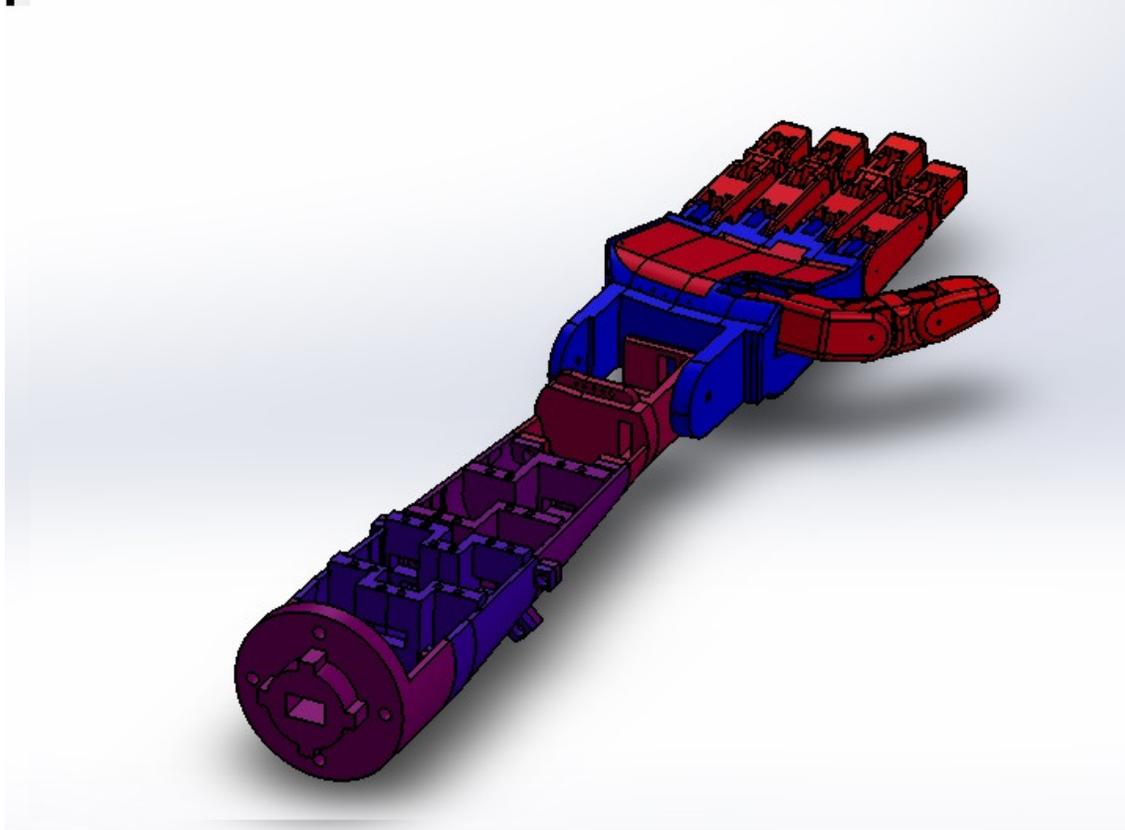


Figura 20. Proporción de volumen de cada pieza para el ensamblaje.

Tabla 3
Peso de las piezas en ABS y PLA.

PIEZA	Cantidad	Área [mm2]
Palma mano	1	70876,08
Antebrazo Sólido2	1	53244,02
Antebrazo Sólido3	1	39214,02
Antebrazo Sólido1	1	34125,56
Antebrazo Sólido4	1	22672,31
Tapa Palma	1	11824,17
Metacarpiano(Pulgar)	1	9040,48
Falange Proximal	4	7973,65
Falange Proximal (Pulgar)	1	6058,18
Falange distal(Pulgar)	1	4413,12
Falange Media	4	3746,28
Falange distal(Índice.medio,anular)	3	2695,36
Falange distal(Meñique)	1	2647,32
TOTAL	21	268530,55

Tabla 4
Peso de las piezas en ABS y PLA (parte 2).

PIEZA	Peso ABS[g]	Peso PLA [g]
Palma mano	283,27	336,04
Antebrazo Sólido2	104,26	123,68
Antebrazo Sólido3	70,55	83,7
Antebrazo Sólido1	94,41	112
Antebrazo Sólido4	56,63	67,18
Tapa Palma	15,94	18,91
Metacarpiano(Pulgar)	22,28	26,43
Falange Proximal	58,82	69,78
Falange Proximal (Pulgar)	13,36	15,84
Falange distal(Pulgar)	10,67	12,66
Falange Media	24,48	29,04
Falange distal	14,81	17,56
Falange distal(Meñique)	4,5	5,34
TOTAL	773,98	918,16

con un mejor acabado y al ser los dedos más pequeños se opta por esto; las piezas grandes se opta por el PLA ya que es un material un poco más frágil que permite realizar modificaciones de una manera más fácil (Molina, 2016). El peso final para las piezas es el mostrado en la tabla 5.

Para realizar la impresión de las piezas fue necesario realizar una modificación sobre la pieza del antebrazo la pieza original como se observa en la Fig. 16 apartado b era una pieza única pero debido al tamaño que puede imprimir la maquina no era posible realizar esta impresión, se tuvo

que seccionar el antebrazo en 4 piezas como se muestra en la Fig. 15 que una vez impresas serán conectadas a través de tornillos y tuercas como se muestra en la Fig. 27; para imprimir es necesario pasar las piezas al formato STL , pasarlas por el programa netfabb para verificar que no existan errores sobre la pieza y sobre Flash Print que es el asistente para la impresión.

Junto con las 21 piezas impresas el prototipo cuenta adicionalmente con piezas complementarias como son los 3 resortes y eslabones que tiene cada dedo, los 14 tornillos y

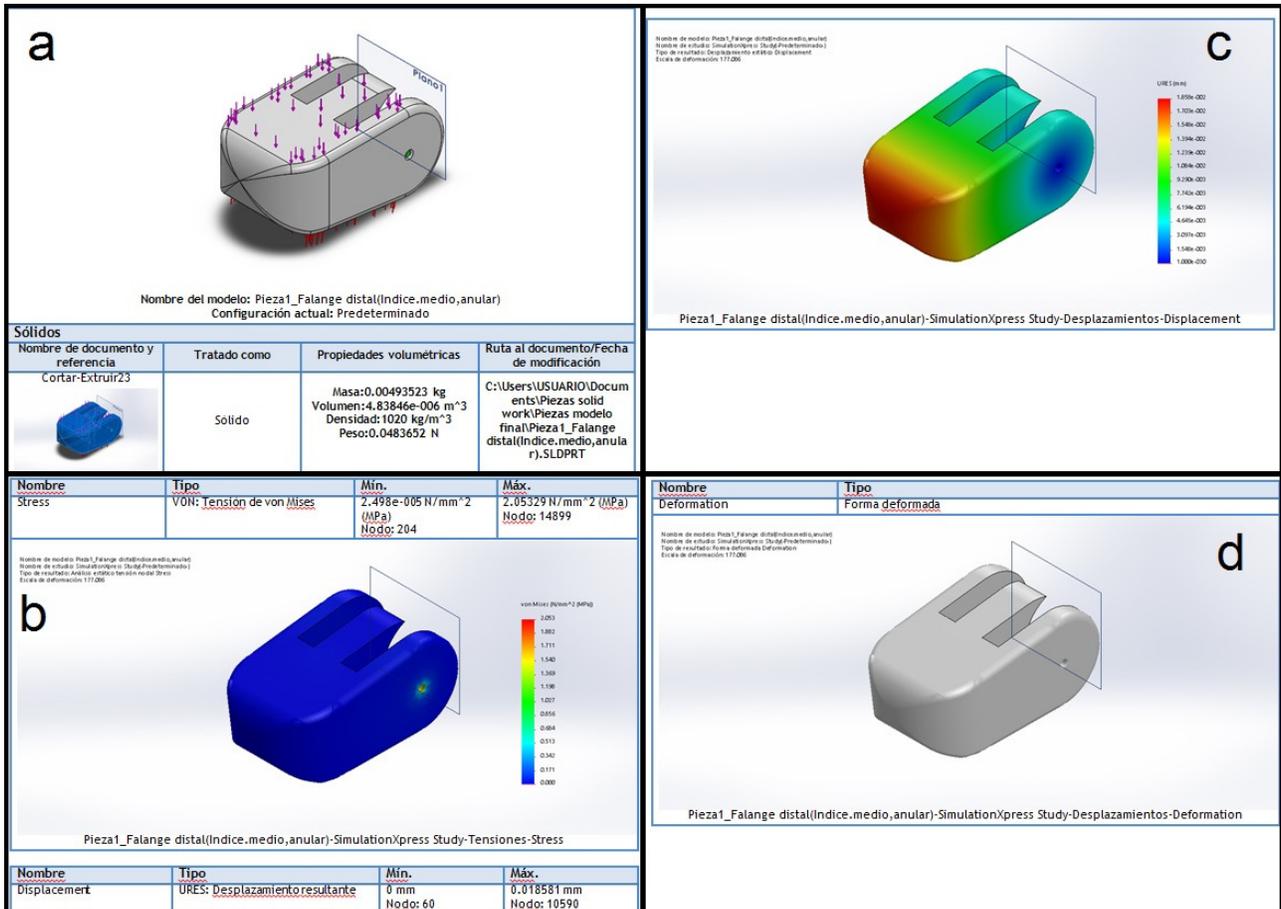


Figura 24. Resultado Simulation Xpress, a) propiedades del sólido, b) estudio de desplazamiento, c) estudio de tensión estrés, d) forma deformada.

Tabla 5

Peso de las piezas del prototipo impreso.

MATERIAL DE IMPRESIÓN	Cantidad	Peso Total [g]
ABS	15	148,92
PLA	6	741,51
TOTAL PROTOTIPO	21	890,43

tuerkas para la sujeción del antebrazo, los actuadores que son 6 servomotores y el módulo de control Arduino nano.

Fue necesario el realizar modificaciones sobre las piezas impresas para realizar el montaje del prototipo, como se observa en la Fig. 26, también fue necesario el cortar la pieza ya que al momento del diseño no se dimensiono bien el tamaño del cable de los servomotores, adicional fue necesario el realizar nuevamente los agujeros de los eslabones y sobre los que pasa el hilo nailon ya que en la impresión quedaron muy pequeños, la última modificación que se realiza es el método de conexión entre la mano y el

antebrazo esta fue debido a que al momento de realizar el montaje resulto más práctico dejar el servomotor de forma directa en la mano de como estaba previsto.

El prototipo como se observa en la Fig. 28, debido a los resortes toma una posición natural similar a la de la mano en reposo humana que no es con los dedos totalmente estirados sino un poco recogidos, esto se da por el rango de movimiento del accesorio del servomotor.

Con el prototipo ya construido se realizan diferentes pruebas observando los agarres básicos como se muestran en la Fig. 30 y la articulación de la muñeca como se ve

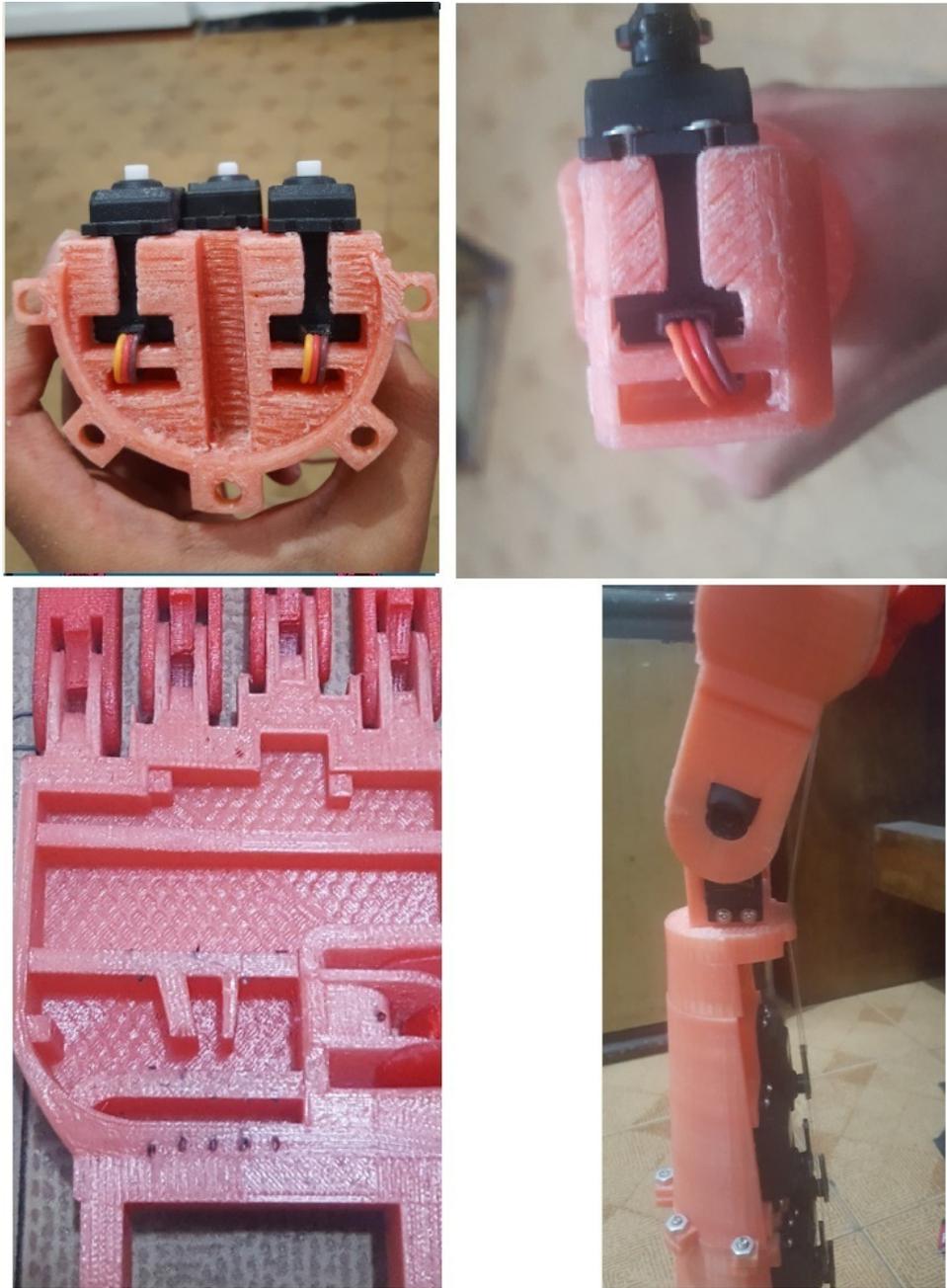


Figura 26. Modificaciones sobre las piezas ya impresas.

en la Fig. 29. Finalmente se obtiene un prototipo funcional, practico para futuros estudios por parte del grupo de investigación ARMOS de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Conclusiones

Este artículo recopila las investigaciones más relevantes dando como resultado un prototipo práctico que adopta características funcionales y morfológicas que imitan a la mano humana. Se observa, además, que no se obtiene una réplica artificial, sino un equivalente basado en el

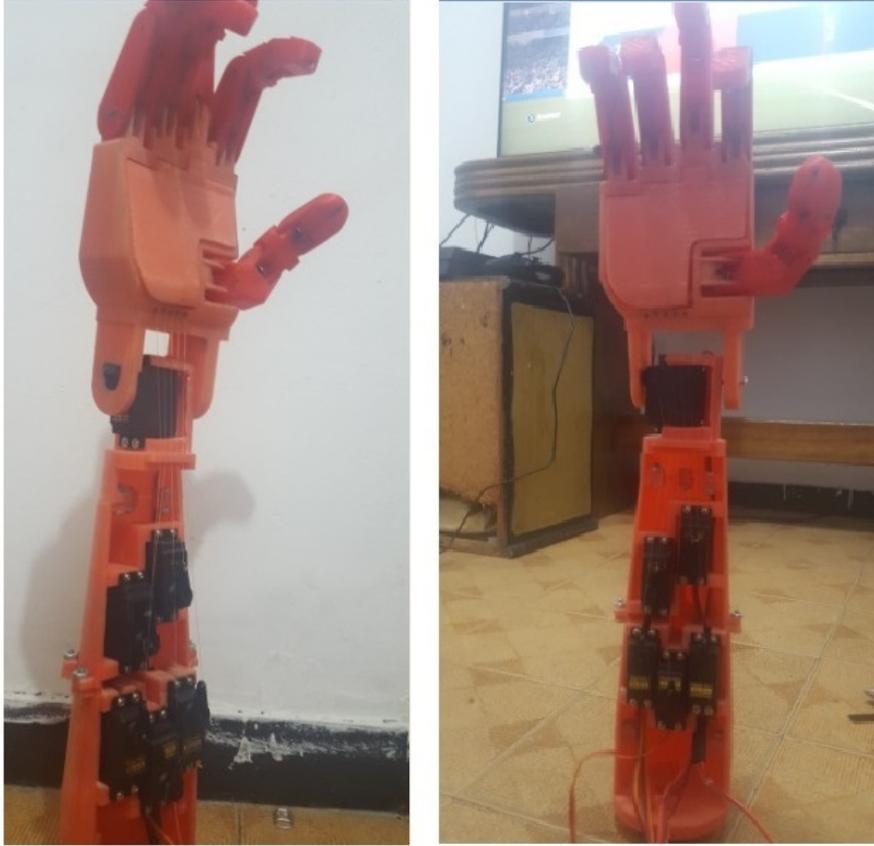


Figura 28. Prototipo finalizado.

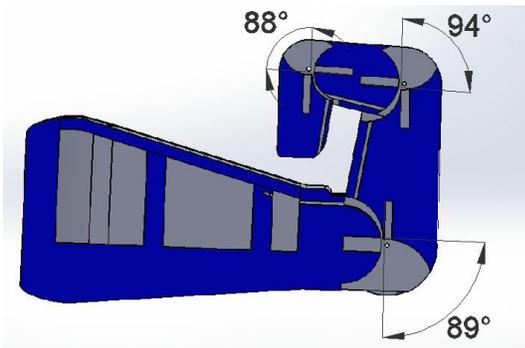


Figura 21. Ángulos límite para los dedos índice, medio, anular y meñique

modelo biológico, que muestra movimientos similares a los humanos.

Se logra definir e implementar los materiales para la construcción del prototipo, además de la selección de los actuadores y demás elementos con el fin de obtener un modelo funcional.

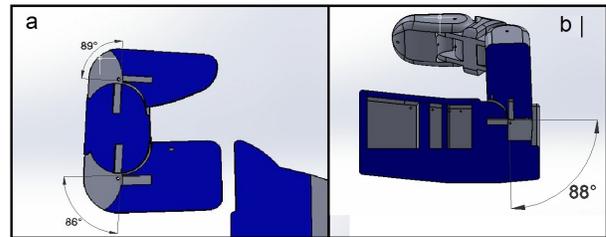


Figura 22. a) Ángulos límite para el pulgar sobre las falanges distal y proximal, b) Ángulo límite para el pulgar sobre el metacarpiano.

Por medio de software especializado se logra el simular y determinar las características más prácticas para obtener el mejor desempeño en la máquina y también el determinar las limitaciones mecánicas de la misma.

Fruto de la investigación se aporta al grupo de investigación ARMOS un prototipo con las características necesarias para ser tema de futuros estudios e investigación, debido a su forma ya que cuenta con superficies amplias en los dedos y la palma para ubicación de sensores o demás

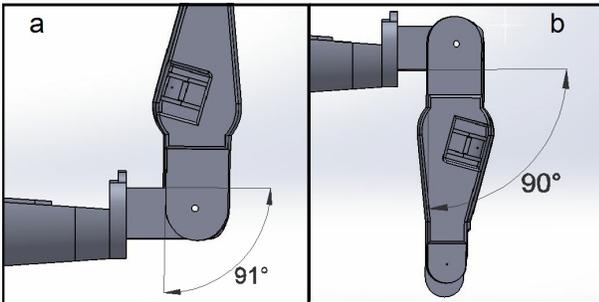


Figura 23. Ángulos límites para la palma, a) flexion, b) extensión.

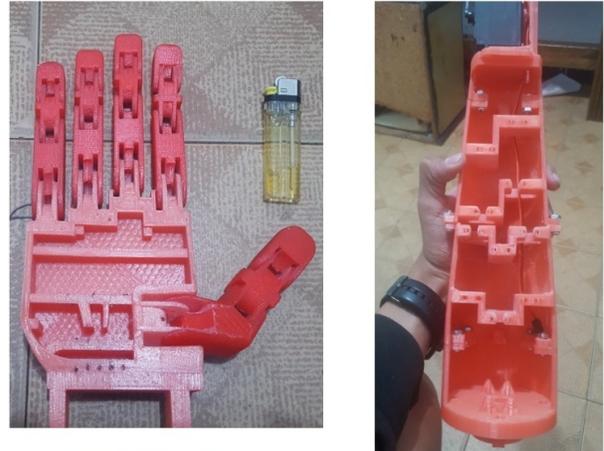


Figura 27. Diferentes etapas de construcción del prototipo.

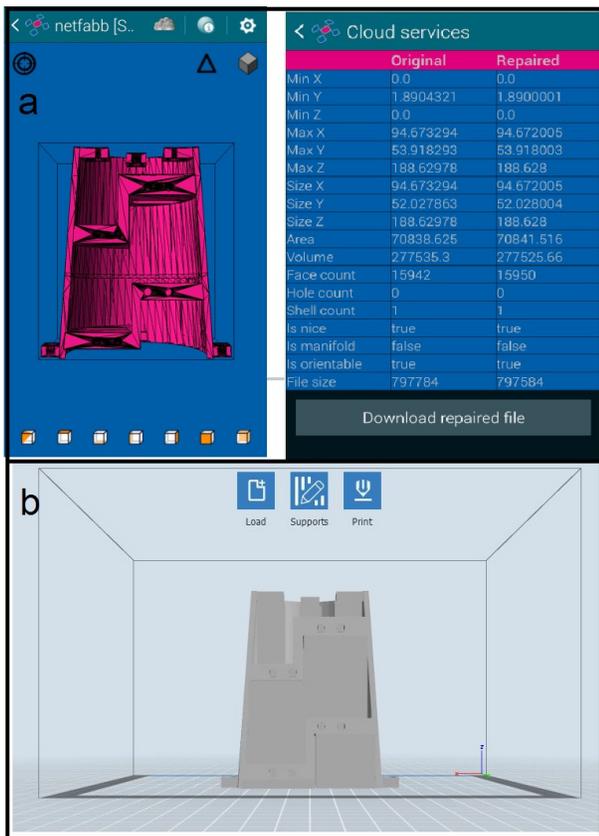


Figura 25. Ejemplo previo a la impresión sobre una de las partes del antebrazo a) netfabb version android, b) Flash Print.

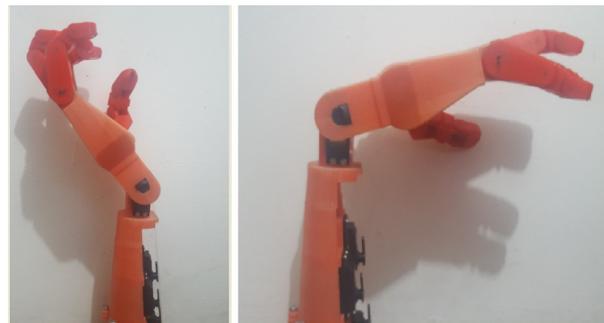


Figura 29. Articulación de la muñeca.

dispositivos, además cuenta con un modo de acople dispuesto con el fin de realizar futuras conexiones con otros prototipos.

Referencias

Cailliet, R. (2006). *Anatomía funcional biomecánica*. ISBN 9788471014931: Marbán.

Dang, H., Weisz, J., y Allen, P. (2011). Blind grasping: Stable robotic grasping using tactile feedback and hand kinematics. En *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (p. 5917-5922).

Hairong, W., Shaowei, F., y Hong, L. (2012). An anthropomorphic design guideline for the thumb of the dexterous hand. En *International Conference on Mechatronics and Automation*.

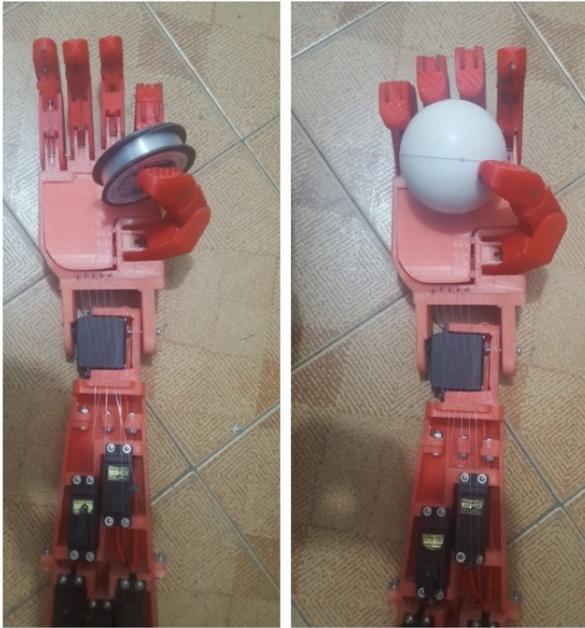


Figura 30. Agarres básicos.

Hyunhwan, J., y Joono, C. (2011). Design of hybrid type robotic hand: The ku hybrid hand. En *2011 11th international conference on control, automation and*

systems (iccas) (p. 1113-1116).

Mahmoud, R., Ueno, A., y Tatsumi, S. (2011). An assistive tele-operated anthropomorphic robot hand: Osaka city university hand ii. En *2011 6th acm/ieee international conference on human-robot interaction (hri)* (p. 85-92).

Molina, J. (2016). *Caracterización de materiales termoplásticos de abs y pla semi - rígido impresos en 3d con cinco mallados internos diferentes*. Tesis de Master no publicada, Escuela politecnica nacional de Quito.

Monk, S. (2011). *Programming arduino getting started with sketches* (McGraw-Hill, Ed.). McGraw-Hill.

Netter, F. (2011). *Netters concise orthopaedic anatomy* (5.^a ed.; Elsevier, Ed.). Elsevier.

Pérez, M. (2012). Prototipo de mano robótica antropométrica sub-actuada. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 65(65), 46-59.

Tondu, B. (2009). Kinematic modelling of anthropomorphic robot upper limb with human-like hands. En *International conference on advanced robotics (icar 2009)* (p. 1-9).

Zuñiga, D., y Andrade, D. (2011). Diseño y construcción de una mano robótica para la enseñanza del alfabeto dactilológico universal para personas sordomudas. *Ingenius Revista de ciencia y tecnología*, 6(6), 67-84.