



**FACULTAD DE MEDICINA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención de título de  
Médico**

**Título: Prótesis de mano en impresión 3D: características de  
prensión y sujeción en actividades de la vida diaria  
comparadas con la mano humana.**

**Autores: González Dávila, Mateo José; Cuesta Sempértegui,  
Pablo Andrés.**

**Director: Holguín Carvajal, Juan Pablo.**

**Cuenca, Ecuador  
19 de noviembre del 2020**

## Resumen

En nuestro estudio, se evaluaron las características de movimiento en la prótesis de mano desarrollada y reproducida por el equipo de investigación. Actualmente la tecnología ha permitido desarrollar nuevas prótesis de mano, las cuales intentan disminuir las limitaciones físicas de una persona amputada; sin embargo, es muy escasa la bibliografía sobre la evaluación de estos dispositivos, motivo por el cual se realizó una descripción comparativa de las características de prensión y sujeción entre la prótesis de mano de impresión 3D; *Phoenix hand v3* y la mano humana. La evaluación de este dispositivo se realizó bajo el protocolo de evaluación antropomórfica de la mano *AHAP*, un protocolo validado que incluye tareas de prensión relacionadas con actividades de la vida diaria. Este estudio además realizó una descripción comparativa entre esta prótesis de mano con diferentes prótesis previamente evaluadas bajo el *AHAP*. Los resultados obtenidos muestran que la prótesis *Phoenix hand v3*, un dispositivo de bajo costo, logra disminuir las limitaciones funcionales de una persona con amputación de miembro superior.

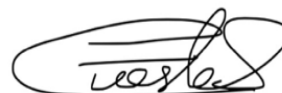
## Abstract

This research studies the movement and characteristics of the hand prosthesis developed and reproduced by the research team. Nowadays, technology has made it possible to develop new hand prostheses, which attempt to reduce the physical limitations of an amputee. However, the bibliography on the evaluation of these devices is very scarce, reason why a comparative description of the grip and hold characteristics between a 3D printed hand prosthesis and the human hand was conducted. The evaluation of this device will be carried out under the AHAP protocol, a validated protocol that includes grasping tasks related to activities of daily living. This study also reflects a comparative description between our hand prostheses, with different prostheses previously evaluated under the AHAP. The results obtained show that the *Phoenix hand v3* prosthesis manages to reduce the functional limitations of a person with an upper limb amputation.

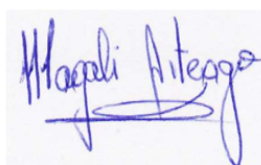
Translated by



Mateo José González Dávila



Pablo Andrés Cuesta Sempértegui



## Palabras clave

**GAS-** Grasping ability score

**AHAP-** Antropomorphichand assessment protocol

## Introducción

Actualmente los avances tecnológicos han permitido desarrollar diferentes dispositivos protésicos, sin embargo existe limitada bibliografía sobre la evaluación de las habilidades propias de estos dispositivos (1).

León presentó en un estudio en 2013 la comparación métrica de presión entre manos artificiales y la mano humana como un método para evaluar las manos protésicas, no obstante, dicho estudio no se puede reproducir con diferentes prótesis artificiales (2); por tanto, en Estados Unidos, el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST por sus siglas en inglés, *National Institute of Standards and Technology*) ha reconocido la necesidad de una evaluación comparativa específica en este campo (3).

Actualmente en Ecuador, según el consejo nacional de discapacidades del Ecuador (CONADIS), el país registra un total de 481.392 personas con discapacidad, de las cuales el 46.34% presenta discapacidad física (4). La Organización Mundial de la Salud estima que 40 millones de personas alrededor del mundo requieren una prótesis, sin embargo solo en 5-15% tienen acceso a estos dispositivos (5). Un estudio en Chile en 2010 cuantificó un total de 143 pacientes que sufrieron amputación de miembro superior, de las cuales el 25% representó una amputación completa de mano, brazo o antebrazo (6).

Según un estudio de Kevin C. Chung, más de 500,000 personas vivían con amputaciones de extremidades superiores en 2005, y las amputaciones de extremidades superiores representaron un tercio de todas las amputaciones (7). Las estadísticas de *advanced amputee*, muestran que a nivel mundial existe 1 millón anual de personas con discapacidad física por amputación de extremidad, lo que resulta en limitación funcional significativa (8).

Ecuador se caracteriza por ser un país con un alto número de obreros artesanales, donde la mano de obra predomina a diferencia de países donde la mano de obra actualmente se encuentra sustituida en su totalidad por las máquinas. Es por esto, que existe un alto índice de accidentes laborales que pueden terminar en la

amputación de una de sus extremidades, lo que se traduce en la necesidad de acceso a prótesis de mano y/o miembro superior; por lo que poder acceder a una prótesis funcional y de bajo coste, resultaría un proyecto interesante. No obstante, por la escasa bibliografía existente sobre estos dispositivos, es necesario evaluar la funcionalidad de los mismos, para poderlos introducir en la población que la requiere; motivo por el cual en este estudio se evaluarán las capacidades de prensión y sujeción de una nueva prótesis de mano de impresión 3D de bajo costo denominada *Phoenix hand V3* del grupo *Enable.org*, cuya funcionalidad fue evaluada bajo un conjunto de tareas relacionadas con actividades de la vida diaria mediante el Protocolo de Evaluación Antropomórfica de Manos Artificiales con sus siglas en inglés *AHAP (The Anthropomorphic Hand Assessment Protocol)* creado en 2019 (1), el cual permite calificar y analizar la funcionalidad de la prótesis de mano.

## **Materiales y Métodos**

### ***Prótesis 3D***

Se ha reproducido una prótesis de impresión 3D de bajo costo, denominada *Phoenix hand V3*; el desarrollo y ensamblaje de la prótesis tuvo un costo aproximado de \$30. El diseño de esta prótesis se basó en un conjunto de 12 piezas articuladas, las mismas que brindan un funcionamiento mecánico de prensión mediante la tracción de cuerdas sujetadas a un punto fijo en la porción más proximal del dispositivo durante la flexión del segmento restante de la amputación.

La prótesis ha sido desarrollada con las siguientes especificaciones:

1. Impresión 3D de prótesis con filamento ácido poli láctico (*PLA*) y poliéster de glicol (*PETG*) de 1.75mm.
2. Mecanismo de acción que funciona por un grupo de líneas de tensión traccionables (*nylon pesca 0.70mm*) que simulan los tendones humanos para ejercer movimientos de flexión, las cuales están sujetadas a un punto fijo de prótesis.

3. Los movimientos de extensión son accionados por un sistema de bandas elásticas (*ligas dentales 5/16"*, 3.5 Oz), las cuales extienden los dedos de la prótesis cuando se relaja la flexión.
4. Material antideslizante que mejora la sujeción de los objetos (*puntas digitales de silicona, pads antideslizantes de látex lava platos*) en las principales áreas de contacto de la palma y los dedos similares a los de la mano humana.
5. Fijador de prótesis con correa de velcro.
6. Peso aproximado total de 286 gr.
7. Apariencia estética.

Para la impresión 3D se usó una combinación de *PLA* y *PETG*, para obtener la dureza y flexibilidad adecuados en cada zona con el fin de mejorar la capacidad de prensión; se utilizó *PETG* para palma y falanges distales y *PLA* para sujetador de antebrazo y falanges proximales.

Para los movimientos de flexión del dispositivo se utilizaron cuatro líneas de nylon de pesca de 0,70 mm de diámetro, con resistencia máxima de 25 kg. El recorrido de las líneas de nylon va desde el sujetador en la porción próxima superior de la prótesis hasta el punto más distal de las falanges a través de conductillos en la palma y falanges y se realizó un nudo para unir el tendón a las falanges distales, el cual queda bajo las cubiertas antideslizantes.

El dispositivo *Phoenix hand v3*, se muestra a continuación en la [figura 1](#).



Figura 1. Phoenix hand v3.

La prótesis se ha escalado a un tamaño de 140% de las especificaciones del diseño y las dimensiones de la prótesis se especifican en la [tabla 1](#).

<b>Estructura</b>	<b>Dimensión mm</b>
Longitud palma	105
Longitud mano (muñeca hasta punto más distal del dedo medio)	175
Ancho de la palma	115
Profundidad palma	50

Tabla 1. Dimensiones de la prótesis

El dispositivo puede ser modificado en tamaños escalados con herramientas de edición digital para lograr optimizar la funcionalidad de la prótesis.

En el siguiente link se adjunta video de funcionamiento del dispositivo:

[https://drive.google.com/file/d/1P6zZS\\_eQRf-MtQ7zA9BYX5oSg0K87IPU/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1P6zZS_eQRf-MtQ7zA9BYX5oSg0K87IPU/view?usp=sharing)

### **Protocolo de Evaluación**

Se utilizó el protocolo *AHAP*, el cual que permite valorar características de prensión y sujeción de prótesis de mano. Las acciones del dispositivo fueron ejecutadas por un operador sin discapacidades físicas; de esta manera, se evitan los sesgos de control de la prótesis y así solo se consideran en la evaluación los aspectos mecánicos del diseño y comparación de las funciones de la mano.




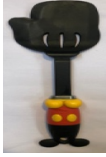
Para la evaluación de las tareas propuestas por el protocolo *AHAP*, se seleccionó un grupo estándar de objetos propuesto recientemente como puntos de referencia en la investigación de la manipulación de *Yale-CMU-Berkeley* (9), ya que este grupo de objetos y tareas se ha considerado ampliamente entre la robótica y comunidad

de investigación en biomecánica. Este grupo está compuesto por 73 objetos diferentes, incluidos algunos elementos que se encuentran típicamente en las actividades de la vida diaria. De estos se eligieron 12, mismos que se muestran en conjunto con el tipo de prensión ejercida en la [tabla 2](#).

<b>TIPO DE PRENSIÓN</b>	<b>OBJETO</b>	
<b>Prensión hook</b>	 Jarra	 Bolsa
<b>Prensión esférica</b>	 Pelota pequeña	 Pelota grande
<b>Prensión cilíndrica</b>	 Frasco medicamentos	 Vaso de vidrio
<b>Pinza lateral</b>	 Bowl	 Pinza



Tabla 2- Objetos

<b>Pinza trípode</b>	 Lata atún	 Marcador
<b>Prensión diagonal</b>	 Destornillador	 Espátula

utilizados en la prueba *AHAP* con los diferentes tipos de prensión recomendado para cada objeto.

### ***Metodología de Evaluación AHAP***

La escala de evaluación *AHAP* se puede aplicar a varios dispositivos artificiales, los cuales pueden ser robóticos o prostéticos (1). La mano debe ser accionada por un sujeto humano, ya sea una persona discapacitada que lleve la prótesis o una persona sin discapacidad como se realizará en este estudio.

Durante este estudio, estas tareas fueron realizadas por 3 diferentes evaluadores: en primera instancia el dispositivo fue accionado por un estudiante de medicina vinculado con el desarrollo de la prótesis y luego por dos personas ajenas al desarrollo del dispositivo, a quienes se dio únicamente indicaciones del mecanismo de acción y el correcto desarrollo de las tareas a realizar durante la evaluación. Estas últimas 2 personas evaluadoras fueron 2 mujeres, de 26 y 11 años respectivamente. Para cada una de las tareas, los objetos fueron entregados al sujeto accionador por un operador que los mantuvo en la posición correcta para una ejecución exitosa del agarre.

El sujeto debió estar de pie durante la prueba y ubicado cerca de una mesa. El operador debía soltar el objeto una vez que la mano artificial realiza el agarre. Así

mismo el protocolo permitió practicar con el objeto durante un minuto antes de la prueba. El operador indica el tipo de presión adecuada para cada tarea, y el sujeto debe intentar reproducir la postura demostrada con la mano artificial con la mayor precisión posible.

Cada una de las tareas y su metodología de puntuación están mostradas en el [apéndice](#).

El operador proporciona la puntuación de cada acción relacionada con cada tarea. La prueba tuvo una duración de aproximadamente 60 minutos y se suman las puntuaciones de los dos objetos de cada tipo de presión con lo que se consigue la puntuación final.

El Puntaje de Habilidad de Agarre, *GAS*, (Grasping Ability Score, por sus siglas en inglés), evalúa la capacidad de reproducir los diferentes tipos de agarre similares a los humanos como la capacidad para sujetar los objetos en movimiento.

Para obtener las puntuaciones finales, se suman cada una de las puntuaciones y se divide por las puntuaciones máximas posibles, de esta manera, el *GAS* de la mano artificial se puede expresar como un porcentaje de la capacidad de agarre de la mano humana.

### **Evaluación de presión de prensión y grados de angulación.**

Este estudio midió también la presión de prensión máxima de la prótesis, la cual fue medida con un manguito aneroide de presión arterial.

En este caso, el sujeto actuador ejerce presión sobre el manguito de presión arterial, el cual es inflado de manera progresiva hasta que las articulaciones del dispositivo cedan ante el aumento de la presión, marcando el máximo de presión de prensión medido en milímetros de mercurio (mm/Hg).

Los movimientos propios de la mano fueron evaluados según grados de angulación de cada una de las articulaciones del dispositivo, tomando en cuenta la palma de la mano como referencia base; de esta manera, se midió la angulación durante la flexión máxima de cada una de las articulaciones de la prótesis. Los grados de angulación fueron medidos con un transportador de ángulos de 360 grados.

### **Peso máximo de carga**

Se evaluó la capacidad máxima de carga de peso que soporta la prótesis; esta fue evaluada mediante el levantamiento mediante prensión de hook de una bolsa llena de objetos, la cual fue llenada progresivamente y pesada antes de ejecutar la acción; para esto se utilizó una balanza electrónica digital, con capacidad de medición entre 5 gr a 40 kg. El peso máximo de carga se determinó al punto en el que las articulaciones de la prótesis ceden ante el peso sujetado.

### **Resultados**

Luego de completar las pruebas de la prótesis de mano bajo el protocolo *AHAP*, se obtuvieron los resultados del puntaje *GAS*, en el que, para las tareas de prensión la puntuación supera el 60% en comparación con la mano humana y la capacidad de sujeción fue correcta en 4 de las 7 tareas realizadas.

Cabe recalcar que la tarea de pinza fina obtuvo la puntuación más baja, con 0% de reproductibilidad de la tarea, es decir la mano artificial no está en capacidades de permitir este tipo de prensión.

Los resultados se muestran en la [tabla 3](#), los cuales representan la puntuación porcentuada obtenida por la mano artificial en comparación con las capacidades de la mano humana.

	<b>Prensión</b>	<b>Sujeción</b>	<b>Score</b>
<b>Hook</b>	100%	100%	100%
<b>Esferica</b>	100%	100%	100%
<b>Tripode</b>	100%	100%	100%
<b>Extensión</b>	100%	65%	83%
<b>Diagonal</b>	60%	50%	55%
<b>Pinza lateral</b>	75%	25%	37%

<b>Pinza fina</b>	0%	0%	0%
-------------------	----	----	----

Tabla 3. Puntuación según tipos de prensión y sujeción

Durante la evaluación de la presión de prensión máxima, se observó un valor máximo de 240 mm/hg antes de que pierda su capacidad prensil.

Así mismo se midió el peso máximo de carga, el cual fue de 11.6 libras con prensión tipo hook.

Los movimientos propios de la mano fueron evaluados según grados de angulación de cada una de las articulaciones del dispositivo, tomando en cuenta la palma de la mano como referencia base. El dispositivo en reposo presenta una angulación de 40° hacia el soporte del antebrazo en relación a la base. En cuanto a las porciones flexoras de los dedos, las cuales presentan 2 puntos de angulación en sus articulaciones (falange proximal y falange distal), los resultados fueron: para los dedos 1-4 los grados de angulación de falange proximal fueron 50°; y para la unión interfalángica, entre falange proximal con falange distal su angulación fue de 90° en flexión para máxima capacidad prensil; y para dedo 1 una angulación de 50° en la falange proximal, y para la falange distal, una angulación de 90° en flexión para máxima capacidad prensil.

## Discusión

En los últimos años el avance en el desarrollo de las manos artificiales antropomórficas tanto robóticas como para manos protésicas ha crecido rápidamente, pero no se ha realizado paralelamente estudios para validar métodos de evaluación del desempeño de los diferentes diseños de dispositivos (1)(10). Es importante comentar que no existe información específica de los actuadores que utilizan las prótesis de mano actualmente, motivo por el cual la referencias de comparación son escasas (11).

Este estudio realizó una evaluación de las características de prensión y sujeción de la prótesis de mano de impresión 3D: *Phoenix hand v3*, con el protocolo de evaluación antropomórfica de *AHAP*; el cual mostró un resultado de *GAS* de 68% en la evaluación global, la cual fue comparada con resultados de otros dispositivos de características similares que fueron evaluadas en un estudio de Lopillo, bajo los mismos parámetros y con el mismo protocolo de evaluación *AHAP*; las prótesis evaluadas fueron *ARMAR hand*, en 3 diferentes versiones, y la *KIT prosthetic hand* en 2 diferentes versiones. Las diferencias entre los modelos presentados de la *ARMAR hand* y *KIT prosthetic* se basan en la adición de pads que mejoran la capacidad de prensión y sujeción, aumentando la capacidad de agarre con materiales antideslizantes (1).

Luego de la comparación, la prótesis de mano *Phoenix hand v3*, fue superior a las 3 diferentes versiones de la *ARMAR hand*, con un puntaje *GAS* de 45%, 55%, y 61%; para las versiones A1, A2, Y A3, respectivamente (1). Sin embargo la *Phoenix hand v3*, fue inferior en comparación con la *KIT prosthetic hand*, que obtuvo un *GAS* de 79% en su mejor versión (1), es decir un 11% por debajo de la *KIT prosthetic hand V2*.

Comparando los 3 dispositivos, se observa que todos superan el 50% del *GAS*; lo cual significa que su capacidad de replicar movimientos producidos por la mano humana en actividades de la vida diaria, logró buenos resultados, lo que se reproduce en un beneficio significativo para personas con requerimiento de una prótesis de mano.

Ahora, las diferencias realmente significativas, están en el precio de estos dispositivos; El *kit prosthetic* tiene un valor aproximado de \$ 1600 dólares (12), lo cual es 50 veces superior al precio del *Phoenix hand v3*, con un valor de producción aproximado de \$30; por lo que resultaría en cuanto a costo un beneficio a favor de la *Phoenix hand v3*, ya que sus resultados en la evaluación del GAS fueron similares a otros dispositivos de mayor valor económico.

Sería un dispositivo más accesible para la mayoría de la población, más aún en nuestro medio donde los recursos son más escasos, resultando ser un dispositivo sumamente útil en capacidades de reproducir movimientos de prensión y sujeción relacionados con actividades de la vida diaria por un bajo coste; además es impórtate mencionar que el impacto ambiental de esta prótesis además es mínimo, ya que sus materiales provienen recursos renovables al 100% (13).

Como se mencionó inicialmente, en la actualidad existe muy poca referencia bibliográfica sobre la evaluación de dispositivos protésicos, sin embargo, varios dispositivos han sido evaluados que, aunque sus características no son comparables con el *Phoenix hand v3*, fueron evaluados bajo parámetros algo similares. El estudio de Yuan Liu, muestra que dispositivos biónicos como: *Bebionic 3*, *Michelangelo hand*, *lIimb-ultra revolution* and *SensorHand speed*, en los resultados, su GAS alcanzó únicamente 45.2% (14), de todas formas, son dispositivos con un valor entre los 35.000 y 70.000 dólares . Específicamente para la *lIimb-ultra*, del grupo *Bionic Touch*, su precio aproximado es de 100.000 dólares (15).

Además, la impresión 3D proporciona una forma de personalizar los dispositivos para mejorar los resultados de manera individualizada para cada uno de los pacientes (16).

En comparación a prótesis preexistentes que han sido fabricadas en distintos materiales y con otros mecanismos tecnológicos, este diseño reduce significativamente su tiempo de fabricación por lo que el paciente puede acceder en menor tiempo su prótesis de mano (17)(18).

La ventaja de este estudio es que durante la evaluación se utilizó un actuador externo, de esta manera disminuyó los sesgos de operador y se evaluó únicamente el funcionamiento de la prótesis, sin embargo, esta prótesis es funcional para un tipo específico de amputación, por lo que para poderlo aplicar en un distinto tipo de amputación de extremidad superior se debe realizar ciertas modificaciones a la prótesis.

### **Conclusiones y recomendaciones**

1. Nuestra prótesis de mano de impresión 3D *Phoenix hand v3* puede brindar al paciente con amputación de miembro superior, una importante disminución de las limitaciones físicas.
2. Con este estudio se puede afirmar que este dispositivo incrementa las posibilidades de acceso, ya que resulta ser una prótesis de bajo costo y fácil fabricación.
3. Para demostrar finalmente la utilidad de la mano protésica, se recomienda realizar más estudios en los cuales se incluyan pacientes discapacitados, candidatos para una prótesis de estas características con el fin de mejorar el dispositivo, ya que cada prótesis debe ser fabricada con base a medidas específicas para cada usuario que se beneficiará de la misma.

### **Agradecimientos**

Agradezco a todos quienes formaron parte de este proyecto que empezó siendo un sueño; al Dr. Juan Pablo Holguín C., por su acompañamiento y constante apoyo, al Dr. Galo Duque, quien en todo momento supo brindarnos sus conocimientos y nos motivó a encontrar la excelencia de este proyecto, de igual manera queremos agradecer al Dr. Cristian Astudillo C., quien nos brindó su ayuda y conocimientos para hacer de este proyecto un propósito de ayuda social.

### Referencias bibliográficas

1. Llop-Harillo I, Pérez-González A, Starke J, Asfour T. The Anthropomorphic Hand Assessment Protocol (AHAP). *Rob Auton Syst*. 2019 Nov 1;121.
2. León B, Sancho-Bru JL, Jarque-Bou NJ, Morales A, Roa MA. Evaluation of human prehension using grasp quality measures. *Int J Adv Robot Syst*. 2012 Oct 9;9.
3. Falco J, Van Wyk K, Liu S, Carpin S. Grasping the performance. *IEEE Robot Autom Mag*. 2015;22(4):125–36.
4. ConsejoDiscapacidades.gob.ec. Estadísticas de Discapacidad – Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades [Internet]. 2020 [cited 2020 Nov 17]. p. 1–1. Available from: <https://www.consejodiscapacidades.gob.ec/estadisticas-de-discapacidad/>
5. Cuellar JS, Smit G, Breedveld P, Zadpoor AA, Plettenburg D. Functional evaluation of a non-assembly 3D-printed hand prosthesis. *Proc Inst Mech Eng Part H J Eng Med*. 2019 Nov 1;233(11):1122–31.
6. Bizama C, Lavandero M, Leiva N, Cofre C, Neira G. Amputación de extremidades superiores: caracterización epidemiológica. Vol. 14, *Rev Chil Salud Pública*. 2010.



7. Ziegler-Graham K, MacKenzie EJ, Ephraim PL, Travison TG, Brookmeyer R. Estimating the Prevalence of Limb Loss in the United States: 2005 to 2050. *Arch Phys Med Rehabil*. 2008 Mar;89(3):422–9.
8. Advanced Amputee Solutions. Amputee Statistics You Ought to Know [Internet]. 2012 [cited 2020 Nov 17]. Available from: <https://advancedamputees.com/amputee-statistics-you-ought-know>
9. Calli B, Walsman A, Singh A, Srinivasa S, Abbeel P, Dollar AM. Benchmarking in Manipulation Research: Using the Yale-CMU-Berkeley Object and Model Set. *IEEE Robot Autom Mag*. 2015 Sep 1;22(3):36–52.
10. Diment LE, Thompson MS, Bergmann JHM. Three-dimensional printed upper-limb prostheses lack randomised controlled trials: A systematic review. *Prosthet Orthot Int*. 2018 Feb 1;42(1):7–13.
11. Ayats Soler M. Diseño de una prótesis de mano adaptable para niños [Internet]. 2017 [cited 2020 Nov 17]. Available from: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/104798/TFG\\_Marta\\_Ayats\\_2.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/104798/TFG_Marta_Ayats_2.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
12. Weiner P, Starke J, Hundhausen F, Beil J, Asfour T. The KIT Prosthetic Hand: Design and Control. In: Weiner, P, Starke, J, Hundhausen, F, Beil, J, & Asfour, T (2018) *The KIT Prosthetic Hand: Design and Control 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Madrid; 2018. p. 3331-undefined.
13. Lopesino Rivera D. Análisis y mejora del diseño de una mano protésica [Internet]. 2018. Available from: [http://oa.upm.es/50450/1/TFG\\_DANIEL\\_LOPESINO\\_RIVERA.pdf](http://oa.upm.es/50450/1/TFG_DANIEL_LOPESINO_RIVERA.pdf)
14. Liu Y, Yang D, Jiang L, Liu H. A synthetic framework for evaluating the anthropomorphic characteristics of prosthetic hands. In Busan, Korea: 2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM); 2015. p. 882-undefined.
15. Daniela García S, María José Espinoza V. Avances en prótesis: una mirada al presente y al futuro. *Rev Médica Clínica Las Condes*. 2014

- Mar;25(2):281–5.
16. Diment LE, Thompson MS, Bergmann JHM. Clinical efficacy and effectiveness of 3D printing: A systematic review. Vol. 7, BMJ Open. BMJ Publishing Group; 2017.
  17. Sargo S. Prótesis de mano impresas con tecnología 3D [Internet]. 2018 [cited 2020 Nov 17]. Available from: [https://fido.palermo.edu/servicios\\_dyc/proyctograduacion/archivos/4837.pdf](https://fido.palermo.edu/servicios_dyc/proyctograduacion/archivos/4837.pdf)
  18. Zuniga JM, Peck JL, Srivastava R, Pierce JE, Dudley DR, Than NA, et al. Functional changes through the usage of 3D-printed transitional prostheses in children. Disabil Rehabil Assist Technol. 2019 Jan 2;14(1):68–74.

## Anexos

### Apéndice 1

#### **Pasos del Protocolo de evaluación de manos antropomórficas (AHAP) para cada objeto.**

---

##### **Paso Descripción**

1. El operador muestra el objeto y la postura / tarea de presión correcta al sujeto.
2. El operador ayuda al sujeto a practicar la presión / tarea durante aproximadamente un minuto.
3. El operador entrega el objeto al sujeto para la prueba.
4. El sujeto acciona la mano artificial para agarrar el objeto con la palma hacia arriba. El operador suelta el objeto tan pronto como la mano artificial ha agarrado el mismo. El sujeto mantiene la presión durante tres segundos. Para la tarea de prensado de índices el sujeto presiona el botón para iniciar el temporizador y espera tres segundos. A este paso le sigue

---

**Paso Descripción**

- inmediatamente el paso 5 y la secuencia de los pasos 4 a 5 se repite tres veces.
5. Mientras mantiene la presión, el sujeto gira la mano de forma natural con poca aceleración para que la palma apunte hacia abajo (180 °) y mantiene la presión durante tres segundos en esta posición. Para la tarea de prensado de índices el sujeto presiona el botón nuevamente para detener el temporizador (tiempo máximo para ejecutar tres segundos). Para la posición de la plataforma, este paso no se ejecuta.
  6. El sujeto suelta el objeto, que es tomado por el operador.

**Sistema de puntuación del Protocolo de Evaluación de la Mano Antropomórfica (AHAP).**

---

<b>Paso</b>	<b>Tarea</b>	<b>Puntuación (para cada ensayo)</b>	<b>Criterios de puntuación</b>
4.	Todas	1	La presión se completa con el tipo de presión correcto. En el Apéndice se pueden encontrar instrucciones detalladas para evaluar la postura de presión.
		0,5	La postura de presión es diferente a la especificada en el Apéndice.
		0	La mano artificial no puede agarrar el objeto.

---

Paso	Tarea	Puntuación (para cada ensayo)	Criterios de puntuación
5.	Todas las tareas excepto	1	No se detecta ningún movimiento visible del objeto con respecto a la mano
		0,5	El objeto se mueve con respecto a la mano pero no se deja caer.
		0	El objeto se deja caer.
		1	Completado con el tipo de prensión correcto.
		0,5	Completado con un tipo de prensión diferente al especificado en el Apéndice.
		0	No completado en menos de tres segundos.

Para evaluar la corrección del tipo de prensión (GT), se deben considerar las siguientes instrucciones para cada GT:

- *Gancho (hook)*: El GT se considera correcto si hay contacto entre el objeto y el lado palmar de al menos tres dedos largos.
- *Prensión esférico*: El GT se considera correcto si hay contacto entre el objeto y los lados palmar del pulgar, todas las falanges de al menos tres dedos largos y la palma.

- *Pinza trípode:* El GT se considera correcto si el objeto entra en contacto con el lado radial del dedo medio y el lado palmar de las falanges distales del pulgar y el dedo índice.
- *Prensión de extensión:* El GT se considera correcto si hay contacto entre el objeto y el lado palmar de la falange distal y la falange intermedia (si existe), de al menos tres dedos largos y el lado palmar del pulgar. En cualquier caso, el ángulo entre los ejes de la falange distal y el lado del objeto debe ser inferior a  $30^\circ$ . Para las cajas, el contacto de las falanges del pulgar y los dedos debe estar en los lados opuestos de la caja con mayor área.
- *Prensión cilíndrico:* El GT se considera correcto si el ángulo entre el eje principal del pulgar y el eje principal del área de prensión del objeto es mayor de  $60^\circ$  y hay contacto entre el objeto y los lados palmar del pulgar, todas las falanges de al menos tres dedos largos y la palma.
- *Prensión volar diagonal:* El GT se considera correcto si el ángulo entre el plano definido por las falanges del pulgar y el plano de simetría del objeto es menor de  $30^\circ$  y hay contacto entre el objeto y los lados palmar del pulgar, la palma y al menos tres dedos largos.
- *Pinza lateral:* El GT se considera correcto si hay contacto entre el objeto y al menos el lado palmar de la falange distal del pulgar y el lado radial del dedo índice.
- *Pinza pulpar:* El GT se considera correcto si el objeto entra en contacto con los lados palmar de la falange distal del pulgar y la falange distal de un solo dedo largo, sin ningún contacto del objeto con la palma.