

**Título del Proyecto  
de Investigación a que corresponde el Reporte Técnico:**

**Diseño y Modelado de Mano Robótica  
Antropomórfica de Músculos Artificiales**

**Tipo de financiamiento**

Sin financiamiento

Autores del reporte técnico:

Edgar Alonso Martínez García  
Cristian Cruz Ramirez (tesista pregrado)

## Diseño y Modelado de Mano Robótica Antropomórfica de

### Músculos Artificiales

Coordinación General de Investigación y Posgrado  
UACJ-Investigación

#### **Resumen del reporte técnico en español** (máximo 250 palabras)

Las manos robóticas antropomórficas han aparecido como resultado de la búsqueda por diseñar efectores finales capaces de desarrollar la mayor cantidad de tareas de manipulación sin requerir modificación física, así como lo hace la mano humana. La mayoría de los modelos se basan en un sistema de motores eléctricos e hilos, en este artículo se propone un diseño con músculos artificiales como sustitutos de los motores eléctricos. Se ha realizado un modelo mecánico con extensión y flexión de los 5 dedos, modelado de los músculos artificiales para obtener su longitud respecto al tiempo y el modelado cinemático de los dedos para obtener la posición de su parte final. Se ha simulado el sistema mediante FreeCAD y librerías dinámicas en C++, los resultados obtenidos tienen gran similitud con el comportamiento biológico, por lo que en futuros trabajos se buscará desarrollar un prototipo para experimentación.

#### **Resumen del reporte técnico en inglés** (máximo 250 palabras):

Anthropomorphic robotic hands have appeared as result of the search to design end effectors capable of perform as many handling tasks as possible without wanting physical modification, just as the human hand does. The Most models are based on an electric motor system and threads, this article proposes a design with muscles artificial as substitutes for electric motors. It has been created a mechanical model with extension and flexion of the 5 fingers, shaping the artificial muscles to obtain their length with respect to time and kinematic modeling of the fingers to get the position of your end part. The system was simulated in FreeCAD and C ++, the results obtained have great similarity with biological behavior. Future work will seek to develop experimentation.

**Palabras clave:** biorobot, destreza, extremidad, cinematica

#### **Usuarios potenciales** (del proyecto de investigación)

Laboratorio de Robotica, IIT

#### **Reconocimientos**

Al alumno de Mecatrónica Santiago de Cristian Cruz Ramirez por el desarrollo del proyecto, y los miembros del Laboratorio de Robótica que se involucraron parcialmente con algun tópico de este proyecto.

#### **Productos generados**

##### **Video academico en la plataforma Youtube**

Robotic hand mechanism - Artificial muscles analysis

<https://www.youtube.com/watch?v=oGMp8zBaeBk>

RT-LR-10-20

# Diseño y Modelado de Mano Robótica Antropomórfica de Músculos Artificiales

**Cristian Cruz Ramírez (L5)****Asesor: Edgar A. Martínez García**

LABORATORIO DE ROBÓTICA

INSTITUTO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

## Resumen

*Las manos robóticas antropomórficas han aparecido como resultado de la búsqueda por diseñar efectores finales capaces de desarrollar la mayor cantidad de tareas de manipulación sin requerir modificación física, así como lo hace la mano humana. La mayoría de los modelos se basan en un sistema de motores eléctricos e hilos, en este artículo se propone un diseño con músculos artificiales como sustitutos de los motores eléctricos. Se ha realizado un modelo mecánico con extensión y flexión de los 5 dedos, modelado de los músculos artificiales para obtener su longitud respecto al tiempo y el modelado cinemático de los dedos para obtener la posición de su parte final. Se ha simulado el sistema mediante FreeCAD y librerías dinámicas en C++, los resultados obtenidos tienen gran similitud con el comportamiento biológico, por lo que en futuros trabajos se buscará desarrollar un prototipo para experimentación.*

## 1. Introducción

La mano es la extremidad externa más sofisticada y compleja del cuerpo humano [1], es el resultado de milenios de evolución [2]. La mano brinda de excepcionales capacidades de manipulación al ser humano, tantas que han dado lugar a su clasificación en numerosos estudios [3]. En las últimas décadas el desarrollo de robots para

realizar tareas en distintas áreas ha creado una necesidad de diseñar efectores finales capaces de replicar la capacidad humana de manipular algún objeto en particular. Algunas de las áreas que sobresalen son: exploración espacial [4], [5]; exploración marina [6]-[9]; industria manufacturera [10]-[13]; robots de servicio [14], [15]; prótesis [16]. En todas ellas, pero en especial en la última área mencionada un efector final con la capacidad de manipular no un objeto en particular si no cualquiera con la misma habilidad que lo hace la mano humana es el objetivo final, lamentablemente hoy en día no existe.

### 1.1. Manos robóticas antropomórficas

El término antropomorfismo se refiere a la capacidad de un dispositivo para imitar los aspectos generales de la mano humana, como forma, tamaño, consistencia, color, temperatura y factores estéticos [17]. A pesar de que existen efectores finales con poca semejanza en forma y estética a la mano humana con grandes capacidades de replicar las capacidades de esta, uno de sus puntos débiles respecto a los acercamientos antropomórficos es la teleoperación, ya que una mano robótica antropomórfica con un sistema de teleoperación óptimo permitiría a una persona efectuar tareas a distancia con nulo requerimiento de entrenamiento [18].

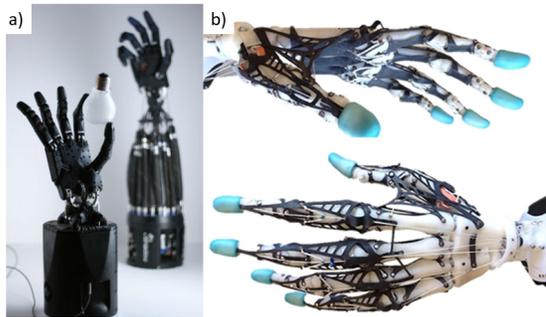


Figura 1: Ejemplos de manos robóticas antropomórficas: a) "Shadow Dexterous Hand"[19], b) "Biomimetic robotic hand"[20].

Un índice para medir la capacidad de una mano robótica se denomina "destreza"[19], algunas de las manos robóticas antropomórficas con mayor destreza en la actualidad son "Shadow Dexterous Hand" [19] y "Biomimetic robotic hand" de Zhe Xu [20], que se muestran en la Figura 1. Ambas al igual que muchas otras son actuadas mediante motores eléctricos, estos generalmente son situados en una base unida a la parte inferior de la mano, representando un alto porcentaje del tamaño total de la mano robótica. Las capacidades de manipulación de estos modelos son sorprendentes, dando la posibilidad de sujetar objetos de distintas formas sin ningún problema como: plumas, cartas, discos, mancuernas, pelotas, latas, carteras, martillos, tornillos, entre otros, algunos de ellos se muestran en la Figura 2.

## 1.2. Materiales blandos

A pesar de su alta destreza estas manos mantienen significativas diferencias respecto a su semejante biológico: composición rígida y actuación mediante motores eléctricos. Ambas diferencias han sido tratadas con el uso de materiales blandos, por una parte, se tienen diseños totalmente formados con materiales blandos como [21], el cual es neumáticamente actuado, cada componente de la mano cuenta con cavidades internas por donde al pasar aire comprimido se generan los movimientos de la mano.

El uso de materiales blandos en el diseño de robots incluidas las manos robóticas tienen numerables ventajas ya que este tipo de materiales son adaptables, tienen capacidad de compresión e incluso de deformación [22].

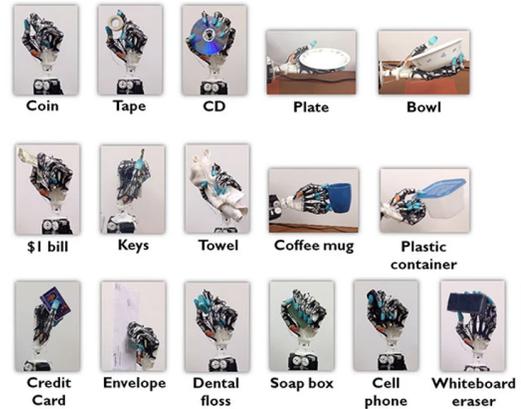


Figura 2: Manipulación de objetos por mano robótica antropomórfica [20].

## 1.3. Músculos artificiales

Con el objetivo de sustituir los motores eléctricos se han diseñado redes de músculos artificiales que como su nombre lo dice imitan el funcionamiento de los músculos biológicos, los cuales tienen la propiedad de contraerse y relajarse a voluntad. Los primeros acercamientos a este comportamiento se han logrado mediante músculos neumáticos [23], [24], cuando se les inyecta aire comprimido, estos se expanden en una dirección y se contraen en la dirección perpendicular, provocando ese efecto de contracción deseado.

Se ha demostrado que las capacidades de carga de este tipo de músculos artificiales son altas, además de tener una composición robusta, lo que los hace ideales para aplicaciones industriales. Su punto débil es que requieren un sistema neumático de válvulas y compresor, lo cual limita sus aplicaciones a tareas en estaciones estáticas.

En la búsqueda por prescindir de un sistema neumático se han realizado numerosas investigaciones sobre las propiedades térmicas de algunos materiales, los cuales, al sufrir un cambio en su temperatura, generalmente provocado por una corriente eléctrica, cambian su longitud. Algunos de estos materiales son: nylon [25], hidrogel [26], [27], nanotubos de carbono [28]. En la Figura 4 se muestran ejemplos de cada uno de ellos. Todos son casos que continúan en investigación y no han sido empleados directamente en manos robóticas, ya que a pesar de replicar la contracción de los músculos tienen el gran problema de requerir altas corrientes eléctricas para funcionar, lo

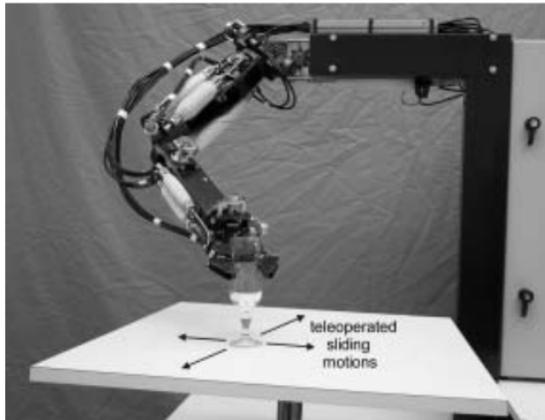


Figura 3: Uso de músculos artificiales neumáticos para accionar un efector final [24].

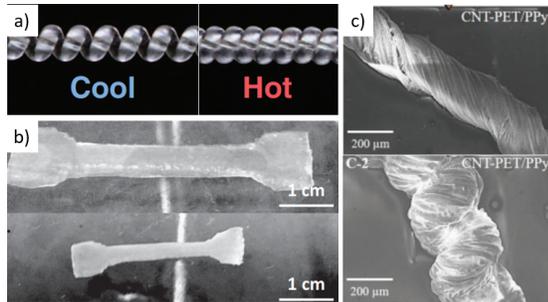


Figura 4: Materiales para creación de músculos artificiales: a) nylon [25], b) hidrogel [26], c) nanotubos de carbono [28].

que causa problemas de temperatura en los circuitos de control.

Recientemente han cobrado relevancia entre la comunidad los músculos artificiales HASEL [29], ya que usan un concepto simple como base de su funcionamiento, cuando se tiene una capsula llena de algún líquido y esta es presionada por un extremo, el líquido de dicho extremo se desplaza al extremo contrario provocando dos efectos, hacia un eje la capsula se expande, pero en el otro eje se contrae. Los músculos de HASEL usan electrodos para generar dicha presión y causar la contracción deseada. Entre sus grandes fortalezas se encuentra la gran variedad de formas que pueden adoptar los músculos artificiales, en la Figura 5 se muestran algunos ejemplos.



Figura 5: Ejemplos de músculos artificiales HASEL [29].

En este trabajo se propone un diseño de mano robótica antropomórfica accionada por músculos artificiales, dando un mayor acercamiento al comportamiento de la mano humana. En la sección 1 se analiza el sistema músculo-esquelético de la mano, en la sección 2 se muestra el diseño mecánico propuesto, en la sección 3 se hace un estudio de la modelación matemática de un musculo artificial y en la sección 4 se plantea el modelo cinemático de los dedos de la mano.

## 2. Modelo músculo-esquelético de la mano

En el desarrollo de una mano robótica antropomórfica es imprescindible un análisis completo del sistema músculo-esquelético de la mano, ya que este es el punto de partida de cualquier posible diseño.

El esqueleto de la mano está formado por ocho huesos cortos, cuyo conjunto constituye el esqueleto de la muñeca o carpo, cinco huesos largos que forman el metacarpo, y por último, catorce huesos, también largos, llamados falanges, que constituyen el esqueleto de los dedos [30]. En la Figura 6 se muestran detalladamente cada uno de los huesos que conforman la mano.

Cada unión de 2 huesos es conocida como articulación, todas las articulaciones de la mano están compues-

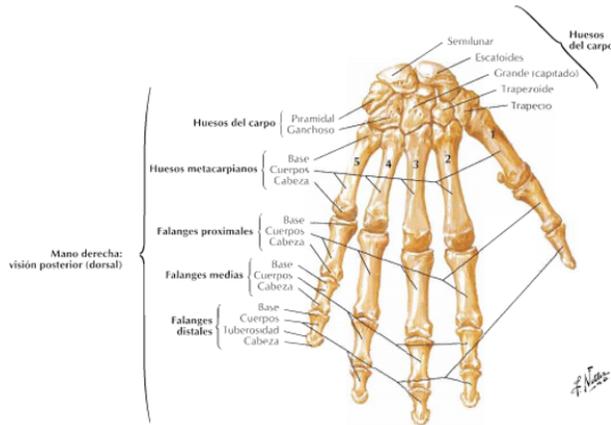


Figura 6: Huesos del carpo y mano [31].

tas por: cartílago, es un tejido conectivo semirrígido que se encuentra en las superficies articulares, este reduce la fricción entre los huesos; ligamentos, es un tejido conectivo semirrígido con forma de parche que sujeta 2 huesos, dando firmeza a la articulación, permitiendo movimiento en ciertas direcciones y restringiéndolo en otras [32].

Cada movimiento realizado por las partes de la mano recibe un nombre particular, estos son: extensión, flexión, oposición, reposición, abducción y aducción. En la Figura 8 se muestra cada movimiento con su respectivo nombre.

Los músculos encargados de la flexión y extensión de los dedos son músculos largos que se encuentran en el antebrazo y se conectan a la mano mediante tendones largos. En las Figuras 8 y 9 se muestran estos músculos con sus respectivos nombres.

Los músculos de la mano o músculos intrínsecos se hallan agrupados en tres regiones. La región externa o eminencia tenar posee cuatro músculos; la interna o hipotenar incluye otros cuatro; finalmente, en la región palmar media, se encuentran once músculos [30].

En la Figura 10 se pueden apreciar con detalle las uniones de los tendones con las falanges del dedo, las cuales dan como resultado su particular movimiento.

### 3. Modelo mecánico artificial

En busca de implementar un nuevo sistema de músculos artificiales para el movimiento de una mano robótica antropomórfica como sustituto de los motores eléctricos

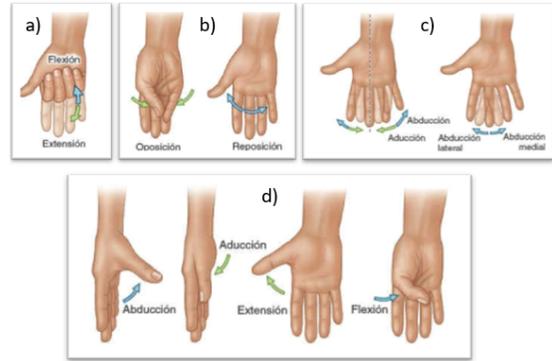


Figura 7: Movimientos de la mano: a) Flexión y extensión de los dedos de la mano en las articulaciones metacarpofalángicas e interfalángicas; b) Oposición y reposición del pulgar en la articulación carpometacarpiana y del dedo meñique en la articulación metacarpofalángica; c) Abducción y aducción de los dedos 2, 4 y 5 en las articulaciones metacarpofalángicas y abducción del dedo 3 en la articulación metacarpofalángica; d) El pulgar esta rotado 90 grados respecto a las otras estructuras. La abducción y la aducción de la articulación metacarpofalángica se producen en el plano frontal, la flexión y la extensión de las articulaciones metacarpofalángica e interfalángica se producen en planos sagitales [32].

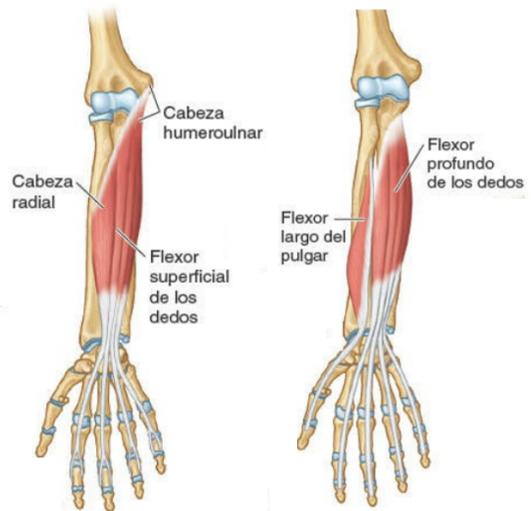


Figura 8: Músculos flexores de los dedos [32].

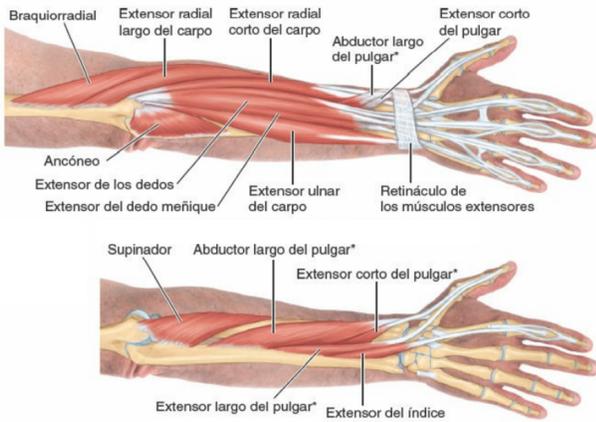


Figura 9: Músculos extensores de los dedos [32].

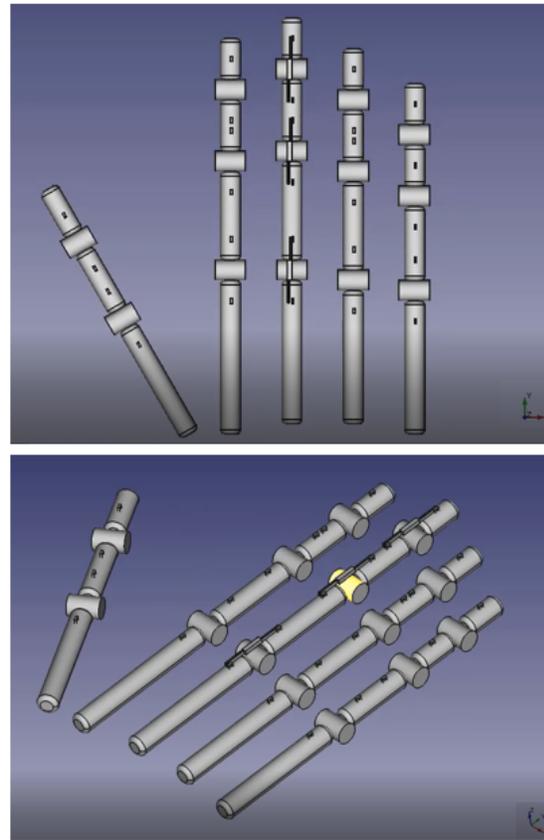


Figura 11: Modelo mecánico propuesto.

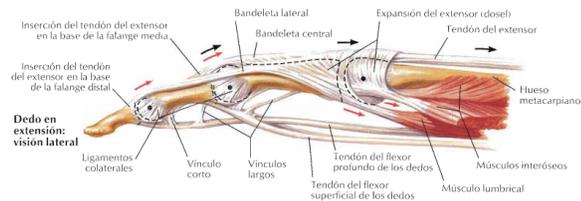


Figura 10: Tendones flexores y extensores de los dedos [31].

de los diseños en el mercado se han reducido los grados de libertad de la mano a únicamente flexión y extensión de los 5 dedos, dando un total de 15 grados de libertad. En la Figura 11 se muestra el diseño mecánico elaborado en FreeCAD. Cada falange es independiente y se encuentran unidas en una articulación cilíndrica la cual permite movimiento de rotación en un solo eje, el eje X. Como simplificación visual cada músculo es representado por un pistón que se une en sus extremos a dos falanges distintas y a la misma distancia del eje de giro.

#### 4. Modelo elástico

Con el objetivo de emular el funcionamiento antropomórfico de la mano, se sustituyen los motores eléctricos como tensores de los tendones extensores y flexores de

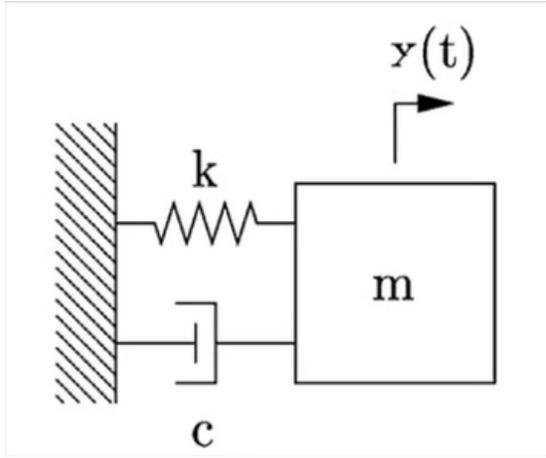


Figura 12: Sistema masa-resorte-amortiguador.

cada dedo, por músculos artificiales, los cuales como su nombre lo dice son un mejor acercamiento al comportamiento biológico. Los músculos artificiales se pueden modelar como sistemas masa-resorte-amortiguador, es decir:

$$m \frac{d^2}{dt^2} y(t) + c \frac{d}{dt} y(t) + ky(t) = 0 \quad (1)$$

Donde  $y(t)$  es la longitud del músculo,  $m$  la masa del objeto,  $c$  el coeficiente de amortiguamiento y  $k$  el coeficiente de elasticidad. Además, se puede considerar únicamente el caso de solución críticamente amortiguado, por lo tanto:

$$y(t) = (A_1 + A_2 t) e^{-\frac{c}{2m} t} \quad (2)$$

$$A_2 = A_1 \frac{c}{2m} \quad (3)$$

Donde  $A_1$  es la longitud inicial del músculo (relajado).

En la Figura 14 se puede apreciar la contracción del músculo artificial, lo cual genera un giro de la articulación, lo cual se trata a profundidad en la siguiente sección.

## 5. Modelo cinemático

Para el control de una mano robótica antropomórfica es indispensable tener un modelo para obtener la posición en el espacio de los extremos de cada dedo. Para ello se toman en consideración las longitudes de las falanges y ángulos de rotación de las articulaciones.

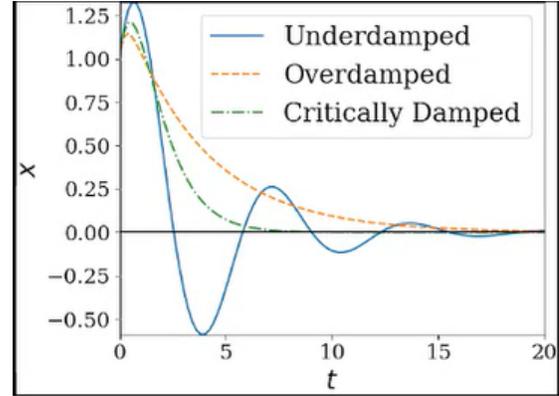


Figura 13: Soluciones del sistema masa-resorte-amortiguador en el tiempo.

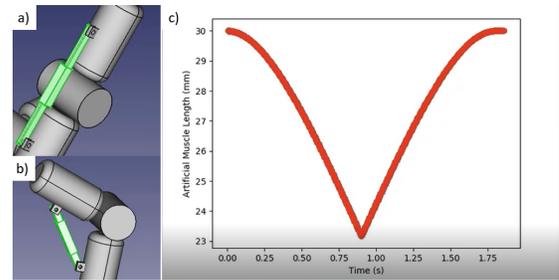


Figura 14: Simulación de músculos artificiales: a) Relajado, b) Contraído, c) Gráfica de longitud del músculo.

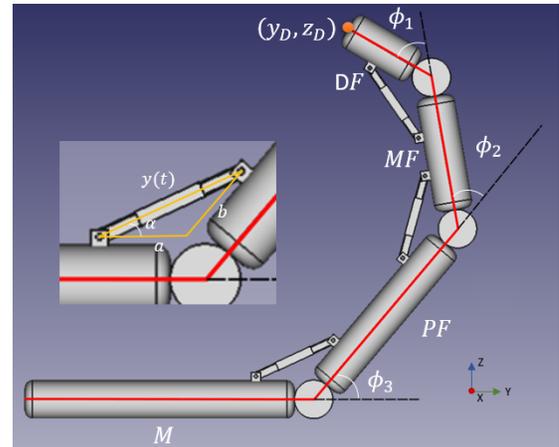


Figura 15: Descripción de la nomenclatura empleada.

La contracción de un músculo flexor provoca un giro respecto al eje de rotación de la articulación, ya que las distancias de la sujeción del músculo a las falanges son fijas, este ángulo de giro está definido como:

$$\phi = \pi - \arccos \left( \frac{a^2 + b^2 - y(t)^2}{2ab} \right) \quad (4)$$

A su vez el ángulo formado por el músculo y la falange inferior está definido como:

$$\alpha = \arccos \left( \frac{a^2 + y(t)^2 - b^2}{2ay(t)} \right) \quad (5)$$

Así tomando en cuenta los tres ángulos de giro de las articulaciones se obtiene la posición del punto final del dedo:

$$y_D = M + PF \cos(\phi_3) + MF \cos(\phi_3 + \phi_2) + DF \cos(\phi_3 + \phi_2 + \phi_1) \quad (6)$$

$$z_D = PF \sin(\phi_3) + MF \sin(\phi_3 + \phi_2) + DF \sin(\phi_3 + \phi_2 + \phi_1) \quad (7)$$

## 6. Conclusiones

El diseño de una mano robótica antropomórfica con alta destreza es una tarea que se continúa tratando desde varios enfoques, la mayoría de ellos utilizando motores eléctricos para la generación del movimiento. La implementación de una red de músculos artificiales en sustitución de los motores eléctricos ha dado como resultado un buen comportamiento bajo simulación, las falanges tienen un posicionamiento que emula a su contraparte biológica. En próximos trabajos se buscará seleccionar y diseñar un tipo de músculo artificial que brinde el rendimiento deseado, haciendo énfasis en reducir la complejidad y volumen de los sistemas ya existentes, para posteriormente realizar experimentos con el sistema completo.

## Referencias

- [1] R. Mahmoud et al. (2010). "Dexterous Mechanism Design for an Anthropomorphic Artificial Hand: Osaka City University Hand I", in IEEE 10th Int. Conf. on Humanoid Robotics, pp.180-185.
- [2] Kivell, R. (2015). "Evidence in hand: recent discoveries and the early evolution of human manual manipulation". *Phil. Trans. R. Soc. B* 370: 20150105. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2015.0105>
- [3] Feix, T., Romero, J., Schmiedmayer, H., Dollar, A. M., Kragic, D. (2016). "The GRASP Taxonomy of Human Grasp Types". *IEEE Transactions on Human-Machines Systems*, 46(1), 66-77.
- [4] Chalon, M., Wedler, A., Baumann, A., Bertleff, W., Beyer, A., Butterfaß, J., et al. (2011). "Dexhand: a space qualified multi-fingered robotic hand," in 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Shanghai: IEEE), 2204-2210.
- [5] Laliberté, T., and Gosselin, C. M. (2001). "Underactuation in space robotic hands," in International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Montréal, Canada (Montréal, QC), 18-21.
- [6] Cianchetti, M., Arienti, A., Follador, M., Mazzolai, B., Dario, P., and Laschi, C. (2011). Design concept and validation of a robotic arm inspired by the octopus. *Mater. Sci. Eng. C* 31, 1230-1239. doi: 10.1016/j.msec.2010.12.004
- [7] Lemberg, J., Kampmann, P., and Kirchner, F. (2011). "A small-scale actuator with passive-compliance for a fine-manipulation deep-sea manipulator," in 2011 MTS/IEEE OCEANS (Santander), 1-4.
- [8] Mura, D., Barbarossa, M., Dinuzzi, G., Grioli, G., Caiti, A., and Catalano, M. G. (2018). A soft modular end effector for underwater manipulation: a gentle, adaptable grasp for the ocean depths. *IEEE Robot. Automat. Mag.* 25, 45-56. doi: 10.1109/MRA.2018.2871350
- [9] Stuart, H., Wang, S., Khatib, O., and Cutkosky, M. R. (2017). The Ocean One hands: an adaptive design for robust marine manipulation. *Int. J. Robot. Res.* 36, 150-166. doi: 10.1177/0278364917694723
- [10] Kragten, G., van der Helm, F., and Herder, J. (2012). "Underactuated robotic hands for grasping in warehouses," in *Automation in Warehouse Development*, eds R. Hamberg and J. Verriet (London: Springer), 117-131.
- [11] Asfour, T., Kaul, L., Wächter, M., Ottenhaus, S., Weiner, P., Rader, S., et al. (2018). "Armar-6: a collaborative humanoid robot for industrial environments," in 2018 IEEE-RAS 18th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids) (Beijing: IEEE), 447-454.

- [12] Brown, E., Rodenberg, N., Amend, J., Mozeika, A., Steltz, E., Zakin, M. R., et al. (2010). Universal robotic gripper based on the jamming of granular material. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 107, 18809–18814. doi: 10.1073/pnas.1003250107
- [13] Amend, J., Cheng, N., Fakhouri, S., and Culley, B. (2016). Soft robotics commercialization: jamming grippers from research to product. *Soft Robot.* 3, 213–222. doi: 10.1089/soro.2016.0021
- [14] Kaneko, K., Kanehiro, F., Morisawa, M., Miura, K., Nakaoka, S., and Kajita, S. (2009). “Cybernetic human HRP-4C,” in 2009 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Paris: IEEE), 7–14.
- [15] Gardecki, A., and Podpora, M. (2017). “Experience from the operation of the pepper humanoid robots,” in 2017 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE) (Koscielisko), 1–6.
- [16] Kulkarni, T., and Uddanwadiker, R. (2015). Overview: mechanism and control of a prosthetic arm. *Mol. Cell. Biomech.* 12, 147–195. doi: 10.3970/mcb.2015.012.147
- [17] Gama Melo, E. N., Avilés Sánchez, O. F., Amaya Hurtado D. (2014). “Anthropomorphic robotic hands: a review”. *Ingeniería y Desarrollo*, 32(2), 279-313.
- [18] L. Biagiotti et al., How Far Is the Human Hand? A Review on Anthropomorphic Robotic End-effectors, 2004. [online]. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu>
- [19] L. Birglen et al. (2008). “Grasping vs. Manipulating” in *Underactuated Robotic Hands*. Berlin, Heidelberg, Germany: Springer, pp. 7-17.
- [20] Shadow, 2020, <https://www.shadowrobot.com/dexterous-hand-series/>
- [21] Xu, Z., Todorov, E. (2016). “Design of a Highly Biomimetic Anthropomorphic Robotic Hand towards Artificial Limb Regeneration”. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2016 (ICRA'16)*.
- [22] Zhou, J. et al. (2019). “A Soft-Robotic Approach to Anthropomorphic Robotic Hand Dexterity”. *IEEE Access*, 7, 101483-101495.
- [23] Laschi, C., Mazzolai, B., and Cianchetti, M. (2016). “Soft robotics: technologies and systems pushing the boundaries of robot abilities”. *Sci. Robot* 1:3690. doi: 10.1126/scirobotics.aah3690
- [24] Bobak, M. et al. (2014). “Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly”. *Advanced functional materials journal* 24, 2163-2170. DOI: 10.1002/adfm.201303288
- [25] B. Tondu, S. Ippolito, J. Guiochet and A. Daidie. (2005). “A Seven-degrees-of-freedom Robot-arm Driven by Pneumatic Artificial Muscles for Humanoid Robots”. *The International Journal of Robotics Research* 24: 257. DOI: 10.1177/0278364905052437
- [26] Carter S. et al. (2018). “Artificial Muscles from Fishing Line and Sewing Thread”. *Science Magazine* vol. 343, 868-872. DOI: 10.1126/science.1246906
- [27] S. E. Bakarich et al. (2015). “4D Printing with Mechanically Robust, Thermally Actuating Hydrogels”. *Macromolecular Rapid Communications Journal*. DOI: 10.1002/marc.201500079
- [28] Shazed A. et al. (2020). “Artificial Muscles from Hybrid Carbon Nanotube-Polypyrrole-Coated Twisted and Coiled Yarns”. *Macromolecular Materials and Engineering Journal*. DOI: 10.1002/mame.202000421
- [29] Rothermund P. et al. (2020). “HASEL Artificial Muscles for a New Generation of Lifelike Robots—Recent Progress and Future Opportunities”. *Advanced science news*. DOI: 10.1002/adma.202003375
- [30] Quiroz Gutierrez F. (2013). *Anatomía Humana*. Editorial Porrúa (4ta ed.). México.
- [31] Netter F. H. (2007). *Atlas de Anatomía Humana*. Elsevier Masson (4ta ed.). Barcelona, España.
- [32] Moore K. L., Dalley A. F., Agur A. M. R. (2001). *Anatomía con orientación clínica*. Wolters Kluwer (8va ed.). Barcelona, España.



**Cristian Cruz Ramírez:** Estudiante de Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica y Licenciatura en Matemáticas en el Instituto de Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.