



NOMBRE DEL SIMPOSIO O TALLER
VII Simposio de Diseño e Ingeniería Asistida por Computadora,
Biomecánica, y Mecatrónica
COMEC 2025

Título

**Procedimiento para la parametrización de prótesis de mano usando el
diseño asistido por computador**

Title

*Procedure for parameterization of hand prostheses using computer-aided
design*

Dr. Yamill S. Campos Pérez¹, Xavier Molina Jiménez²

¹Centro de Estudios Energéticos y de Tecnologías Ambientales (CEETA). Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Cuba. E--mail: ycampos2525@gmail.com

²Estudiante de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Cuba.

Resumen:

La mano humana es una extremidad fundamental para realizar tareas de manipulación, agarre y destreza de todo tipo de objetos, capaz de ejecutar innumerables acciones gracias a su función principal: la prensión. Las prótesis de mano son productos que requieren ser personalizados debido a la variedad de tipos de amputaciones y características antropométrica de cada paciente amputado. Para lograr adaptar las prótesis a las características de cada paciente es necesario que las partes de la prótesis puedan ser editables y parametrizadas, a partir de las dimensiones antropométrica de cada individuo lo que permitiría personalizar el tamaño sin la necesidad de rediseñar cada componente. En este trabajo se presenta un procedimiento general para la creación del modelado 3D de una mano de forma paramétrica para su posterior impresión 3D. Una de las ventajas de la tecnología de impresión 3D es que permite el desarrollo de



diseños de prótesis de mano de bajo costo. Diseñar la prótesis paramétricamente no es un trabajo fácil, especialmente si se desea que la forma de los componentes sea orgánica y estética, lo cual es una prioridad en prótesis, y si los mecanismos para el movimiento de los dedos son complejos.

Abstract:

The human hand is a fundamental limb for manipulating, grasping, and dexterity tasks with all types of objects. It is capable of performing countless actions thanks to its primary function: pressure. Hand prostheses are products that require customization due to the variety of amputation types and anthropometric characteristics of each amputee. To adapt the prostheses to the characteristics of each patient, it is necessary for the prosthesis parts to be editable and parameterized based on the anthropometric dimensions of each individual. This paper presents a general procedure for creating a parametric 3D model of a hand for subsequent 3D printing. One of the advantages of 3D printing technology is that it allows for the development of low-cost hand prosthesis designs. Designing a prosthesis parametrically is not an easy task, especially if you want the components to have an organic and aesthetic shape, which is a priority in prosthetics, and if the mechanisms for finger movement are complex.

Palabras Clave: Parametrización; Prótesis de mano; Impresión 3D

Keywords: *Prosthetic hand; 3D printing; Parameterized*

1. Introducción

Las prótesis de mano son productos que se diseñan de forma personalizadas debido a los diferentes tipos o niveles de amputaciones y las características del muñón de cada paciente amputado, figura 1.



Figura 1. Niveles de amputación

La impresión 3D ha permitido el desarrollo de diseños de prótesis de mano de bajo costo. Sin embargo, existe un problema que las prótesis a menudo no coinciden con el tamaño y la forma de una mano del paciente. [1]

Los modelos en ocasiones se diseñan de forma genéricos y no están en un formato que permita editarlo y como consecuencia su copia o adaptación para cada paciente se limita a realizarle un escalado a la prótesis que se encuentra ya diseñada, esto puede producir dolor en el paciente debido a problema de mal ajuste de la prótesis, ya que fue diseñada sin tener en cuendaa las características antropométricas de la mano y muñón del paciente. Aunque los modelos podrían rediseñarse esto llevaría tiempo y sería una tarea engorrosa.

La solución a este problema podría resolverse si las prótesis se diseñaran usando el diseño paramétrico de la mano permitiendo modificar los parámetros de diseño de las falanges de los dedos, la palma de la mano y muñón, sin la necesidad de rediseñar cada componente.

Las articulaciones flexibles [1, 2] o de bisagra [3, 4], son los tipos de articulaciones usados en las prótesis de mano, las cuales consisten en solo dos o tres piezas (falanges) unidas por cables o cuerdas. Según Ten Kate et al., las prótesis de mano impresas en 3D utilizan cables o cuerdas como flexores, figura 2, [5] .

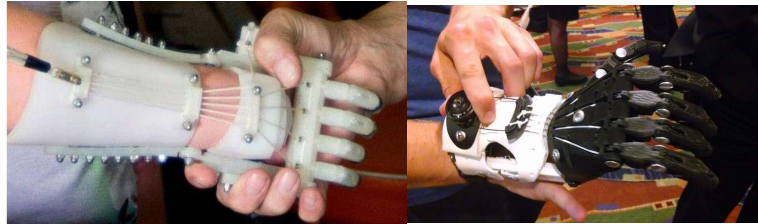


Figura 2. Prótesis de mano que usan utilizan cables o cuerdas como flexores

También son usados, para el accionamiento y movimiento de las falanges, los mecánicos de barras articuladas (linkages). Este tipo de sistema está presente en las prótesis mioeléctrica o motorizadas, figura 3, [6].

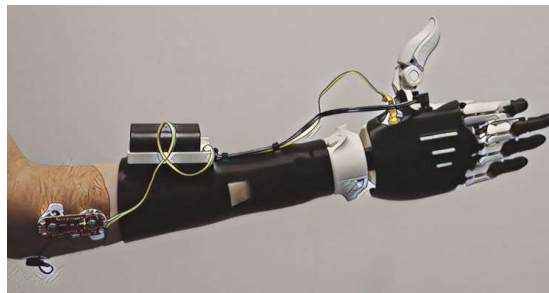


Figura 3. Prótesis mioeléctrica de mano que usan mecanismo de barra

El uso de mecanismos de barra (linkage mechanisms) permiten además de que las prótesis mantenga un parecido cercano a una mano real, ayuda a superar desventajas del movimiento de los dedos accionados por cables y ligas [1], como:

1. Fricción excesiva
2. Falta de precisión en la trayectoria
3. Aflojamiento frecuente de los cables de activación

Sin embargo, adaptar la forma de los enlaces mecánicos para lograr un dedo antropomórfico y estético es una tarea difícil, que se complica más cuantas más articulaciones y eslabones acoplados tenga el dedo [6-9]. Además, la parametrización de las dimensiones de las barras o eslabones del mecanismo de accionamiento es más compleja, ya que además de parametrizar las dimensiones de las falanges, se requiere



actualizar las longitudes de cada eslabón en función de las longitudes o el ancho de las falanges.

2. Metodología y resultados

Para realizar el diseño paramétrico de mano se parte de un modelo 3D de referencia o patrón, en el cual se definen las variables o parámetros que serán tenido en cuenta en la parametrización, estas variables pueden ser:

- Longitud y ancho (circunferencia) de cada falange [10, 11]
- Longitud y ancho de la palma de la mano

Estas dimensiones deben relacionarse entre sí mediante proporciones o funciones lineales. La antropometría de la mano se ha estudiado e investigado por varios investigadores desde hace década. En el caso específico de las dimensiones y proporciones de la falange se han estudiado ampliamente [12-14].

Por otro lado, la palma de la mano presenta una geometría más compleja, lo que dificulta la creación del modelo 3D de la misma. Los diseños actuales o modelos 3D de la palma dependen en gran medida de la idea, creatividad o enfoque del diseñador, a la hora de realizar el diseño de la misma.

Para el modelado 3D de la mano se pueden usar valores antropométricos que se encuentra en la literatura, este tiene como deficiencia que esos valores fueron obtenidos para un tipo de población, con determinadas características de etnia, raza, nutricionales, económica, genéticos, ambientales, etc. Por ejemplo, las características antropométricas de un asiático difieren con las de un europeo y con las de un americano. La otra solución es el escaneo 3D de la mano de varios voluntarios para obtener un conjunto de proporciones aplicables a un modelo CAD, esta opción es más aceptable ya que la muestra se toma de la región geográfica donde viven los pacientes.

El proceso de parametrización se realiza en dos etapas: una primera etapa que es el escaneo de los dedos y la segunda etapa es el escaneo de la palma de la mano.



Del escaneo de los dedos se obtiene los valores de la longitud total del dedo y las longitudes de las cada falanges y el ancho (circunferencia) de los dedos [12], figura 4.

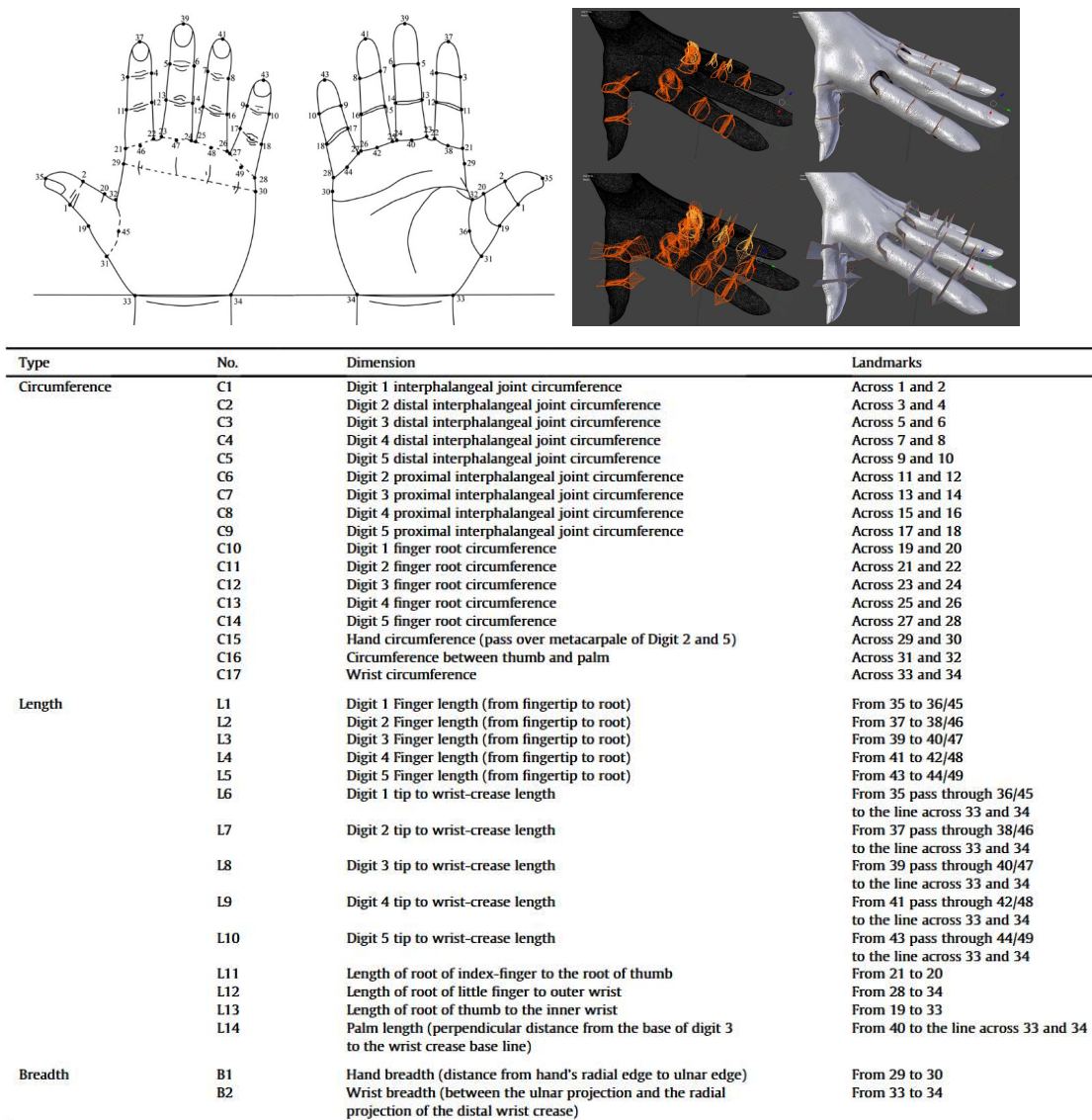


Figura 4. Dimensiones de la mano. Tomado de [10]

Para la palma de la mano, una vez escaneado en 3D las manos de los voluntarios, cada modelo obtenido es cargado en un software CAD, figura 5.

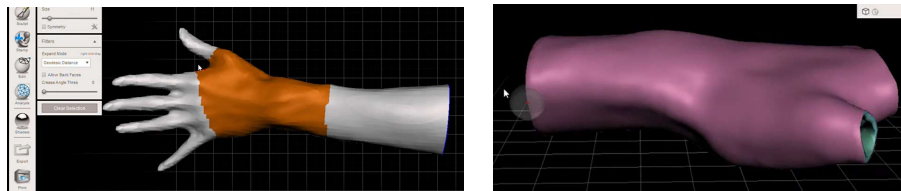


Figura 5. Ejemplo de mano escaneada y extracción de la parte de la palma mano

A partir del software se mide la longitud y anchura en la zona del pulgar, y cuatros secciones transversales de la mano (Upper palm section, Upper thumb section, Lower thumb section y Wrist section), figura 6, y se dibujan sus contornos utilizando geometrías primitivas, como: elipse, arcos, curvas, líneas según sean necesarias, ajustándose lo más posible a los bordes de cada sección escaneas.

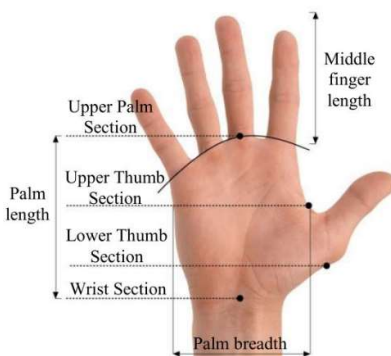


Figura 6. Secciones consideradas para la construcción de la palma, Tomado de [1]

Posteriormente, se promediaron las relaciones entre diámetros, longitudes de eje y distancias entre centros para diseñar un modelo 3D de palma de la mano, de los diferentes voluntarios. Con estos valores promediados se crea un modelo 3D que se usará como modelo de referencia o patrón de la palma de la mano, permitiendo ser modificable para cada paciente de forma personalizada. Los contornos de cada sección son creados en un software CAD, figura 7.

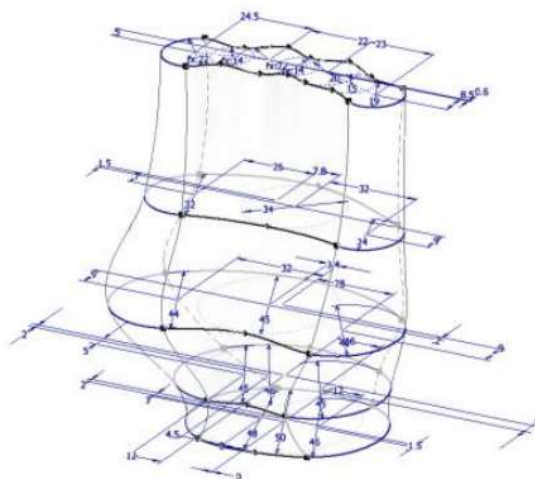


Figura 7. Contornos de la sección transversal de la palma de la mano creadas en un software CAD.

Tomado de [1]

El mecanismo de accionamiento para el movimiento de las falanges consta de articulaciones de cuatro barras, figura 8.

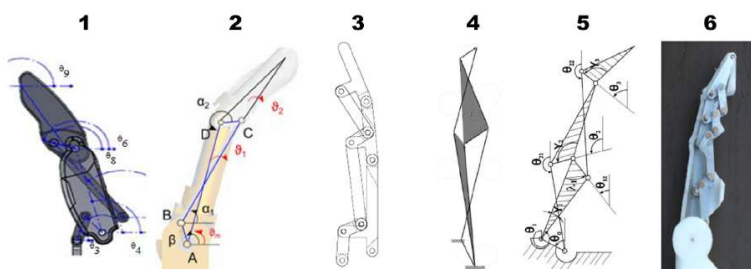


Figura 8. Dedos protésicos de un grado de libertad. (1) El dedo protésico desarrollado por Leal-Naranjo et al. (2) El dedo en S desarrollado por Imbinto et al. (3) El dedo TBM desarrollado por Dechev et al. (4) El dedo protésico desarrollado por Omarkulov et al. (5) El dedo LARM desarrollado por Rodríguez et al.

(6) El dedo protésico desarrollado por Jang et al. Tomado de [9]

La longitud de cada articulación se calcula según las ecuaciones de Grashoff y la antropometría de cada usuario. La cantidad y dimensiones de los eslabones depende del número de falange que se va a tener en cuenta en el diseño de la prótesis. Los diseñadores de prótesis de mano han expresado diferentes opiniones sobre el número de falanges. Un dedo protésico de tres falanges no solo se asemeja a la mano real, sino que también mejora el agarre. Sin embargo, esta característica puede aumentar la complejidad de la estructura y el peso de la prótesis. Dado que la simplicidad en el



diseño de una mano protésica es fundamental y una prioridad, la mayoría de la prótesis desarrolladas comercialmente se han diseñado con una o dos falanges [9].

Para la fabricación de la prótesis se pueden utilizar varios métodos. Una técnica típica consiste en mecanizar metales ligeros como el aluminio. El coste y el tiempo de mecanizado de una mano serían elevados debido a las piezas diminutas y los diseños complejos. Otro método es el moldeo por inyección. Si bien este método no es adecuado para personalizar una prótesis debido al coste inicial y al largo tiempo de desarrollo que supone la fabricación del molde. La tecnología de impresión 3D es otro de los métodos que se ha desarrollado en los últimos años. Este método es ampliamente utilizado por "open bionic" como empresa comercial y también en prototipos de manos para investigación. Además de ofrecer la posibilidad de producir diseños sofisticados y complejos, esta tecnología hace que la mano sea más ligera y económica. Sin embargo, las principales desventajas de las manos impresas en 3D son su baja resistencia y su incapacidad para ejercer grandes fuerzas [9].

3. Conclusiones

Se describe un procedimiento general para la creación de un modelo 3D paramétrico de una prótesis de mano con vista a que pueda ser usado en el diseño de este tipo de producto y su posterior impresión en 3D. Permitiendo la personalización del diseño para diferentes tamaños de mano mediante variaciones adecuadas de las dimensiones de cada segmento de la mano según el paciente. Dado que la simplicidad y el peso en el diseño de una mano protésica es fundamental.

Para el diseño de los dedos se debe usar la variante de dos falanges, ya que simplificaría el diseño del mecanismo de accionamiento del movimiento de los dedos y la parametrización de los mismo.

A pesar que la tecnología de impresión 3D es utilizado para la fabricación de prototipos de prótesis y de fabricar diseños sofisticados, esta tecnología hace que la prótesis mano sea más ligera y económica. A pesar de las ventajas anteriores presenta como desventajas su baja resistencia y su incapacidad para ejercer grandes fuerzas.



4. Referencias bibliográficas

1. Bustamante, M., *A parametric 3D-printed body-powered hand prosthesis based on the four-bar linkage mechanism*, in *IEEE 18th International Conference on Bioinformatics and Bioengineering* 2018: Lima, Peru.
2. E-nable. *The Flexy Hand and Flexy Hand 2*. 2025; Available from: <http://enablingthefuture.org/upper-limb-prosthetics/the-flexy-hand/>.
3. Omaha, U.o.N. *Cyborg Beast*. 2025; Available from: <https://enablingthefuture.org/upper-limb-prosthetics/cyborg-beast/>.
4. E-nable. *K-1 Hand*. 2025; Available from: <https://enablingthefuture.org/k-1-hand/>.
5. J. Ten Kate, G.S.a.P.B., *3D-printed upper limb prostheses: a review*. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology* 2017. **2**(3): p. pp. 300-314, DOI: [://doi.org/10.1080/17483107.2016.1253117](https://doi.org/10.1080/17483107.2016.1253117)
6. N. Dechev, W.C.a.S.N., *Multiple finger, passive adaptive grasp prosthetic hand*. *Mechanism and Machine Theory*, 2001. **36**(10): p. pp. 1157-1173, 2001, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0094-114X\(01\)00035-0](https://doi.org/10.1016/S0094-114X(01)00035-0)
7. Omarkulov, N. *Design and analysis of an underactuated anthropomorphic finger for upper limb prosthetics*. in *37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. 2015. DOI: 10.1109/EMBC.2015.7318895.
8. Jang, G., *Robotic index finger prosthesis using stackable double 4-BAR mechanisms*. *Mechatronics* 2013. **23**(3): p. pp. 318-325, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2013.01.006>
9. Kashef, S.R., *Robotic hand: A review on linkage-driven finger mechanisms of prosthetic hands and evaluation of the performance criteria*. *Mechanism and Machine Theory*, 2020. **145**, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2019.103677>
10. Yu, A., *2D and 3D anatomical analyses of hand dimensions for custom-made gloves*. *Applied Ergonomics*, 2013. **44**: p. pp. 381-392, DOI: 10.1016/j.apergo.2012.10.001
11. Rincón-Becerra, O., *Estimation of anthropometric hand measurements using the ratio scaling method for the design of sewn gloves*. *DYNA*, 2020. **87**(215): p. pp. 146-155, DOI: <http://doi.org/10.15446/dyna.v87n215.87984>
12. Rincón-Becerra, O., *Estimation of anthropometric hand measurements using the ratio scaling method for the design of sewn gloves*. *DYNA*, 2020. **87**(215): p. pp. 146-155, DOI: <http://doi.org/10.15446/dyna.v87n215.87984>
13. Mohammad, Y.A.A., *Anthropometric characteristics of the hand based on laterality and sex among Jordanian*. *International Journal of Industrial Ergonomics* 2005. **35**: p. pp. 47-754,
14. Maldonado, A., *Rediseño Ergonómico De Matraca Para Industria Automotriz*, in *Memorias del Vi Congreso Internacional de Ergonomía*. 2004. p. pp. 138-148.