



# MODELADO GEOMÉTRICO Y SIMULACIÓN CINEMÁTICA DE PRÓTESIS DE MANO PARA PACIENTES ADULTOS CON AMPUTACIÓN TRANSRADIAL

## GEOMETRIC MODELING AND KINEMATIC SIMULATION OF HAND PROSTHESIS FOR ADULT PATIENTS WITH TRANSRADIAL AMPUTATION

Diego Zavala Molina\*, Ricardo Jesús Silva Cabrejos\*, Margarita Murillo Manrique\*, Ricardo Rodríguez Bustinza\*, José Luis Cornejo Aguilar\*\*, Ricardo John Palomares Orihuela\*.  
Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú\*  
Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú\*\*

RECIBIDO: 29 de septiembre de 2023

ACEPTADO: 01 de diciembre de 2023

### RESUMEN

La amputación transradial, que implica la pérdida de la extremidad superior por debajo del codo, es una realidad que afecta profundamente la vida de las personas. La investigación consideró como objetivo modelar y simular el movimiento de los dedos de la mano de una prótesis para pacientes adultos con amputación transradial para incrementar su calidad de vida. Así, podrían realizar con mayor facilidad actividades cotidianas específicas. Se realizó el análisis morfológico y diseño CAD de la mano utilizando como modelo la mano de un paciente adulto voluntario con amputación transradial derecha; asimismo, se detalló el diseño CAD del dedo pulgar de 2 GDL utilizando el software de ingeniería SolidWorks Professional. Luego se realizó el modelamiento cinemático de los dedos de la mano utilizando el algoritmo de Denavit – Hartenberg y se simuló los movimientos de los dedos utilizando el software de ingeniería Matlab. Se obtuvieron las posiciones iniciales y finales del extremo de los dedos de la mano, así como las trayectorias durante la simulación del cierre de la mano. Por lo tanto, la toma de medidas de un paciente maximiza la posibilidad de implementar un prototipo funcional. El modelamiento cinemático permite simular las trayectorias de los dedos de la mano con el software Matlab.

**Palabras claves:** prótesis, amputación, transradial, trayectoria, simulación.

### Cómo citar

D. Zavala Molina, R. J. Silva Cabrejos, M. F. Murillo Manrique, R. R. Rodríguez Bustinza, J. Cornejo, y R. J. Palomares Orihuela, «Modelado Geométrico y Simulación Cinemática de Prótesis de Mano para Pacientes Adultos con Amputación Transradial», *Perfiles\_Ingeniería*, vol. 19, n.º 20, pp. 179–200, dic. 2023.

### ABSTRACT

Transradial amputation, which involves the loss of the upper limb below the elbow, is a reality that profoundly affects people's lives. The objective of the research was to model and simulate the movement of the fingers of a prosthesis for adult patients with transradial amputation to increase their quality of life. Thus, they could more easily carry out specific daily activities. Morphological analysis and CAD design of the hand were performed using the hand of a volunteer adult patient with right transradial amputation as a model; Likewise, the CAD design of the 2 DOF thumb was detailed using SolidWorks Professional engineering software. Then kinematic modeling of the fingers of the hand was carried out using the Denavit – Hartenberg algorithm and the movements of the fingers were simulated using the Matlab engineering software. The initial and final positions of the end of the fingers of the hand, as well as the trajectories during the simulation of hand closure, were obtained. Therefore, taking measurements of a patient maximizes the possibility of implementing a functional prototype. Kinematic modeling allows simulating the trajectories of the fingers of the hand with the Matlab software.

**Keywords:** prosthesis, amputation, transradial, trajectory, simulation.

© Los autores. Este artículo Open Access esta publicado bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional. (CC-BY 4.0)



## Introducción

El Instituto Nacional de Estadística e Informática del Perú (INEI), en el 2012, reportó que 1,575,402 peruanos tenían algún tipo de discapacidad [1], lo que representa al 5.2 % del total de habitantes. Por otro lado, el reporte del censo del 2017, indicó que esa cifra se duplicó en apenas 5 años [2]. Parte de la población con discapacidad está representada por aquellos que presentan algún tipo de amputación de sus extremidades, lo que disminuyó su capacidad motriz y su contribución a la sociedad, así como el gran impacto negativo emocional. En el Perú, el 69.4 % de las personas que sufren un accidente no cuentan con el beneficio de atención del sistema de salud por parte del Estado o de una institución privada; en su gran mayoría, realizan una actividad laboral informal [3].

La amputación transradial [4], que implica perder una extremidad superior del cuerpo por debajo del codo, es una realidad difícil que afecta profundamente la vida de las personas que la atraviesan. En este contexto, el proyecto presenta el modelamiento y simulación del movimiento de la mano de una prótesis para pacientes adultos con amputación a nivel transradial. Asimismo, aborda la necesidad crítica de desarrollar prótesis electrónicas [5-8] avanzadas que permitan a los pacientes recuperar el uso de sus extremidades superiores o inferiores amputadas. Está situado en la línea de investigación de la biomecatrónica [9-15].

En particular, proyectos como el “Modelamiento y simulación de la mano humana, empleando herramientas CAE” [16] y The Ability Hand [17] de Psyonic han mostrado avances considerables en restaurar la funcionalidad de la mano de pacientes que han sufrido amputaciones transradiales. Estas iniciativas han ofrecido lecciones y conocimientos invaluable que forman la base del proyecto de investigación. El enfoque del proyecto implica el uso de herramientas avanzadas de modelado y simulación [18-22] para diseñar una prótesis de pulgar eficaz y personalizable. Esta investigación no solo busca restaurar la funcionalidad perdida en una extremidad superior, sino también mejorar la calidad de vida y la independencia de los pacientes afectados por amputaciones transradiales [23-26].

En conclusión, el desarrollo del proyecto representa un paso adelante en la aplicación de herramientas tecnológicas que mejoren la calidad de vida de los pacientes con amputación transradial. A futuro, la investigación tiene como objetivo desarrollar el modelamiento

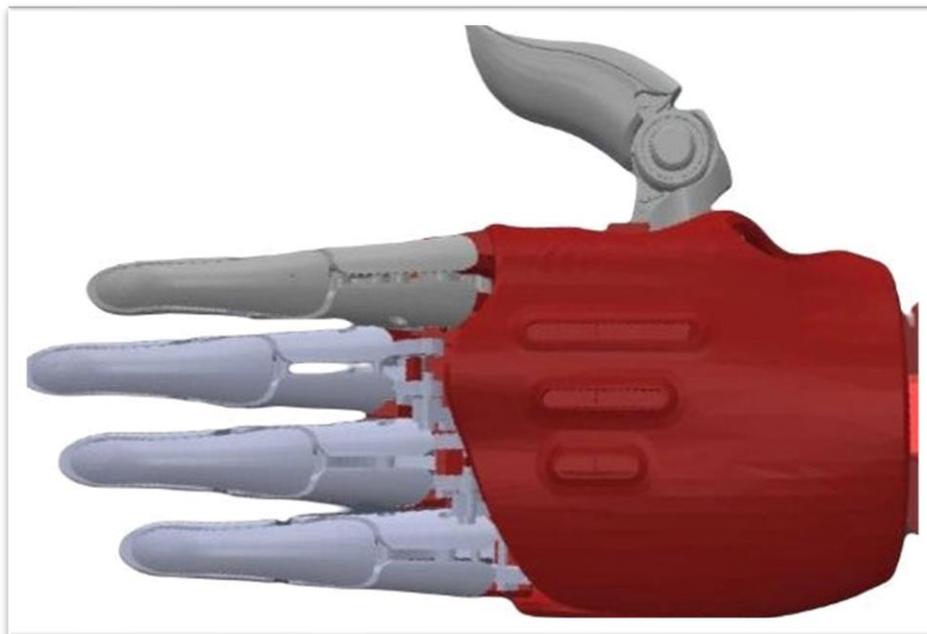
matemático del dedo pulgar para implementar una etapa de control precisa y eficaz basado en el conocimiento acumulado a través de proyectos previos. Este enfoque tiene el potencial de alterar significativamente la vida de quienes se ven afectados por esta afección brindándoles la oportunidad de recuperar un componente esencial de su función y autonomía [27-29].

## 1. Metodología

### 2.1. Análisis Morfológico y Diseño CAD de la Mano

El proyecto está enfocado en el modelamiento de la mano de una prótesis para un paciente adulto que debido a un accidente laboral por atropello vehicular tuvo que ser sometido a una amputación transradial del lado derecho, por lo que, se hizo necesario un análisis morfológico de la mano izquierda, mediante la medición de las dimensiones de la mano izquierda del paciente. En la Figura N° 1, se presenta el diseño CAD de la mano derecha desarrollado en el software de ingeniería SolidWorks Professional, como parte de una prótesis transradial [30].

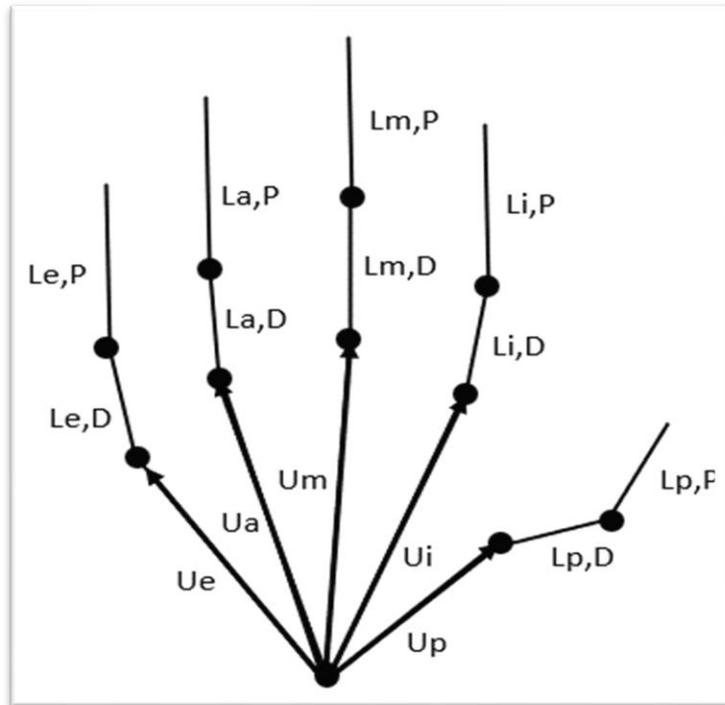
Figura N° 1. Diseño CAD de la mano derecha para la prótesis transradial



Elaborado en SolidWorks Professional

Teniendo en cuenta el diseño CAD de la mano en SolidWorks, se identifican los puntos de análisis de cada articulación de todos los dedos (pulgares, índice, medio, anular, medio), así como, los eslabones de cada cadena cinemática, los que se presenta en la Figura N° 2 [31].

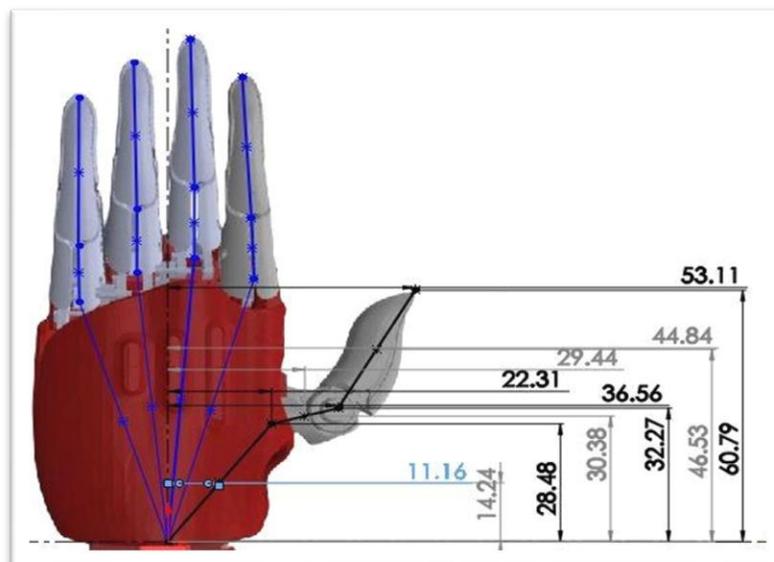
Figura N° 2. Cadena cinemática representadas en el diseño de la mano



Elaborado en SolidWorks Professional

Habiendo definido las cadenas cinemáticas de los dedos es posible realizar las mediciones de las dimensiones de cada uno de los eslabones de los 5 dedos, tal como se visualiza en la Figura N° 3 y se presentan en la Tabla N° 1.

Figura N° 3. Dimensiones de cada eslabón del dedo pulgar



Elaborado en SolidWorks Professional

Tabla N° 1. Medidas realizadas en los cinco dedos

Pulgar (mm)		Índice (mm)		Medio (mm)		Anular (mm)		Meñique (mm)	
$L_{e,p}$	32.97	$L_{a,p}$	33.94	$L_{m,p}$	35.41	$L_{a,p}$	35.42	$L_{e,p}$	35.75
$L_{e,p}$	14.75	$L_{a,d}$	14.83	$L_{m,d}$	17.09	$L_{a,d}$	15.24	$L_{e,d}$	13.47

Elaborado en SolidWorks Professional

En la Tabla N° 2, se muestran los ángulos de orientación de los dedos y, en la Tabla N° 3, los vectores de orientación registrados; los cuales posteriormente se utilizarán para el análisis en el modelo.

Tabla N° 2. Orientación de cada cadena sobre los cinco dedos

Ángulo (rad)	
Pulgar	0.38
Índice	0.20
Medio	0.09
Anular	- 0.09
Meñique	-0.20

Elaborado en SolidWorks Professional

Tabla N° 3. Coordenadas de los vectores de orientación de cada dedo

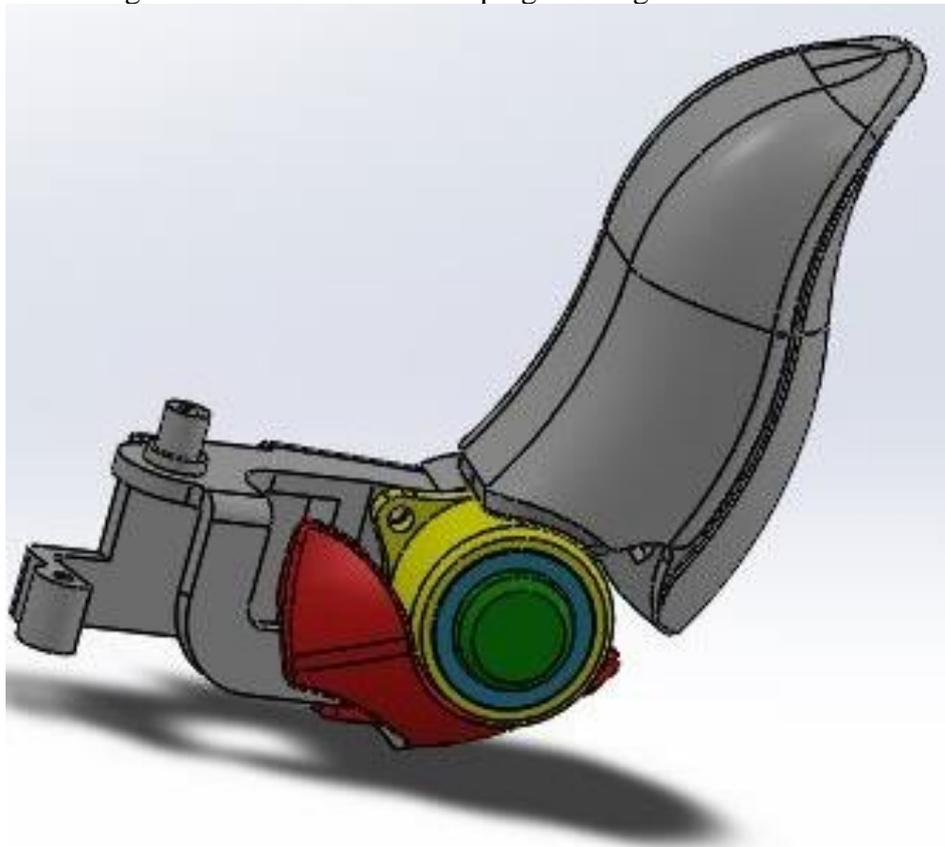
Pulgar (mm)		Índice (mm)		Medio (mm)		Anular (mm)		Meñique (mm)	
$U_{px}$	28.48	$U_{ix}$	63.54	$U_{mx}$	68.71	$U_{ax}$	65.00	$U_{ex}$	57.97
$U_{py}$	0.00	$U_{iy}$	0.00	$U_{my}$	0.00	$U_{ay}$	0.00	$U_{ey}$	0.00
$U_{pz}$	22.31	$U_{iz}$	18.51	$U_{my}$	5.71	$U_{az}$	-6.61	$U_{ez}$	-18.96

Elaborado en SolidWorks Professional

## 2.2. Diseño CAD del Pulgar de 2 GDL

Con el objetivo de diseñar un posterior sistema de control, se realizó un estudio detallado del dedo pulgar a partir de las medidas de la mano del paciente voluntario. Se analizó la estructura interna para diseñar un modelo mecánico que se acciona a través de un servomotor analógico [32]. El dedo pulgar cuenta de seis partes funcionales, diseñadas en CAD [33] a partir del software SolidWorks Professional, el cual permite el modelado de elementos mecánicos complejos, el ensamblaje de prototipos en 2D y 3D, así como sus respectivos planos. El diseño CAD 3D del pulgar con dos grados de libertad se representa en la Figura N° 3.

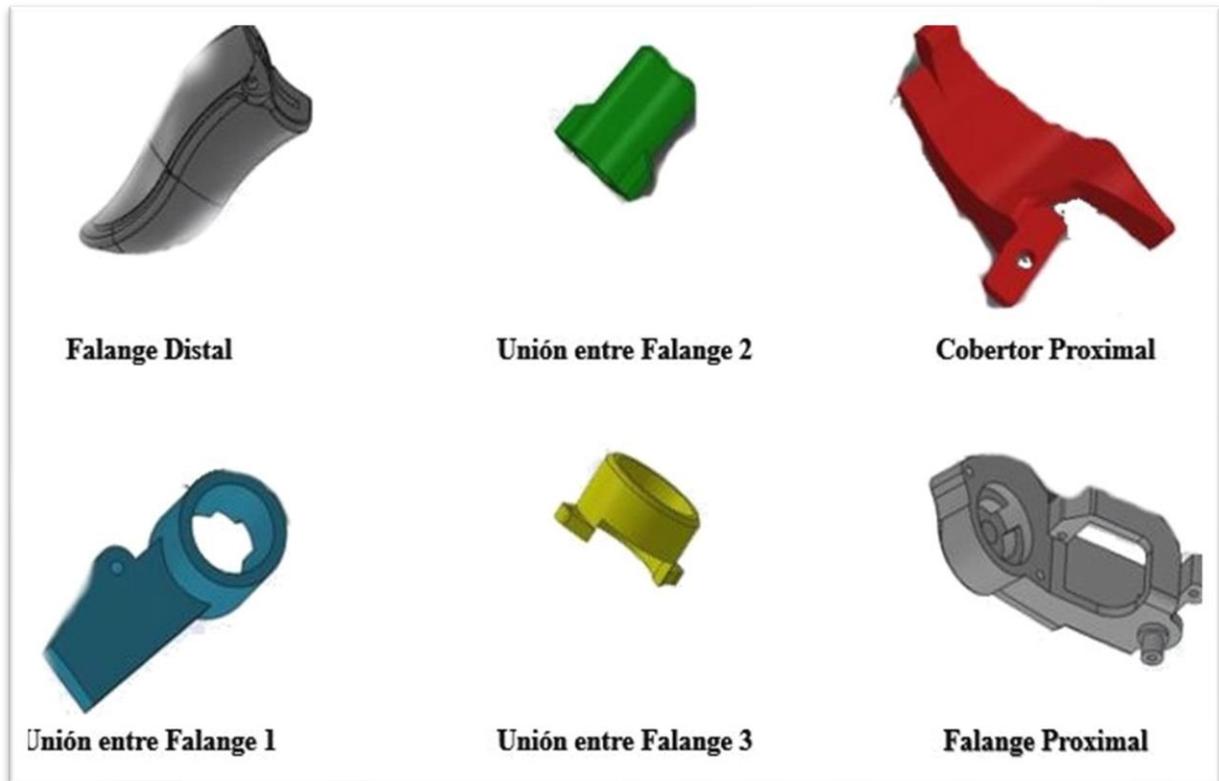
Figura N° 3. Diseño CAD de pulgar de 2 grados de libertad



Elaborado en SolidWorks Professional

El diseño CAD de las seis piezas que conforman el pulgar de 2 GDL (falange distal, unión entre falange 2, cobertor proximal, unión entre falange 1, unión entre falange 3 y falange proximal) se representa en la Figura N° 4.

Figura N° 4. Partes del pulgar de 2 GDL



Elaborado en SolidWorks Professional

### 2.3. Modelo Cinemático de la Mano de la Prótesis Transradial

Utilizando el diagrama presentado en la Figura N° 2, el modelo cinemático directo es obtenido mediante el uso del algoritmo de Denavit-Hartenberg en cada una de las cadenas cinemáticas que conforman la mano. Se analiza solo uno de los cinco dedos, debido a su alta similitud estructural. Los parámetros obtenidos para los dedos, de acuerdo con el esquema presentado, se muestran en la Tabla N° 4.

Tabla N° 4. Parámetros articulares D-H para los dedos

Link (i)	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	$\theta_1$	0	$L_1$	0
2	$\theta_2$	0	$L_2$	0

Elaborado en SolidWorks Professional

Donde:

- $\theta_i$  = Ángulo de  $X_{i-1}$  hasta  $X_i$ , al girar alrededor de  $Z_i$ .
- $d_i$  = Distancia entre ejes  $Z_{i-1}$  y  $Z_i$  medido a lo largo de  $Z_i$ .
- $a_i$  = Distancia entre ejes  $X_{i-1}$  y  $X_i$  medido a lo largo de  $X_i$ .
- $\alpha_i$  = Ángulo desde  $Z_{i-1}$  hasta  $Z_i$ , girando alrededor de  $X_i$ .

Se obtiene la variable  $P_i$ , que expresa la matriz que contiene la posición y orientación del extremo de todos los dedos.  $P_i$  se representa en la ecuación 1.

$$P_i = {}^{-1}T_i(u_i) * {}^0T_i(\theta_i) \quad (1)$$

Donde:

- ${}^{-1}T_i(u_i)$  = matriz correspondiente a  $u_i$ , vector de aproximación medido a partir de la muñeca de la mano hasta el extremo del dedo.
- ${}^0T_i(\theta_i)$  = matriz que representan la cadena cinemática desde su inicio hasta el extremo del dedo.

Por lo tanto,  ${}^0T_i(\theta_i)$  se expresa según la ecuación 2:

$${}^0T_i(\theta_i) = {}^0T_i(\theta_{i,CMC}) * {}^1T_i(\theta_{i,MCP-\alpha}) \quad (2)$$

Los elementos que conforman la ecuación 2 se determinan reemplazando los parámetros de D-H en la matriz de transformación homogénea que se muestra en la ecuación 3.

$$T_i(\theta_i) = \begin{bmatrix} c(\theta_i) & -s(\theta_i) * c(\alpha_i) & s(\theta_i) * s(\alpha_i) & \alpha_i * c(\theta_i) \\ s(\theta_i) & c(\theta_i) * c(\alpha_i) & -c(\theta_i) * s(\alpha_i) & \alpha_i * s(\theta_i) \\ 0 & s(\alpha_i) & c(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Sustituyendo los parámetros articulares de la Tabla N° 4 en la ecuación 3, se obtienen las siguientes matrices:

$${}^0T_i(\theta_{i,CMC}) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\text{sen}(\theta_1) & 0 & L_1 * \cos(\theta_1) \\ \text{sen}(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & L_1 * \text{sen}(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1_2T_i(\theta_{i,MCP\alpha}) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\text{sen}(\theta_2) & 0 & L_2 * \cos(\theta_2) \\ \text{sen}(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & L_2 * \text{sen}(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Reemplazamos los valores de las matrices halladas en la ecuación 2 y luego hallamos la matriz de transformación para el vector  ${}^{-1}_0T_i(\mathbf{u}_i)$  representada en la ecuación 4:

$${}^{-1}_0T_i(\mathbf{u}_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & u_{ix} \\ 0 & 1 & 0 & u_{iy} \\ 0 & 0 & 1 & u_{iz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Finalmente, reemplazamos los valores en la ecuación 1 y se obtiene la matriz  $P_{i=}$ :

$$P_{i=} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \end{bmatrix}$$

Donde:

- $a_1 = \cos(q_1) * \cos(q_2) - \sin(q_1) * \sin(q_2)$
- $a_2 = -\cos(q_1) * \sin(q_2) - \cos(q_2) * \sin(q_1)$
- $a_3 = 0$
- $a_4 = U_x + L_1 * \cos(q_1) + L_2 * \cos(q_1) * \cos(q_2) - L_2 * \sin(q_1) * \sin(q_2)$
- $b_1 = \cos(q_1) * \sin(q_2) + \cos(q_2) * \sin(q_1)$
- $b_2 = \cos(q_1) * \cos(q_2) - \sin(q_1) * \sin(q_2)$
- $b_3 = 0$
- $b_4 = U_y + L_1 * \sin(q_1) + L_2 * \cos(q_1) * \sin(q_2) + L_2 * \cos(q_2) * \sin(q_1)$
- $c_1 = 0$
- $c_2 = 0$
- $c_3 = 1$
- $c_4 = U_z$
- $d_1 = 0$

- $d_2=0$
- $d_3=0$
- $d_4=1$

Debido a que el diseño de cada uno de los dedos de la mano presenta similitudes, de acuerdo con la Tabla N° 4, se reemplazan los valores contenidos en las tablas 1, 2 y 3 para obtener la matriz Pi de cada uno, tal como se muestra a continuación.

Dedo Pulgar:

$$P_p = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\text{sen}(\theta_1 + \theta_2) & 0 & 32.97 * \cos(\theta_1 + \theta_2) + 14.75 * \cos(\theta_1) + 28.48 \\ \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & 32.97 * \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) + 28.48 * \cos(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & 22.31 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Dedo Índice:

$$P_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\text{sen}(\theta_1 + \theta_2) & 0 & 33.94 * \cos(\theta_1 + \theta_2) + 14.83 * \cos(\theta_1) + 63.54 \\ \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & 33.94 * \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) + 14.83 * \text{sen}(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & 18.51 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Dedo Medio:

$$P_m = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\text{sen}(\theta_1 + \theta_2) & 0 & 35.41 * \cos(\theta_1 + \theta_2) + 34.18 * \cos(\theta_1) + 68.71 \\ \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & 35.41 * \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) + 17.09 * \text{sen}(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & 5.71 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Dedo Anular:

$$P_a = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\text{sen}(\theta_1 + \theta_2) & 0 & 35.42 * \cos(\theta_1 + \theta_2) + 15.24 * \cos(\theta_1) + 65 \\ \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & 35.42 * \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) + 15.24 * \text{sen}(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & -6.61 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Dedo Meñique:

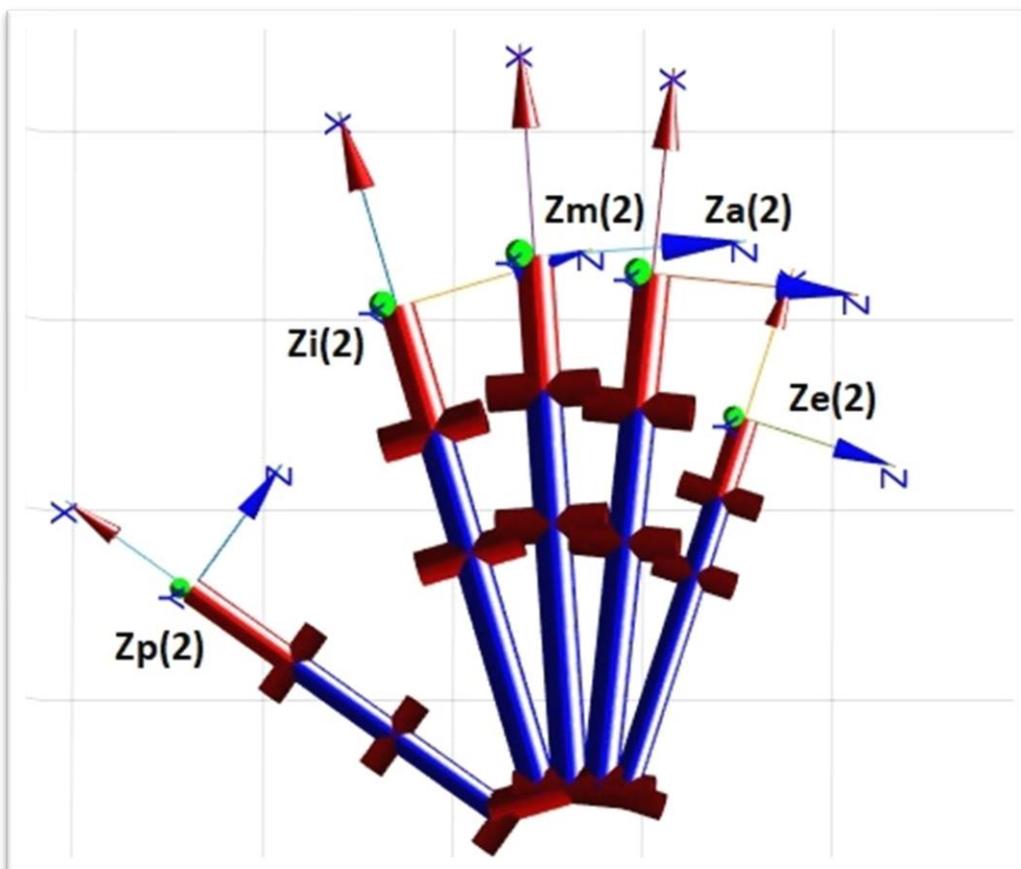
$$P_e = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\text{sen}(\theta_1 + \theta_2) & 0 & 35.75 * \cos(\theta_1 + \theta_2) + 13.47 * \cos(\theta_1) + 57.97 \\ \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & 35.75 * \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) + 13.47 * \text{sen}(\theta_1) \\ 0 & 0 & 1 & -18.96 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 3. Resultados

Una vez obtenido el modelamiento cinemático de la mano se genera el diseño CAD que represente y cumple con el modelamiento desarrollado. Se utilizó el Robotics System Toolbox del software de ingeniería MATLAB, herramienta que permite simular modelos de robots comerciales y aquellos de diseño propio. Se consideró una posición inicial representada mediante una mano abierta y una posición final mediante una mano cerrada.

En la posición inicial de reposo, todos los ángulos  $\theta_i$  de los dedos de la mano presentan un valor de 0 rad, tal como se muestra en la Figura N° 5. Este valor se reemplaza en  $\theta_1$  y  $\theta_2$  de la matriz presentada en la ecuación 3 y posteriormente, de acuerdo con la ecuación 2, se calcula  ${}^0T_i(\theta_i)$ , matriz que representa la cadena cinemática, desde su base hasta el extremo del dedo.

Figura N° 5. Mano en posición inicial (abierta)



Elaborado en Matlab

Se obtiene la posición inicial del extremo de los dedos de la mano, contenidas en el plano X-Z. Se obtuvo para el dedo pulgar una posición, respecto a los ejes referencia XYZ, de 75.74, 0.00 y -102.20 respectivamente de acuerdo con lo indicado en la Tabla N° 5.

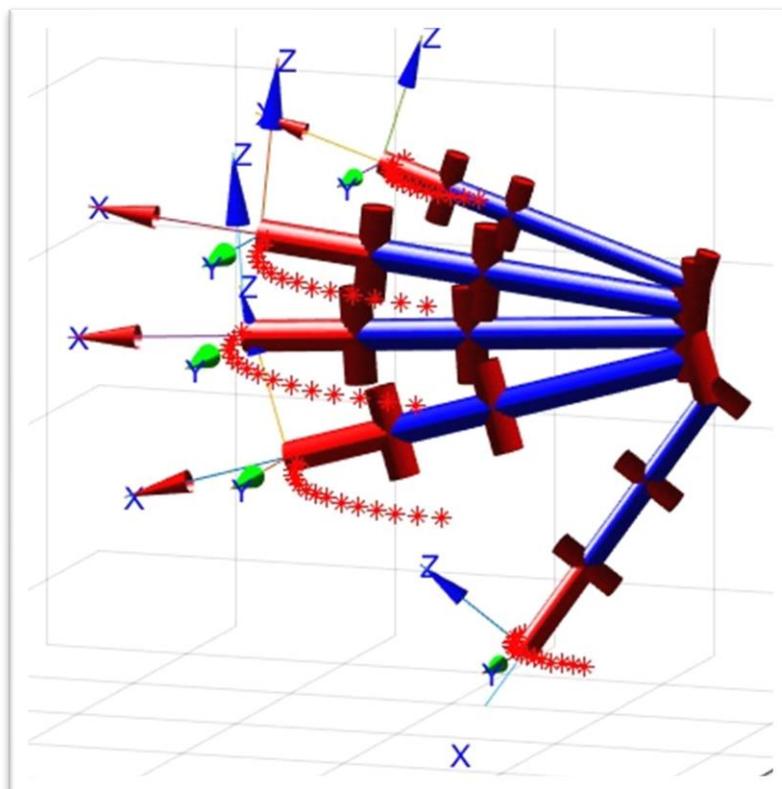
**Tabla N° 5.** Posición inicial de los dedos de la mano

Posición inicial	Dedos de la mano				
	Pulgar	Índice	Medio	Anular	Meñique
x	75.74	150.40	163.80	159.00	121.10
y	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
z	-102.20	-48.24	-12.09	19.04	43.47

Elaborado en Matlab

Al realizar el movimiento de cierre de la mano, se obtiene las curvas de las trayectorias recorridas por los extremos de los dedos, las cuales se representan de color rojo en la Figura N° 6.

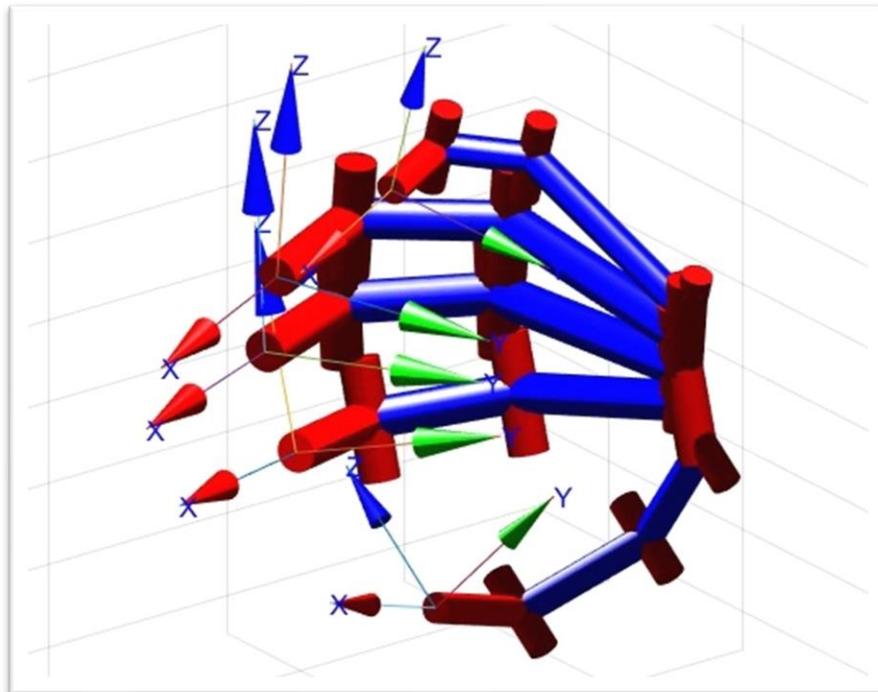
Figura N° 6. Mano realizando el movimiento de cierre



Elaborado en Matlab

El movimiento final consiste en el cierre de la mano, en el que todos los grados de libertad de los dedos presenta el valor de  $-1$  rad. Este valor permite que el paciente cierre la mano con un ajuste seguro para desarrollar sus actividades, lo que se representa en la Figura N° 7.

Figura N° 7. Mano en posición final (cerrada)



Elaborado en Matlab

Asimismo, al culminar el cierre de la mano, se obtiene la posición final del extremo de los dedos. Se obtuvo para el dedo pulgar una posición, respecto a los ejes referencia XYZ, de 39.77, 55.72 y -51.90 respectivamente, tal como se muestra en la Tabla N° 6.

Tabla N° 6. Posición inicial de los dedos de la mano

Posición final	Dedos de la mano				
	Pulgar	Índice	Medio	Anular	Meñique
x	39.77	89.36	97.55	92.94	82.54
y	57.72	59.42	61.99	62.01	37.78
z	-51.90	-30.03	-7.44	12.41	31.12

Elaborado en Matlab

#### 4. Discusión y Conclusiones

Estamos de acuerdo con Collazos [34] en cuanto a la creciente demanda por parte de usuarios que han experimentado una amputación. En consecuencia, la adquisición de una prótesis para recuperar la capacidad funcional se convierte en una necesidad imperativa. Para tal efecto, se puede realizar el modelamiento cinemático con el software de ingeniería Matlab considerando las medidas de las falanges, y un software de diseño para el análisis de esfuerzos y de fatiga. Asimismo, se concuerda con Mejía [35] respecto al análisis matemático para interpretar el sistema mecánico mediante el análisis independiente de las resistencias de los dedos para estudiar la relación angular de las falanges proximales y así obtener el rango de movimiento. También coincidimos con Vizcayno [36] respecto a la necesidad de realizar un análisis matemático para describir el comportamiento de los tendones y el movimiento de los dedos a través de un modelo cinemático.

Los miembros superiores y especialmente las manos permiten desempeñar una gran cantidad de tareas básicas de la vida diaria o complejas en el campo laboral, por lo que es relevante garantizar su funcionalidad a partir de su diseño arquitectónico y capacidad de control electrónico. La participación de un paciente voluntario ha permitido obtener con exactitud las medidas anatómicas a considerar en la propuesta de diseño CAD utilizando el software de ingeniería SolidWorks. Esto permite la mayor posibilidad de implementar un prototipo funcional para tareas básicas y complejas.

El modelamiento cinemático que utiliza el algoritmo de Denavit-Hartenberg permite obtener las expresiones matemáticas para simular las trayectorias de cada uno de los dedos de una mano mediante el software Matlab. Así se obtienen las posiciones iniciales y finales del extremo de cada uno de los dedos de la mano.

Como trabajo futuro se plantea desarrollar una estrategia de control para el dedo pulgar y brindar la posibilidad de realizar actividades de mayor complejidad. Asimismo, la implementación de la mano como parte de una prótesis transradial constituirá el inicio de la fase de pruebas funcionales con el paciente voluntario.

## 5. Referencias bibliográficas

- [1] INEI, “Perú Características de la Población con Discapacidad” *Instituto Nacional de Estadística e Informática*. Lima, Perú. Accedido: agosto de 2023. [Online]. Disponible: [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1209/Libro.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1209/Libro.pdf)
- [2] INEI, “Capítulo III: Resultados generales sobre la población con discapacidad” *Dirección Técnica de Demografía e Indicadores Sociales*. Lima, Perú. Accedido: agosto de 2023. [Online]. Disponible: [https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1675/cap03.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1675/cap03.pdf)
- [3] H. T. Camacho-Conchucos, “Pacientes amputados por accidentes de trabajo: características y años acumulados de vida productiva potenciales perdidos” vol. 71, no. 4, pp. 271–275, 2010.
- [4] E. Vázquez, “Los Amputados y su Rehabilitación: Un Reto para el Estado”, Artículo de Investigación, CONACYT, México, 2016.
- [5] J. M. Dorador, “Robótica y Prótesis Inteligente”, Artículo de Investigación, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2004.
- [6] A. L. Villanueva, “Biomedicina, Biomarcadores, Biomecánica y Medica Predictiva”, Artículo de Investigación, MAPFRE RE, España, 2012.
- [7] J. P. Quezada, K. S. Cabrera, J. Cornejo, R. Palomares, J. A. Cornejo-Aguilar and M. Vargas, "Mechatronic Conceptual Design and Kinematic Analysis of Serial-Type Robotic Exoskeleton for Assisted Rehabilitation Therapy on Upper Limbs," *2023 Third International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT)*, Bhilai, India, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICAECT57570.2023.10118243.
- [8] J. Aguirre, M. B. Pérez, R. Palomares and J. Cornejo, "Ergonomic Bio-Design and Motion Simulation of a Mechatronic Orthosis System for Knee Rehabilitation," *2022 IEEE XXIX International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, Lima, Peru, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/INTERCON55795.2022.9870040.

- [9] J. Cornejo et al., “Industrial, collaborative and mobile robotics in Latin America: Review of mechatronic technologies for advanced automation,” *Emerg. Sci. J.*, vol. 7, no. 4, pp. 1430–1458, 2023.
- [10] V. Rodriguez, L. Sanchez, R. Palomares, and J. Cornejo, “Ergonomic bio-design and motion simulation of a mechatronic orthosis system for elbow rehabilitation,” in *2022 IEEE XXIX International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, 2022.
- [11] J. Cornejo et al., “Anatomical Engineering and 3D printing for surgery and medical devices: International review and future exponential innovations,” *Biomed Res. Int.*, vol. 2022, p. 6797745, 2022.
- [12] J. Aguirre, M. B. Pérez, R. Palomares and J. Cornejo, "Ergonomic Bio-Design and Motion Simulation of a Mechatronic Orthosis System for Knee Rehabilitation," *2022 IEEE XXIX International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, Lima, Peru, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/INTERCON55795.2022.9870040.
- [13] J. Cornejo, J. A. Cornejo-Aguilar, C. Gonzalez, and R. Sebastian, “Mechanical and kinematic design of surgical mini robotic manipulator used into SP-LAP multi-DOF platform for training and simulation,” in *2021 IEEE XXVIII International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, 2021.
- [14] J. A. Juarez, R. Palomares, J. Cornejo, and R. R. Bustinza, “Biomedical mechatronic device iTakuna: Smart embedded system for electric wheelchair used by paraplegic patients,” in *2021 IEEE XXVIII International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, 2021.
- [15] J. Cornejo et al., “Mechanical design of a novel surgical laparoscopic simulator for telemedicine assistance and physician training during aerospace applications,” in *2021 IEEE 3rd Eurasia Conference on Biomedical Engineering, Healthcare and Sustainability (ECBIOS)*, 2021.
- [16] C. D. Rodríguez, “Modelamiento y simulación de la mano humana utilizando herramientas CAE”, *Artículo de Investigación*, Universidad de la Salle, Bogotá, 2016.

- [17] A. Zara. “A New Era for Bionic Limbs” [Online]. Disponible: <https://www.embs.org/pulse/articles/a-new-era-for-bionic-limbs/>
- [18] J. P. David, T. Helbing, and H. Witte, “SenGlove-A Modular Wearable Device to Measure Kinematic Parameters of The Human Hand”, Article, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2023.
- [19] P. Palacios et al., “Biomechatronic embedded system design of sensorized glove with soft robotic hand exoskeleton used for rover rescue missions on mars,” in 2021 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS), 2021.
- [20] J. Cornejo et al., “Mechatronic exoskeleton systems for supporting the biomechanics of shoulder-elbow-wrist: An innovative review,” in 2021 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS), 2021.
- [21] D. A. Rozas Llontop, J. Cornejo, R. Palomares, and J. A. Cornejo-Aguilar, “Mechatronics design and simulation of anthropomorphic robotic arm mounted on wheelchair for supporting patients with spastic cerebral palsy,” in 2020 IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV), 2020.
- [22] J. Cornejo, J. P. Perales-Villaruel, R. Sebastian and J. A. Cornejo-Aguilar, "Conceptual Design of Space Biosurgeon for Robotic Surgery and Aerospace Medicine," *2020 IEEE ANDESCON*, Quito, Ecuador, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ANDESCON50619.2020.9272122.
- [23] P. Palacios, W. Castillo, M. V. Rivera and J. Cornejo, "Design of T-EVA: Wearable Temperature Monitoring System for Upper Limbs during Extravehicular Activities on Mars," *2020 IEEE Engineering International Research Conference (EIRCON)*, Lima, Peru, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/EIRCON51178.2020.9254027.
- [24] J. Cornejo, J. A. Cornejo Aguilar, and J. P. Perales Villaruel, “Innovaciones Internacionales En Robótica Médica Para Mejorar El Manejo Del Paciente En Perú,” *Rev. Fac. Med. Humana*, vol. 19, no. 4, pp. 105–113, 2019.
- [25] M. Vargas, J. Cornejo, and L. E. Correa-López, “Ingeniería Biomédica: La Revolución Tecnológica Para El Futuro Del Sistema De Salud Peruano,” *Rev. Fac. Med. Humana*, vol. 16, no. 3, 2016.

- [26] J. Cornejo, J. A. Cornejo-Aguilar, and R. Palomares, "Biomedik surgeon: Surgical robotic system for training and simulation by medical students in Peru," in 2019 International Conference on Control of Dynamical and Aerospace Systems (XPOTRON), 2019.
- [27] R. A. Vergaray, R. F. Del Aguila, G. A. Avellaneda, R. Palomares, J. Cornejo and J. A. Cornejo-Aguilar, "Mechatronic System Design and Development of iROD: EMG Controlled Bionic Prosthesis for Middle- Third Forearm Amputee," *2021 IEEE Fifth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, Cuenca, Ecuador, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ETCM53643.2021.9590715.
- [28] R. M. Ñope-Giraldo *et al.*, "Mechatronic Systems Design of ROHNI-1: Hybrid Cyber-Human Medical Robot for COVID-19 Health Surveillance at Wholesale-Supermarket Entrances," *2021 Global Medical Engineering Physics Exchanges/Pan American Health Care Exchanges (GMEPE/PAHCE)*, Sevilla, Spain, 2021, pp. 1-7, doi: 10.1109/GMEPE/PAHCE50215.2021.943487
- [29] O. Mejia, D. Nuñez, J. Rázuri, J. Cornejo and R. Palomares, "Mechatronics Design and Kinematic Simulation of 5 DOF Serial Robot Manipulator for Soldering THT Electronic Components in Printed Circuit Boards," *2022 First International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT)*, Trichy, India, 2022, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICEEICT53079.2022.9768447.
- [30] G. Urriolagoitia, B. Romero, C. Diaz, F. Gallegos, J. Martinez, J. Vargas, "Hand prosthesis prototype construction with the implementation of phalanges through 3D printing technology", Article, [Online]: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40964-023-00481-0>.
- [31] A. Velázquez, E. Merchán, L. Hernández, G. Urriolagoitia, "Rango de movilidad y función descriptiva del dedo índice", Instituto Politécnico de México, México, 2007.
- [32] J. Maldonado, R. Garrido, "Prototipo educativo basado en un servomotor analógico de Radio Control", Congreso Nacional de Control Automático, México, 2017.
- [33] W. Chai, "CAD (computer - aided design)", Article, [Online]: [https://www.techtarget.com/whatis/definition/CADcomputeraideddesign#:~:text=CAD%20\(computer%20aided%20design\)%20is%20the%20use%20of%20computer,\(3%2D\)%20models.](https://www.techtarget.com/whatis/definition/CADcomputeraideddesign#:~:text=CAD%20(computer%20aided%20design)%20is%20the%20use%20of%20computer,(3%2D)%20models.)

- [34] A. G. Collazos, “Diseño y prototipado de una prótesis de accionamiento mecánico para amputaciones transfalángicas de la mano”, Lima, Perú. 2021. [Online]. Disponible: <https://hdl.handle.net/20.500.12815/223>
- [35] E. Mejía, “Diseño de una prótesis electromecánica para personas con amputación de mango funcional de la mano”, Lima, Perú. 2021. [Online]. Disponible: <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/9230>
- [36] J. Vizcayno, “Diseño de Prótesis de Mano con un solo Actuador”, México. 2019. [Online]. Disponible: <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/16723>

### **Diego Alonso Zavala Molina**

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Licenciado en Ingeniería Mecatrónica. Áreas de Investigación: a) Mecatrónica, b) Robótica Médica, c) Ingeniería Biomédica, d) Ingeniería Biomédica-Clínica.

**Autor corresponsal:** [diego.zavala@urp.edu.pe](mailto:diego.zavala@urp.edu.pe)

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9736-1264>

### **Ricardo Jesús Silva Cabrejos**

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Bachiller en Ingeniería Mecatrónica.

[ricardo.silva@urp.edu.pe](mailto:ricardo.silva@urp.edu.pe)

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7732-786X>

### **Margarita Fredesvinda Murillo Manrique**

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Doctora en Educación, Magister en Docencia Universitaria y Gestión Educativa, Bachiller en Ingeniería Eléctrica, Ingeniero Electricista, Colegiado con CIP N.º 59410; Bachiller Profesional en Electricidad y Electrónica., estudios realizados de pregrado en Ciencias Económicas y estudios de Maestría en Ingeniería de Sistemas. Experiencia profesional en diversas empresas en el área de comunicaciones e ingeniería eléctrica. Ex-decana de la Facultad de Ingeniería y Gestión -UNTELS. Ex- Directora de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica - UNTELS. Asesora en la Escuela de Comunicaciones del Ejército y docente en diversas Universidades. Publicación de artículos científicos sobre educación y tecnología en SCOPUS y en revistas especializadas sobre las smart grid y el uso racional de la energía eléctrica, así como ponencias en estas áreas.

[margarita.murillo@urp.edu.pe](mailto:margarita.murillo@urp.edu.pe)

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2580-0082>

### **Ricardo Raúl Rodríguez Bustinza**

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Ingeniero Electrónico - Universidad Ricardo Palma (URP). Maestro en Automática e Instrumentación - Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Doctor en Ingeniería Eléctrica - Universidad Nacional del Callao (UNAC). Profesor investigador en las áreas de control avanzado, inteligencia artificial y robótica. Profesor de Posgrado en Automática e Instrumentación FIEE-UNI. Profesor de Pregrado en la Escuela Profesional de Ingeniería Mecatrónica FIM-UNI. Miembro del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Coordinador de Proyectos en ISCA & Electronics, en el área de la ingeniería de control cubriendo esencialmente aspectos relacionado al control con sistemas embebidos dirigido a la investigación científica y control por PLC dirigido al sector industrial.

[ricardo.rodriquezb@urp.edu.pe](mailto:ricardo.rodriquezb@urp.edu.pe).

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6411-7123>

### **José Luis Cornejo Aguilar**

Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos

Miembro senior IEEE. Doctor(c) en Ingeniería (Mechatronics Stream), Especialista en Robótica, Ing. en Diseño e Impresión 3D, Maestría en Ingeniería Biomédica, Maestría en Administración de Empresas, Ingeniero Profesional. Desarrolla proyectos de investigación internacionales multicolaborativos en: Mecatrónica y Diseño Mecánico; Fabricación y Desarrollo de Productos; y sistemas robóticos bioinspirados. Es orador internacional y revisor profesional en conferencias y revistas. Es autor de más de 50 artículos publicados sobre bases de datos de alto impacto. Asimismo, colabora como Profesor e Investigador para Instituciones Académicas.

[jose.cornejo@ieee.org](mailto:jose.cornejo@ieee.org)

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4096-9337>

### **Ricardo John Palomares Orihuela**

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Doctor en Ciencias de la Educación. Maestría (c) en Ingeniería Biomédica. Maestría en Docencia Universitaria. Licenciado en Ingeniería Mecatrónica. Miembro senior - IEEE. Investigador RENACYT (Grupo Carlos Monge Medrano - Nivel IV). Líneas de Investigación: a) Mecatrónica, b) Robótica Médica, c) Ingeniería Biomédica, d) Ingeniería Biomédica-Clínica, e) Evaluación de Tecnologías Sanitarias.

[ricardo.palomares@urp.edu.pe](mailto:ricardo.palomares@urp.edu.pe).

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9076-3674>

### **Contribución de Autoría**

Todos los autores contribuyeron a definir la solución al problema de investigación, participando en la redacción del primer borrador del artículo, el cual fue revisado críticamente con aportes de forma y de relevancia técnica. Así, se le otorgó el consentimiento de aprobación a la versión final remitida a la revista *Perfiles de Ingeniería*.

### **Conflictos de Intereses**

Se declara que no existe conflicto de intereses de los autores de la presente publicación. Los autores son integrantes de la comunidad de egresados y docentes de la Universidad Ricardo Palma. Uno de los autores es parte del comité editorial de la revista *Perfiles de Ingeniería*, y no participó en el proceso editorial luego del envío del artículo.

### **Responsabilidad Ética**

Los autores declaran y garantizan el respeto a la confidencialidad de los datos personales del paciente voluntario, así como el consentimiento informado para su participación.

### **Financiamiento**

Esta investigación se realizó con los recursos propios de todos los coautores.

**Correspondencia:** [diego.zavala@urp.edu.pe](mailto:diego.zavala@urp.edu.pe)