

Diseño Mecánico de un Prototipo de Prótesis de Mano

MECHANICAL DESIGN OF A PROTOTYPE OF HAND PROSTHETICS

Mayra Daniela Yépez Rosero¹, Carlos Alfonso Villarreal Bolaños²

Resumen

El presente proyecto muestra el diseño y construcción de un prototipo de prótesis de mano para amputación transradial. Las características de diseño se establecieron en función de las medidas antropométricas del paciente, así como, los movimientos, ángulos de flexión y tipos de agarres a realizar.

Se usó mecanismos de 4 barras para constituir el movimiento de flexo - extensión de los dedos y la transmisión de potencia para los dedos: medio, anular y meñique. Para la transmisión de potencia en el dedo índice se usó un tren de engranes rectos. Para su validación se realiza diferentes pruebas virtuales para la determinación y análisis de esfuerzos, para determinar los puntos críticos y asegurar la confiabilidad del prototipo.

La construcción se realizó mediante impresión tridimensional en material polimérico, Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS). Finalizada su construcción, se realiza pruebas de validación del prototipo.

Finalmente se obtuvo un prototipo de prótesis de mano que cumple las condiciones de diseño propuestas.

Abstract

This research is about the design and construction of a prototype of hand prosthesis for transradial amputation. The design characteristics were established based on the anthropometric measures of the patient, as well as the movements, flexion angles and types of grips to be performed.

Four bars were used to form the flexo - extension movement of the fingers and the transmission of power for the fingers: medium, ring and pinky. For the power transmission on the index finger a straight gear train was used. For its validation different virtual tests are made for the determination and analysis of efforts, to determine the critical points and to assure the reliability of the prototype.

The construction was made by three-dimensional printing in polymeric material, Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS). Once completed, prototype validation tests are performed.

Finally, a prototype of hand prosthesis was obtained that meets the proposed design conditions.

Keywords: Hand prosthesis, transradial amputation, biomechanical, anthropomorphic, mechanisms

¹ Carrera de Ingeniería Mecatrónica, Carrera de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Técnica del Norte, Ibarra – Ecuador.

Palabras Clave: Prótesis mano, amputación transradial, biomecánica, antropomórfico, mecanismos.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a accidentes laborales o calamidad doméstica muchas personas han sufrido amputaciones de extremidades superiores. Actualmente, en la provincia de Imbabura existen 4826 personas con discapacidad física, según datos del CONADIS [1]. Estas personas se encuentran limitadas en cuanto al acceso a prótesis robóticas que, si bien existen en el mercado mundial, ésta tecnología es de difícil acceso, ya que las prótesis deben ser personalizadas y además son considerablemente costosas.

Actualmente la mayoría de las prótesis de mano son mecánicas, poco funcionales o netamente estéticas, la mayoría de las cuales usan una pinza como efector final en lugar de dedos.

El diseño de prototipos de prótesis de mano ha evolucionado con el transcurso del tiempo, partiendo de modelos básicos que solo suplían la parte estética del miembro perdido, hasta la actualidad en la cual la funcionalidad es lo más imperante al momento de generar nuevas propuestas [2], por lo que es importante el diseño de un prototipo de prótesis de mano que asemeje las funcionalidades de la mano humana en cuanto a apariencia estética, agarres principales y movimientos.

2. METODOLOGÍA

2.1. Características de la persona de estudio

Se estableció al Sr. Alexander Aguilar, como persona de estudio, con el propósito de aproximar las dimensiones del prototipo a las medidas antropométricas de su mano derecha, para replicar la mano izquierda, la cual carece debido a una malformación congénita. Usando un calibrador digital de marca Mitutoyo con un error instrumental de $\pm 0.02\text{mm}$ y resolución de $0,01\text{mm}$, se tomaron medidas de cada una de las falanges de los dedos y la palma, dichas

medidas se redondearon a números enteros, las cuales son usadas como referencia para las dimensiones finales del prototipo.

2.2. Movimientos del prototipo

El movimiento de flexo – extensión (Figura 1) es el principal movimiento que realizan las articulaciones de los dedos de la mano, a excepción del pulgar, por lo que se decide aplicarlo al prototipo. Adicional a este movimiento se encuentran aquellos basados en la abducción y aducción con usos limitados en función de su grado de rotación [3], por lo que no se consideró dichos movimientos en éste proyecto.

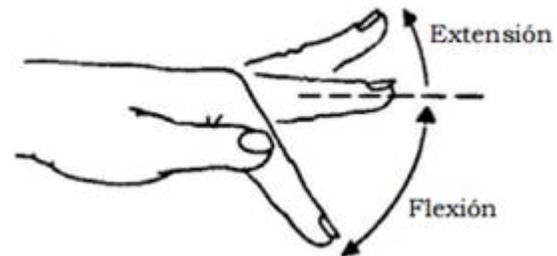


Figura1. Flexo-extensión de los dedos.

2.3. Selección de mecanismos de los dedos

Mediante el estudio del estado del arte se determinó los mecanismos en base a situaciones resueltas con resultados favorables para usar en prótesis de mano. Los mecanismos más usados en prótesis de mano para flexo - extensión de los dedos son: cadenas de engranajes, poleas y mecanismos de cuatro barras simple, he invertido [4].

Se considera que mediante el mecanismo los dedos puedan realizar los ángulos de flexión necesarios para el movimiento de flexo – extensión de los dedos y se delimite a las

medidas antropométricas planteadas [5]. (Figura 3).

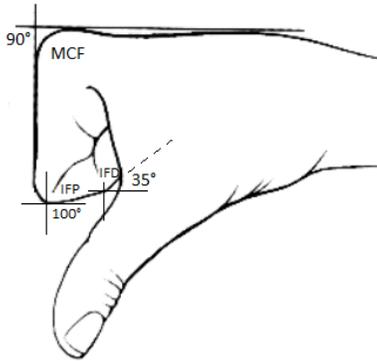


Figura 2. Ángulos de flexión de los dedos. [5]

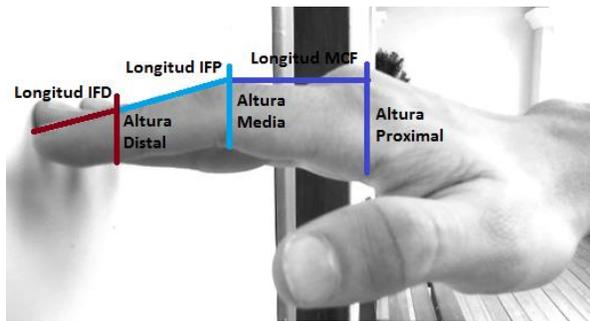


Figura 3. Parámetros dimensionales de los dedos

Adicionalmente es necesario un mecanismo para el accionamiento de los dedos: medio, anular y meñique, el cual debe ser capaz de rotar los dedos como se observa en la figura 4 [6].

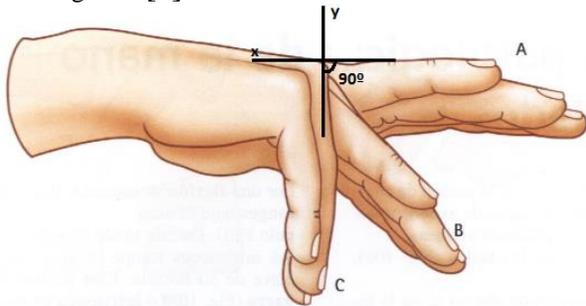


Figura 4: Ángulo de rotación de la articulación metacarpo-falángica [6].

2.4. Material

Para su diseño se utiliza software para seleccionar un material ligero, resistente y

económico. Adicionalmente un parámetro importante a considerar es la facilidad de manufactura, para garantizar la adecuada fabricación del prototipo. Por lo cual, se elige el polímero acrilonitrilo butadieno estireno ABS para su construcción.

2.5 Simulación del prototipo

Debido a la complejidad morfológica de los elementos a analizar, se utilizó el método de elementos finitos para determinar las deformaciones máximas, desplazamientos y factor de seguridad en las partes principales que constituyen el prototipo.

2.6 Construcción y ensamblaje del prototipo

Finalizado el diseño del prototipo, se procede a manufacturar cada una de sus elementos mediante impresión tridimensional, para posteriormente ensamblar sus dedos e insertarlos en la palma de la mano, para constituir el prototipo de prótesis.

2.7 Pruebas de validación

Mediante la implementación de un sistema de control en la prótesis de mano, se realiza las pruebas de validación del prototipo, verificando su funcionalidad en cuanto a agarres de precisión y fuerza con diferentes objetos.

3. RESULTADOS

3.1 Dimensiones del mecanismo

Se establece el mecanismo considerando las medias en los dedos, mediante la síntesis dimensional se obtuvo el mecanismo mostrado en la figura 5, el cual cumple con los requerimientos de diseño.

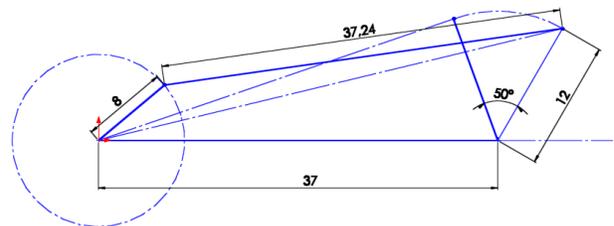


Figura 5. Dimensiones del mecanismo de 4 barras.

3.2 Análisis de posición

Se realizó una síntesis de tres posiciones fundamentales, para determinar la trayectoria y ángulos de flexión del mecanismo, para cumplir con las funcionalidades propuestas.

Se analiza la trayectoria que describe el mecanismo durante el cierre del dedo, cuando se bloquea la falange proximal, así como, los ángulos de las articulaciones mencionados en la tabla 1.1, como se indica en la figura 6.

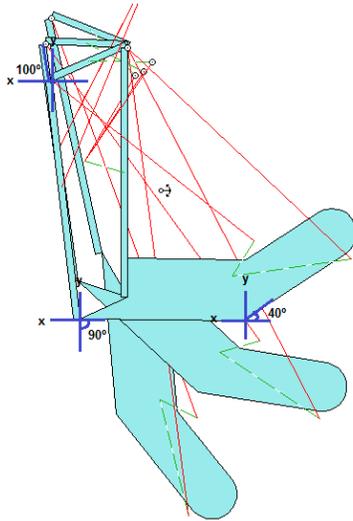


Figura 6. Síntesis de tres posiciones del dedo.

3.3 Análisis estático

Se realiza un análisis estático para el agarre cilíndrico, considerando que los puntos de contacto de los dedos índice y pulgar del prototipo están cubiertos de silicona y sujetan un diámetro máximo de un vaso de vidrio de 63,7 mm de diámetro y 500 g, siendo éstos los parámetros máximos de diámetro. Los ángulos formados en los puntos de contacto de los dedos índice y pulgar con dicho objeto (Figura 7).

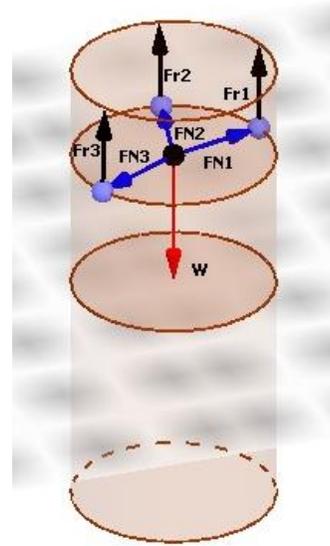


Figura 7. Fuerzas que actúan en el agarre cilíndrico.

Obteniéndose las diferentes fuerzas normales que interactúan en el momento del agarre, como se muestra a continuación.

$$FN_1 = \frac{Fr_1}{0.3} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$FN_2 = \frac{Fr_2}{0.3} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$FN_3 = \frac{Fr_3}{0.3} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$FN_1 = 6.66 \text{ N} \quad FN_2 = 1.95 \text{ N} \\ FN_3 = 7.72 \text{ N}$$

3.4 Torque necesario para el actuador del dedo índice

En la Figura 8 se observa el actuador para el dedo índice y la ubicación en el prototipo, siendo el torque requerido el siguiente:

$$T_{motor} = i * \vec{M}_{AB} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$T_{motor} = 0,31 [Nm]$$

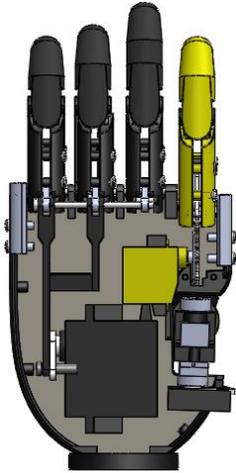


Figura 8. Actuador para el dedo índice.

3.5 Torque del actuador para la transmisión en los dedos: medio, anular y meñique

Luego de realizar un análisis estático en los diferentes mecanismos que intervienen, se determina un torque de $0,31 \text{ N}\cdot\text{m}$ para el dedo índice y se multiplica éste valor por 3, para hallar el torque requerido para los dedos: medio, anular y meñique, obteniendo $0,93 \text{ N}\cdot\text{m}$ como mínimo. La figura 9 muestra la ubicación del actuador.

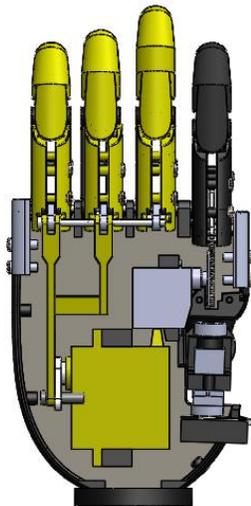


Figura 9. Actuador para el mecanismo de los tres dedos.

3.6 Selección de materiales

En la tabla 1 se muestra los materiales considerados en cuanto a resistencia, precio y

ligereza, los materiales que se consideraron para su análisis son: aleaciones de aluminio, magnesio, poliuretano, acero inoxidable y ABS, sin embargo, considerando la facilidad de manufactura del material se selecciona el ABS. En la tabla 1 se presentan las propiedades del ABS [7].

Tabla 1. Propiedades generales y mecánicas del ABS

Propiedades	ABS
Módulo elástico	2000 N/mm ²
Densidad	1020 Kg/m ³
Límite de tracción	30 N/mm ²
Límite de compresión	
Límite elástico	31 Mpa
Calor específico	1386 J/Kg*k
Resistencia a la flexión	48 Mpa
Resistencia a la tracción	45 Mpa

3.7 Diseño mecánico del prototipo

Inicialmente se establece su arquitectura de diseño en base a software como se muestra en la figura 10.

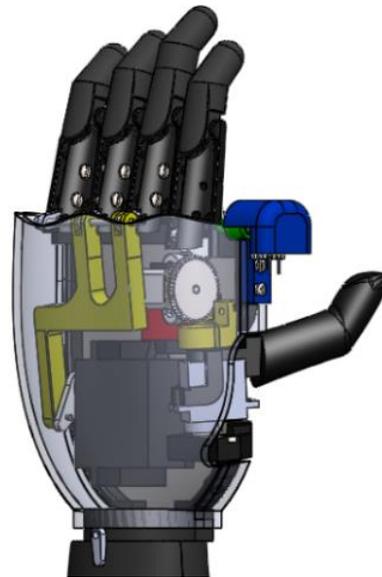


Figura 10. Diseño global del prototipo.

Diseño de los dedos

Para esto se basó el diseño de los dedos en las medidas antropométricas aproximadas del sujeto de estudio como se muestra en la figura 11.

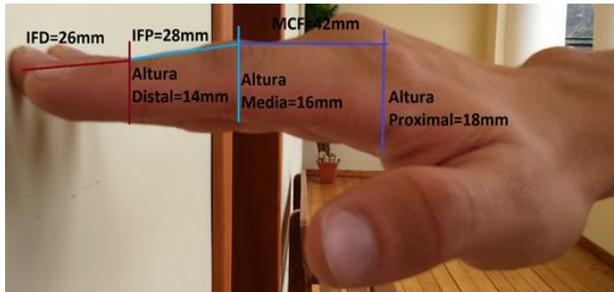


Figura 11. Medidas aproximadas del dedo del sujeto de estudio.

En la figura 12 se muestra un dedo ensambrado con sus partes constitutivas.



Figura 12. Ensamblaje de un dedo

Diseño del pulgar.

El pulgar está diseñado para girar en su propio eje y hacer la oposición con respecto al dedo índice para hacer el agarre de puntual. Está conformado por el dedo y un soporte para colocar el micro servo como se observa en la figura 13. En las tablas 2, 3 y 4 se hace una comparación de las medidas antropométricas y las del diseño computacional.

Tabla 2. Longitud de las articulaciones en mm

Articulación	Medidas Antropométricas	Medidas CAD
Proximal	41	40
Distal	34	33

Tabla 3. Altura de las articulaciones en mm

Articulación	Medidas Antropométricas	Medidas CAD
Proximal	15	20
Distal	17	18

Tabla 4. Anchura de las articulaciones en mm

Articulación	Medidas Antropométricas	Medidas CAD
Proximal	17	20
Distal	19	20,5



Figura 13. Diseño del dedo pulgar.

3.7.1 Diseño de la palma inferior.

La palma inferior se encuentra conformada por una base con sus respectivos soportes para los ejes de los dedos y alojamientos para los servomotores como se indica en la figura 14. Se considera las medidas antropométricas de la persona de estudio para su dimensionamiento y diseño, como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Dimensiones de la palma inferior en mm

	Medidas Antropométricas	Medidas CAD
Longitud	113,8	113,5
Anchura	82	93,6

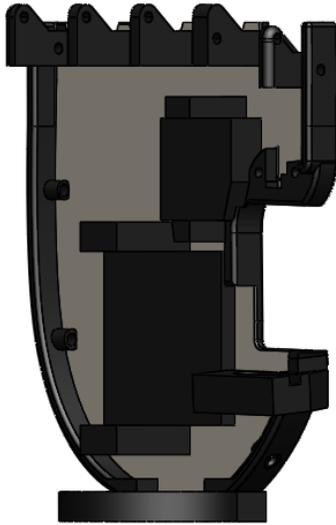


Figura 14. Diseño de la palma Inferior

3.8 Arquitectura de la mano

Luego de haber realizado varios diseños y modificaciones en el CAD se logró conseguir un prototipo de prótesis de mano. Ésta mano es capaz de realizar un agarre cilíndrico teórico de 62,7 mm y un agarre de pinza como se indica en la figura 15.

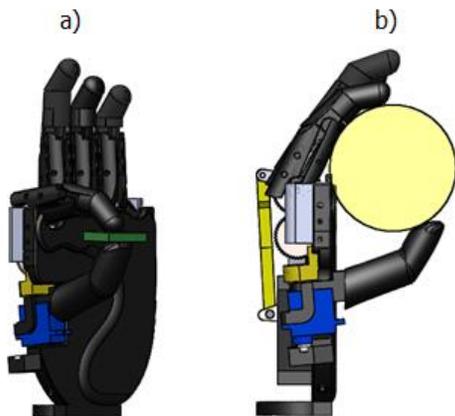


Figura 15. Agarres que realiza el prototipo: (a) agarre de pinza, (b) agarre cilíndrico

3.9 Análisis de elementos finitos

El desarrollo CAD/CAE permite tener una visión completa del prototipo en estudio, por lo que se hace uso de herramientas para determinar los desplazamientos y factor de seguridad [8]. Este estudio utilizó la teoría de falla mediante esfuerzos combinados de von Mises, que es apropiada para materiales dúctiles; el elemento falla si el esfuerzo supera el límite elástico del material, lo cual se puede comprobar con el factor de seguridad, que debe ser mayor a 2. Los principales elementos analizados son: el dedo índice, pulgar, palma inferior y barra doble, por ser los elementos más críticos en el diseño, donde el caso más extremo es que el prototipo levante los objetos con los dedos índice y pulgar.

Las fuerzas aplicadas en el modelo geométrico: $F1$ y $F2$; son las fuerzas normales al dedo generadas por el agarre cilíndrico como se indica en la Figura 16.

$$F1 = 0,66 \text{ N}, F2 = 1,95 \text{ N}$$

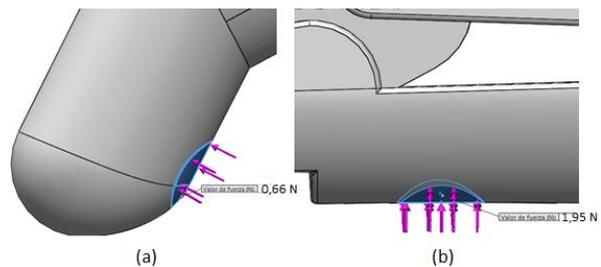


Figura 16 Fuerzas aplicadas en el dedo índice: (a) Dirección y zona de aplicación de la $F1$, (b) Dirección y zona de aplicación de la $F2$

El esfuerzo de von Mises obtenido en el dedo índice es de 4,1 MPa, según la figura 17.

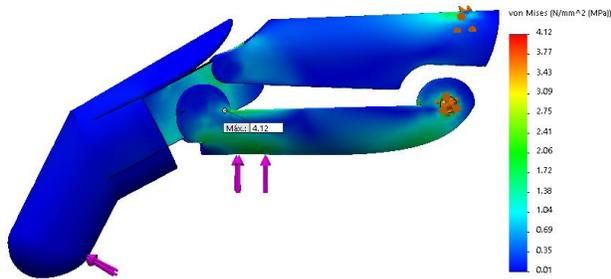


Figura 17. Esfuerzo de von Mises en el dedo índice.

El factor de seguridad en el dedo índice es de 5,8 según la figura 18.

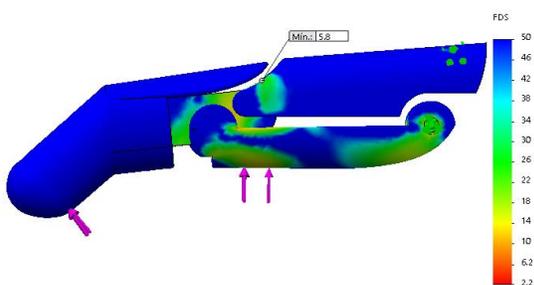


Figura 18. Factor de seguridad del dedo índice.

Se analizó el dedo pulgar (Figura 19) colocando una fuerza normal FN3 ejercida al hacer contacto con un objeto cilíndrico de 63,7 mm de diámetro y 500 g de masa, calculada previamente.
 $F_3 = 7,72 \text{ N}$

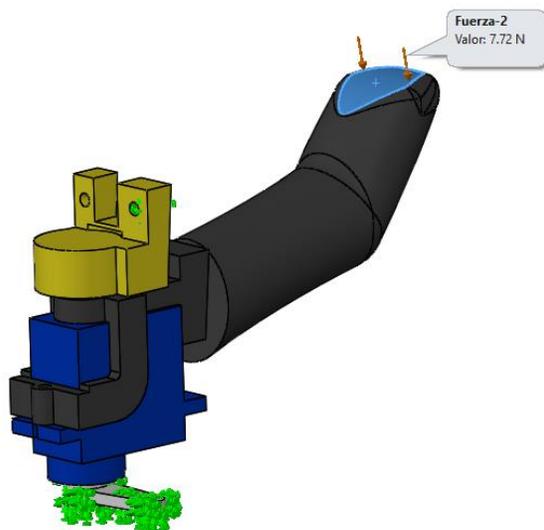


Figura 19. F3 colocada en el extremo del pulgar

El esfuerzo de von Mises obtenido en el dedo pulgar es de 4,54 MPa, según la figura 20.

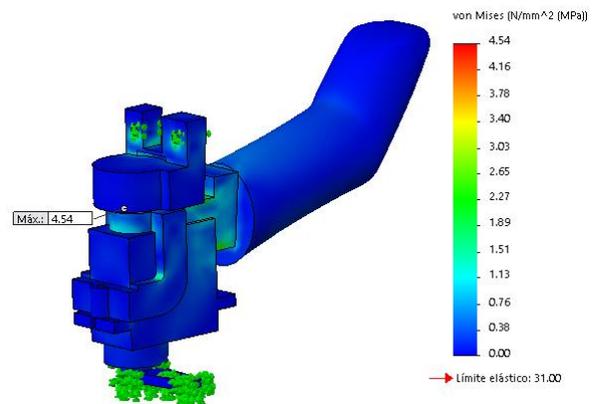


Figura 20. Esfuerzo de von Mises en el dedo pulgar.

El factor de seguridad en el dedo pulgar es de 6,83 según la figura 21.

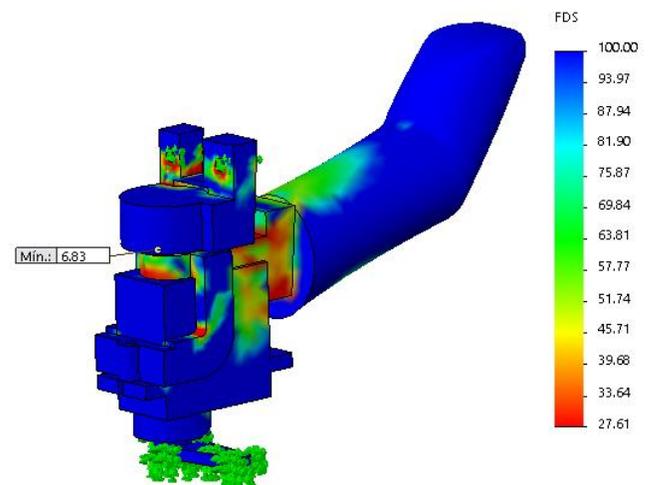


Figura 21. Factor de seguridad del dedo pulgar.

Se coloca las fuerzas calculadas para los soportes de los dedos en la palma y las fuerzas correspondientes en la base del pulgar como se indica en la figura 22.

$F_1 = 14,78 \text{ N}$, $F_2 = 32,4 \text{ N}$, $F_3 = 1,18 \text{ N}$, $F_4 = 1,8 \text{ N}$

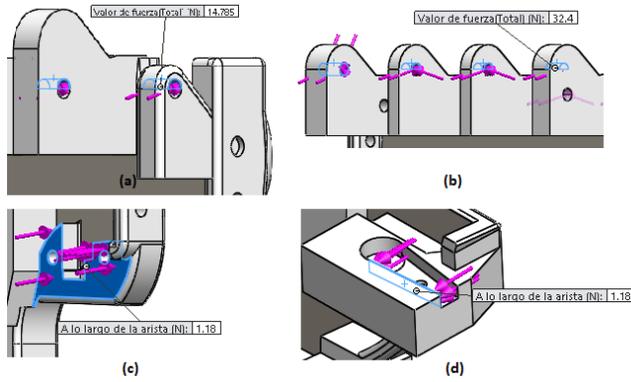


Figura 22. Colocación de las fuerzas en la palma: (a) Fuerza F1, (b) Fuerza F2, (c) Fuerza F3, (d) Fuerza F4.

El esfuerzo de von Mises obtenido en la palma es de 4,29 MPa, según la figura 23.

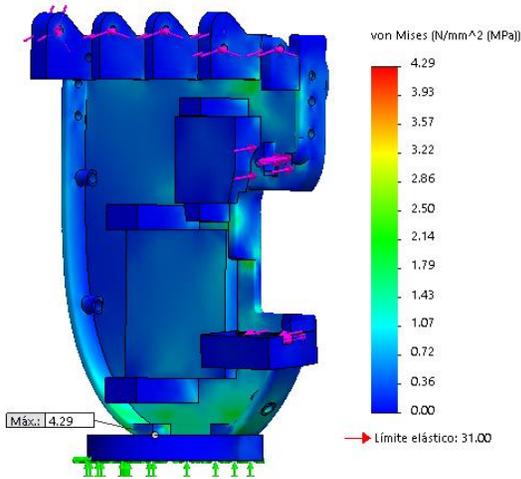


Figura 23. Esfuerzo de von Mises en la palma.

El factor de seguridad en el dedo pulgar es de 7,23 según la figura 24.

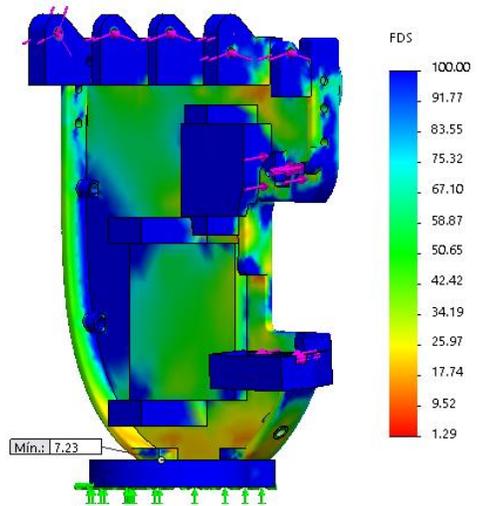


Figura 24. Factor de seguridad en la palma.

La fuerza obtenida a partir del par del motor de 64,86 N se aplica en la cara interna del orificio que conecta a la barra doble con el servomotor y se colocan sujeciones avanzadas para caras cilíndricas donde va el pasador para los dedos (Figura 25).

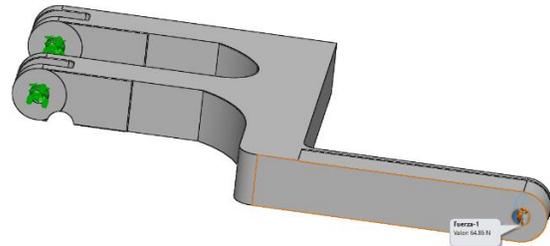


Figura 25. Aplicación de la fuerza en la barra doble.

El esfuerzo de von Mises obtenido en la barra doble es de 10,76 MPa, según la figura 26.

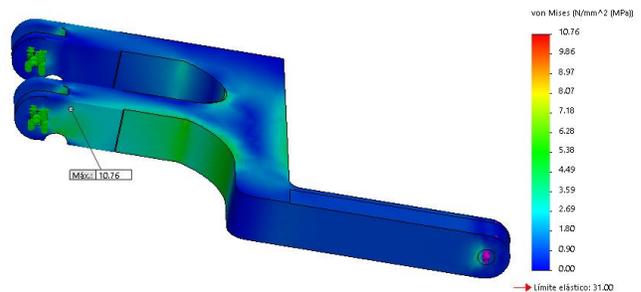


Figura 26 Esfuerzo de von Mises en la barra doble

El factor de seguridad en la barra doble es de 2,88 según la figura 27.

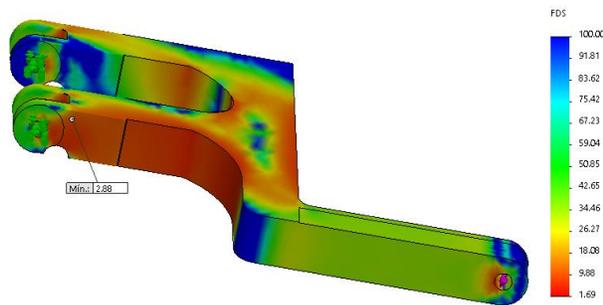


Figura 27. Factor de seguridad en la barra doble.

3.10 Pruebas de agarre de precisión.

Se realizaron las pruebas en cuanto al agarre de precisión, con algunos objetos pequeños (Figura 28), a los cuales se aplicó la fuerza necesaria para sujetarlos sin romperlos.

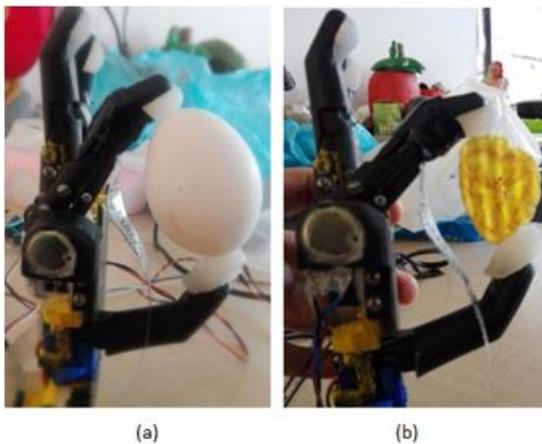


Figura 28: Pruebas de precisión en sujeción de objetos en agarre de pinza: (a) Huevo, (b) Chifle.

3.10.1 Pruebas de agarre de fuerza.

Se realizaron pruebas de fuerza en el agarre cilíndrico con una masa de máximo 300 g y diámetros de aproximadamente 50 mm.

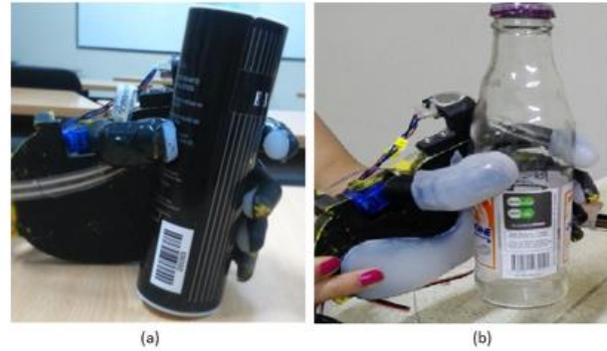


Figura 29. Pruebas de sujeción de objetos en agarre cilíndrico: (a) botella plástico, (b) botella vidrio.

4. CONCLUSIONES

- El estudio bibliográfico permitió determinar aspectos técnicos necesarios para el diseño del prototipo. Así, como: material, mecanismos, actuadores y mecanismos de transmisión de movimiento para los requerimientos de diseño.
- Para el movimiento de los dedos y el diseño de las falanges proximales se usó mecanismos de cuatro barras para constituir el movimiento del flexo - extensión de los dedos índice, medio, anular y meñique; consiguiendo un movimiento activo total de 230° , que constituye un 90% del MAT de la fisiología de la mano humana.
- El material utilizado para la construcción de éste prototipo fue ABS, mediante impresión tridimensional, permitió conseguir un prototipo con la resistencia mecánica propuesta en el diseño y adicionalmente proporcionó facilidad de manufactura.
- Se realizó el diseño mecánico y construcción de un prototipo de prótesis de mano con características geométricas aproximadas a la mano del sujeto de estudio que cumple con los requerimientos de diseño y las funcionalidades propuestas.
- El esfuerzo de von Mises en los elementos analizados es menor al límite elástico del

material, el factor de seguridad es mayor a 2,2, y los desplazamientos son menores a 1 mm según los requerimientos de diseño planteados.

- El prototipo realiza dos tipos de agarres los cuales son: cilíndrico con una sujeción aproximada de objetos de 50 mm de diámetro y 300 g de masa; constituyendo el 78,49 % del diámetro teórico planteado en éste proyecto y pinza, manipulando objetos pequeños con precisión.

[8] Quinayás-Burgos, C. A., Muñoz-Añasco, M., Vivas-Albán, Ó. A., & Gaviria-López, C. A. (2010). Diseño Y Construcción De La Prótesis Robótica De Mano UC-1. *Ingeniería y Universidad*, 14(2). pp 223-237.

5. REFERENCIAS

[1] CONADIS. (2015). Registro Nacional de Discapacidades. pp 3-7.

[2] Vargas Pérez, J. L., Yunga Patiño, L. F., Cajamarca Guambaña, L. F., & Matute Salinas, J. L. (2015). *Diseño, construcción e implementación de prótesis biomecánica de mano derecha* (segunda fase).

[3] García, E. (2015). Los dedos de la mano. Colegio Interamericano de Radiología, Ortopedia y Traumatología. p. 1-2.

[4] Pinto Linares, H. A. (2007). *Diseño óptimo de mecanismos de cuatro barras para generación de movimiento con restricciones de montaje y ángulo de transmisión*. Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales.

[5] Sánchez Calderón, D. H. (2017). *Consideraciones Anatómicas En El Diseño De Una Mano Artificial*. Universidad Militar Nueva Granada.

[6] López L. A. A., (2015). Biomecánica y patrones funcionales de la mano. pp14.

[7] González, J., Murillo, P. R., Luna, I. F., & Mendoza, A. J. (2005). Robótica y prótesis inteligentes. *Revista Digital Universitaria*. pp 8-15.