

DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MODELOS MECÁNICOS DE UNA MANO PROTÉSICA ANTROPOMÓRFICA PARA AMPUTACIONES DEL MIEMBRO SUPERIOR

*Carlos Calderón-Córdova⁴⁶, Yomar González⁴⁷,
Cristian Ramírez⁴⁸, Wilmar Hernández⁴⁹*

El presente trabajo forma parte del proyecto de investigación “Mano de Esperanza” el cual busca desarrollar prótesis robóticas de bajo costo para personas con discapacidad motriz en sus extremidades superiores. El objetivo del presente trabajo es diseñar y evaluar el modelo mecánico que reproduzca las funciones básicas y la estética antropomorfa de la mano humana. Para el proceso de diseño se definieron especificaciones funcionales, geométricas y once requerimientos: resistencia, funcionalidad, disponibilidad, costo, fabricación, peso neto, mantenimiento, capacidad, sujeción, dimensiones y estética. Para la evaluación de los modelos mecánicos se aplicó la siguiente metodología: primero, se definieron los requerimientos; segundo, se los jerarquizó; tercero, se hizo un ranking de satisfacción de los requerimientos para cada uno de los modelos a evaluar; finalmente se aplicó la ecuación polinómica del método de decisión multicriterio Scoring para obtener el porcentaje de satisfacción de cada uno de los modelos mecánicos propuestos. Como

⁴⁶Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica, Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador. {cacalderon@utpl.edu.es}

⁴⁷Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica, Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador. Instituto Nacional de Bioingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. {yomar.gonzalez@inabio.edu.ve}

⁴⁸Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica, Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador. {cramirez@utpl.edu.ec}

⁴⁹Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica, Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador. {whernandez@utpl.edu.e}

resultado del análisis, diseño y evaluación de modelos se seleccionó el modelo de mano protésica antropomórfica (MPA-5), el cual cumple los requerimientos con un porcentaje de satisfacción de 88.54%.

Palabras clave: mano antropomórfica; prótesis; modelo mecánico; CAD; decisión multicriterio.

INTRODUCCIÓN

Según el CONADIS (Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades), hasta febrero de 2017, en el Ecuador había 196.758 personas con discapacidad física-motriz, y de este número, 48.271 personas están insertadas laboralmente, lo que representa que solamente el 24.5% ha tenido las condiciones y herramientas protésicas para poder desempeñar una actividad laboral (CONADIS et al., 2017). Con base al problema anterior, en el Ecuador nace el proyecto “Mano de Esperanza”, cuya misión es desarrollar prótesis robóticas de bajo costo con la finalidad de aportar a la inclusión social y laboral de personas con discapacidad motriz en sus extremidades superiores. La misión del proyecto está sintonizada con las necesidades de los países en desarrollo (Calderón, Ramírez, Barros, & Punin, 2017). El presente trabajo forma parte del proyecto “Mano de Esperanza”, y el objetivo abordado es el diseño y la evaluación del modelo mecánico que reproduzca las funciones básicas de la mano humana y la estética antropomorfa. Este modelo debe estar aplicado a prótesis de extremidades superiores con base en requerimientos de diseño delimitados por el equipo de investigación conformado por la Universidad Técnica Particular de Loja, la Universidad Central de Venezuela y el Taller de Prótesis y Órtesis de la ciudad de Loja. Estos requerimientos son: funcionalidad, costo, disponibilidad de materiales, resistencia, disponibilidad de procesos de fabricación local, peso neto y facilidad de mantenimiento, entre otros aspectos complementarios de dimensiones y formas.

En el entorno académico existen algunos aportes sobre el proceso de diseño y características a cumplir por parte de manos protésicas. Zuniga, J. et al (2015) proponen un procedimiento para el ajuste de una prótesis de bajo costo a niños con discapacidad motriz, sin embargo,

este no cubre el procedimiento de diseño. Baril, Laliberté, Gosselin, & Routhier (2013) proponen una mano protésica antropomórfica, desde la etapa de diseño hasta su implementación, sin embargo, este prototipo está pensado para activación mediante un tensor sin motor. Controzzi, Cipriani y Carroza (2008, 2011) presentan el diseño mecatrónico de una mano antropomórfica de 16 grados de libertad, sin embargo, su complejidad es alta debido a que no está pensada para aplicaciones protésicas de usuario final y su utilidad se centra en experimentación clínica. Bennett, Dalley, Truex y Goldfarb (2015) presentan el diseño de un prototipo antropomórfico de mano protésica que se inspira en las proporciones de los huesos de la mano. Desde el punto de vista de metodologías de análisis de este tipo de prototipos, Pérez (2011) aplica análisis cinemático y validación a una mano protésica servoarticulada. Finalmente, desde el punto de vista comercial, Belter, Segil, Dollar y Weir (2013) analizan el desempeño y características de las manos protésicas mioeléctricas comerciales Vincent, iLimb, iLimb Pulse, Bebionic, Bebionic v2 y Michelangelo. Este análisis es importante, ya que los datos servirán como referencia al modelo desarrollado en el presente trabajo. Se destaca que el presente trabajo aborda el diseño del modelo mecánico que reproduzca las funciones básicas de la mano humana y la estética antropomorfa, además, se menciona que en Calderón (2017) se documentan las funciones de control para desempeñar los movimientos de la mano protésica. En (Calderón-Córdova, Ramírez, Barros, Quezada y Barba (2017) se evidencia los algoritmos para la identificación de las señales mioeléctricas del usuario que controla la ejecución de funciones. Finalmente, aspectos complementarios como algoritmos de procesamiento y validación constan en Hernández et al. (2016) y Hernández et al. (2017).

Con respecto a la organización del presente trabajo, este se encuentra estructurado de la siguiente manera: la sección 2 sintetiza las especificaciones funcionales y geométricas que el modelo mecánico de mano protésica debe cumplir, la sección 3 describe los modelos propuestos para el prototipo de mano protésica antropomórfica (MPA), la sección 4 describe la evaluación de los modelos MPA propuestos y, finalmente, la sección 5 resume las conclusiones del trabajo.

ESPECIFICACIONES FUNCIONALES Y GEOMÉTRICAS DE LA MANO PROTÉSICA

Especificaciones funcionales de la mano protésica

Las especificaciones funcionales y geométricas que el modelo de mano protésica antropomórfica debe cumplir, son las siguientes:

Diseñar un modelo mecánico que reproduzca las funciones básicas de la mano humana y sea estéticamente viable.

- Debe contar con los cinco dedos de la mano y mecanismos de actuación independientes.
- Debe reproducir las funciones básicas: mano relajada, sujeción cilíndrica, agarre de pinza, dedo pulgar en aducción y dedo índice extendido.
- El modelo debe contar como máximo de 9 articulaciones, una para el pulgar y dos para cada uno de los dedos restantes. La articulación interfalángica distal se considera fija.
- El modelo debe ejecutar el movimiento flexión-extensión en el rango fisiológico de las articulaciones metacarpofalángica (MCF) e interfalángica distal (IFP). No se considera el movimiento de aducción/abducción en la articulación MCF de los dedos: índice, medio, anular y meñique.
- Las dimensiones del modelo deben estar dentro del rango fisiológico aceptable, es decir, debe poseer dimensiones equivalentes a las longitudes promedio de la mano humana.

Con respecto a los materiales y procesos de manufactura se requiere:

- El sistema propuesto debe estar basado en materiales y procesos disponibles de manufactura local.
- El modelo debe estar basado en materiales y procesos de manufactura de bajo costo.
- Los materiales del modelo deben ser ligeros y resistentes al impacto.

El sistema debe poseer mecanismos de transmisión y procedimientos de ensamblaje simples.

El sistema debe garantizar procedimientos sencillos de mantenimiento preventivo/correctivo mediante el fácil acceso a los componentes internos.

Debe proponer y validar el esquema geométrico, el modelo cinemático y los mecanismos de transmisión de movimientos que permitan desempeñar las funciones básicas de la mano.

Especificaciones geométricas y estructura 3D de la mano humana

En la actualidad no hay estudios antropométricos referentes al genotipo ecuatoriano de la extremidad superior, sin embargo se pueden utilizar dimensiones aproximadas de los dedos. Binignat, Almagià, Lizana y Olave (2012) presentan un estudio antropométrico donde se muestra el rango de dimensiones de los huesos más importantes que conforman la mano (Ver figura 2.1 y tabla 2.1).

La selección del tamaño específico para cada dedo y dimensión de la palma se hizo mediante la reconstrucción 3D de la estructura ósea y mediante tomografías axiales computarizadas (TAC) en formato DICOM de un individuo de 58 años de edad, y los cortes se tomaron cada 3 mm aproximadamente. La reconstrucción se efectuó mediante la aplicación Mimics, la cual fue cortesía del Grupo de Biomecánica de la Universidad Simón Bolívar (Caracas-Venezuela). Posteriormente se exportó a SolidWorks 2014 a fin de obtener las dimensiones base para el diseño del prototipo de mano protésica (ver figura 2.2).

Con base en la información recopilada se optó por utilizar los valores promedio de la tabla 2.1 para las dimensiones de la palma y de las falanges (proximal, medio y distal) pertenecientes al modelo mecánico de la mano protésica antropomórfica propuesta en el presente trabajo.

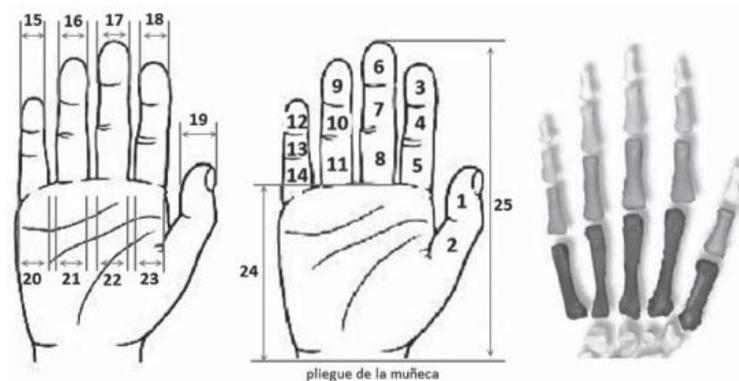


Figura 2.1. Promedio de dimensiones antropométricas específicas de la mano en hombres y mujeres (Binignat, 2012)

Tabla 2.1. Promedio de longitudes⁽¹⁾, ancho de la mano y longitud de la palma en grupos etarios de hombres y mujeres con edades comprendidas entre 30-50 años

N°	Descripción	Tipo L:largo A:ancho	⁽²⁾ Valor promedio hombres (mm)	⁽²⁾ Valor promedio mujeres (mm)	⁽³⁾ Valor asumido (mm)
1	Falange distal del pulgar	L	37-40	27-30	30
2	Falange proximal del pulgar	L	37-40	27-30	34
3	Falange distal del dedo índice	L	24-26	21-23	25
4	Falange media del dedo índice	L	30	27-28	30
5	Falange proximal del dedo índice	L	50	44-46	43
6	Falange distal del dedo medio	L	25-26	22-24	25
7	Falange media del dedo medio	L	34-35	32-33	30
8	Falange proximal del dedo medio	L	55	47-49	43
9	Falange distal del dedo anular	L	22-24	24-26	25
10	Falange media del dedo anular	L	34	33-36	30
11	Falange proximal del dedo anular	L	47-50	45-47	43
12	Falange distal del dedo meñique	L	20-24	22-23	25
13	Falange media del dedo meñique	L	23-25	26-27	30
14	Falange proximal dedo meñique	L	40	39-43	46
15	Articulación distal dedo meñique	A	17	15	16
16	Articulación IFD del dedo anular	A	19	16	16
17	Articulación IFD del dedo medio	A	20	17	16
18	Articulación IFD del dedo índice	A	20	17	16
19	Articulación IFD del dedo pulgar	A	37	37	20
20	Articulación MCF dedo meñique	A	18	16	16
21	Articulación MCF del dedo anular	A	21	18	16
22	Articulación MCF del dedo medio	A	23	20	16
23	Articulación MCF del dedo índice	A	23	20	16
24	Palma	L	110-115	97-100	-
25	Mano	L	180-190	170	-
26	Palma	A	85-88	78-80	-

⁽¹⁾ Se toma como referencia únicamente la mano derecha.

⁽²⁾ No se incluyen datos de desviaciones estándar hasta contar con data de mediciones en Ecuador.

⁽³⁾ Valor asumido para efectos del primer prototipo.

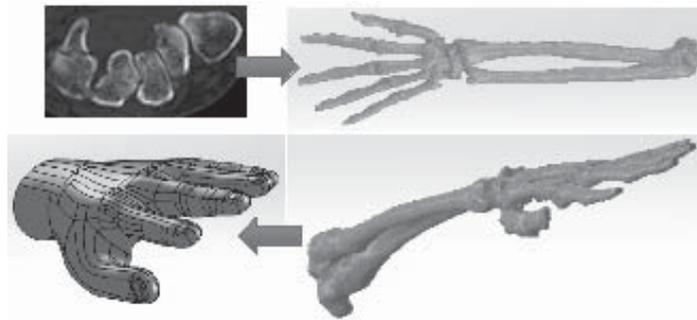


Figura 2.2. Proceso de reconstrucción 3D de la mano a partir de TAC

MODELOS PROPUESTOS DE MANO PROTÉSICA ANTROPOMÓRFICA (MPA)

En esta fase del proceso de diseño mecánico se desarrollan modelos base de una mano protésica antropomórfica con objeto de evaluar la propuesta más conveniente. Esta es la fase más importante debido a que en ella se lleva a cabo el diseño básico del producto teniendo en cuenta las restricciones y necesidades del cliente, así como también se busca hacer el bosquejo de un producto optimando tiempo y recursos por medio de un diseño conceptual en el que se toman en cuenta las especificaciones funcionales delimitadas en la sección 2.

Modelo MPA-1

Con base en el conjunto de dimensiones antropométricas de los componentes de una mano (ver tabla 2.1), y tomando además como base el trabajo de Ventimiglia (2012), se plantea la geometría de los componentes principales de la mano protésica (ver figura 3.1). Las características principales de este modelo se citan a continuación:

Geometría de los *dedos*.- Estos están diseñados para ser accionados mediante un sistema mixto conformado por un motor eléctrico lineal y un esquema de transmisión basado en eslabones mecánicos (barras). El presente modelo, basado en el criterio de simplicidad, incluye la falange proximal y la unión de las falanges media y distal en un solo componente. El ensamblaje es capaz de simular los movimientos de flexión y extensión de los dedos requeridos para desempeñar los movimientos mencionados en la sección 2.

Base del sistema de accionamiento y transmisión del pulgar.- Se incluye un sistema de accionamiento de 2 grados de libertad (GdL) para el pulgar con objeto de emular los movimientos de flexión-extensión y abducción-aducción. El sistema es accionado primeramente por un subsistema de corona y tornillo sin fin (previamente calculado), con una relación de transmisión de 1:1. Este tipo de transmisión es el encargado de emular los movimientos de abducción-aducción. Seguidamente se adiciona el segundo mecanismo de accionamiento el cual consiste en un motor lineal. Este es el encargado de generar los movimientos de flexión-extensión.

Este diseño tiene la ventaja de permitir un mayor número de grados de libertad con la menor cantidad de partes posibles, las cuales suelen ser de costo elevado al tratarse de dimensiones pequeñas. La relación de transmisión de 1:1 permite obtener un diseño compacto que puede ajustarse a ciertas dimensiones antropométricas de la mano. Sin embargo, dado el tamaño de los motores lineales disponibles, algunas dimensiones de los componentes externos (carcasas) pueden ser ligeramente mayores a las esperadas.

Diseño de acople de muñeca universal.- Se mantiene como requerimiento que la terminación de las carcasas en la muñeca sea en lo posible de un tamaño estándar con objeto de adaptar el nuevo diseño de mano protésica a los procesos convencionales de fabricación de sockets desempeñados en los Talleres de Prótesis y Órtesis del Ministerio de Salud Pública del Ecuador.

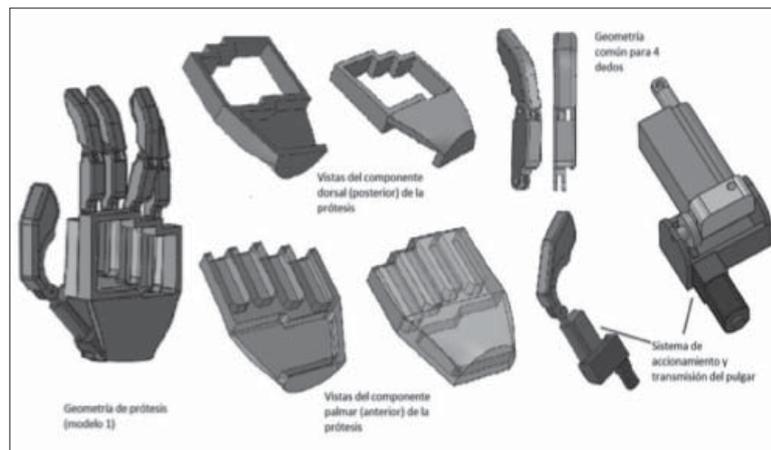


Figura 3.1. Geometría de los componentes del modelo MPA-1

Luego del modelo MPA-1 se han generado varios basados en la técnica de tormenta de ideas, en los que se han agregado o modificado parámetros para conseguir componentes mecánicos funcionales y factibles de fabricar por mecanizado.

Modelo MPA-4

El modelo MPA-4 toma como base los trabajos desarrollados por Ventimiglia (2012) y Pérez (2011), además de algunos lineamientos generales de prótesis comerciales como la Bebionic (Belter, 2013). Las características principales de este modelo se citan a continuación:

Diseño anatómico.- Este modelo se caracteriza por poseer carcasas más anatómicas divididas en partes con la finalidad de facilitar el acceso hacia el interior para hacer cambios y mantenimiento preventivo o correctivo. Las carcasas presentan geometrías adaptadas a la funcionalidad, la estética y factibles de mecanizar mediante procesos efectuados en un Centro de mecanizado de Control Numérico (CNC). Además, en términos generales, se adicionan dispositivos de sujeción y deslizamiento como rodamientos, tornillos y ejes de rotación.

Geometría de los dedos.- Se mantiene el diseño para ser accionado mediante un sistema mixto compuesto por un motor eléctrico lineal y transmisión mediante eslabones mecánicos (barras). Se incluye la falange proximal y las falanges media y distal unidas en un solo componente. Se modifican las articulaciones en función de ejes disponibles comercialmente. La geometría se modifica con fines estéticos (ver figura 3.2).

Base del sistema de accionamiento y transmisión del pulgar.- Se utiliza un sistema equivalente al modelo MPA-1 con la particularidad de que sus dimensiones son reducidas. Las modificaciones principales corresponden a: el valor del módulo de transmisión, el diseño de la base del sistema de transmisión y, finalmente, al diseño de partes para sujeción y deslizamiento de componentes del sistema. Se replantea el cálculo de la corona y tornillo sin fin para hacer el sistema más compacto. Dadas las posibilidades de fabricación en talleres de mecanizado en el país, se seleccionó un módulo de 0.7 para dimensionar este sistema de transmisión.

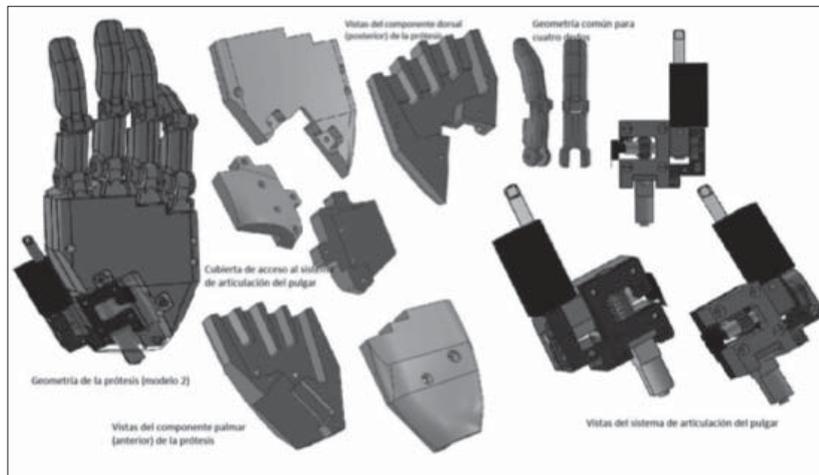


Figura 3.2. Geometría de los componentes del modelo MPA-4

MODELO MPA-5

Este modelo es más anatómico que el MPA-4 y sus características se citan a continuación:

Cuenta con una carcasa superior dividida en dos partes removibles, las cuales permiten el fácil acceso a los motores lineales de cada uno de los dedos y al sistema de transmisión del pulgar. Además, ambas partes contienen canales que permiten el paso del cableado para alimentación de los motores y del potenciómetro que sensa el desplazamiento del pulgar durante el movimiento de abducción-aducción (figuras 3.3 y 3.4).

La carcasa inferior es unicompartimental y emula la anatomía de la palma de la mano. Tanto esta carcasa inferior como la superior cuentan con espacios para el montaje de los motores lineales que accionan el movimiento de los dedos (figura 3.4).

Se rediseña la pieza que permite la articulación de los dedos con el resto de la mano protésica. Dado el proceso de fabricación por mecanizado, se nivelan los nudillos de la articulación metacarpofalángica (MCF) y se agregan las angulaciones necesarias para permitir el cierre palmar (figura 3.5).

El pulgar se plantea como una sola pieza y se adiciona al modelo la carcasa de protección. El sistema del pulgar está conformado por el motor rotatorio Pololu MM-R 995 y por la base del pulgar, la cual está conformada por dos piezas con unión atornillada encargadas de fungir como sostén

entre el eje de rotación para el motor y el mecanismo de transmisión para el movimiento de abducción-aducción del pulgar. El diseño de este sistema cambió su configuración en este modelo (figura 3.6).

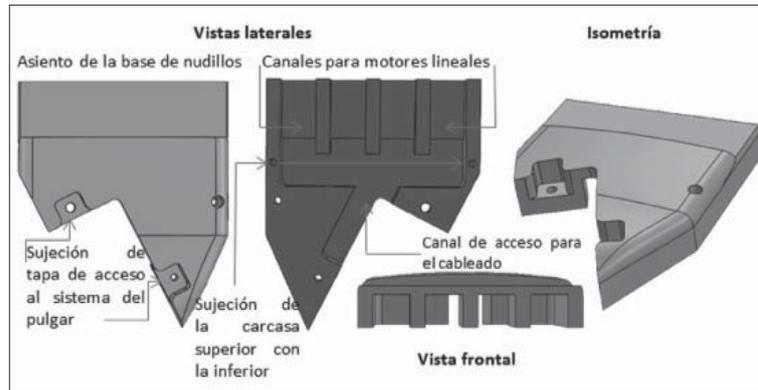


Figura 3.3. Vistas de la geometría de la carcasa superior

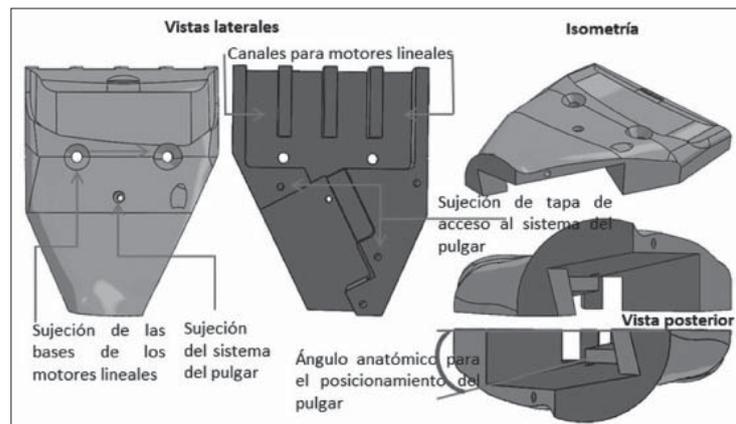


Figura 3.4. Vistas de la geometría de la carcasa inferior o palmar

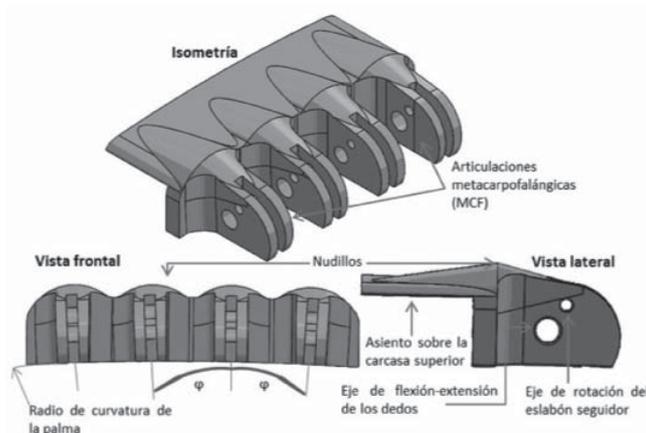


Figura 3.5. Vistas de la geometría de la base de los dedos

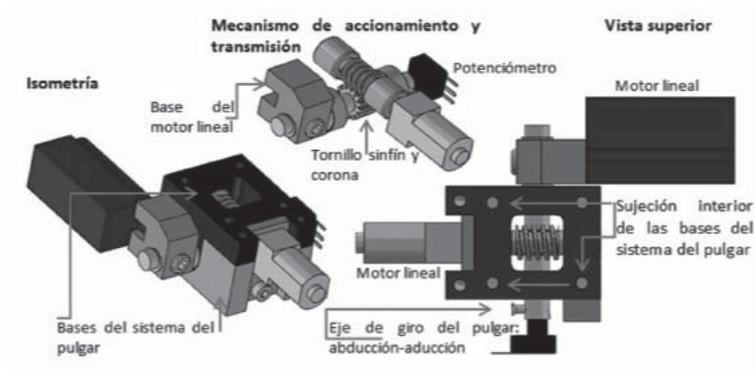


Figura 3.6. Vistas de la geometría del sistema del pulgar

La geometría de los dedos es más rectangular debido a la disponibilidad del material en láminas. Los dedos están formados por dos segmentos: la falange proximal y el segmento conformado por la unión de la falange media y la distal. Se mantiene un ángulo fijo entre la falange media y la distal (figuras 3.7 y 3.8).



Figura 3.7. Vistas de la geometría de la falange proximal, media y distal



Figura 3.7. Vista de la mano protésica ensamblada MPA-5

EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DE MPA PROPUESTOS

El objeto de esta sección es seleccionar la mejor alternativa en lo que respecta a los modelos propuestos en la sección 3. Para la evaluación de los modelos de la mano protésica se aplicó la siguiente metodología: primero, se definieron los requerimientos; segundo, se valoró la importancia de cada requerimiento para obtener la jerarquización de ellos; tercero, se hizo un ranking de satisfacción de los requerimientos para cada uno de los modelos a evaluar; finalmente se aplicó la ecuación polinómica del método de decisión multicriterio *Scoring* para obtener el porcentaje de satisfacción de cada uno de los modelos mecánicos propuestos (MPA-1, MPA-4 y MPA-5). El mejor modelo es aquel con mayor porcentaje de satisfacción.

Para la definición y priorización de los requerimientos y la selección del modelo mecánico se hizo el análisis multicriterio teniendo en cuenta el cumplimiento del conjunto de requerimientos jerarquizados en una escala del 1 al 10 para los modelos MPA planteados. Dichos requerimientos se valoraron para cada modelo mecánico mediante apreciaciones cualitativas traducidas en valores numéricos entre 1 y 10. En ellos, 10 significa “muy importante”, 7 quiere decir “importante”; 4 representa “importancia media” y 1 implica “poco importante”.

Con base en las especificaciones declaradas por el cliente en la sección 2 se definen 11 requerimientos mínimos requeridos para el modelo mecánico planteado. Siguiendo la metodología propuesta por Pérez (2011) se ponderan los requerimientos para luego aplicar el método de decisión multicriterio *Scoring* normalizado (Tavella, Miropolsky y Manera, 2014), los resultados de la jerarquización de los 11 requerimientos de diseño se muestran en las tablas 4.1 y 4.2.

Tabla 4.1. Jerarquización de requerimientos de diseño

Requerimiento		R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈	R ₉	R ₁₀	R ₁₁	Σ
R ₁	Funcional		+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	7
R ₂	Dimensiones	-		-	-	+	-	-	+	-	+	-	3
R ₃	Peso neto	-	+		-	-	+	-	+	+	-	+	5
R ₄	Resistente	-	+	+		+	+	+	+	+	+	+	9
R ₅	Mantenimiento	-	+	+	-		+	-	-	-	-	+	4

R ₆	Estética	-	+	-	-	-		-	-	+	-	+	3
R ₇	Costo	-	+	+	-	+	+		-	+	-	-	5
R ₈	Fabricación	-	-	-	-	+	+	+		-	+	+	5
R ₉	Capacidad	-	+	-	-	+	-	-	+		-	+	4
R ₁₀	Disponibilidad	-	+	+	-	+	+	+	-	+		-	6
R ₁₁	Sujeción	+	+	-	-	-	-	+	-	-	+		4

Tabla 4.2. Ponderación de requerimientos

Ítem	Requerimiento	Ponderación
1	Resistente	9
2	Funcional	7
3	Disponibilidad	6
4	Costo	5
5	Fabricación	5
6	Peso neto	5
7	Mantenimiento	4
8	Capacidad	4
9	Sujeción	4
10	Dimensiones	3
11	Estética	3

Finalmente, aplicando la ecuación polinómica (1) del método de *Scoring* se obtiene que la alternativa más satisfactoria corresponde al modelo MPA-5.

$$C_i = \frac{10 \sum_{i=1}^n V_i P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (1)$$

La tabla 4.3 muestra los resultados del ranking de satisfacción de los 11 requerimientos para cada modelo propuesto, además de mostrar los porcentajes de satisfacción.

Tabla 4.3. Ranking de satisfacción de los requerimientos para cada modelo propuesto

Requerimiento		Modelo MPA-1	Modelo MPA-4	Modelo MPA-5
1	Resistente	4	7	10
2	Funcional	10	10	10
3	Disponibilidad	4	7	10
4	Costo	10	10	10
5	Fabricación	7	7	7
6	Peso neto	7	7	7
7	Mantenimiento	7	7	7
8	Capacidad	4	4	7
9	Sujeción	7	7	10
10	Dimensiones	4	7	7
11	Estética	10	10	10
	Calificación (C_i)	66.18%	76.00%	88.54%

Valga destacar que la jerarquización de los requerimientos y el ranking de satisfacción es un proceso que requiere la evaluación directa del usuario final, más que del cliente mismo; en este caso, el cliente está conformado por la Universidad Técnica Particular de Loja y una fundación de apoyo a personas con discapacidad motriz. La ponderación presentada en el presente trabajo está basada en la opinión del cliente y del equipo de trabajo, y queda para trabajos futuros la evaluación de los potenciales usuarios.

Las características del modelo MPA-5, en relación a los requerimientos, se describen a continuación:

Resistente. El modelo mecánico se lo implementó con base en el material plástico denominado ASA (acrilato estireno acrilonitrilo), que es un material con alta resistencia a los impactos, al calor y a las condiciones meteorológicas. Este plástico se utiliza en impresoras 3D de gama media y sus características son superiores al plástico estándar ABS.

Funcional. El modelo mecánico permite la reproducción de las funciones básicas: a) mano relajada, b) sujeción cilíndrica, c) dedo índice extendido, d) agarre de pinza, y e) dedo pulgar en aducción. La figura

4.1 muestra el prototipo implementado desempeñando las funciones básicas mencionadas.

Disponibilidad. Los materiales con los que se implementó el modelo mecánico se disponen dentro el país.

Costo y fabricación. La implementación del modelo mecánico se efectuó mediante tecnología de impresión 3D basada en plástico ASA (<500 USD por prototipo). La opción de mecanizado en CNC basado en nailon y grilón tenía un costo superior a 2.000 USD por prototipo.

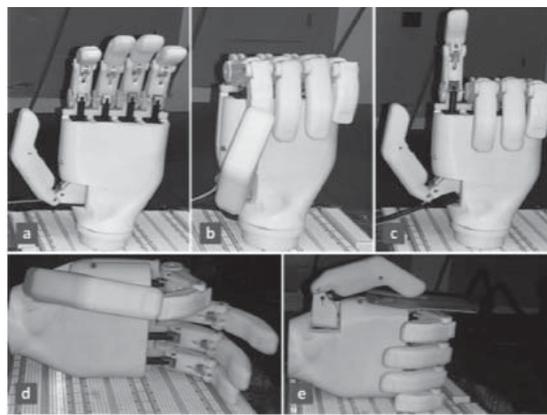


Figura 4.1. Imágenes de las funciones básicas ejecutadas por el prototipo de Mano Protésica Antropomórfica MPA-5

Peso neto, dimensiones y estética. El modelo mecánico se basó en las dimensiones promedio de la mano humana. El peso es de 500 gramos aproximadamente, incluidos componentes eléctricos y electrónicos en el interior de la palma. Este valor corresponde con los modelos comerciales de prótesis.

Mantenimiento y sujeción. El modelo mecánico está diseñado para garantizar un mantenimiento sencillo debido al diseño unicompartimental de las piezas anterior y posterior de la palma de la mano. Además, se consideraron elementos de sujeción estables.

Capacidad. El modelo mecánico junto con los actuadores lineales pueden soportar hasta una fuerza máxima de 45 N.

CONCLUSIONES

Se obtuvo un modelo de mano protésica antropomórfica (MPA-5) que cumple los once requerimientos con un porcentaje de satisfacción

de 88.54%. Los requerimientos son: resistencia, funcionalidad, disponibilidad, costo, fabricación, peso neto, mantenimiento, capacidad, sujeción, dimensiones y estética.

Para la evaluación de los modelos mecánicos de mano protésica antropomórfica se aplicó la siguiente metodología: primero, se definieron los requerimientos; segundo, se valoró la importancia de cada requerimiento para obtener la jerarquización de ellos; tercero, se hizo un ranking de satisfacción de los requerimientos para cada uno de los modelos a evaluar; finalmente, se aplicó la ecuación polinómica del método de decisión multicriterio Scoring para obtener el porcentaje de satisfacción de cada uno de los modelos mecánicos propuestos. Como resultado se seleccionó el modelo con mayor porcentaje de satisfacción.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), a la empresa National Instruments y a la Vicepresidencia de la República del Ecuador por el financiamiento, provisión de tecnología y soporte del *Proyecto Mano de Esperanza* (código PROY_CCCE_1252) respectivamente.

REFERENCIAS

- BARIL, M.; LALIBERTÉ, T.; GOSSELIN, C.; ROUTHIER, F. (2013) On the design of a mechanically programmable underactuated anthropomorphic prosthetic gripper. *Journal of Mechanical Design*, 135(12), 121008.
- BELTER, J.T.; SEGIL, J.L.; SM, B. (2013) Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands: a review. *Journal of rehabilitation research and development*, 50(5), 599.
- BENNETT, D.A.; DALLEY, S.A.; TRUEX, D.; GOLDFARB, M. (2015) A multigrasp hand prosthesis for providing precision and conformal grasps. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(4), 1697-1704.

- BINVIGNAT, O.; ALMAGIÀ, A.; LIZANA, P.; OLAVE, E. (2012) Aspectos biométricos de la mano de individuos chilenos. *International Journal of Morphology*, 30(2), 599-606.
- CALDERÓN, C.A.; RAMÍREZ, C.; BARROS, V.; PUNIN, G. (2017) Design and Deployment of Grasp Control System applied to robotic hand prosthesis. *IEEE Latin America Transactions*, 15(2), 181-188.
- CALDERÓN-CÓRDOVA, C.; RAMÍREZ, C.; BARROS, V.; QUEZADA-SARMIENTO, P.A.; BARBA-GUAMÁN, L. (2017) EMG signal patterns recognition based on feedforward Artificial Neural Network applied to robotic prosthesis myoelectric control. In *Proceedings of Future Technologies Conference (FTC)* (pp. 868-875).
- CIPRIANI, C., CONTROZZI, M.; CARROZZA, M.C. (2011) The SmartHand transradial prosthesis. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 8(1), 29.
- CONADIS ET AL. (2017) Consejo Nacional para la Igualdad de Discapacidades: Estadísticas de discapacidad, Recuperado en <http://www.consejodiscapacidades.gob.ec/estadistica/index.html>.
- CONTROZZI, M.; CIPRIANI, C.; CARROZZA, M.C. (2008, September). Mechatronic design of a transradial cybernetic hand. In *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on* (pp. 576-581).
- HERNÁNDEZ, W.; CALDERÓN-CÓRDOVA, C.; BRITO, E.; CAMPOVERDE, E.; GONZÁLEZ-POSADA, V.; ZATO, J.G. (2016) A method of verifying the statistical performance of electronic circuits designed to analyze the power quality. *Journal of the International Measurement Confederation*, 93, pp. 21-28.
- HERNÁNDEZ, W.; CALDERÓN-CÓRDOVA, C.; GONZÁLEZ-POSADA, V.; PARRA-CERRADA, Á.; JIMÉNEZ, J.L.; GONZÁLEZ-GARCIA, J.E.; ZATO, J.G.; SERGIYENKO, O.Y. (2017) Bootstrap-based frequency estimation method. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 95, pp. 193-200.
- PÉREZ, M. (2011) *Análisis cinemático e implementación de una mano robótica servoarticulada* aplicable como prótesis. Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica con especialidad en Diseño Mecánico, Instituto Politécnico Nacional, México.

- TAVELLA, M.; MIROPOLSKY, A.; MANERA, R. (2014) Estudio Comparativo de Métodos Multicriterio para el análisis de la Localización Sustentable de Parques Industriales Regionales. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 1(1), 41.
- VENTIMIGLIA, P. (2012) *Design of a human hand prosthesis* (Doctoral dissertation, Worcester Polytechnic Institute, United States).
- ZUNIGA, J.; KATSAVELIS, D.; PECK, J.; STOLLBERG, J.; PETRYKOWSKI, M.; CARSON, A.; FERNÁNDEZ, C. (2015) Cyborg beast: a low-cost 3d-printed prosthetic hand for children with upper-limb differences. *BMC research notes*, 8(1), 10.