



# Desarrollo de una prótesis de mano funcional y asequible para realizar tareas cotidianas de manera autónoma

D. Plana Villa<sup>1</sup>, J. Puig-Ortiz<sup>1</sup>, R. Pàmies-Vilà<sup>1</sup>, L. Jordi Nebot<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica, Universitat Politècnica de Catalunya, david.plana@estudiantat.upc.edu, joan.puig@upc.edu, rosa.pamies@upc.edu, lluisa.jordi@upc.edu

---

*Este trabajo tiene como objetivo el desarrollo de una prótesis de mano funcional y asequible para otorgar mayor autonomía y calidad de vida a las personas afectadas de una discapacidad en una extremidad superior. Se trata de poder proporcionar a estas personas una prótesis de bajo coste que permita realizar de manera autónoma las tareas cotidianas.*

*Para definir las tareas que deben poderse realizar con la prótesis se han utilizado las pruebas del Cybathlon Series 2024. El Cybathlon es una competición organizada por la universidad ETH de Zurich donde participan personas con discapacidad y sus equipos, formados habitualmente por miembros de empresas o de universidades. En la categoría ARM, la competición define una serie de actividades de la vida cotidiana que el participante debe superar con restricciones en la utilización de las extremidades no afectadas de discapacidad. En este trabajo se analizan las pruebas planteadas y se agrupan en tres categorías: adaptabilidad, precisión y fuerza.*

*Paralelamente, se han analizado las prótesis de mano disponibles en el mercado identificando las características que debían incorporarse en el nuevo prototipo y descartando las características que elevaban el coste y no aportaban una funcionalidad básica para la mayoría de tareas cotidianas.*

*Los análisis realizados han permitido diseñar y fabricar una prótesis mediante impresión 3D, que cumple con los requisitos establecidos de funcionalidad, durabilidad y coste. La prótesis ha sido utilizada por el equipo Arm2u de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB) para participar en la competición Cybathlon Series 2024, obteniendo unos meritorios resultados.*

---

## 1. Introducción

Las denominadas tecnologías de soporte son aquellas que permiten mejorar las capacidades funcionales de personas con discapacidad. Estas conllevan un aumento en la autonomía de sus usuarios, mejorando así su calidad de vida. El avance de la tecnología ha permitido incrementar tanto el alcance como la calidad de estos productos que generan un impacto social positivo.

Aunque el desarrollo de la tecnología ha permitido un avance importante para las prótesis, estas suelen tener precios que no están al alcance de la mayoría de los usuarios. Además, la búsqueda de una prótesis antropomórfica puede incidir negativamente en sus funcionalidades, debido a la dificultad de replicar la complejidad de la anatomía humana.

Este trabajo se ha desarrollado en Arm2u, asociación de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB) de la *Universitat Politècnica de Catalunya* (UPC). Arm2u se fundó en 2018 con el objetivo de mejorar la calidad de vida de las personas que necesitan una tecnología de asistencia para su vida cotidiana. Su objetivo es desarrollar una prótesis de brazo de precio asequible, centrada en las necesidades del usuario e impresa en 3D [1].

El objetivo general del trabajo es desarrollar una prótesis de mano que permita al usuario realizar tareas cotidianas sin acudir a la ayuda de terceras personas. Para ello, se utilizan las pruebas del *Cyathlon Series*, ya que estas replican un amplio rango de usos reales y situaciones cotidianas que una persona con prótesis puede encontrar.

## 2. Análisis de las prótesis de mano disponibles en el mercado

Las prótesis de mano se pueden dividir en dos grandes grupos: prótesis funcionales (o activas) y prótesis estéticas (o pasivas). La única función de una prótesis pasiva es la de mejorar la apariencia física del miembro remanente. Las prótesis funcionales pueden dividirse en prótesis mecánicas, si son activadas mecánicamente mediante movimientos relativos que realiza el piloto sobre la prótesis, o prótesis eléctricas, si son activadas mediante motores o actuadores lineales eléctricos. Finalmente, las prótesis eléctricas se dividen, en función del método de control de la activación de la prótesis, en prótesis eléctricas directas y prótesis mioeléctricas. En las directas, los movimientos se activan mediante interruptores, pulsadores o sensores de presión. Las mioeléctricas se controlan a partir de la detección de señales producidas por la contracción de algunos músculos.

Debido al objetivo principal de este trabajo, el interés se centra en las prótesis funcionales eléctricas. Queda fuera del alcance de este trabajo el sistema de control de la prótesis, por lo que en esta sección se detallan las características de diferentes manos prostéticas funcionales eléctricas que se encuentran en el mercado.

- **BeBionic:** este modelo es uno de los más avanzados en el mercado, ya que permite recrear con precisión los movimientos de una mano, con movimientos independientes para cada dedo. Como puede observarse en la Figura 1, funciona con 5 actuadores lineales, uno para cada dedo, que actúan sobre un mecanismo de barras que replica el movimiento de la falange medial. El principal problema de este sistema es su complejidad operativa. Los componentes electrónicos requeridos para este mecanismo suponen un coste elevado y un complicado mantenimiento.



Figura 1: Prótesis BeBionic. Aspecto y funcionamiento [5].

- **Myohand VariPlus Speed:** este modelo ha sido desarrollado por Ottobock, líder del sector de las prótesis. Es uno de los más vendidos en todo el mundo debido a su fiabilidad y robustez. Se trata de un mecanismo articulado sencillo que realiza el movimiento de pinza, combinado con una funda de silicona que simula el resto de la mano y dota a la prótesis de una apariencia antropomórfica. La Figura 2 muestra

la mano con el recubrimiento de silicona y sin él. Una ventaja notable es su fuerza de agarre superior, que permite a los usuarios tomar objetos pesados y realizar actividades que requieren más fuerza con confianza y seguridad. Sin embargo, uno de los inconvenientes es que puede no ofrecer la misma variedad de movimientos precisos e independientes que otras prótesis más avanzadas, limitando un poco su versatilidad en tareas más delicadas o complejas.



**Figura 2:** Prótesis VariPlus Speed [6].

- **Greifer DMC VariPlus:** también desarrollada por Ottobock, la prótesis está diseñada para proporcionar una fuerza de agarre robusta y gran durabilidad. Esta prótesis es ideal para tareas que requieren una gran fuerza y resistencia, permitiendo a los usuarios manipular objetos pesados y realizar actividades laborales exigentes con confianza. Sin embargo, un inconveniente es que, debido a su especialización en fuerza y resistencia, puede no ofrecer la misma precisión y versatilidad para tareas más delicadas o que requieren un control más fino. Además, la implementación de este mecanismo dificulta la semejanza antropomórfica, y la estética final se acerca más a la robótica industrial que a la apariencia humana, como puede observarse en la Figura 3.



**Figura 3:** Prótesis Greifer DMC [7].

- **Hero arm:** la prótesis, diseñada por OpenBionics, funciona actuando sobre cada dedo individualmente mediante sensores como puede verse en la Figura 4. La mano cierra al tirar de los cables que pasan por los dedos, buscando el recorrido más corto del cable. Tiene una gran variedad de movimientos y funcionalidades con un alto nivel de precisión y control, permitiendo adaptar la mano a la forma de casi cualquier objeto. Sin embargo, uno de los inconvenientes es que, pese a sus capacidades avanzadas, puede no tener la misma fuerza de agarre que otras prótesis más robustas, limitando su uso en tareas que requieren una gran fuerza o manipulación de objetos pesados. Además, mantiene los problemas de coste y mantenimiento derivados de utilizar un motor por dedo.



Figura 4: Prótesis Hero arm [8].

- **Michelangelo:** a pesar de dar la impresión de ser una prótesis con las mismas articulaciones que una mano humana como puede verse en la Figura 5, esta actúa cada dedo de forma individual, pero estos son completamente sólidos, y no replican los movimientos de las falanges medial y distal. El recubrimiento está hecho de un material blando y flexible que permite que la mano adapte su forma a los objetos que sujeta. Por otra parte, la tecnología avanzada puede suponer una curva de aprendizaje por el usuario, así como una necesidad de un mantenimiento especializado y reparaciones complicadas.



Figura 5: Prótesis Michelangelo. Aspecto y funcionamiento [5].

### 3. Metodología

El análisis de las prótesis de mano disponibles en el mercado ha servido para identificar las características de cada modelo que pueden incorporarse en el nuevo prototipo y descartar las características que elevan el coste y no aportan una funcionalidad básica para la mayoría de tareas cotidianas.

A continuación, se realiza un análisis de las pruebas planteadas en *Cyathlon Series* y se agrupan en tres categorías: adaptabilidad, precisión y fuerza. Para escoger la tipología de prótesis a desarrollar se ha realizado un Proceso de Jerarquía Analítica o AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Este método, desarrollado por Thomas Saaty en el año 1980 [2], es un método cuantitativo para la toma de decisiones multi criterio.

Finalmente, se definen los requerimientos que debe cumplir el prototipo de prótesis a desarrollar.

#### 3.1. Descripción de tareas cotidianas. *Cyathlon Series*

*Cyathlon Series* es una competición organizada por la universidad ETH de Zurich que combina tecnología con deportes adaptados [3, 4]. Su principal objetivo es proporcionar un escenario donde personas con discapacidad y sus equipos puedan competir en diferentes pruebas utilizando tecnologías de asistencia como exoesqueletos, prótesis robóticas y otros dispositivos.

La competición propone ocho disciplinas, en las que personas con discapacidad (pilotos) trabajan con las tecnologías de asistencia para superar una serie de obstáculos. El equipo de Arm2u participa en la disciplina ARM, que consiste en una carrera de obstáculos para prótesis de brazo transradial o superior. La competición consiste en 10 pruebas que representan situaciones cotidianas.

Las 10 pruebas de la carrera de obstáculos se deben realizar en el orden fijado por la organización. Cada prueba tiene una zona delimitada de la que no se puede salir. En cada una de ellas, hay diversos objetos, algunos de los cuales son de color azul. Estos objetos azules solo pueden ser manipulados con la prótesis, y esta no puede tocarse con la otra mano mientras esté en contacto con alguno de ellos. Si la prótesis no está tocando ningún objeto azul se puede tocar y manipular, pero no se pueden realizar cambios de piezas o terminales en la misma.

A continuación, se detallan todas las pruebas con una breve descripción de sus objetivos y restricciones.

- **Carry bottles:** se deben introducir 4 botellas de pesos diferentes en una caja, transportar esta caja hasta la zona final y depositar las 4 botellas encima de la mesa.
- **Serving food:** simula la dificultad de transportar recipientes con contenido en su interior. Se debe llevar hasta la mesa una cacerola que se encuentra en un horno, inicialmente cerrado, y que contiene 6 pelotas. La cacerola debe cogerse por las dos asas. Además, hay que transportar una sartén también con pelotas en su interior, agarrándola por el mango con la prótesis.
- **Storing dishes:** representa el proceso de ordenar la cocina. Se debe transportar un plato, una taza y cubiertos, que se encuentran en un escurridor, y un bote, hasta una estantería, dejando cada objeto en un estante o cajón determinado. Todos los objetos son azules.
- **Hanging laundry:** representa la dificultad que tiene vestirse, desvestirse y tender la ropa. El piloto debe ponerse una sudadera que se encuentra inicialmente en un cubo y debe abrocharse la cremallera azul hasta arriba. Cuando el árbitro confirme que la cremallera está subida, deberá desabrocharla, quitarse la sudadera y dejarla colgada en la cuerda. Además, tendrá que colgar una camiseta utilizando una pinza azul que se encuentra en el lateral del tendedero. La cuerda de tender la ropa estará a la altura del piloto más 10 cm.
- **Do-it-yourself:** representa el uso cotidiano de herramientas. Se debe clavar un clavo con un martillo de mango azul en un taco de plástico. Cuando el clavo haya sobrepasado la parte inferior de este taco y el árbitro dé permiso, se debe quitar el clavo con unas tenazas también de mango azul, y posteriormente enroscar una bombilla en un compartimento lateral.
- **Containers:** replica la dificultad de abrir envases habituales. Se deben abrir 2 botes y 2 botellas, cada uno utilizando la mano o la prótesis para desenroscar la tapa y la otra para retener el envase. Ni la tapa ni el contenido del envase deben caer al suelo.
- **Haptic bag:** simula el reto de identificar objetos sólo por el tacto. En una bolsa cerrada hay cuatro objetos: dos cilindros y dos cubos, siendo uno de cada duro y el otro de espuma. El piloto debe sacarlos de la bolsa en un orden preestablecido.
- **Hot wire:** representa la necesidad de precisión al manipular objetos finos, como un pincel. Se debe mover un aro de metal a través de un recorrido construido con un alambre, sin que el aro haga contacto.
- **Stacking:** simula la dificultad de mantener un objeto cogido y moverlo. Sentado en una silla, se debe hacer una pirámide de 6 vasos azules que se encuentran separados inicialmente, después, deshacerla y hacer un montón con todos los vasos. Los vasos no pueden caer al suelo.
- **Clean Sweep:** representa situaciones cotidianas en las que se manipulan objetos pequeños con precisión. El piloto debe colocar, en lugares concretos de una mesa, una llave, una pieza de Lego, una tarjeta de crédito y una bola todos de color azul. Estos se encuentran inicialmente en una caja, también azul, en una mesa a 5 m de la otra.

Aunque cada prueba supone un reto particular y comporta dificultades únicas, se propone clasificar las solicitudes de las pruebas en tres categorías: adaptabilidad, precisión y fuerza. La Tabla 1 muestra la distribución de las pruebas según sus solicitudes. Realizar esta clasificación permite identificar qué habilidades son esenciales para cada tarea específica, facilitando así la evaluación y selección de la prótesis más adecuada para las necesidades individuales de los usuarios.

Se considera que requieren adaptabilidad aquellas pruebas en las que haya o bien objetos de geometrías concretas que dificulten la sujeción u objetos que deben agarrarse de una forma específica para superar la prueba. Se considera que requieren precisión las pruebas en las que hay que manejar objetos pequeños y con movimientos precisos. Finalmente, se considera que requieren fuerza las pruebas en las que hay que mover objetos pesados.

**Tabla 1:** Distribución de las solicitaciones de cada prueba.

	Adaptabilidad	Precisión	Fuerza
Carry bottles	√		√
Serving food			√
Storing dishes		√	
Hanging laundry		√	
Do-it-yourself	√		
Containers		√	
Haptic bag	√		
Hot wire	√		
Stacking	√		
Clean sweep		√	

### 3.2. Elección de la tipología de prótesis mediante el método AHP

El método AHP se basa en descomponer problemas complejos en una jerarquía de criterios y alternativas, permitiendo la comparación y ponderación para seleccionar la opción más adecuada. Este método facilita decisiones sistemáticas y coherentes basadas en varios criterios. Su aplicación se desarrolla en 5 pasos.

- **Descomposición jerárquica:** se descompone el problema en una jerarquía que incluye un objetivo principal, criterios, subcriterios y alternativas.
- **Ponderación de los criterios:** se asignan pesos a los criterios para reflejar su importancia relativa respecto al objetivo principal.
- **Comparaciones en parejas:** se comparan las alternativas dos a dos en relación con cada criterio. Se representan las valoraciones subjetivas en una escala numérica.
- **Cálculo de prioridades:** se calculan las prioridades relativas de las alternativas utilizando operaciones matemáticas, como el cálculo de vectores propios de matrices de comparación.
- **Consistencia:** se verifica la consistencia de las comparaciones realizadas para asegurar que las evaluaciones son coherentes.

Para la descomposición jerárquica, se define como objetivo principal la determinación de los componentes imprescindibles para el diseño de una mano biónica. Como criterios a tener en cuenta, se definen la funcionalidad, la estética, el coste, el peso y la durabilidad. El criterio de funcionalidad se subdivide en tres subcriterios que se corresponden con las tres categorías extraídas del análisis de las pruebas del *Cyathlon*: adaptabilidad, precisión y fuerza. La Tabla 2 resume los parámetros de la jerarquía por lo que respecta a objetivo principal, criterios y subcriterios.

**Tabla 2:** Resumen de los parámetros de la jerarquía del sistema.

<b>Objetivo principal</b>	Determinar los componentes imprescindibles de una mano biónica	
		Adaptabilidad
	Funcionalidad	Precisión
		Fuerza
<b>Criterios</b>	Estética	
	Coste	
	Peso	
	Durabilidad	

Las alternativas se definen a partir del análisis de las prótesis del mercado. Las propuestas se agrupan en función del mecanismo de accionamiento básico de la mano:

- **Opción 1a:** prótesis con dedos actuados individualmente y mecanismo articulado. Basada en el funcionamiento de la prótesis Bebionic.
- **Opción 1b:** prótesis con dedos actuados individualmente y dedos sólidos. Basada en el funcionamiento de la prótesis Michelangelo.
- **Opción 1c:** prótesis con dedos actuados individualmente por tensores. Basada en el funcionamiento de la prótesis Hero Arm.
- **Opción 2:** *gripper* paralelo con forma adaptada a las exigencias de la tarea a realizar. Basada en el funcionamiento de la prótesis Greifer DMC.

- **Opción 3a:** pinza con recubrimiento de material adaptable. Basada en el funcionamiento de la prótesis MyoHand VariPlus.
- **Opción 3b:** pinza con forma adaptada a las exigencias de la tarea a realizar. Basada en aplicaciones de robótica concretas para cadenas de fabricación.
- **Opción 3c:** pinza con forma adaptada a las exigencias de la tarea a realizar y recubrimiento adaptable. Basada en el funcionamiento de la prótesis MyoHand VariPlus, pero añadiendo factores de forma diversos en los dedos.

A continuación, se asignan pesos a la importancia relativa de los criterios y subcriterios. Se comparan los criterios dos a dos para construir las tablas de ponderación de criterios y subcriterios. Para ello se utiliza una escala de 1 a 9 (escala de Saaty), donde 1 indica igual importancia y 9 indica importancia extrema de un criterio sobre el otro. La Tabla 3 muestra los pesos asignados en la comparación de criterios y la Tabla 4 los pesos en la comparación de subcriterios.

**Tabla 3:** Tabla de ponderación de criterios.

	Funcionalidad	Estética	Coste	Durabilidad	Peso
Funcionalidad	1	5	3	4	4
Estética	1/5	1	1/3	1/2	1/2
Coste	1/3	3	1	2	2
Durabilidad	1/4	2	1/2	1	1/2
Peso	1/4	2	1/2	2	1

**Tabla 4:** Tabla de ponderación de subcriterios.

	Adaptabilidad	Precisión	Fuerza
Adaptabilidad	1	3	4
Precisión	1/3	1	2
Fuerza	1/4	1/2	1

A continuación, se comparan las alternativas de diseño dos a dos para cada criterio y subcriterio. Para cada caso se obtiene una tabla de comparación de 7 filas y 7 columnas, ya que las alternativas planteadas son 7. Para los criterios de peso y de coste, se han comparado sus inversas ya que, en realidad, lo más beneficioso es que tanto el peso como el coste sean mínimos. Todas estas tablas se normalizan dividiendo cada término por la suma de los términos de la columna y se calcula el promedio para cada fila. Así se obtiene el vector de prioridad de las alternativas, que constituye la solución del problema. La Tabla 5 muestra el vector de prioridad, en tanto por ciento, obtenido.

**Tabla 5:** Vector de prioridad de alternativas.

Alternativa	1a	1b	1c	2	3a	3b	3c
Prioridad	14,85%	13,38%	13,78%	13,03%	14,31%	14,11%	16,54%

Según el estudio realizado, la mejor opción es la 3c, que es una prótesis con mecanismo de pinza, pero con factores de forma específicos y con un recubrimiento de un material blando (silicona). Cabe señalar que, a la vista de la proximidad de las puntuaciones obtenidas por las distintas opciones y de la subjetividad inherente a la asignación de los pesos y de la comparación de alternativas, resulta osado dar como definitivo el resultado del estudio realizado. En definitiva, se ha seleccionado una buena alternativa, pero es difícil concluir que sea la óptima.

### 3.3. Definición de los requerimientos de la prótesis

A partir de los estudios realizados, con el objetivo principal de desarrollar una prótesis de mano funcional y asequible, y con el objetivo secundario de participar en la competición *Cyathlon Series*, se plantean los siguientes requerimientos:

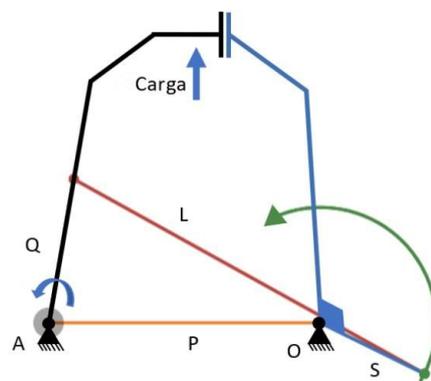
- **Funcionalidad**
  - Capacidad para coger objetos de formas y tamaños diferentes. Se espera que pueda superar al menos 7 pruebas del *Cyathlon*.
  - Respuesta rápida y fiable. Se espera que la prótesis tarde menos de 2 s en cerrar completamente (desde la máxima posición de apertura).
- **Ergonomía y confort**
  - Ajuste adaptable a la anatomía del usuario.
  - Ligera para reducir la fatiga. La masa de la prótesis no puede superar los 500 g.

- **Durabilidad**
  - Resistencia al uso cotidiano, incluyendo impactos.
  - Durabilidad de los materiales frente a un uso continuado.
  - Mecanismos de seguridad para proteger la prótesis de un mal uso.
- **Estética**
  - Apariencia natural y similar a una mano humana.
  - Opciones de personalización para adaptarse a las preferencias del usuario.
- **Coste**
  - Asequibilidad para el usuario final, incluyendo el coste inicial y los costes de mantenimiento. El coste de fabricación no puede ser mayor de 200 €.
  - Facilidad de mantenimiento y reparación.
- **Seguridad**
  - Mecanismos de seguridad para prevenir daños tanto al usuario como al entorno.
  - Materiales no tóxicos y seguros para uso prolongado.

## 4. Resultados

Siguiendo las conclusiones del análisis comparativo realizado, la base para el diseño es una pinza articulada, con factores de forma y combinaciones de materiales que aseguren una mayor adaptabilidad a distintos objetos.

Para garantizar el máximo agarre en la posición de cierre, se plantea diseñar una pinza mediante un cuadrilátero articulado, de forma que una parte de la pinza sea fija a la manivela y la otra fija al balancín, haciendo coincidir el cierre de la mano con el punto próximo al punto muerto del mecanismo. De esta forma, con la mano cerrada, un peso sobre la pinza tiende a cerrarla más. La Figura 6 ilustra cómo, al aplicar una carga, los dedos intentan girar en sentido antihorario y, al estar físicamente imposibilitado este giro por el contacto entre ambos dedos, el resultado es un aumento de la fuerza de cierre.

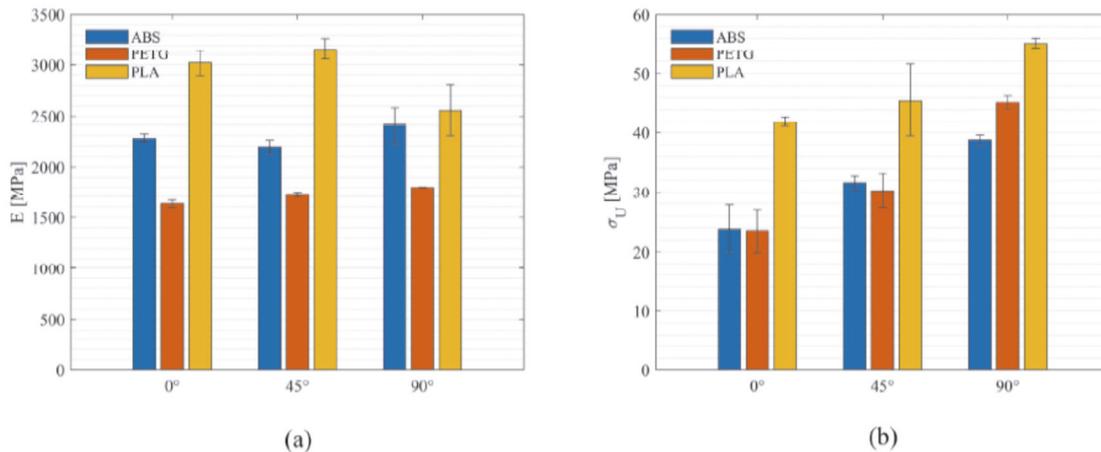


**Figura 6:** Sentido de giro al aplicar una carga.

Para transmitir el par del motor al mecanismo de barras se ha pensado en utilizar un tornillo sin fin. El eje del motor es solidario al tornillo que engrana con una corona fija a la manivela del mecanismo de la pinza. Una de las principales ventajas del uso de este sistema es que permite obtener una relación de reducción elevada en un espacio compacto. Además, el tornillo sin fin presenta la propiedad de ser irreversible en determinadas condiciones de fricción y relación de engranaje, lo cual es especialmente útil en aplicaciones como esta. En concreto, la corona —elemento conducido— no puede mover el tornillo, lo que impide que las cargas externas aplicadas sobre la pinza se transmitan de vuelta al motor. Esta característica protege el motor de esfuerzos no deseados y evita retrocesos cuando el sistema está en reposo.

La voluntad de crear una prótesis adaptable a la anatomía del usuario y mantener un coste reducido ha llevado a la decisión de construir las pinzas mediante impresión 3D. Se han valorado dos materiales distintos, el PLA (ácido poliláctico) y el PETG (polietileno tereftalato de glicol), ambos termoplásticos rígidos. No se han considerado aquellos materiales con propiedades similares pero que requieren un ambiente de impresión con temperatura controlada, como puede ser el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) debido las características de la impresora

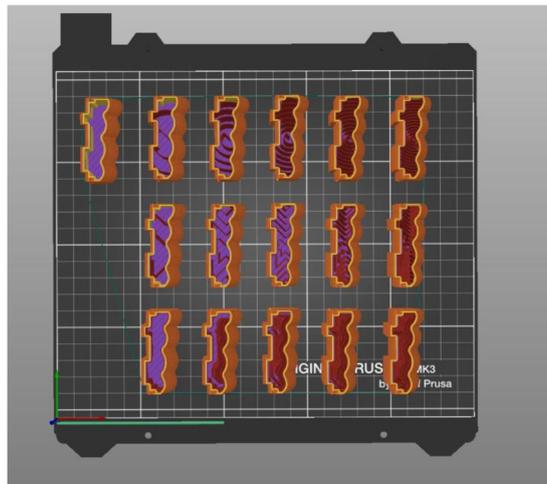
disponible. De los materiales considerados, el PLA es el que presenta un módulo de Young y tensión máxima mayores, como puede verse en la Figura 7.



**Figura 7:** Comparación del módulo de Young (a) y la tensión máxima (b) entre los materiales [9].

Para la parte de los dedos deformable elásticamente se utiliza TPU (Poliuretano termoplástico). El TPU ofrece una excelente flexibilidad y elasticidad, siendo ideal para aplicaciones que requieren movimiento, además de ser muy duradero y resistente al desgaste y a los impactos. También mantiene sus propiedades en un amplio rango de temperaturas y es biocompatible, siendo útil en aplicaciones médicas. Además, es fácil de procesar en impresoras 3D compatibles.

También se han realizado pruebas con diferentes tipos y densidades de *infill*, hasta encontrar el que mejor se adapta a los requerimientos (Figura 8). La densidad final es de un 5% con un patrón llamado acordeón de Arquímedes, ya que esta combinación requiere poca fuerza para deformar y adaptarse al objeto.



**Figura 8:** Test de densidades y patrones de *infill* diferentes.

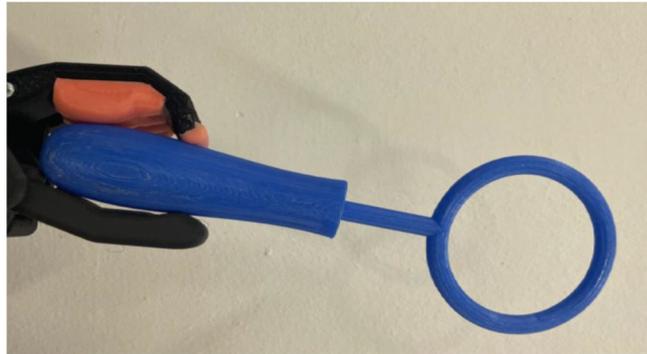
El cálculo del par motor y la reducción necesaria se han abordado a partir del requerimiento de que la prótesis cierre, desde su punto máximo, en menos de 2 s. Se ha comprobado que el recorrido del pulgar es de 59°, siendo la velocidad resultante del sistema motor-reductor como mínimo:

$$n_{\min} = \frac{\text{Ángulo recorrido}}{\text{tiempo máximo}} = \frac{59^\circ}{2\text{s}} = 4,92 \text{ min}^{-1} \quad (1)$$

Se propone un motor con una velocidad de salida de 100  $\text{min}^{-1}$  y un reductor de tornillo sin fin de reducción 20:1, con un tornillo de un diente y una corona de 20 dientes. Para este tipo de transmisión se estima un rendimiento del 60%. A partir de los datos anteriores, de las dimensiones de los dedos y de la estimación de la fuerza máxima necesaria, se calcula que el par motor que debe proporcionar el motor, que es  $T_m = 0,195 \text{ Nm}$ . El motor comercial seleccionado es un motor de corriente continua de 12 V, con velocidad nominal de 100  $\text{min}^{-1}$  y par máximo de 0,245 Nm.

Se han realizado diversas iteraciones de diseño modificando distintos aspectos de la forma de los dedos, para adaptarlos a las pruebas del *Cyathlon Series*; se ha añadido un material flexible en la punta y en la parte interior

de los dedos, para adaptarse a las diferentes formas de objetos, como puede verse en la figura 9; y se ha modificado el diseño exterior para acercarlo a la de una mano real. Para ello, se intenta integrar el mecanismo para que no destaque a simple vista. La Figura 10 muestra la evolución de la apariencia de la mano a través de las distintas iteraciones y la Figura 11 muestra el prototipo final.



**Figura 9:** Objeto de la prueba *Hot Wire* correctamente agarrado.



**Figura 10:** Evolución del aspecto de la prótesis de mano.



**Figura 11:** Prototipo funcional de la prótesis de mano.

El prototipo finalmente obtenido se ha evaluado para comprobar el grado de cumplimiento de los requerimientos. El resultado de la evaluación se muestra en la Tabla 6.

Finalmente, como resultado cabe mencionar la meritoria participación del equipo Arm2u en el *Cyathlon Series* celebrado en octubre de 2024 en Zurich. En los entrenamientos previos a la competición se consiguió superar todas las pruebas planteadas. En la competición, a pesar de los nervios y de la limitación temporal fijada, el equipo se clasificó como mejor equipo integrado por estudiantes y el mejor equipo del estado español. La Figura 12 muestra dos fotografías de la participación del equipo en la competición.

**Tabla 6:** Tabla comparativa entre los requerimientos y el rendimiento de la prótesis.

	Requerimiento	Resultado
<b>Funcionalidad</b>	Pruebas mínimas a superar: <b>7</b>	Pruebas con capacidad para superar: <b>10</b>
	Tiempo máximo de cierre: <b>2 s</b>	Tiempo máximo de cierre: <b>1,97 s</b>
<b>Ergonomía y confort</b>	Adaptable al usuario (dimensiones): <b>Sí</b>	Adaptable al usuario (dimensiones): <b>Sí</b>
	Masa final menor que: <b>500 g</b>	Masa final: <b>~300 g</b>
<b>Durabilidad</b>	Resistencia a impactos	El PLA es resistente a impactos
	Durabilidad de los materiales	No hay prueba de desgaste
	Mecanismo para proteger el motor	Tornillo sin fin protegiendo el motor
<b>Estética</b>	Apariencia antropomórfica	Apariencia antropomórfica
	Opciones de personalización	La impresión 3D lo permite
<b>Coste</b>	Coste de fabricación menor que: <b>200 €</b>	Coste de fabricación: <b>25-30 €</b>
	Facilidad de reparación	Componentes y materiales comunes
<b>Seguridad</b>	Prevenir daños al usuario	La potencia del motor no es suficiente
	Materiales no tóxicos	Los materiales son biocompatibles

**Figura 12:** Fotografías de la piloto del equipo Arm2u realizando las pruebas.

## 5. Conclusiones

Tras la realización de este trabajo, pueden extraerse algunas conclusiones preliminares que, si bien resultan significativas, requieren ser contrastadas en futuras investigaciones para determinar su validez general.

En primer lugar, el análisis de distintas prótesis existentes ha permitido identificar algunas tendencias y enfoques tecnológicos que parecen especialmente prometedores. Se ha observado una notable diversidad de soluciones disponibles en el mercado, que varían considerablemente en cuanto a concepto, funcionalidad y estética.

El estudio comparativo entre diferentes opciones ha contribuido a una mejor comprensión de los factores clave que diferencian unas prótesis de otras. Aspectos como la funcionalidad, la estética y el coste han servido de guía para delimitar los requerimientos del prototipo desarrollado, aunque estos criterios podrían ser objeto de revisión a medida que se disponga de más información.

En cuanto a los requerimientos establecidos, se ha puesto de manifiesto la relevancia de aspectos como la adaptabilidad, la capacidad de realizar diversas tareas, la durabilidad y la facilidad de uso. Estas consideraciones han orientado el diseño del prototipo, con la intención de responder a las necesidades cotidianas de los usuarios. No obstante, será necesario verificar si estos requisitos se mantienen adecuados en contextos más amplios o con distintos perfiles de usuario.

El proceso de prediseño ha dado lugar a una extensión prostética funcional y potencialmente adaptable a distintos usuarios, funciones y objetos. Las pruebas realizadas, basadas en los desafíos del *Cyathlon Series*, han proporcionado una primera validación del diseño, si bien sería conveniente repetirlas en contextos más variados y con mayor número de usuarios para confirmar su aplicabilidad general.

En relación con el coste de fabricación, la estimación preliminar sugiere que podría ser viable producir una prótesis funcional a un precio accesible. Esta evaluación incluye tanto materiales como procesos de producción, aunque

sería necesario un estudio más detallado y a mayor escala para determinar su sostenibilidad económica a largo plazo.

En definitiva, este trabajo ha permitido avanzar en el desarrollo de una prótesis orientada al uso cotidiano, mostrando un diseño que, en las pruebas realizadas, ha cumplido con los objetivos planteados. Sin embargo, las conclusiones alcanzadas deben considerarse provisionales y sujetas a futuras verificaciones. Este estudio pretende servir como punto de partida para desarrollos posteriores en el ámbito de las prótesis, con el fin de seguir mejorando la calidad de vida de las personas con discapacidad de miembro superior.

## 6. Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a todos los integrantes del equipo Arm2u por su entusiasmo y participación en un proyecto que muestra el lado más humano de la tecnología, que incide directamente en la calidad de vida de las personas.

## 7. Referencias

- [1] “Project”, ARM2u – ETSEIB, Barcelona. <https://arm2u-etseib.upc.edu/wp/project/>
- [2] Nantes E. A., “El método *Analytic Hierarchy Process* para la toma de decisiones. Repaso de la metodología y aplicaciones”, *Revista de la escuela de perfeccionamiento en investigación operativa*, **27**(46), 54-73 (2019)
- [3] “CYBATHLON”, CYBATHLON ETH Zürich, Zürich. <https://cyathlon.ethz.ch/en>
- [4] ETH Zurich, “Races and Rules, Cyathlon Challenges 2024”, ETH Zürich, Zürich (2023)
- [5] Belter J. T., Segil J. L., Dollar A. M., Weir R. F., “Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands: A review”, *Journal of Rehabilitation Research and Development*, **50**(5), 599-618 (2013)
- [6] “MyoHand VariPlus Speed”, Ottobock. <https://www.ottobock.com/es-es/product/8E38~59>
- [7] “Electric Greifer DMC VariPlus”, Ottobock. <https://www.ottobock.com/es-es/product/8E33>
- [8] Hussain S., Shams S., Jawaid Khan S., “Impact of Medical Advancement: Prostheses”, *Computer Architecture in Industrial, Biomechanical and Biomedical Engineering*, IntechOpen, (2019)
- [9] D’andrea D., Risitano G., Raffaele M., Cucinotta F., Santonocito D., “Damage assessment of different FDM-processed materials adopting Infrared Thermography”, *Fracture and Structural Integrity*, **16**(62), 75-90 (2022)