

Prototipo de softrobot que simula la sujeción tridigital de la mano humana a partir de actuadores de tensión lineal.

Guzmán Hernández, Manuel

2023

<https://hdl.handle.net/20.500.11777/5922>

<http://repositorio.iberopuebla.mx/licencia.pdf>

Prototipo de *softrobot* que simula la sujeción tridigital de la mano humana a partir de actuadores de tensión lineal

Guzmán Hernández Manuel (tercer semestre en Ingeniería Biomédica)¹, Lozano Torres Juan Carlos (tercer semestre en Ingeniería Biomédica)¹, Mérida Vázquez Maximiliano (tercer semestre en Ingeniería Biomédica)¹, Villavicencio Vázquez Luis Javier (tercer semestre en Ingeniería Biomédica)¹, Ramírez Rodríguez Rocío (profesor responsable)¹, Álvarez Flores Alejandro (profesor asesor)¹, Girón Nieto Huber (profesor asesor)², Ochoa García Oliver (profesor asesor)³, Moreno Hernández Ana (profesor asesor)⁴.

¹Universidad Iberoamericana Puebla, San Andrés Cholula, Puebla, México.

Resumen

Softrobotics es una rama de la robótica que estudia la implementación de materiales y sistemas de actuación blandos para crear máquinas capaces de simular las características y tareas que realizan los organismos vivos. Los *softrobotics* frecuentemente se diseñan siguiendo la bio-inspiración. En el área de ingeniería biomédica la robótica blanda busca la creación de dispositivos capaces de imitar el comportamiento del cuerpo humano, además de, resolver problemas que estén relacionados con padecimientos o enfermedades fisiológicas. En este documento se describe el trabajo realizado para diseñar un *softrobot* basado en medidas antropométricas, que utilizando actuadores lineales sea capaz de simular la sujeción tridigital que realiza una mano humana, reduciendo el peso del modelo y con capacidad de sujetar objetos. Se diseñó un modelo 3D utilizando SolidWorks basado en medidas antropométricas. Se imprimieron distintos modelos en 3D utilizando TPU y se implementó un sistema de actuadores de tensión lineal mini para posteriormente, realizar pruebas de sujeción. Se obtuvo un diseño en tres piezas con modelos que presentan resistencia y flexibilidad capaces de soportar la activación de 50 N por actuación lineal. El rango de sujeción se encuentra entre los 2.5 cm y los 5.5 cm de radio y el peso total del dispositivo es de 360 g, mostrando la optimización respecto a trabajos previos. Se demostró la capacidad de producir un modelo que estandarice el diseño, facilite la producción, implemente actuadores lineales y sea capaz de generar la fuerza que sujete objetos de uso cotidiano, aparte de reducir el peso del dispositivo.

Palabras clave: Softrobotics, Termoplástico poliuretano, TPU

***Autor Corresponsal:** manuel.guzman.hernandez@iberopuebla.mx

Introducción

La robótica es un área de la ciencia o rama de la tecnología que estudia el diseño y construcción de máquinas capaces de desempeñar tareas realizadas por el ser humano o que requieren el uso de inteligencia. Dentro del área industria robótica existen sistemas que poseen ciertas características antropomórficas con la finalidad de manipular materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales. Actualmente, la comunidad científica busca avances tecnológicos justificados por la necesidad de evolucionar hacia robots más capaces de realizar interacciones con humanos y se han implementado estrategias de diseño y control centradas en la seguridad entre humanos y robots [1]. En paralelo con el desarrollo de sistemas de actuación flexibles como los actuadores elásticos seriales. Algunos de los métodos más comunes para controlar y activar los *softrobots* son los polímeros electroactivos, polímeros con memoria de forma o la activación utilizando aire comprimido o fluidos a presión [2].

La robótica blanda o *Softrobotics* es una rama de la robótica que estudia el uso de materiales, piezas y sistemas blandos para la construcción de robots capaces de satisfacer las condiciones de elasticidad y flexibilidad requeridas según el ambiente y el propósito [3]. La mayoría de los *softrobots* que existen están diseñados con base en imitar el funcionamiento y la apariencia similar a la de los seres invertebrados, tales como pulpos o gusanos [4], a esto se le conoce como bio-inspiración.

La bio-inspiración es una rama del estudio biológico que tiene como objetivo mimetizar las características de sistemas biológicos en sistemas inanimados [5]. Es por esto, que mayoría los *softrobots* se fabrican con materiales flexibles, con la capacidad de deformarse fácilmente como fluidos, geles y elastómeros que pueden igualar características físicas de otros materiales. Este tipo de interacciones entre materiales suaves son muy extensas, ya que pueden simular la piel natural, el tejido muscular, los órganos internos, pero también pueden replicar funciones biológicas y organismos, de forma artificial.

Para el desarrollo y diseño de *softrobots* aplicado para el área de la ingeniería biomédica se hace a partir de la antropometría. Para simular el movimiento de las estructuras humanas se utilizan medidas antropométricas lo más cercanas a una persona, esto facilita la simulación de los movimientos realizados por el sistema musculoesquelético. En el caso de los movimientos de la mano que producen un agarre se pueden clasificar en seis categorías: cilíndrico, de punta, de gancho, de palma, esférico y de lado.

Existen varios tipos de estos aparatos, dependiendo de su mecanismo de movimiento se les puede categorizar en: a) Micro actuadores lineales eléctricos de tornillo; b) micro actuadores lineales eléctricos de cremallera; c) Micro actuadores lineales eléctricos de motor lineal [6].

Aunque el campo de los *softrobotics* se ha desarrollado exponencialmente en los últimos años, aún existen deficiencias, falta de evidencia e información acerca de estos. El número de prototipos probados aún es escaso, y los

modelos ya desarrollados son limitados. Otro de los inconvenientes que se presentan con frecuencia es la dificultad para modelar materiales blandos, además de los retos que implica el poder predecir su funcionamiento y operarlos de manera controlada. Además, se han encontrado dificultades al momento de conocer que materiales brindan las características físicas idóneas para el desarrollo de un *softrobot*, en especial la resistencia, elasticidad y la flexibilidad de estos.

Por otro lado, existen múltiples beneficios en el uso de materiales blandos para el desarrollo de robots. Poseen una alta adaptabilidad, por lo que los hace ideales para tareas dinámicas con condiciones variables. De igual manera existe un rango amplio de materiales suaves, desde elastómeros hasta polímeros para impresión en 3D que poseen distintas características, como la biocompatibilidad, elasticidad y deformabilidad, que pueden aprovecharse con la integración de una parte robótica. Además, el uso de materiales suaves puede reducir el costo de producción de robots en gran medida [7].

Debido a sus características, la investigación e implementación de *softrobotics* para solucionar temas biomédicos ha crecido. Existen diferentes propuestas sobre aplicaciones en el campo de la Medicina e Ingeniería Biomédica, una de las más investigadas es la implementación de *softrobots* para cirugía invasiva, aprovechando la adaptabilidad en tamaño y forma de sus materiales para poder asistir a un médico cirujano o incluso para navegar en el interior de un cuerpo humano [7]. Otra de las aplicaciones más utilizadas es el desarrollo de dispositivos como exoesqueletos, órtesis y prótesis, debido a la capacidad adaptable de los polímeros que se utilizan para fabricarse.

Uno de los mayores problemas en el desarrollo de *softrobots* es la selección de polímeros que cumplan con ciertas características físicas como elasticidad, flexibilidad y resistencia. Además, se requiere de un material con una resistencia capaz de soportar las fuerzas generadas por el actuador y que sus características de peso, tamaño y portabilidad faciliten el desarrollar dispositivos del área biomédica. Los dispositivos y prototipos hasta ahora desarrollados llegan a interferir en el desarrollo de tareas cotidianas debido a las características como el peso, el tamaño y la obstrucción en la movilidad de la muñeca. Sumado a esto, los mecanismos utilizados requieren de otras partes como baterías que no están integradas en el exoesqueleto de la mano.

La investigación llevada a cabo busca comprobar si el material Termoplástico Poliuretano (TPU), posee la elasticidad, flexibilidad y resistencia para su uso en el desarrollo de *softrobots*. Además de probar la implementación de un sistema mecánico el cual sea capaz de generar la fuerza y rango de movimiento que logre un agarre cilíndrico de sujeción tridigital [8] (pulgar, índice y medio), cumpliendo con parámetros de dimensión y peso del diseño del *softrobot*.

Los objetivos de este proyecto son: (1) Diseñar un modelo en SolidWorks basado en medidas antropométricas de una mujer adulta para el *softrobot*, (2) producir un prototipo impreso en 3D utilizando TPU, (3) desarrollar un *softrobot*

utilizando un sistema de actuación lineal para simular la sujeción cilíndrica tridigital de la mano humana, (4) determinar mediante pruebas cuantitativas y cualitativas la capacidad de sujeción del prototipo.

Metodología

Diseño en SolidWorks

Se realizó un diseño desde cero del *softrobot* utilizando el programa de modelado 3D SolidWorks. El modelo está basado en medidas antropométricas [9] de las falanges de la mano de una mujer adulta (Fig. 1.), esto debido a que la longitud es menor y la fuerza requerida para el movimiento se reduce. El diseño toma bio-inspiración en los dedos humanos, se planteó una estructura capaz de imitar la flexión en puntos específicos imitando las falanges. Inicialmente se creó un modelo de una sola pieza con puntos que facilitan la flexión. Mediante pruebas de análisis estático realizadas en SolidWorks y prototipos impresos se realizaron modificaciones según los requerimientos de flexibilidad faltantes para lograr el comportamiento motriz deseado. El diseño final se imprimió de tres partes, equivalente a cada falange, con uniones tipo articulación integradas en el diseño. Se diseñó un soporte capaz de sostener los tres modelos en una sola pieza integrando cada uno de los actuadores con su respectivo *softrobot*.

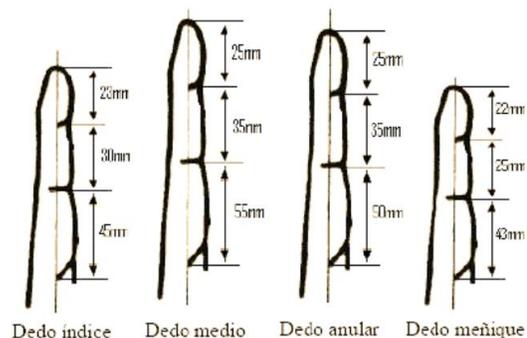


Fig. 1. Medidas antropométricas medias de las falanges de la mano de una mujer adulta [9].

Producción de prototipos

Después de haber diseñado el modelo de forma digital, se imprimieron en 3D. Se utilizó una impresora Creality Ender-3-S1 y filamento Termoplástico poliuretano. Se necesitó de un material blando y flexible para que sea posible el control del movimiento generado. Se eligió el TPU, un polímero utilizado para impresión 3D, debido a que permite cambiar los parámetros de producción, reduce el costo y no requiere de materiales adicionales. Los parámetros de impresión utilizados fueron: relleno tipo giroide con densidad de 10%, temperatura de cama a 80 °C y la boquilla a 228 °C.

Implementación del sistema mecánico

Debido a los requerimientos de fuerza para simular la sujeción de una mano humana, se eligió un sistema de actuación con Actuadores lineales mini de 30mm para facilitar el control de movimiento. Para activar el modelo se

requería de la aplicación de una fuerza capaz de producir la flexión en los puntos en que se dividen en “falanges”. Se utilizaron actuadores de tensión lineal capaces de ejercer una fuerza de 50 N y con dimensiones adaptables al diseño del *softrobot* que además se mantienen dentro del rango de peso presupuestado con solo 50 g cada uno. Se escribió el programa que controla los motores y se utilizó un Arduino UNO para poder generar la activación de los actuadores. El sistema mecánico funciona mediante la conexión de una placa Arduino UNO, tres actuadores mini de 30mm, un controlador L298N, un eliminador regulador de corriente de AC de 12V y una placa de inserción o *protoboard*.

Debido a que los motores requieren 12V, fue necesario la implementación del controlador L298N para poder dirigir la corriente necesaria a dichos motores, los cuales mediante una conexión de este controlador a la placa Arduino UNO, son controlados por un código realizado en la interfaz de IDE de Arduino, para poder controlarlos utilizando el monitor serie que proporciona el IDE al introducir las teclas de variables específicas designadas para la acción de los motores.

Realización de pruebas de sujeción

Para las pruebas de sujeción activamos los actuadores para sostener distintos objetos que varían en tamaño, peso y radio/longitud. Se realizó cada prueba múltiples veces con objetos cilíndricos y no cilíndricos para probar si era capaz de variar según el tipo de objeto. Con los primeros tres diseños realizamos una prueba aplicando una pesa en la punta y medimos la variación de la distancia respecto al eje y negativo, esto para ver el comportamiento de flexión de los modelos impresos en una sola pieza.

Resultados y Discusión

El diseño de cada dedo cuenta con tres piezas independientes que están bio-inspiradas en las falanges de la mano humana (Fig. 2 a Fig. 4). Para el diseño se respetaron las medidas antropométricas de longitud de las falanges de una mujer adulta.

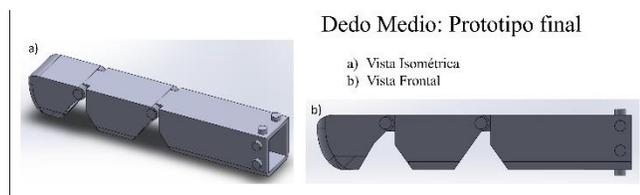


Fig. 2. Diseño final dedo medio basado en medidas antropométricas realizado en SolidWorks.



Fig. 3. Diseño final dedo pulgar basado en medidas antropométricas realizado en SolidWorks.



Fig. 4. Diseño final dedo índice basado en medidas antropométricas realizado en SolidWorks.

Los prototipos impresos en TPU se produjeron después de revisar la capacidad de flexión del anterior (Tabla 1). Usando los mismos parámetros en una impresora Creality Ender 3S-1. Los tres primeros diseños se imprimieron en una sola pieza (Fig. 5) y el diseño final se imprimió en tres partes diferentes (Fig. 6). El diseño final con el soporte que une los dedos tiene un peso 114 g sin ningún elemento electrónico o de actuación.

Tabla 1: Descripción de valores de masa y tiempo de producción de cada modelo.

Dedo	Masa (g)	Tiempo (hr)
Índice	19	3.5
Medio	22	4
Pulgar	14	2.47



Fig. 5. Diseños 1, 2 y 3 realizados en SolidWorks impresos utilizando TPU en una impresora Creality Ender 3S-1.



Fig. 6. Diseños final de tres módulos realizado en SolidWorks impresos utilizando TPU en una impresora Creality Ender 3S-1.

El sistema de actuación utiliza un actuador lineal mini de 30mm para cada modelo, cada uno produce una tensión de 50 N en un cincho que flexiona y extiende el modelo. El peso del prototipo con los actuadores lineales integrados al *softrobot* es de 264 g.

```

1 //Variable para la letra de entrada
2 char letra;
3 int IN1 = 8;
4 int IN2 = 7;
5 unsigned long t;
6
7 void abrir ()
8 {
9   digitalWrite(IN1, LOW);
10  digitalWrite(IN2, HIGH);
11 }
12 void cerrar ()
13 {
14   digitalWrite(IN1, HIGH);
15   digitalWrite(IN2, LOW);
16 }
17 void setup ()
18 {
19   pinMode (IN1, OUTPUT);
20   pinMode (IN2, OUTPUT);
21   Serial.begin (9600);
22 }
23 void loop ()
24 {
25   if(Serial.available()>0)
26   {
27     letra = Serial.read();
28   }
29   if (letra == 'a' )
30   {
31     abrir ();
32     delay (2000);
33   }
34   if (letra == 'c' )
35   {
36     cerrar ();
37     delay (2000);
38   }
39 }

```

Fig. 7. Código de programación para activar los actuadores lineales. Las variables A y C producen la apertura y cierre de los motores.

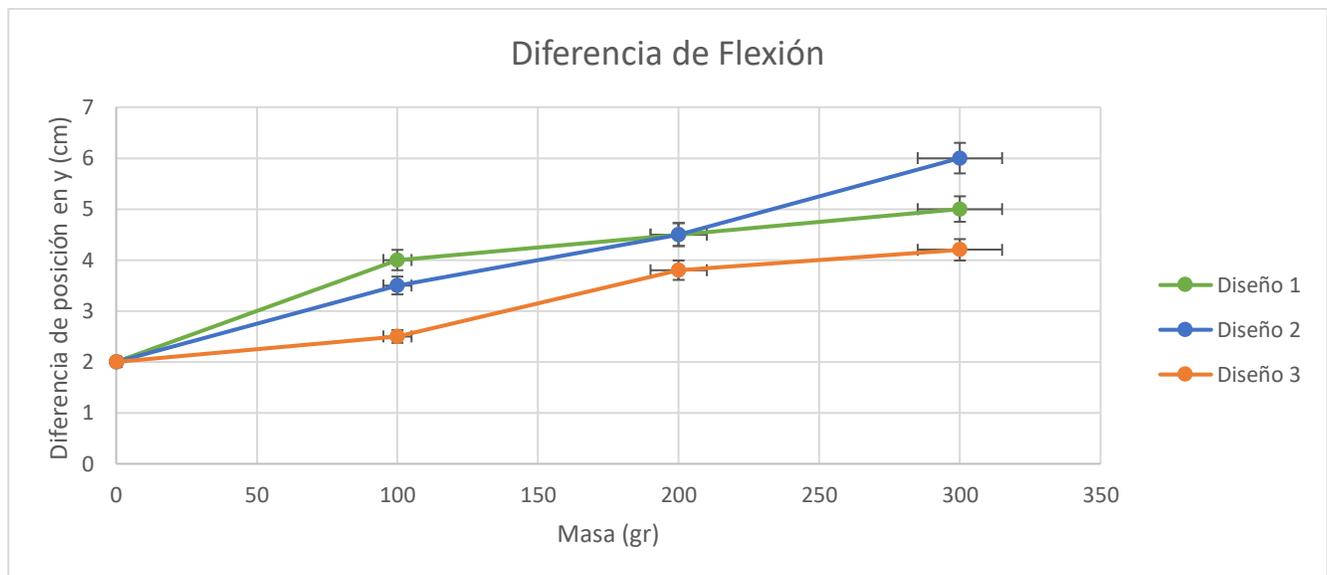


Fig. 8. Gráfica de diferencia de posición respecto al eje y negativo según la variación de la fuerza vertical aplicada en la punta del modelo. Nos muestra la tendencia de flexión con diferencia de 100gr entre cada medición. La gráfica muestra el promedio tomado después de realizar las mediciones tres veces ($n=3$), también se muestran las barras de error de cada medición.

Los resultados obtenidos sobre la flexión de los modelos impresos en una pieza muestran la falta de flexión el comportamiento de los tres diseños es muy similar (Fig. 8). Los actuadores lineales no producían la fuerza requerida para flexionar los modelos sin importar las modificaciones realizadas. Un modelo de tres piezas con articulaciones integradas fue capaz de flexionarse para simular los movimientos realizados durante una sujeción tridigital. Para el diseño final el modelo fue capaz de sostener objetos con diferentes formas y en un rango de tamaño entre los 5 cm y 7 cm de radio/longitud (Tabla 2). La sujeción tridigital realizada por el modelo es firme y no deja que el objeto se libere.

Tabla 2: Medidas de los objetos utilizados para realizar las pruebas de sujeción del modelo final. El intervalo \pm indican promedio y desviación estándar. $n = 3$

Objeto	Radio (cm)	Longitud (cm)
Botella pet	3.34 ± 0.01	N/A
Termo de aluminio	4.61 ± 0.01	N/A
Desarmador	2.54 ± 0.01	N/A
Tubo cúbico de metal	N/A	3.7 ± 0.01
Botella de plástico	4.45 ± 0.01	N/A
Mouse	3.66 ± 0.01	N/A
Pinzas para cable	N/A	5.5 ± 0.01
Multi herramienta	N/A	4.5 ± 0.01

En comparación con el modelo de exoesqueleto tipo guante multisegmento de M. Li *et al.* (2019) [10], que utiliza una lámina de acero como resorte para generar los movimientos de extensión y flexión y genera un máximo aproximado de

31 N en cuatro dedos, el nuestro es capaz de producir aproximadamente 50 N por dedo. Además, al estar basados en medidas antropométricas y usar el TPU para la impresión en combinación con la densidad de relleno del 10% utilizada reducen el peso total del dispositivo. El modelo de [10] impreso en PLA pesa un total de 401g incluyendo el guante, motores y mecanismo multisegmento (uno de sus objetivos era mantenerse debajo de los 500g), nuestro modelo tiene un peso de 360g incluyendo los elementos electrónicos del sistema (Arduino UNO, Controlador L298N y *protoboard* mini).

Para mejorar el rango de sujeción se requiere de futura investigación y cambios en el diseño que permitan realizar otro tipo de sujeciones, ampliar el radio de sujeción y que tengamos un modelo de cinco dígitos. Según los datos obtenidos en las pruebas de sujeción, el rango es aceptable cuando se trata de tomar objetos utilizados de forma cotidiana con sujeción firme. Unido a el trabajo expuesto en este documento se busca implementar un modelo de mano completo que posea sensores y que sea capaz de imitar otros tipos de sujeción sin dejar a un lado el diseño basado en medidas antropométricas.

Conclusiones, perspectivas y recomendaciones

En este proyecto se realizó el diseño e implementación de un sistema de actuación para crear un *softrobot* capaz de

simular la sujeción tridigital de la mano humana. El dispositivo fabricado se creó basado en medidas antropométricas buscando la reducción del peso comparado con modelos previos similares. Después de realizar pruebas, con los resultados obtenidos se concluyó que el rango y fuerza de agarre son mejores que los del dispositivo tomado como referencia, además de que se logró disminuir el valor del peso total. La forma del modelo y los ángulos de flexión se adaptan mejor a objetos cilíndricos, ya que los modelos con otras formas requieren de un ajuste de posición para lograr una sujeción firme y precisa. La fuerza de agarre es suficiente para sujetar objetos utilizados de forma cotidiana sin presentar dificultad, sin embargo, no presenta la misma calidad de sujeción cuando se trata de objetos más pesados. Para próximas adiciones a este proyecto, algunos de los objetivos son automatizar el modelo utilizando sensores y añadiendo los dedos faltantes para la posible implementación en un dispositivo biomédico (prótesis u órtesis). Además, buscaríamos poder simular otro tipo de movimientos y sujeciones.

Es importante revisar diversos trabajos previos, considerar el tiempo y materiales disponibles y que siempre exista la cooperación y comunicación del equipo.

Referencias

1. “Robótica,” Instituto Tecnológico de Nuevo Laredo, 2003. Accessed: Oct. 23, 2023. [Online]. Available: http://www.itnuevolaredo.edu.mx/takeyas/apuntes/Inteligencia%20Artificial/Apuntes/tareas_alumnos/Robotica/Robotica%202005-Verano_.pdf
2. A. Miriyev, K. Stack, and H. Lipson, “Soft material for soft actuators,” *Nature Communications*, vol. 8, no. 1, Sep. 2017, doi: 10.1038/s41467-017-00685-3
3. “Soft robotics: Definition and research issues,” IEEE Conference Publication | IEEE Xplore, Nov. 01, 2017. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8267170>
4. “Robótica suave – HiSoUR Arte Cultura Historia.” <https://www.hisour.com/es/soft-robotics-43130/>
5. G. M. Whitesides, “Bioinspiration: something for everyone,” *Interface Focus*, vol. 5, no. 4, p. 20150031, Aug. 2015, doi: 10.1098/rsfs.2015.0031.
6. Alex, “Micro actuadores lineales eléctricos,” *Transductor.net*, jun. 03, 2023. <https://transductor.net/micro-actuadores-lineales-electricos/>
7. W. Sire, “Soft Robot - A review - Elveflow,” *Elveflow*, Oct. 10, 2022. <https://www.elveflow.com/microfluidic-reviews/general-microfluidics/soft-robot/>
8. N. Andreu, “Rehabilitación de las habilidades manipulativas a través de las pinzas funcionales,” *IRENEA - Instituto De Rehabilitación Neurológica*, Jan. 2019, [Online]. Disponible: <https://irenea.es/blog-dano-cerebral/habilidades-manipulativas-pinzas-funcionales/>
9. Lopesino Rivera, “https://oa.upm.es/50450/1/TFG_DANIEL_LOPESINO_RIVERA.pdf,” *IndustrialES*, vol. 05, Feb. 2018.
10. “An intelligent grasping system for applications in prosthetic hands,” IEEE Conference Publication | IEEE Xplore, Dec. 01, 2008. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4786086>
11. “¿Qué es el TPU? - Lubrizol.” <https://espanol.lubrizol.com/Engineered-Polymers/About/What-is-TPU>
12. N. L. Rosmery, “ANTROPOMETRÍA. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS TECNOLOGÍAS PARA LA CAPTACIÓN DE LAS DIMENSIONES ANTROPOMÉTRICAS.” http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372016000200004
13. “Soft Robotic Glove for Neuromuscular Rehabilitation,” *Wyss Institute*, Apr. 20, 2022. <https://wyss.harvard.edu/technology/soft-robotic-glove/>
14. M. Li et al., “An Attention-Controlled hand exoskeleton for the rehabilitation of finger extension and flexion using a Rigid-Soft combined mechanism,” *Frontiers in Neurorobotics*, vol. 13, May 2019, doi: 10.3389/fnbot.2019.00034.