



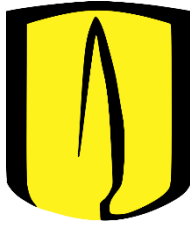
**Universidad de los Andes**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO GEOMETRICO DE EXOESQUELETO MODULAR Y PARAMETRIZABLE  
PARA MOVIMIENTOS DE ROTACION ARTICULAR**

Autor:

Oscar Andres Aguirre Colorado



**Universidad de los Andes**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO GEOMETRICO DE EXOESQUELETO MODULAR Y PARAMETRIZABLE  
PARA MOVIMIENTOS DE ROTACION ARTICULAR**

*Trabajo presentado como informe de proyecto individual para optar al título de ingeniero  
mecánico*

Autor:

Oscar Andres Aguirre Colorado

Asesor:

Jonathan Camargo Leyva, PhD

*Agradecimientos,*

*A mis padres por su apoyo incondicional y por acompañarme durante todo este proceso, y a mis hermanos por esta siempre para mí.*

# Contenido

<b>RESUMEN.....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>2</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>2</b>
2.1. Objetivo General .....	2
2.2. Objetivos Específicos.....	2
<b>3. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>3</b>
3.1. Tipos de Cuerpos y Características Antropométricas .....	3
3.2. Formas de Sujeción de Exoesqueletos .....	4
3.3. Actualidad de los Exoesqueleto .....	5
3.3.1. Clasificación de exoesqueletos .....	5
3.3.2. Aplicaciones actuales.....	6
3.3.3. Tendencias tecnológicas actuales .....	6
3.3.4. Desafíos actuales .....	7
3.4. Biomecánica de Articulaciones Humanas.....	7
3.4.1. Tipos de articulaciones y movimientos.....	7
3.4.2. Rangos de movimiento (ROM).....	9
3.4.3. Articulación del codo.....	9
3.4.4. Articulación de rodilla .....	10
3.5. Modelado 3D Poligonal.....	11
3.5.1 Función de grupos de vértices y sistemas de peso .....	12
3.5.2 Modelos estructurados .....	13
3.6. Escaneo 3D en Cuerpos Humanos .....	13
3.7. Técnicas de Machine Learning.....	14
3.7.1. Clustering: Clasificación de morfologías humanas.....	14
<b>4. METODOLOGÍA .....</b>	<b>16</b>
4.1. Búsqueda y Selección de Datasets del Cuerpo Humano en 3D.....	16
4.2. Generación de Cuerpos.....	17
4.2.1. Grupos de vértices .....	18
4.2.2. Separación de Superficies .....	19

<b>4.3.</b>	<b>Análisis Estadístico.....</b>	<b>20</b>
<b>4.4.</b>	<b>Clustering.....</b>	<b>22</b>
<b>4.5.</b>	<b>Superficie Promedio .....</b>	<b>23</b>
<b>4.6.</b>	<b>Diseño del Exoesqueleto .....</b>	<b>23</b>
4.6.1.	Diseño de manga para el brazo .....	24
4.6.2.	Diseño de la estructura.....	24
<b>4.7.</b>	<b>Manufactura y Construcción del Exoesqueleto .....</b>	<b>28</b>
4.7.1.	Manufactura.....	28
4.7.2.	Construcción .....	29
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>29</b>
<b>5.1.</b>	<b>Resultados del clustering .....</b>	<b>29</b>
<b>5.2.</b>	<b>Resultado de las superficies promedio .....</b>	<b>32</b>
<b>5.3.</b>	<b>Resultado de Diseño de Manga .....</b>	<b>33</b>
<b>5.4.</b>	<b>Resultados de Diseño de la estructura .....</b>	<b>34</b>
<b>5.5.</b>	<b>Resultados de validación.....</b>	<b>36</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>37</b>
<b>7.</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>38</b>
<b>8.</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>38</b>
	<b>ANEXO A. ....</b>	<b>41</b>

## **Resumen**

Este proyecto presenta el diseño geométrico de un exoesqueleto modular y parametrizable enfocado en los movimientos de rotación articular. Se parte de la necesidad de crear exoesqueletos ergonómicos y adaptables a las diversas características antropométricas de la población. De esta manera, se acudió a modelos sintéticos 3D de cuerpos humanos, generados a partir del add-on de SMPL-X. Este es un modelo paramétrico basado en datos de escaneos 3D reales. A partir de 400 modelos generados (200 hombre y 200 mujeres), se realizaron estudios estadísticos y se aplicaron métodos de clasificación mediante clustering, usando el algoritmo de K-Means para catalogar tres tallas (S, M y L).

Por cada talla, se calculó una superficie promedio de brazo y pierna. Con base en la superficie promedio de un brazo de talla M, se diseñó un exoesqueleto, de forma que este sea fácilmente adaptable a la variación de las morfologías humanas. Su diseño se basó en obtener un producto vestible y sistema modular, que permita una fácil construcción e intercambio de piezas. Además, se siguió una metodología de iteración. También, se diseñó un mecanismo que permite mantener la alineación del eje de rotación del codo con el motor, mediante expansión y compresión (ULV). Finalmente, se fabricó y validó un prototipo físico para comprobar su ergonomía, modularidad y funcionalidad. Este trabajo establece una metodología escalable para el diseño sobre las diferentes partes del cuerpo. De esta manera se busca obtener un exoesqueleto de cuerpo completo.

## **1. Introducción**

Los seres humanos tenemos limitaciones físicas que muchas veces nos impiden desempeñarnos como quisiéramos en tareas que requieren movimiento, resistencia y fuerza. Es por esto por lo que, en los últimos años, los exoesqueletos han emergido como una respuesta a esta problemática. Estos dispositivos son una solución innovadora en campos como la rehabilitación física, la asistencia a personas con movilidad reducida y la mejora del rendimiento físico en entornos laborales o militares. El problema, es que muchos de los exoesqueletos actuales son difícilmente adaptables a personas con diferentes características antropométricas, lo que genera limitaciones en su escalabilidad.

Este proyecto se centra en el diseño de un exoesqueleto modular y parametrizable enfocado en movimientos de rotación articular. Donde se busca proponer una metodología que permita la escalabilidad de exoesqueletos para diferentes partes del cuerpo. Así, se podrán crear estructuras ergonómicas, funcionales y adaptables a la diversidad morfológica de los usuarios. Para ello se usarán técnicas de modelado 3D, machine learning, y análisis estadístico, que permitirán encontrar una categorización por tallajes que logren tener en cuenta una gran población de seres humanos.

Lo anterior se realizará a partir del uso del modelo paramétrico SMPL-X para Blender, con el cual se generarán 400 cuerpos con diferentes características morfológicas. Con esto, se espera obtener una base sólida de datos anatómicos que permitan estudiar a profundidad el cuerpo humano.

Esta tesis establece una base metodológica para el diseño de exoesqueletos personalizados y eficientes, abriendo nuevas posibilidades en la creación de dispositivos más accesibles, anatómicamente coherentes y técnicamente escalables.

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo General**

Diseñar un exoesqueleto modular y parametrizable que se adapte de manera precisa a diferentes tipos de cuerpos y características antropométricas de diversas etnias, mediante el uso de modelado geométrico avanzado en 3D, análisis antropométrico a partir de modelos escaneados y técnicas de clasificación basadas en machine learning.

### **2.2. Objetivos Específicos.**

- i. Generar una base de datos sintética representativa de cuerpos humanos mediante el uso de modelos paramétricos 3D entrenados con datos antropométricos reales.
- ii. Extraer y analizar características morfológicas clave utilizando técnicas estadísticas para identificar patrones de variabilidad entre usuarios.

- iii. Implementar algoritmos de clustering para segmentar la población en grupos morfológicos que permitan estructurar un sistema de tallas.
- iv. Calcular superficies promedio por grupo y utilizar estos datos como referencia para el diseño anatómico del exoesqueleto.
- v. Diseñar un exoesqueleto modular, vestible y adaptable a cada talla utilizando herramientas de modelado CAD, priorizando la ergonomía, la modularidad y la escalabilidad.

### **3. Marco Teórico**

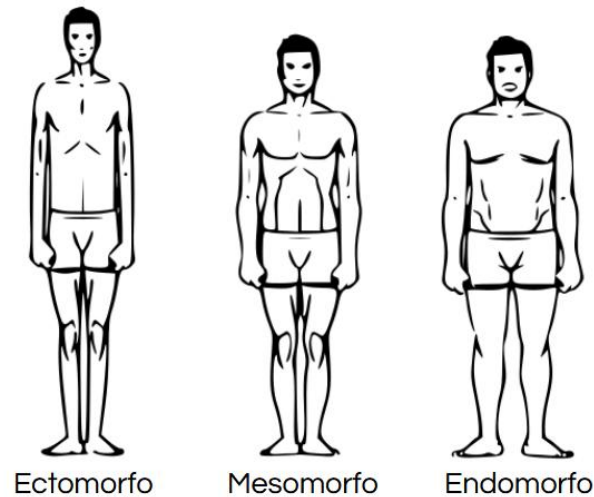
#### **3.1. Tipos de Cuerpos y Características Antropométricas**

Para lograr diseñar un exoesqueleto modular y parametrizable, es fundamental analizar la naturaleza del cuerpo humano y considerar sus diversas características antropométricas. Las diferencias en las características antropométricas entre etnias se pueden atribuir a factores como la genética, el nivel de actividad física, alimentación y el entorno socioeconómico. Estos factores influyen directamente en la forma, proporciones y dimensiones del cuerpo humano [1].

Estas variaciones se reflejan en las diferentes poblaciones que hay alrededor del mundo. Por ejemplo, las poblaciones de origen asiático tienden a una menor estatura y un menor índice de masa corporal (IMC) en comparación con las poblaciones europeas y africanas, quienes presentan mayor robustez ósea y muscular [2]. De esta manera, es necesario considerar un amplio espectro de medidas antropométricas, entre las cuales están: estatura, peso, largo de las extremidades, medidas de anchura, IMC y porcentaje de grasa corporal [3].

También, se pueden identificar varias morfologías relacionadas a tres tipos de somatotipos: ectomorfo, endomorfo y mesomorfo (Figura 1.). Estos dividen la estructura física de un cuerpo humano según sus características físicas y nos permite entender el perfil de una persona. Un cuerpo ectomorfo describe la predisposición a tener una estructura física más delgada y alta, este tipo de somatotipo incluye personas con poco musculo y grasa, y un metabolismo rápido. Por otro lado, un cuerpo endomorfo describe la predisposición a acumular grasa, lo que implica personas con tendencia a ganar peso fácilmente, estructura ósea más grande y un metabolismo lento. Y, por último, un cuerpo mesomorfo es el equilibrio entre estas dos describiendo la predisposición a desarrollar masa muscular, de tal forma que este tipo de personas tienen una estructura muscular y ósea más desarrollada, con un metabolismo normal, permitiéndoles subir y bajar de peso sin mucha dificultad y sin tendencia a acumular mucha grasa.





*Figura 1. Tipos de morfologías del cuerpo humano*

Por otro lado, el diseño también debe contemplar implicaciones biomecánicas, es decir, sobre cómo se mueve cada cuerpo. Los rangos de movimiento de las articulaciones pueden variar según las características antropométricas de una persona y el historial físico del usuario. Algunos estudios demuestran que los rangos máximos para movimientos como la flexión de codo o la abducción de hombro pueden diferir entre grupos poblacionales y deben ser considerados en el diseño para evitar limitaciones, incomodidad o incluso lesiones [4].

Además, la edad y el sexo son factores sumamente importantes para estudiar. La edad influye claramente en las dimensiones del cuerpo, especialmente en niños y jóvenes que se encuentran en etapa de desarrollo. Sin mencionar, que el envejecimiento conlleva una pérdida progresiva de masa muscular (sarcopenia), menor densidad ósea y reducción del rango de movimiento. Asimismo, existen diferencias anatómicas y proporcionales entre hombres y mujeres. Por ejemplo, las mujeres poseen torsos más pequeños, caderas más anchas y menor masa muscular en comparación con un hombre. Esto es importante para la ubicación y tamaño de los módulos de sujeción [5].

### **3.2. Formas de Sujeción de Exoesqueletos**

Uno de los mayores retos en el diseño de exoesqueletos está en el sistema de sujeción. Este dispone la forma en la que el exoesqueleto se va a acoplar al usuario y asegura que el movimiento mecánico se logre transmitir de una manera eficiente. Además, esta debe ser segura evitando molestias, lesiones o deslizamientos indeseados. Una sujeción adecuada garantiza precisión en la asistencia y alineación entre el sistema robótico y las articulaciones humanas [6]. Las formas de sujeción se pueden clasificar en tres grupos principales:

- Sujeción rígida: Este sistema incluye elementos rígidos (abrazaderas de aluminio o polímeros) que permiten que el exoesqueleto se ajuste al cuerpo y distribuya las cargas mecánicas, reduciendo esfuerzos en ciertas partes de este. De forma que estas se fijan

usualmente mediante cierres mecánicos. Ofrece alta estabilidad y precisión, a cambio de una baja adaptabilidad e incomodidad, además de requerir un ajuste personalizado [7].

- **Sujeción semirrígida:** Este sistema combina elementos rígidos con componentes flexibles (correas ajustables o espumas) de tal forma que se logra una estabilidad y comodidad equilibrada. Ofrece una alta adaptabilidad a diferentes morfologías sin sacrificar del todo la capacidad de transmisión de fuerza. Este tipo es ideal para sistemas modulares y parametrizables [7].
- **Sujeción flexible:** Este sistema utiliza materiales blandos o flexibles (velcro, neopreno, tejidos, etc.) que permite que el exoesqueleto sea más cómodo, ligero y fácil de ajustar. Sin embargo, este tipo de sujeciones tiene una baja transmisión de fuerza [8].

Además, un diseño modular requiere una alta intercambiabilidad en la estructura del sistema facilitando su configuración. De esta forma, es clave integrar cierres de liberación rápida o anclajes universales con los que se minimice el esfuerzo de montaje y desmontaje.

### 3.3. Actualidad de los Exoesqueleto

En las últimas décadas los exoesqueletos han evolucionado de forma considerable, desde simples prototipos experimentales en laboratorios a dispositivos funcionales utilizados en medicina, industria y el campo militar. En gran parte, esto ha sido gracias al progresivo desarrollo de nuevas tecnologías como la inteligencia artificial, actuadores compactos y sensores biomédicos [7].

#### 3.3.1. Clasificación de exoesqueletos

Los exoesqueletos se pueden clasificar según su función, parte del cuerpo que asisten y tipo de actuador utilizado. La Tabla 1 resume estas clasificaciones:

*Tabla 1. Clasificación actual de exoesqueletos*

Clasificación	Tipo
Función	Asistivos
	Rehabilitadores
	Industriales
	Militares
Zona del cuerpo	Extremidades inferiores
	Extremidades superiores
	Tronco/Espalda
	Cuerpo completo
Tipo de actuador	Eléctrico
	Neumático/Hidráulico
	Pasivo (resortes, poleas)
	Soft/Textil

### ***3.3.2. Aplicaciones actuales***

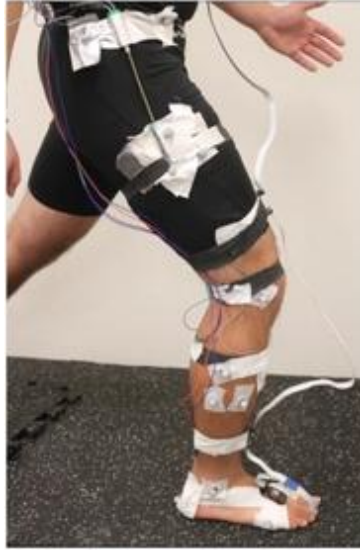
Existen diferentes campos en los que se pueden usar exoesqueletos. En el sector industrial se pueden aplicar estos sistemas con una función más pasiva, esperando reducir la carga muscular en tareas donde se produce una alta fatiga muscular. Por ejemplo, algunas empresas vehiculares como Ford y BMW han utilizado exoesqueletos en tareas de montaje, mostrando una reducción en la fatiga de hombros y espalda hasta en un 30%. De una manera similar, en el ámbito militar, también se han utilizado exoesqueletos para aumentar el rendimiento de soldados, de esta forma se busca que los soldados tengan una mayor resistencia durante largas marchas y misiones difíciles. Aunque en este sector aún no se han usado exoesqueletos, su adopción promete mucho para el futuro militar y su adopción se encuentra en curso en programas de defensa de EE. UU. y Corea del Sur [8].

Por otro lado, en el campo de salud, los exoesqueletos permiten una mejor recuperación a pacientes en estados de rehabilitación, ya sea por fracturas o lesiones. Además, permiten a pacientes con parálisis parcial o total recuperar movimientos funcionales, así como también, mantener la masa muscular activa. Ya existen algunos dispositivos que se han testeado en Europa, Japón y Estados Unidos [9].

Finalmente, los exoesqueletos también son útiles en logística y construcción, ya que pueden ayudar con la carga de elementos pesados de una forma más segura y eficiente, disminuyendo la fuerza ejercida por el usuario y ayudando con la salud muscular o esquelética.

### ***3.3.3. Tendencias tecnológicas actuales***

En la actualidad el campo de exoesqueletos ha seguido ciertas líneas de avance. El control adaptativo es uno de ellos, donde se integran sensores biométricos EMG o IMU para interpretar las intenciones del usuario en tiempo real (Figura 2.). Asimismo, se han estado buscando desarrollar exoesqueletos con materiales inteligentes y tejidos funcionales, que sean ligeros y flexibles. De tal forma que se ajusten al cuerpo como una prenda (exosuits). Además, con la reciente tendencia por la inteligencia artificial, se ha buscado integrarla para entender y personalizar el funcionamiento del dispositivo según el usuario. Así la respuesta del exo podría ser más precisa. Por último, la investigación en nuevos diseños de baterías y gestión del consumo energético juega un papel importante para el futuro de los exoesqueletos, ya que se espera poder aumentar la autonomía y el poder de estos con el tiempo.



*Figura 2. Modelo de locomoción basada en sensores EMG [10].*

#### **3.3.4. Desafíos actuales**

A pesar de los avances, los exoesqueletos enfrentan varios retos. El costo de estos dispositivos es muy alto, especialmente aquellos con un fin médico. Además, Los exoesqueletos actuales siguen siendo muy rígidos, por tanto, se deben mejorar en su ergonomía, de tal manera que se puedan cubrir varias tallas, géneros y condiciones físicas, es decir, tener un diseño adaptable. Por otro lado, aún existe una gran barrera en la comunicación entre el usuario y el sistema. En ultimas, tampoco existe una regulación de este tipo de dispositivos, ya que no hay una estandarización normativa a nivel global. Esto último, retrasa y complica la venta de exoesqueletos.

### **3.4. Biomecánica de Articulaciones Humanas**

La biomecánica estudia cómo responde el movimiento del cuerpo humano a las fuerzas internas (generadas por músculos, tendones y huesos) y externas (como la gravedad, el contacto, etc). Además, examina como estas fuerzas afectan la estructura biológica. En el contexto del diseño de exoesqueletos, es crucial entender la biomecánica de las articulaciones, ya que esto permite que el dispositivo se adapte correctamente a los movimientos naturales de todos los cuerpos humanos, sin restringirlos ni forzarlos.

#### **3.4.1. Tipos de articulaciones y movimientos**

Podemos clasificar las articulaciones humanas dependiendo de su función y estructura. De tal forma, que las articulaciones sinoviales (Figura 3.) son las más importantes, debido a su gran rango de movimiento y a su complejidad. Dentro de estas, podemos encontrar los seis tipos principales:

- Planas: permiten pequeños deslizamientos entre superficies planas. Por ejemplo, entre huesos del tarso.
- Bisagra: permiten movimiento unidireccional de flexión y extensión. Por ejemplo, el codo y la rodilla.

- Pivote: permiten rotación sobre un eje longitudinal. Por ejemplo, la articulación atlantoaxial del cuello.
- Elipsoidales: permiten movimiento biaxial de flexión, extensión, abducción y aducción. Por ejemplo, la muñeca.
- Silla de montar: superficies articulares que encajan como jinete y silla. Permiten un movimiento biaxial. Por ejemplo, la base del pulgar.
- Esferoidales: permiten movimiento en múltiples ejes, incluido rotación. Por ejemplo: hombro y cadera.

Por otro lado, podemos clasificar cada uno de los movimientos articulares, los cuales se describen en términos de grado de libertad y en función de los planos anatómicos. Los más relevantes son:

- Flexión y extensión: ocurre en el plano sagital. Mientras que la flexión reduce el ángulo entre dos segmentos; la extensión lo incrementa.
- Abducción y aducción: ocurre en el plano frontal. Mientras que la abducción aleja una extremidad del plano medio del cuerpo, por ejemplo, levantar el brazo lateralmente); la abducción la acerca.
- Rotación interna y externa: ocurre en el plano transversal. Mientras que la rotación interna dirige una parte del cuerpo hacia el centro; la externa lo aleja
- Circunducción: en este caso, es un movimiento compuesto, ya que combina flexión, extensión, abducción y aducción para generar un movimiento circular.
- Pronación y supinación: se refiere a la rotación del antebrazo, cuando la palma se dirige hacia abajo se llama pronación, pero si se dirige hacia arriba es supinación.

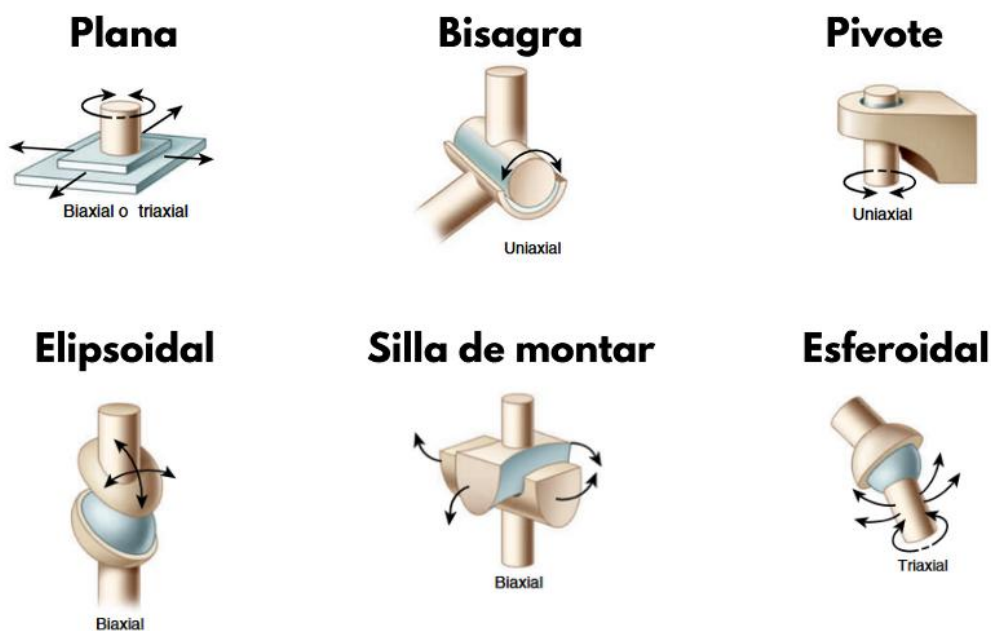


Figura 3. Tipos de articulaciones del cuerpo humano [11].

### 3.4.2. Rangos de movimiento (ROM)

Otro aspecto importante para considerar son los rangos de movimiento que tiene cada articulación del cuerpo, ya que estos varían según el tipo, edad, sexo, entrenamiento físico y condiciones patológicas. Por ejemplo, las personas jóvenes suelen presentar mayor flexibilidad en sus cuerpos que una persona adulta o mayor, debido a las condiciones de su cuerpo y porque naturalmente son personas más saludables. En la Tabla 2 se puede encontrar los ROM para algunas articulaciones, según datos reportados por Norkin y White [12]

Tabla 2. ROM promedio para articulaciones del cuerpo humano

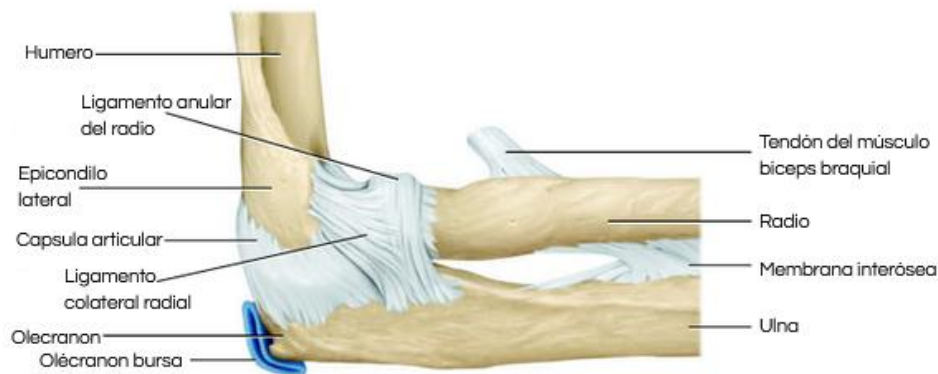
Articulación	Movimiento	Rango Promedio
Hombro	Flexión	0° - 180°
	Abducción	0° - 150°
	Rotación interna / externa	0° - 70° / 0° - 90°
Codo	Flexión / extensión	0° - 150°
Muñeca	Flexión / extensión	0° - 80° / 0° - 70°
	Desviación radial / cubital	0° - 20° / 0° - 30°
Cadera	Flexión (rodilla flexionada)	0° - 120°
	Rotación interna / externa	0° - 35° / 0° - 45°
Rodilla	Flexión	0° - 135°
	Hiperextensión (en algunos casos)	0° - -10° (negativo)
Tobillo	Dorsiflexión / flexión plantar	0° - 20° / 0° - 50°
Columna cervical	Flexión / extensión	0° - 45° / 0° - 45°

Uno de los aspectos más críticos en el diseño de exoesqueletos se encuentra en la alineación del eje de rotación del sistema con el eje de rotación fisiológico de la articulación. Puesto que cualquier desalineación puede ocasionar fuerzas indeseadas que dañen el motor o genere alguna ruptura en el sistema, pero más importante pueden ocasionar algún tipo de lesión sobre el portador. Además, de generar incomodidad y mal funcionamiento. Por otro lado, es importante tener en cuenta que el exoesqueleto no solo debe replicar o asistir el movimiento, sino también respetar la capacidad del cuerpo humano para absorber, redirigir o resistir fuerzas. Estos aspectos son claves para el desarrollo de un diseño seguro y ergonómico [5].

### 3.4.3. Articulación del codo

La articulación del codo es una de las estructuras más importantes del miembro superior, estos son extensiones flexibles que permiten alcanzar y manipular cosas del entorno. Esta articulación es una de las más prominentes e importantes, y su biomecánica es relevante en el diseño de exoesqueletos. Anatómicamente está compuesta de dos articulaciones sinoviales primarias, una es de tipo bisagra, por lo que permite la flexión y extensión del brazo de forma estable y suave, y la permite la pronación y la supinación del antebrazo. Además, es compuesta, pues involucra tres huesos diferentes: húmero, radio y cúbito.

Desde el lado biomecánico, el codo presenta un grado de libertad que viene de la flexión y extensión. Su movimiento lo realiza los músculos bíceps braquial, braquial anterior y tríceps braquial, asistidos por estructuras estabilizadoras como los ligamentos colaterales. Además, en un adulto sano su rango de movimiento se encuentra entre  $0^\circ$  y  $150^\circ$  como vimos en la Tabla 2. Por otro lado, el eje de rotación de esta articulación se alinea con el extremo distal del húmero en la región de los cóndilos [11].



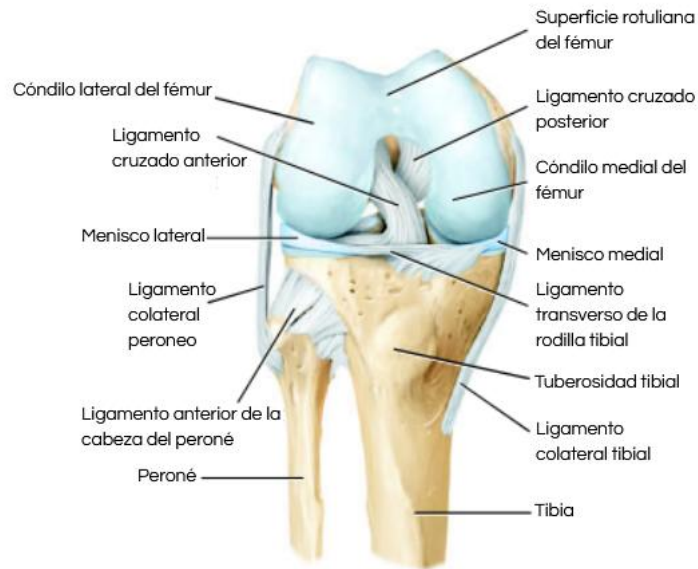
*Figura 4. Aspecto lateral del codo [11]*

#### **3.4.4. Articulación de rodilla**

La rodilla es la articulación sinovial más grande y una de las más complejas del cuerpo humano. A pesar de su cavidad articular, la rodilla está conformada por tres articulaciones sinoviales principales: una entre la rótula y el extremo inferior del fémur llamada femororrotuliana, y dos laterales entre los cóndilos femorales de arriba y los meniscos en forma de C, que en conjunto son las femorotibiales. Cada una de estas permite un movimiento, en el caso de la primera es una articulación plana, donde la rótula se desliza a través del extremo distal del fémur durante la flexión de la rodilla. Mientras que la última es una articulación de bisagra que logra la flexión y extensión.

Aunque usualmente se piensa en la rodilla como una articulación de tipo bisagra, en realidad su comportamiento es más complejo. Puesto que, en la flexión, existe una pequeña rotación axial de la tibia sobre el fémur, generando estabilidad y adaptabilidad durante la caminata. Por otro lado, la rodilla tiene un rango de movimiento de entre  $0^\circ$  y  $135^\circ$ , sin embargo, en algunos individuos existe una hipertensión fisiológica que los lleva hasta  $-10^\circ$ .

Seguidamente, la articulación de la rodilla funciona también como un amortiguador y estabilizador del cuerpo humano, es por esto por lo que posee ligamentos cruzados y colaterales que evitan desplazamientos indeseados en la rodilla. Asimismo, los meniscos funcionan como sistema de amortiguamiento. El eje de rotación está ubicado cerca de los cóndilos femorales, es importante mencionar que este eje cambia durante el movimiento debido a la geometría. [11]



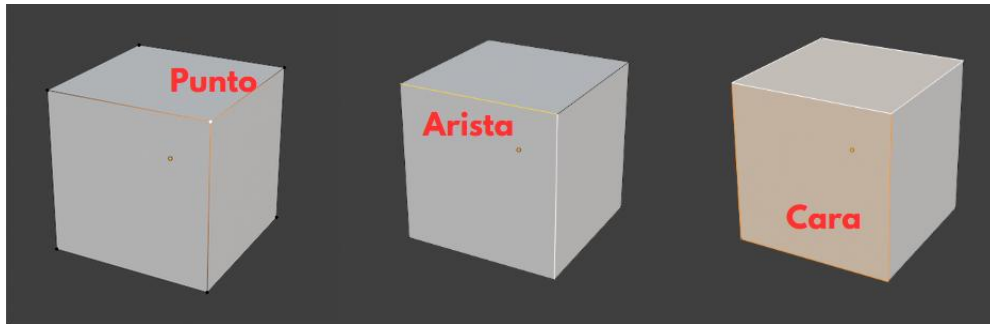
*Figura 5. Vista anterior de la rodilla [11].*

### 3.5. Modelado 3D Poligonal

El uso de software de modelado tridimensional es fundamental en ingeniería, pues este permite desarrollar, visualizar y validar antes de realizar una fabricación física. De esta manera, se obtiene un resultado más preciso, se disminuye la probabilidad de error y los costos asociados a iteraciones físicas. Existen algunos tipos de software que permiten realizar modelado 3d mediante mallas poligonales como: Blender, fusión 360, Maya, etc. Este tipo de software permite modelar de forma más precisa y hacer geometrías más complejas, lo cual es especialmente útil en modelos que requieren mayor complejidad y detalle.

Una maya poligonal está compuesta por cuatro elementos clave (Figura 6.). En primer lugar, se encuentran los vértices, estos son puntos definidos en un espacio tridimensional y marcan las coordenadas donde se unen las aristas. Luego, las aristas son segmentos que unen dos vértices y estas definen los lados los polígonos. Seguidamente, encontramos las caras, estas son superficies cerradas que forman polígonos. Deben estar formadas por tres o más vértices conectados. Los polígonos más utilizados son los cuadrangulares gracias a que son fáciles de dividir, y los triángulos. Finalmente, las normales son vectores perpendiculares a las caras que indican su orientación.

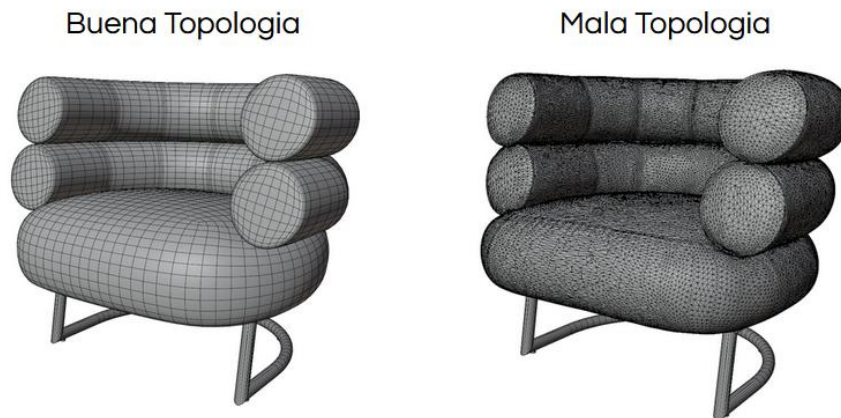




*Figura 6. Estructura básica de polígonos*

El conjunto de estos elementos define la topología de una maya. De esta manera la topología se refiere a como están conectados y organizados los vértices, aristas y caras. Una topología correcta depende de la distribución de estos elementos, lo cual es fundamental tanto para estudiar las geometrías como para temas de animación, impresión 3d o simulación física. Por lo que, tener muchos vértices en la mayoría de los casos es totalmente innecesario, pues esto genera archivos más pesados y mayor consumo de recursos. Esto quiere decir que es más difícil para un computador cargarlos y procesarlos. Sin embargo, tener pocos vértices disminuye la precisión y suavidad de la geometría, lo que puede generar cuerpos de baja calidad y con poca fidelidad. Es por esto, que es deseable tener un equilibrio según el propósito que se tenga.

Por otro lado, es importante entender que la forma de los polígonos del enmallado, también afectan en la calidad de la topología (Figura 7). El tipo de patrón más deseable es el de cuadrángulos, pues permite una calidad, suavidad y precisión suficiente en el modelo [13].



*Figura 7. Comparación entre buena y mala topología de malla poligonal*

### **3.5.1 Función de grupos de vértices y sistemas de peso**

En algunos softwares como Blender, se pueden seleccionar grupos de vértices (vertex groups) para etiquetarlos o clasificarlos en una región específica de la malla. Por ejemplo, se puede tomar el número de vértices pertenecientes a la región de los labios de un modelo de cabeza de un humano y etiquetarlos en un grupo llamado “labios”. De esta forma se puede asignar zonas móviles o fijas

en un modelo, aplicar modificadores o deformaciones localizadas, y definir puntos de anclaje o interfaces de contacto en diseños ergonómicos.

En suma, estos grupos pueden combinarse con sistemas de pesos (vertex weights) que definen cuanto influye un deformador, hueso o control sobre cada vértice. Esta técnica es ampliamente usada en animación, pues permite definir como se deforma un cuerpo cuando este se mueve. Sin embargo, esto también puede ser transportado para el diseño de exoesqueletos y sistemas mecánicos, de forma que se puede localizar los puntos de deformación de algún elemento y diseñar con respecto a eso.

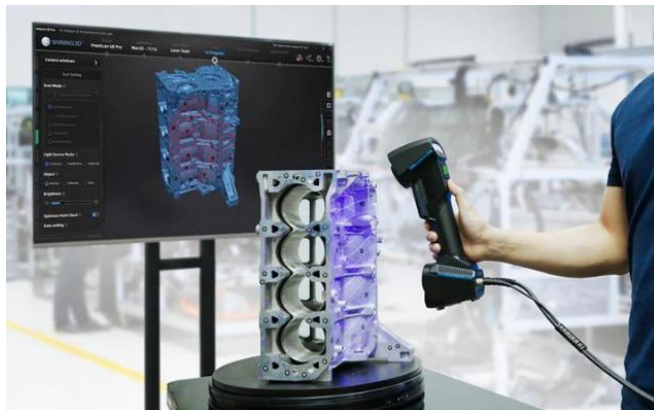
### **3.5.2 Modelos estructurados**

Otra característica importante que nos permiten los softwares de modelado por malla es localizar y etiquetar un vértice según lo que este represente. Algo importante a mencionar, es que cada vértice va a tomar un índice dentro del programa, lo que permite estructurar los modelos. De esta manera, se puede localizar el vértice de índice  $n$  que está localizado en ciertas coordenadas y representan un punto importante en el modelo. Por ejemplo, el vértice puede indicar varios puntos clave en un cuerpo humano, como la punta de la nariz, hasta donde llega el hombro o la altura máxima del cuerpo.

Lo anterior permite, que se puedan encontrar algunos datasets en la web compuestos por modelos que ya están estructurados. Lo que ayuda a analizarlos de manera automatizada y fácil. Además, cuando se trata de datasets de cuerpos humanos, en su mayoría incluyen metadatos sobre sexo, edad, etnia, peso, etc., de cada modelo.

## **3.6. Escaneo 3D en Cuerpos Humanos**

El escaneo 3D es una herramienta clave que se ha consolidado durante los últimos años para la digitalización anatómica y de formas que resultan complejas. Esto da la posibilidad de obtener formas precisas y algunos casos de texturas (Figura 8). así entonces, el resultado es una nube de puntos que representan la figura del objeto. Luego, mediante software especializado y métodos numéricos se transforman en mallas poligonales y se filtran los puntos dejando superficies suaves.



*Figura 8. Escaneo 3D de un cuerpo mediante luz visible*

Existen diferentes instrumentos para realizar escaneos. Es importante destacar que la precisión y exactitud de la malla va a depender del escáner que se use, teniendo en cuenta la sensibilidad, resolución y calibración de este. Además, es clave el posprocesamiento que se realice. Cada instrumento tiene su propio principio físico detrás, algunos toman múltiples imágenes desde distintos ángulos que permiten detectar puntos en común construyendo la nube a partir de coincidencias geométricas. Otros, proyectan un patrón de luz como rejillas o franjas sobre la superficie, de forma que una o más cámaras logran detectar la deformación del patrón sobre la geometría.

En este punto, se pueden encontrar varios datasets de escaneos 3d de cientos de cuerpos de diferentes personas. Sin embargo, es importante tener en cuenta la calidad del escaneo, los métodos de posprocesamiento usados y el formato del archivo.

### **3.7. Técnicas de Machine Learning**

Los exoesqueletos tradicionalmente están diseñados bajo un enfoque estático y generalizado, donde las dimensiones para el dispositivo se han clasificado siguiendo medidas promedio de poblaciones, especialmente de poblaciones norteamericanas y europeas. Lo cual se debe en gran medida a que, en su mayoría, el desarrollo de exoesqueletos está liderado por estas poblaciones. Por lo que, no se refleja la variabilidad real entre individuos, dificultando la adaptabilidad del dispositivo y la escalabilidad.

Así entonces, el machine learning puede representar una herramienta con la capacidad de parametrizar y caracterizar las diferentes medidas del cuerpo, teniendo en cuenta grandes volúmenes de datos y de una forma más dinámica, automatizada y adaptativa. Todo esto, gracias a su capacidad de aprender patrones. De esta forma, con estas técnicas se pueden agrupar usuarios con similitudes estructurales.

#### ***3.7.1. Clustering: Clasificación de morfologías humanas***

El Clustering es una técnica fundamental en el aprendizaje no supervisado que consiste en dividir un conjunto de datos en grupos o “clusters”, buscando que los puntos de cada conjunto tengan una mayor similitud entre sí que con los puntos de otros grupos. Todo esto sin necesidad de etiquetas previas. De esta manera se puede clasificar extensos bancos de datos en diferentes conjuntos o clases. En el contexto de morfologías humanas, esta técnica es fundamental para lograr clasificar los usuarios en categorías como “talla S, M o L”, el clustering permite descubrir estructuras como: “brazos largos, pero torso corto”, “tórax amplio y piernas cortas”, o “cuerpo delgado con extremidades robustas”. Por lo que, además, se pueden identificar las diferentes combinaciones en las características del cuerpo, permitiendo un diseño más minucioso.

Por otro lado, el clustering ayuda a identificar “outliers” de forma más fácil. Estos datos son muy enriquecedores ya que permite especializar o maximizar la adaptabilidad del exoesqueleto de forma que este realmente se ajuste a cada subgrupo.

Definición formal:

Dado un conjunto de datos  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  donde cada  $x_i \in \mathbb{R}^d$ , el clustering busca encontrar una partición  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$  tal que [14]:

1.  $\bigcup_{i=1}^k C_i = X$  (todos los puntos pertenecen a algún cluster)
2.  $C_i \cap C_j = \emptyset$  para  $i \neq j$  (los clusters no se solapan)

Para cuantificar las similitudes entre datos existen varias medidas de distancia. Una de ellas es la distancia euclidiana, que se define como la raíz cuadrada de la suma de las diferencias al cuadrado entre los componentes de dos vectores (Ecuación 1.), esta es bastante utilizada en espacios métricos. También, encontramos la distancia Manhattan, que suma las diferencias absolutas entre componentes (Ecuación 2.), y la distancia coseno que mide el ángulo entre vectores y es particularmente útil en procesamiento de texto (Ecuación 3.) [14].

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^d (x_i - y_i)^2} \quad (1)$$

$$d(x, y) = \sum_{i=1}^d |x_i - y_i| \quad (2)$$

$$d(x, y) = 1 - \frac{xy}{\|x\|\|y\|} \quad (3)$$

El algoritmo K-Means es uno de los algoritmos populares, este divide el grupo en k grupos y busca minimizar la suma de las distancias cuadradas entre los puntos al centroide más cercano (Ecuación 4.), recalculando estos centroides de manera iterativa hasta alcanzar una convergencia. A pesar de esto, se deben de especificar el número de grupos, además, el algoritmo es sensible a una inicialización aleatoria de los centroides [15].

$$J = \sum_{j=1}^k \sum_{x \in C_j} \|x - \mu_j\|^2 \quad (4)$$

Donde  $\mu_j$  es el centroide del cluster  $C_j$ , calculado como el promedio de los vectores dentro del grupo:

$$\mu_i = \frac{1}{|C_i|} \sum_{x \in C_i} x$$

De esta forma, como demuestran las ecuaciones (1) a (4), la calidad de la segmentación va a depender directamente de la métrica de distancia seleccionado y el algoritmo. Aunque K-Means ofrece eficiencia computacional [15], es esencial especificar el número de grupos que se quieren.

## 4. Metodología

### 4.1. Búsqueda y Selección de Datasets del Cuerpo Humano en 3D.

Reunir una base de datos robusta que incluya todas las diferentes características antropométricas del cuerpo humano (altura, peso, IMC, etc.), es fundamental para abordar el diseño del exoesqueleto. No obstante, generar este conjunto de datos a partir de mediciones directas o escaneos individuales requiere de una muestra lo suficientemente amplia, una gran cantidad de recursos y contar con la suficiente cantidad de personas que posean características distintas. Es por esto por lo que se optó en realizar una basta búsqueda de datasets del cuerpo humano escaneados en 3d y modelos generativos sintéticos, desarrollados a partir de estudios antropométricos reales. De esta forma, se tiene una gran cantidad de datos de muchas personas con diferentes formas anatómicas, abarcando variedades como edad, sexo, grupo étnico y condiciones físicas. En la Tabla 3, se realiza la recopilación de los diferentes datasets y modelos encontrados.

Así, se hizo una recopilación de los diferentes datasets encontrados y se realizó una revisión técnica de cada uno de estos. Se espera que, de esta forma, se pueda identificar una fuente confiable que ofrezca una amplia cantidad de modelos, alta diversidad morfológica, estructura anatómica realista, y buena estructura topológica. En la Tabla 3, se enlista los diferentes datasets encontrados.

Tabla 3. Lista de Datasets

Dataset	Tipo	Características clave
MPI-FAUST	Escaneos reales	Alta precisión, pero limitado número de sujetos (~10)
CAESAR	Escaneos reales	Amplia base poblacional, difícil acceso completo
RENDER-PEOPLE	Modelos fotogramétricos	Visualmente realistas, pensados para animación/render
SMPL-X	Modelo paramétrico	Parametrizable, buena topología, rigging incorporado
Human3.6M	Datos animados	Orientado a detección de poses, menos útil para geometría detallada
MPII Human Shape	Mixto (pose + forma)	Basado en SMPL, menos flexible que SMPL-X
SCAPE	Modelo deformable	Orientado a poses y animación, resolución limitada

Aunque cada dataset tiene sus partes positivas, teniendo en cuenta los parámetros evaluados, el modelo de SMPL-X es el que mejor los cumple. SMPL-X (Skinned Multi-Person Model eXtended) ha sido desarrollado por el Max Planck Institute for Intelligent Systems. La elección del modelo se fundamenta más concretamente en que es un “add-on” de blender que permite generar miles de cuerpos de humanos de forma sintética, variando ciertos parámetros clave como altura, peso, genero, edad, etc. Es importante mencionar que este modelo fue entrenado a partir de escaneos de cuerpos humanos reales [16], por lo que, estos cuerpos “sintéticos” poseen coherencia anatómica y son fieles a las proporciones reales de un ser humano. Por otro lado, los modelos generados, están totalmente estructurados, lo que permite manipularlos más fácilmente. Además, sus mallas tienen una topología limpia y homogénea, ideal para manipular la superficie del brazo correctamente. Asimismo, la densidad de vértices es suficiente y la calidad de los modelos es bastante alta. Cada modelo incluye un esqueleto riggeado y articulaciones definidas lo que facilita poder cambiar la pose de cualquier cuerpo en caso de ser necesario. Por último, este “add-on” es accesible bajo una licencia educativa sin ninguna limitación, a diferencia de otros datasets que solo poseen licencias comerciales o tienen restricciones en su uso.

## 4.2. Generación de Cuerpos

Como se mencionó antes, SPML-X es un modelo paramétrico que permite generar cuerpos sintéticos. De esta forma se debe generar una base de datos de cuerpos para obtener los datos necesarios sobre las superficies del brazo y la pierna, así se podrá realizar clustering sobre estos datos. Para ello Blender funciona un papel muy importante, ya este puede ser usado tanto como entorno de modelo como de scripting.

El equipo de desarrollo permite integrar SMPL-X con Blender (Figura 9.). Este “add-on” puede ser manipulado de forma manual directamente en el panel o mediante programación usando Python a través del panel de scripting de Blender.

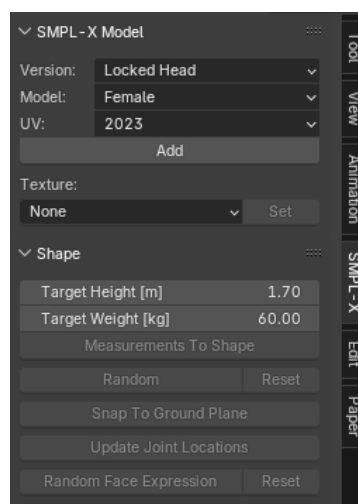


Figura 9. Panel de SMPL-X integrado en Blender.

Puesto que la generación de cientos de modelos de cuerpos es demorado e ineficiente, la mejor solución es realizar un código en Python (GitHub con todos los archivos de código en Anexo A.) que permita automatizar el proceso. De tal manera, que el propio código se encargaría de generar cuerpo por cuerpo tomando valores aleatorios usando la función “random\_shape” del propio add-on. Con este procedimiento, es posible generar la cantidad de cuerpos que se deseen. En esta ocasión se generaron un total de cuatrocientos modelos, siendo un 50% de hombres y el otro 50% de mujer. Se espera que esta cantidad sea suficiente.

#### 4.2.1. Grupos de vértices

Algo importante durante la generación de cuerpos es que se debe obtener los grupos de vértices correspondientes a las partes o superficies que posteriormente se van a separar de la figura para hacer un análisis más enfocado y especializado. Aunque los modelos de SMPL-X ya vienen con estos grupos de vértices, muchos de ellos están sucios, es decir, se incluyen vértices que no corresponden al grupo. Debido a esto, se debe limpiar los grupos de vértices y para esto se va a hacer un pequeño programa con Python para encontrar la lista de índices de los vértices deseados, simplemente seleccionándolos en Blender. Luego se crea un archivo “csv” con el nombre de cada grupo y los respectivos índices. Así, se podrá crear grupos de vértices de forma automática en cada modelo simplemente cargando el archivo csv (Figura 10.). Todo esto gracias a que los modelos están bien estructurados.

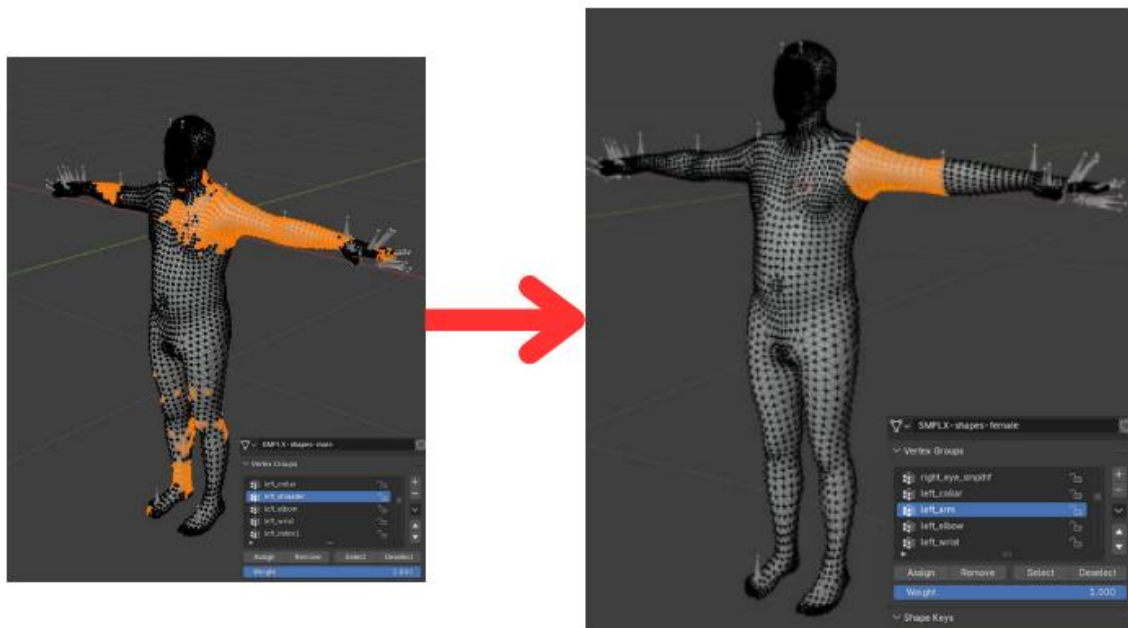
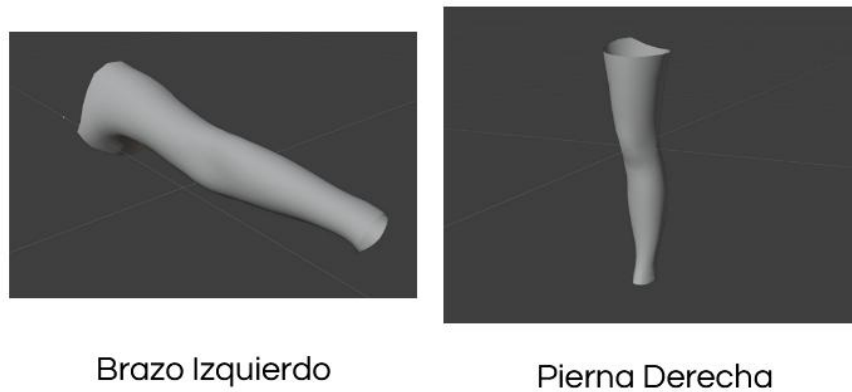


Figura 10. Reestructuración de los grupos de vértices

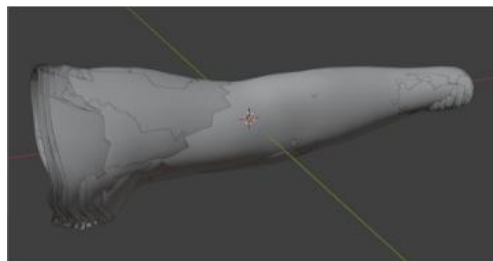
#### 4.2.2. Separación de Superficies

Un punto importante que considerar dentro de la generación de cuerpos para consolidar una buena base de datos es la optimización de recursos de computación y de memoria, además, de optimizar el proceso. Es por esto, que se decidió exportar estrictamente y por separado las partes que se van a estudiar para el diseño del exoesqueleto. De esta manera, los grupos de vértices son supremamente importantes, estos ayudarán a separar las partes basado en aquellos grupos. En este caso, se quiere separar las superficies correspondientes al brazo y pierna. Por lo que, una vez obtenido los grupos de vértices para estas superficies, mediante un código en Python, es posible generar un modificador booleano que nos separe cada superficie (Figura 11.). Así se puede exportar uno a uno cada modelo de brazo y de pierna en formato “obj”.



*Figura 11. Objetos exportados luego de ser separados.*

Es importante mencionar, que cada modelo debe posicionarse en el origen con respecto a un vértice clave antes de ser exportado, de tal manera que se puedan alinear posteriormente todos los objetos exportados sobre ese vértice. En el caso del brazo ese vértice corresponde al eje de rotación del codo y para la pierna lo es para el eje de rotación de la rodilla (Figura 12.). Esta estandarización espacial es clave porque de esta forma es posible encontrar una superficie promedio al compartir un sistema de coordenadas común.



*Figura 12. Cuatrocientas superficies del brazo izquierdo sobrepuestos y alineados en el eje de rotación del codo.*



Este procedimiento es importante porque nos va a permitir obtener una base de datos estructurada en las diferentes partes del cuerpo. Cabe mencionar, que es fundamental guardar los metadatos de cada modelo, ya que describen las características morfológicas latentes del cuerpo a través de un vector conocido como betas, propio del modelo SMPL-X. Las betas, son coeficientes que controlan la forma del cuerpo generado, y están vinculados a una base estadística derivada de escaneos humanos reales. Cada valor en el vector betas representa una deformación a lo largo de un modo principal de variación (similar a los componentes principales de un PCA). En otras palabras, son los parámetros que definen la estructura del cuerpo más allá de simples medidas físicas como peso o estatura, y permiten reconstruir o comparar cuerpos de manera matemática.

Los metadatos van a servir posteriormente para aplicar algoritmos de clustering. Pueden ser guardados en un archivo csv o un json, e incluyen el número del modelo, genero, estatura peso, y las betas correspondientes (Tabla 4.).

*Tabla 4. Ejemplo de estructura de Metadatos.*

Num_modelo	Genero	Estatura (m)	Peso (kg)	IMC	Beta_0	Beta_1	...	Beta_n
1	Male	1,78	75	23,67	0,014	-0,009	...	0,015
2	Male	1,74	68	19,81	-0,045	0,008	...	0,005
...	...	...	...	...	...	...	...	..
n	Male	1,85	82	14,54	0,021	-0,002	...	-0,012
1	Female	1,65	62	20,65	0,017	0,0015	...	0,02
2	Female	1,72	74	26,3	0,038	0,008	...	-0,004
...	...	...	...	...	...	...	...	...
n	Female	1,68	55	20,51	-0,021	0,001	...	0,015

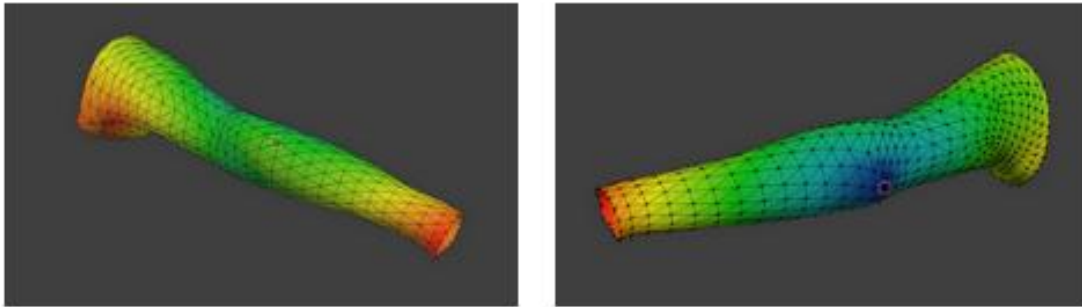
### 4.3. Análisis Estadístico

Ahora bien, cada archivo obj exportado contiene una malla poligonal compuesta por vértices con coordenadas en el espacio tridimensional (x, y, z). Por lo que se puede generar una base de datos que contenga las coordenadas para cada vértice de cada modelo. De esta forma se obtendría cuatrocientas coordenadas para el mismo vértice  $n$ . Para ello, se puede correr un script usando Python por medio de Blender en el que haciendo un recorrido se puede almacenar la información de manera estructurada, de nuevo en un csv.

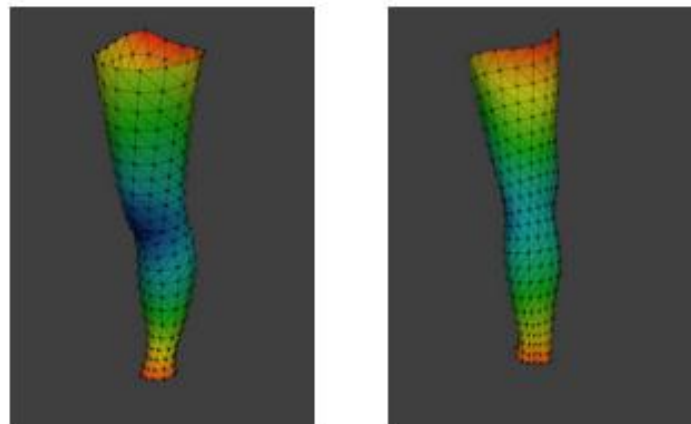
Entonces, es posible crear una matriz de datos por vértice, donde todos los modelos comparten la misma estructura topológica, lo que permite comparar vértices equivalentes entre sí. Haciendo uso de herramientas estadísticas y de algunas librerías de Python, se puede organizar los datos según convengan y hacer un estudio estadístico simple. Gracias a este estudio es posible encontrar las coordenadas promedio de cada vértice y su respectiva desviación estándar, esta última nos indica que tanta variabilidad hay entre las diferentes coordenadas de un vértice. Así, se conseguiría una superficie promedio, que resume las características estructurales más frecuentes en la parte del

cuerpo humano analizada. Lo que significa, que diseñar sobre esta superficie haría un dispositivo que se ajuste al promedio de personas.

Además, teniendo en cuenta la desviación estándar, se puede interpolar los resultados obtenidos a valores entre cero y uno. De esta forma se puede hacer uso de los sistemas de peso (vertex\_group\_weight) que incorpora Blender para visualizar sobre la superficie de las zonas donde más desviación hay en los datos. Entonces, cada vértice sobre la superficie promedio tendría un valor en el sistema de peso teniendo en cuenta su desviación estándar (Figura 13 y 14).



*Figura 13. Visualización de la desviación estándar para el brazo promedio.*



*Figura 14. Visualización de la desviación estándar para la pierna promedio.*

Con base a la visualización de la desviación estándar en el brazo y pierna, las zonas rojas son aquellas donde la desviación es muy cercana a uno, es decir es muy alta. Mientras que las zonas más azules son aquellas donde la desviación es muy baja o cercana a cero. Esto indica que aquellas zonas de baja desviación representan zonas anatómicamente estables y de poca variabilidad geométrica, mostrando que esos puntos pueden considerarse confiables para definir estructuras fijas del exoesqueleto.

#### 4.4.Clustering

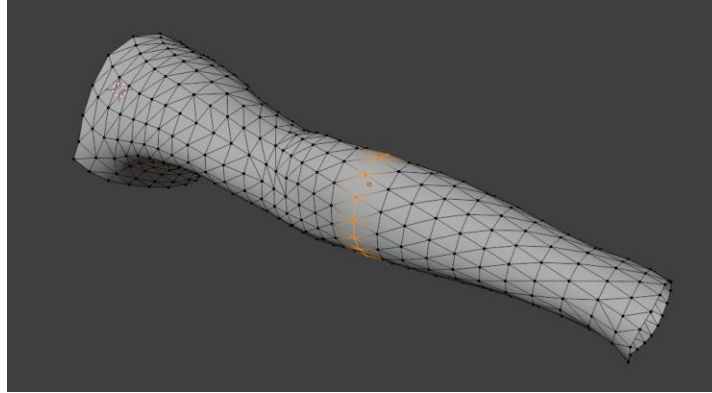
Aunque el análisis estadístico evidencia que en muchas regiones del brazo la desviación estándar de los vértices es baja, esta condición no resulta suficiente para garantizar un diseño robusto y funcional para toda la población objetivo. Ya que, el promedio tiende a suavizar las diferencias extremas, lo que oculta casos particulares importantes. Además, en este análisis hay un montón de outlayers que no se están tomando en cuenta, lo que puede limitar la adaptabilidad del exo.

Para abordar esta limitación, se optó por incluir un sistema de tallaje estructurado. Este sistema permitirá que no solo se reduzcan las variaciones significativas entre usuarios, sino que también disminuirá los outlayers y podrá incluir a muchas más personas para que estas sean representadas y tenidas en cuenta dentro del diseño. Con esto, se mejora la cobertura del exoesqueleto y su capacidad de adaptarse al mayor número de personas sin ningún problema. De esta manera, se usarán métodos de machine learning, más específicamente algoritmos de clustering para clasificar los diferentes tamaños de brazos dentro de un grupo o clúster.

Antes de aplicar cualquier algoritmo de clustering, es necesario definir un conjunto de características cuantitativas que representen la forma de cada brazo. Con esto en mente, se deben generar las siguientes medidas:

- Longitud total del Brazo
- Longitud total de la pierna
- Grosor de la zona proximal (brazo)
- Grosor de la zona distal (antebrazo)
- Grosor de la zona proximal (Muslo)
- Grosor de la zona distal (Pierna)

Estas características son relevantes para el diseño del exoesqueleto, además de representar variaciones significativas entre usuarios. Pueden ser obtenidas una vez más con ayuda de Python a través de Blender. La estrategia es sencilla, hay que encontrar dos vértices que correspondan a los puntos A y B, que representen los extremos anatómicos claros, como el deltoides y la muñeca para longitud. De tal forma, se puede hallar la distancia euclidiana entre los puntos seleccionados, es decir, la diferencia entre los vectores de posición del punto A y el punto B. Sin embargo, para hallar el grosor no es tan sencillo, este procedimiento es un poco más elaborado. Para ello, se debe hacer la suma entre la diferencia de las coordenadas de los vértices que componen la zona de mayor grosor de la zona. Por ejemplo, del antebrazo (Figura 15).



*Figura 15. Vértices que representan la zona de mayor grosor en el antebrazo.*

Ya con las características cuantitativas tanto para el brazo como para la pierna, se puede realizar aplicar métodos de machine learning, específicamente el método de clustering no supervisado. De esta forma, el objetivo es clasificar 400 modelos tanto de pierna como de brazo en grupos según sus características. Usando el algoritmo de K-Means, ampliamente utilizado por su simplicidad, rapidez y buen rendimiento en datos bien estructurados, para obtener tres clusters correspondientes a las tallas “S, M y L”.

#### **4.5. Superficie Promedio**

Con las tallas ya definidas y los modelos etiquetados en su respectivo grupo. Entonces ahora podemos obtener las superficies promedio con sus desviaciones estándar pertinentes para cada tallaje, siguiendo el mismo método realizado anteriormente. De esta manera, se obtienen tres superficies promedio por cada parte del cuerpo que corresponden a las tallas S, M y L.

Para la obtención de las nuevas mallas correspondientes a las superficies promedio, se debe seguir un procedimiento un poco diferente. Blender por su naturaleza no funciona bien si generamos cada vértice en la coordenada promedio y luego generamos el enmallado, pues el programa no identifica correctamente como deben ir las conexiones (aristas) entre vértices. Por esto, se debe tomar uno de los modelos generado (no importa cuál sea) y actualizar la coordenada de cada vértice con las coordenadas promedio obtenidas. De esta manera Blender lo que hace es simplemente mover cada vértice, pero manteniendo las aristas y por tanto la topología. Esto se puede realizar mediante un recorrido en Python. Usando este método se simplifica y se facilita mucho más la obtención de las nuevas superficies.

#### **4.6. Diseño del Exoesqueleto**

Gracias al tallaje y a las superficies promedio encontradas, ahora es posible realizar un diseño geométrico del exoesqueleto teniendo en cuenta la morfología real de los usuarios. Esta estrategia permite diseñar dispositivos más ergonómicos, específicos y funcionales, manteniendo el modularidad y reduciendo la necesidad una personalización total.

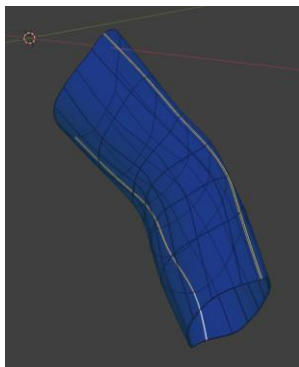
Ahora, el diseño se puede abordar desde un enfoque modular y segmentado, donde se construye cada parte del exoesqueleto teniendo en cuenta la base anatómica correspondiente a cada talla.

Aunque, por efectos del proyecto, en este caso solo se realizará el diseño para el brazo de talla M. Teniendo en cuenta, que este diseño es parametrizable, se puede escalar fácilmente a las otras tallas. Sin embargo, no se obtendrá un diseño para el resto de las partes del cuerpo. También cabe aclarar que este proceso de diseño se hará mediante diversas iteraciones, que serán validadas cada una mediante una construcción del dispositivo usando impresión 3d. Así, hasta llegar a un diseño final que permita el movimiento, se adapte, se acople de manera efectiva al brazo y se alinee correctamente con el eje de rotación del codo.

#### ***4.6.1. Diseño de manga para el brazo***

Se decidió que el exoesqueleto tenga un enfoque vestible, es decir, diseñado para que pueda ser llevado directamente sobre el cuerpo del usuario, similar a una prenda, pero sin perder esa capacidad de transmitir fuerza hacia el sistema musculoesquelético. De esta manera se logra un ajuste cómodo, bueno y de fácil colocación y adaptabilidad a la posible variabilidad de brazos. Entonces, lo primero que se debe diseñar es la manga, sobre la que va a estar posicionado tanto el motor como la estructura que permite transmitir la fuerza del motor. En este caso, Blender es la mejor opción para diseñar este tipo de elementos, ya que en este software se pueden modelar prendas de vestir de forma sencilla. Hay diversos métodos que se pueden seguir para diseñar la manga, pero la forma más fácil es realizar un patrón sobre el brazo y luego usando las físicas de Blender para ropa conseguir el ajuste necesario. Puede ser útil hacer uso de la brocha para perfeccionar y corregir algunas partes de la manga (Figura 24.).

Luego, hay que conseguir el patronaje de la manga para poder construirla, este se puede realizar usando la función de “UV Wrapping” que permite pasar de un objeto 3d a una imagen en 2d. Para esto se debe marcar las líneas de corte del objeto. En este caso se marcaron dos líneas de corte para la manga (Figura 17.). El patronaje a escala real obtenido se puede encontrar en el Anexo A.



*Figura 16. Líneas de corte para el patronaje de la manga.*

#### ***4.6.2. Diseño de la estructura***

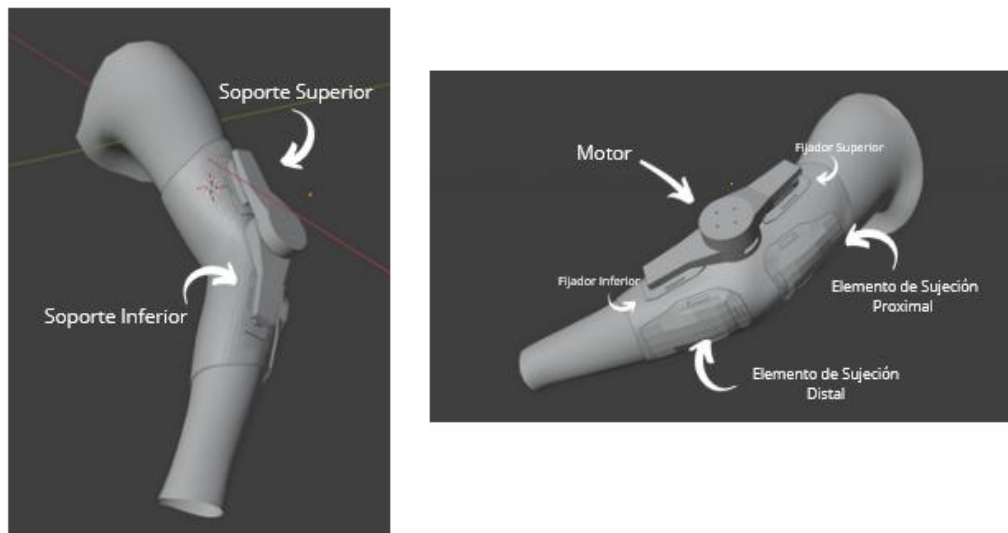
Para el diseño de la estructura se busca cumplir con el objetivo de conseguir la modularidad del dispositivo, además de tener en cuenta la desviación sobre la superficie, que se puede visualizar gracias a los “vertex\_group\_weights”. Siendo las zonas con alta concentración de color azul el espacio adecuado para ubicar las estructuras de sujeción del exoesqueleto (Figura 23.). Asimismo,

el diseño se debe plantear para poder integrar un motor RDM-L-5010 de Myactuator (Figura 16.). Teniendo en cuenta lo anterior, se logró un primer diseño como un acercamiento inicial hacia un sistema que combina ergonomía y rigidez estructural (Figura 17.).



*Figura 17. Motor RMD-L-5010 de Myactuator [17].*

En este primer diseño propuesto, se ubicaron elementos de sujeción que permiten situar de forma correcta el exoesqueleto y dar mayor estabilidad al sistema. Estos se ubicaron en la parte anterior del brazo, pues esta zona es una de las más estables frente a la desviación en la superficie de distintas personas. Estos elementos también sirven como protección para el brazo hacia a posibles golpes o caídas y van cosidos directamente a la manga. Por otro lado, se diseñaron fijadores que permiten unir los soportes a la manga, estos se ubican de nuevo dentro de la zona de baja desviación y se cosen directamente. Por último, se encuentran los soportes, que permiten transmitir la potencia del motor al sistema musculoesquelético para que el exoesqueleto cumpla con su función. Además, son los que sostienen y ubican el motor (Figura 18.).

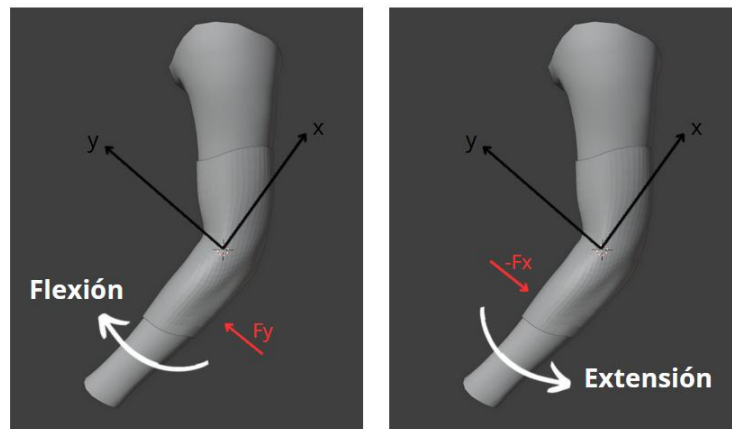


*Figura 18. Primera iteración de diseño del exoesqueleto*

Este diseño fue descartado rápidamente, ya que no lograba transmitir la fuerza como se requiere. Puesto que la manga no es una restricción rígida y al realizar fuerza en la dirección que corresponde, esta se estira o simplemente se desliza a través del brazo. De forma, que se pierde

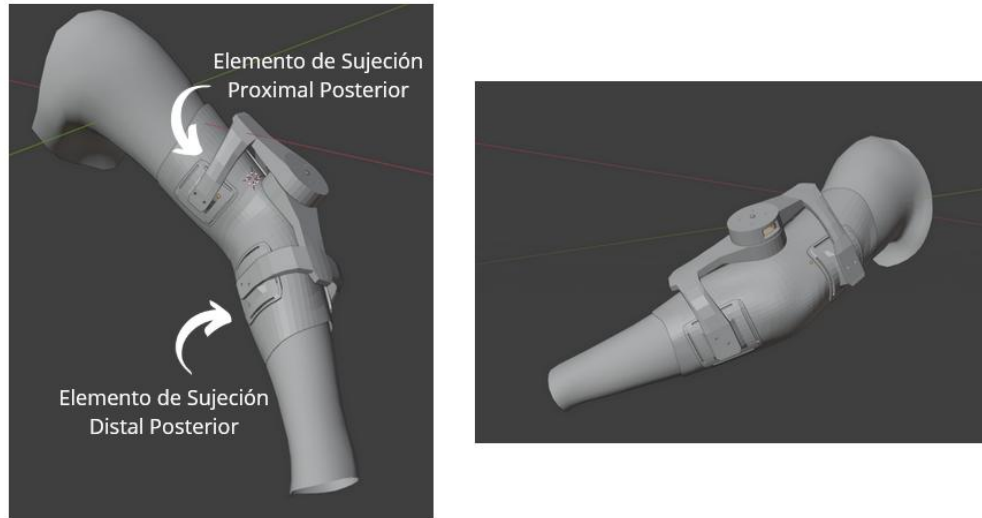
esa capacidad del exoesqueleto de darle fuerza y resistencia al brazo. Es por esto, que se decidió iterar sobre el diseño.

La nueva iteración se realizó teniendo en cuenta el problema ya mencionado, por lo que se incluyeron dos nuevos elementos de sujeción en la parte posterior del brazo y se llevaron los soportes a que se unan directamente de estos elementos. De forma que los fijadores se eliminan totalmente, puesto que su propósito no cumple con lo deseado. Así, el sistema puede transmitir potencia al sistema musculoesquelético, considerando el movimiento de flexión y extensión (Figura 19.).



*Figura 19. Diagrama de fuerzas sobre en movimientos de flexión y extensión sobre el brazo.*

Esta nueva iteración también rediseña la estructura de los elementos de sujeción. El anterior diseño era difícil de imprimir por su forma, no guardaba la estética del diseño y no se adaptaban correctamente a la superficie sobre la que estaban ubicados. Además, el sistema de unión entre soportes y fijadores se hacía mediante interferencia entre ambas piezas, de forma que el armado era bastante difícil y se descajaba al hacer movimientos bruscos. De esta manera se consiguió un nuevo diseño que mejora en gran parte el anterior (Figura 20.).



*Figura 20. Segunda iteración de diseño del exoesqueleto.*

Esta segunda iteración realmente mejora gran parte de los problemas anteriores, pues su reestructuración si permite transmitir fuerza a través de los brazos en forma de “U” que se sujetan en la parte posterior y anterior del brazo. Además, el diseño de los nuevos elementos de sujeción se ajusta perfectamente al brazo y su impresión es mucho más sencilla. A pesar de esto, el sistema aún tiene ciertos problemas, pues no se tuvieron en cuenta bien algunas distancias entre los elementos de sujeción, impidiendo el movimiento total de brazo. Esto se debe a que chocan los soportes a cierto grado de flexión. Por otro lado, el problema más importante se encuentra en el eje de alineación del motor. Como se mencionó anteriormente en repetidas ocasiones, es de suma importancia que el actuador se encuentre bien alineado, para evitar fuerzas no deseadas que puedan dañar el motor, generar esfuerzos innecesarios o crear lesiones al usuario.

La mala alineación del motor no se debe a un mal posicionamiento. La razón es que en el diseño no se está tomando en cuenta la forma en que el codo genera el movimiento. Cuando el brazo se flexiona, no solo genera una rotación en el codo, sino que también se expande un poco, gracias a la naturaleza de los ligamentos. Esto genera que el eje de rotación cambie levemente en su posición. Para esto, se implementó un sistema de expansión y contracción que permita al motor auto posicionarse en el eje de rotación. El sistema se nombró como: “Unidad de longitud variable (ULV)” (Figura 26.). El ULV permite que los soportes se expandan y contraigan en la dirección longitudinal de una forma específica, pero sin perder la capacidad de transición de fuerza del dispositivo.

Por otro lado, se hizo un leve alargamiento en el soporte inferior y un reposicionamiento en los elementos de sujeción distales. De esta manera, se soluciona el problema de restricción en el movimiento, evitando que las partes choquen. Por último, se agregaron pequeños alojamientos para posicionar insertos de calor roscados. Estos insertos permiten fijar y unir las diferentes partes del sistema mediante tornillos. Lo que además de solucionar los problemas que se tenían anteriormente en la unión y ensamblaje del sistema, permite el modularidad del dispositivo,



cumpliendo perfectamente con este objetivo. Así entonces, se obtuvo el diseño final para el exoesqueleto (Figura 27 y 28.).

## **4.7. Manufactura y Construcción del Exoesqueleto**

### **4.7.1. Manufactura**

La manufactura del prototipo es sumamente importante para validar el diseño. Como se mencionó en la sección 4.6., este proceso va de la mano con el diseño CAD del dispositivo. Puesto que se está siguiendo un procedimiento iterativo para lograr un diseño final. Por lo que la manufacturación se realiza para cada diseño establecido y este se valida con el producto ya manufacturado. Para construir cada diseño se usaron métodos de rápido prototipado, como la impresión 3d. De esta manera, se utilizó un material barato y de fácil acceso como el Ácido Poliláctico o PLA para construir cada parte del diseño. Las impresiones fueron realizadas directamente usando las impresoras dispuestas por la universidad (Figura 21.).



*Figura 21. Impresoras 3d marca anycubic del laboratorio Mecha de la universidad.*

Por otro lado, para la manga, se usó tela deportiva que tiene la capacidad de ser muy flexible, de forma que se ajusta perfectamente al brazo del usuario. De esta manera, es posible fabricarla mediante el patronaje encontrado gracias a la herramienta de “UV Wrapping” en Blender (Anexo A.). Por lo que, se obtienen dos pedazos de tela con el patrón establecido que pueden ser unidos mediante costura. En esta ocasión para obtener prototipos rápidos, se usó una máquina de coser marca “brother” dispuesta por la universidad (Figura 22.). Sin embargo, para el producto funcional final, se mandó a coser por una personal profesional para obtener el mejor acabado en la costura.



*Figura 22. Máquina de coser marca Brother.*

#### **4.7.2. Construcción**

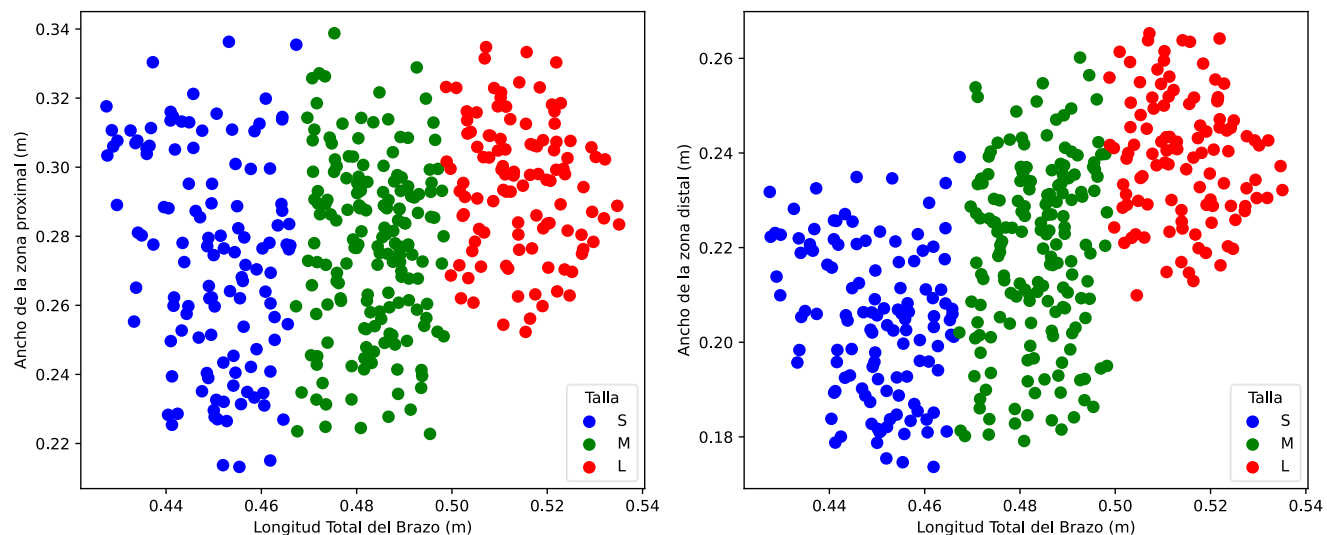
La construcción o armado del sistema es realmente muy sencillo de realizar, todo esto gracias al ser un diseño modular. Para construirlo primero hay que agregar los insertos de calor roscados en los alojamientos destinados usando calor. En este caso se usó un cautín que por su forma permite colocarlos muy fácilmente. Luego se deben coser cada uno de los elementos de sujeción en cada una de sus pestañas. El posicionamiento de los elementos es la parte más complicada pues hay que tomar bien las medidas y las guías sobre la tela usando tiza. Finalmente se unen los soportes con el resto mediante tornillos.

### **5. Resultados**

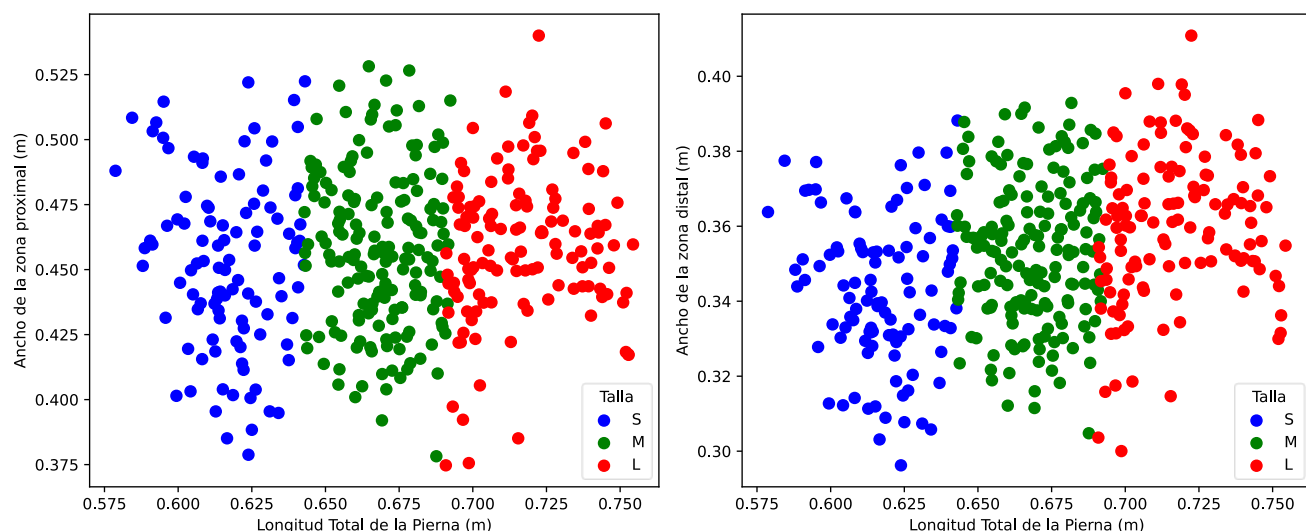
En esta sección se presentan los resultados relevantes con respecto a la metodología implementada. Se incluyen la clasificación morfológica hallada mediante clustering y el diseño geométrico del exoesqueleto modular con respecto a las diferentes tallas establecidas. Estos resultados permiten evaluar la viabilidad del enfoque propuesto y su capacidad para representar de forma precisa la diversidad antropométrica del cuerpo humano.

#### **5.1. Resultados del clustering**

Siguiendo la metodología, se aplicó el algoritmo K-Means con  $k=3$ , es decir, 3 clusters o grupos. Para ambos casos (brazo y pierna) se obtuvieron las siguientes clasificaciones:



Grafica 1. Clustering del brazo para  $k=3$ .



Grafica 2. Clustering de la pierna para  $k=3$ .

Como se puede observar en ambas graficas, los grupos de tallas están claramente divididos por la frontera de decisión, esto demuestra que hay un conjunto de características fuerte que permite una clara agrupación de los modelos. La talla “S” corresponde a las personas con longitudes de brazos y pierna más pequeñas, mientras que la “L” corresponde a las longitudes más grandes, la “M” es un intermedio entre ambas. Esta agrupación, se genera de esta forma porque la longitud del brazo y de la pierna es la característica que más afecta a la adaptabilidad de exoesqueleto. Por otro lado, se puede notar que si bien, para la zona distal del brazo y la pierna el ancho es menos variable y suele ser proporcional a la longitud de estos, para las zonas proximales no lo es tanto. Lo que nos

muestra, que en esta región hay que prestar especial atención a este factor para maximizar la adaptabilidad.

Asimismo, la cantidad de outliers es baja. Cabe aclarar que estos dependen de la tolerancia que se tome. Sin embargo, en las gráficas es posible evidenciar que muy pocos datos se salen de la tendencia. En la Tabla 5. y 6., se puede ver la frecuencia y el porcentaje de modelos por talla.

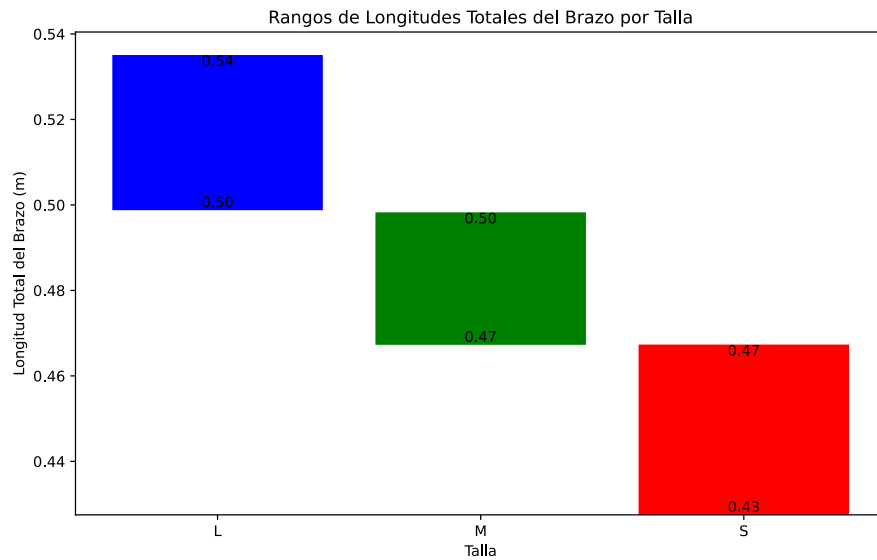
*Tabla 5. Frecuencia y porcentaje de repartición de los diferentes modelos por talla para el brazo.*

Talla	N° de Modelos	Porcentaje
S	121	30,25%
M	169	42,25%
L	110	27,50%

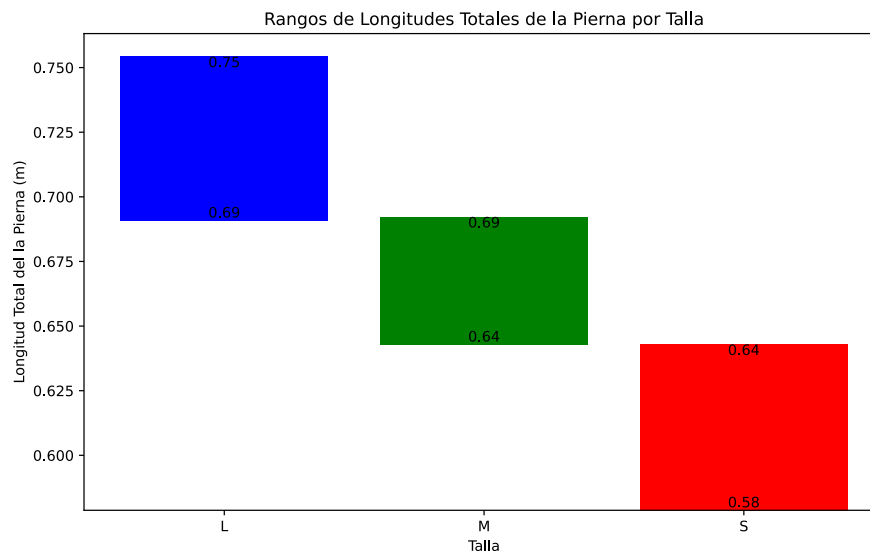
*Tabla 6. Frecuencia y porcentaje de repartición de los diferentes modelos por talla para la pierna.*

Talla	N° de Modelos	Porcentaje
S	126	31,50%
M	171	42,75%
L	103	25,75%

También, es importante definir claramente las fronteras de cada cluster, es decir, las tallas. En las siguientes gráficas, se puede encontrar, los rangos de longitudes totales tanto del brazo como de la pierna según la talla.



*Grafica 3. Rangos de longitudes totales por talla para el brazo.*



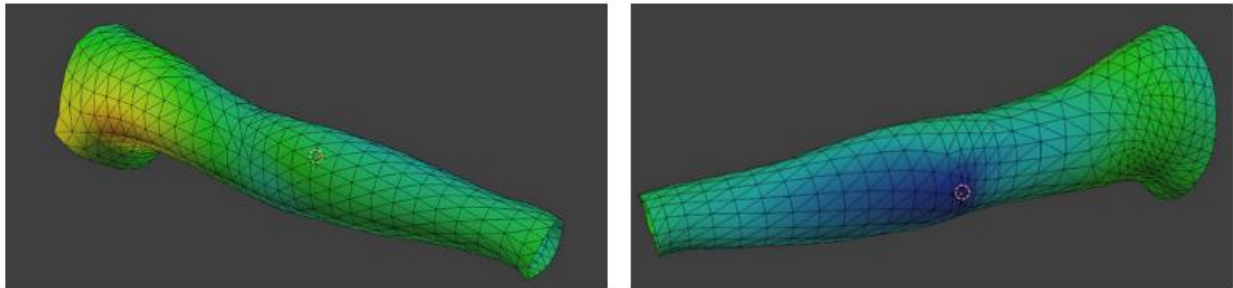
*Grafica 4. Rangos de longitudes totales por talla para la pierna.*

De esta manera, se puede evidenciar que, tanto para la pierna como para el brazo, aunque los rangos de las longitudes en la talla M, es el más pequeño, también es en el que se cataloga la mayor cantidad de personas. Esto se refiere que la gente en promedio es talla M.

## 5.2. Resultado de las superficies promedio

Luego de implementar el método de clustering, usando el algoritmo de K-Means, se obtuvieron las superficies promedio para brazo y para pierna. En el Anexo A., se pueden ver todas las

superficies encontradas por talla con su respectiva desviación estándar. A continuación, se puede ver la superficie encontrada para el brazo de talla M. Esto porque es la única sobre la que se realizó un diseño.



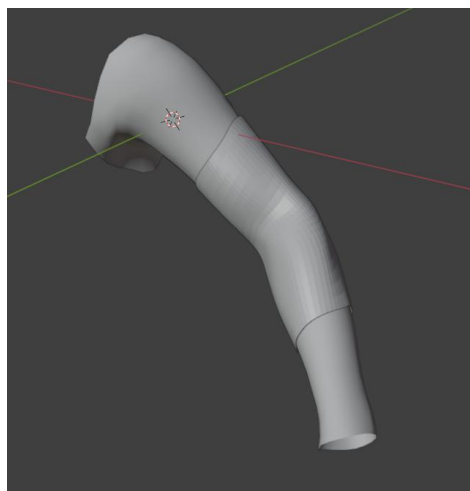
*Figura 23. Brazo izquierdo M promedio junto con visualización de la desviación estándar en la malla.*

Como se puede observar, la desviación estándar en la malla usando un sistema de tallaje disminuye sustancialmente en comparación con la superficie promedio obtenida sin realizar clustering (Figura 13.). Además, la cantidad de personas representadas en esta malla es acotada y dirigida a usuarios con características específicas. Por lo tanto, el sistema de tallaje disminuye el error y aumenta la capacidad de adaptarse a todo tipo de público según el grupo al que pertenezcan.

Por otro lado, se puede evidenciar que las zonas con menos desviación son las más cercanas al codo. Esto quiere decir que esos espacios son los óptimos para anclar el sistema de sujeción y la manga.

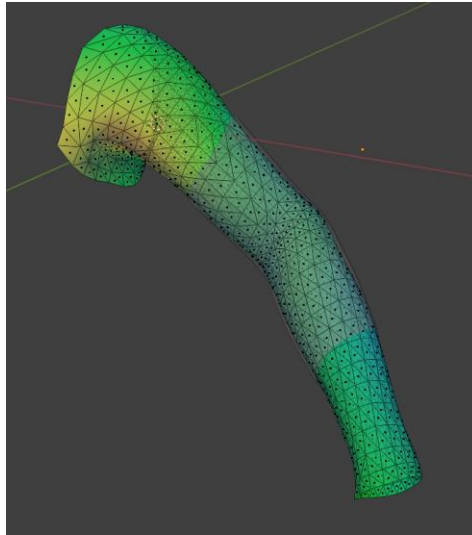
### **5.3. Resultado de Diseño de Manga**

Luego de realizar el diseño de la manga y desmoldarla usando “UV Wrapping” se obtiene el patronaje para la fabricación de esta. El patronaje se encuentra en la sección de Anexo A. Por su parte, el diseño final de la manga es el siguiente:



*Figura 24. Diseño de manga para el exoesqueleto.*

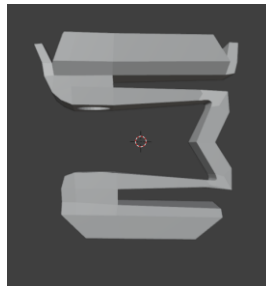
Esta manga está ubicada correctamente sobre la zona de aceptación de diseño de la superficie. Como se puede ver en la siguiente imagen, la manga se encuentra sobre las zonas más azules del brazo.



*Figura 25. Visualización de la manga sobre la zona de aceptación de diseño del brazo izquierdo.*

#### **5.4.Resultados de Diseño de la estructura**

El diseño final del ULV obtenido es el siguiente.



*Figura 26. Unidad de longitud variable (ULV).*

Gracias a la forma del ULV, este puede estirarse y encogerse en la dirección longitudinal, todo esto sin perder su forma las otras direcciones. Esto permite que el sistema no pierda su capacidad de transmitir fuerza a lo largo del exoesqueleto. Esta unidad es intercambiable y encaja fácilmente entre el soporte del motor y el soporte superior.

Por otro lado, el diseño final del brazo se obtuvo siguiendo el proceso de iteración. Este integra el ULV y es totalmente modular. A continuación, se presentan los renders del diseño final (CAD).



*Figura 27. Exoesqueleto de brazo izquierdo vista posterior.*



*Figura 28. Exoesqueleto de brazo izquierdo vista lateral.*



El anterior render fue realizado a partir del modelo en Blender. En el Anexo A, se puede visualizar el CAD del diseño final de cada parte.

Como se puede evidenciar en el render, el exoesqueleto, es totalmente modular, pues cada una de sus partes es separable y puede ser intercambiable. Además, este es totalmente vestible como se propuso anteriormente. Esto hace que el sistema pueda ser llevado directamente como una prenda de vestir.

### **5.5. Resultados de validación.**

Para validar el CAD del diseño del exoesqueleto, se construyó un prototipo usando impresión 3D. El resultado se puede visualizar en las siguientes imágenes.

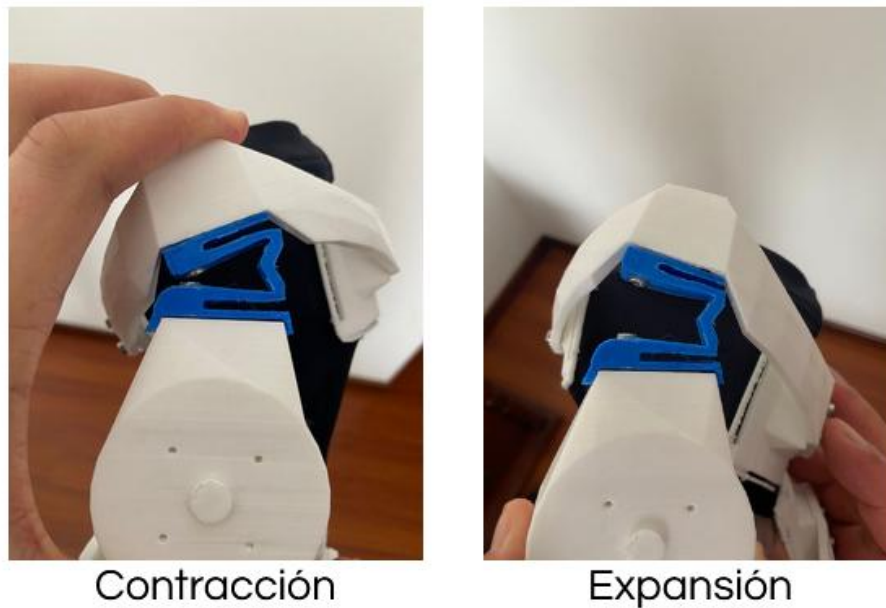


*Figura 29. Exoesqueleto en prueba real.*

Como se puede visualizar, el exoesqueleto es totalmente modular, se adapta fácilmente al brazo y se posiciona de la forma correcta. Además, gracias a la extensión del soporte inferior, el exo permite un movimiento de rango total del brazo ( $0-150^\circ$ ). El exo también es capaz de soportar movimientos de pronación y supinación. La validación se realizó mediante la postura del exo. Como usuario puedo validar que el exoesqueleto es cómodo y se adapta fácilmente al brazo. Además, lado, un conjunto de personas evaluar el exoesqueleto desde una perspectiva visual. Todas las personas, concluyeron que efectivamente el sistema se adapta fácilmente al brazo y se sujeta correctamente. Sin embargo, algunos miembros proponen que se debe cambiar el material de la manga, buscando algo menos elástico y de mejor calidad que permita darle una mejor apariencia visual, así como también darle una mayor fortaleza estructural.

Por otro lado, el sistema de expansión y contracción ULV funciona perfectamente, haciendo que el motor se auto posicione sobre el eje de rotación del codo. Este sistema se evalúa por separado ya que es una parte fundamental del exoesqueleto que permite que este funcione correctamente.

De esta forma a continuación se puede observar imágenes que validan la expansión y la contracción de la unidad.



*Figura 30. Prueba de funcionamiento del sistema ULV.*

Como se puede evidenciar, el sistema ULV tiene una mayor capacidad de contracción que de expansión. Esto está hecho a propósito siguiendo la forma en la que funciona el codo. Además, encaja perfectamente entre ambos soportes. Sin embargo, este sistema posee un problema y es su instalación, pues el espacio de instalación es reducido y para atornillarlo se necesita un poco de paciencia.

## **6. Conclusiones**

El desarrollo de esta tesis permitió implementar un enfoque integral para el diseño geométrico de un exoesqueleto modular y parametrizable. Por lo que, en este proyecto, se logró generar una base de datos representativa de las diversas características antropométricas de los cuerpos humanos, mediante el uso del modelo paramétrico de SMPL-X, entrenado con datos de escaneos 3D de humanos reales. Además, a partir de esta base, se logró extraer y analizar las diferentes morfologías utilizando técnicas de estadística, permitiendo identificar las zonas anatómicas estables y variables para el brazo y la pierna.

Por otra parte, la implementación de algoritmos de clustering dio acceso a una segmentación de la población en diferentes tallas (S, M y L), que representan varios grupos morfológicos. De esta manera se logra definir superficies promedio por cada talla, que sirvieron como referencia geométrica directa para el diseño del exoesqueleto. Este método es importante porque logra disminuir la variabilidad de los cuerpos etiquetándolos en un respectivo grupo con el que comparte características.

Finalmente, se logro diseñar un exoesqueleto modular y vestible, que es escalable a diferentes tipos de talla. Además, la metodología propuesta puede ser extendida a las diferentes partes del cuerpo. Mediante el uso de herramientas CAD como Blender.

## **7. Recomendaciones**

El presente trabajo sienta una base sólida para el desarrollo de exoesqueletos modulares adaptados a la morfología humana mediante análisis estadístico, modelado 3D y clasificación antropométrica. No obstante, existen múltiples líneas de investigación que pueden enriquecer este proyecto en futuras etapas.

Una de ellas es que el prototipo actual se desarrolló sobre la talla M como prototipo base. Sin embargo, este diseño puede ser fácilmente escalable para las otras tallas S y L, que ya están clasificadas, así como también, ya poseen una superficie promedio establecida con sus respectivas desviaciones. Esto permitirá validar completamente el enfoque del modelo y cubrir todo el rango poblacional. Asimismo, también se propone extender el diseño para otras regiones del cuerpo. Lo que se desea es replicar la metodología utilizada para completar el exoesqueleto completo, incluyendo piernas, cadera, hombros, torso y columna. Integrándolo al diseño actual se podría obtener un sistema de cuerpo completo.

Otra línea de investigación se refiere a el desarrollo del sistema de actuadores y sensores. Pasar a un exoesqueleto funcional, requiere de integrar un sistema de sensores EMG que permitan capturar la intención de movimiento del usuario para actuar el motor. De esta manera se posibilitaría la aplicación del exo en situaciones reales de asistencia física o rehabilitación.

Por otra parte, para obtener un modelo más robusto, se puede buscar datasets más complejos que permitan tener en cuenta un mayor número de parámetros como la complexión o las condiciones físicas. Esto permitiría realizar análisis más avanzados y obtener modelos mucho más representativos.

También, se puede hacer un análisis estructural y de transmisión de fuerzas. Realizar un estudio específico sobre la distribución de cargas y fuerzas en el dispositivo, incluyendo análisis por elementos finitos (FEA) para evaluar el rendimiento del mecánico del exoesqueleto. Permitiendo hacer un rediseño específico sobre la estructura del sistema. Además, esto puede extenderse a mejorar el sistema UVL para tener en cuenta movimientos más complejos y así poderlo extrapolar a otras partes del cuerpo.

## **8. Referencias**

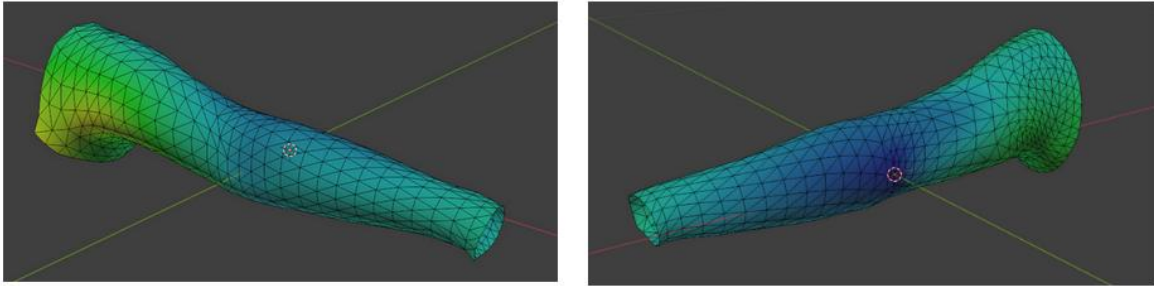
- [1] R. J. Kuczmarski, «CDC growth charts: United States,» *Advance Data*, nº 314, pp. 1-27, 2000.

- [2] J. M. Malina, «Ethnic variation in growth and body proportions,» *Progress in Human Biology*, vol. 19, nº 1, pp. 1-45, 1995.
- [3] W. D. McArdle, F. I. Katch y V. L. Katch, *Exercise Physiology: Energy, Nutrition, and Human Performance*, 8 ed., Wolters Kluwer, 2015.
- [4] W. H. Sheldon, S. S. Stevens y W. B. Tucker, *The Varieties of Human Physique: An Introduction to Constitutional Psychology*, New York: Harper, 1940.
- [5] D. A. Winter, *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*, 4 ed., Wiley, 2009.
- [6] J. Rosen, M. Brand y M. B. Fuchs, «A myosignal-based powered exoskeleton system,» *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. A*, vol. 31, nº 3, pp. 210-222, 2001.
- [7] J. Pons, *Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons*, Wiley, 2008.
- [8] Y. Ding, «Biomechanically-assistive textile exosuits: State-of-the-art and future directions,» *Wearable Technologies*, vol. 1, p. e6, 2020.
- [9] K. Sankai y Y. Nakajima, «HAL: Hybrid Assistive Limb-Based Robotic Technology,» de *Springer Handbook of Robotics*, 2016, pp. 1935-1976.
- [10] J. Camargo, W. Flanagan, N. Csomay-Shanklin, B. Kanwar y A. Young, «A Machine Learning Strategy for Locomotion Classification and Parameter Estimation Using Fusion of Wearable Sensors,» *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 68, nº 5, pp. 1569-1578, May 2021.
- [11] G. J. Tortora y B. H. Derrickson, *Principles of Anatomy and Physiology*, 18 ed., Wiley, 2023.
- [12] C. C. Norkin y D. J. White, *Measurement of Joint Motion: A Guide to Goniometry*, 5 ed., F.A. Davis Company, 2016.
- [13] T. Mullen, *Mastering Blender*, 2 ed., Wiley, 2012.
- [14] T. Hastie, R. Tibshirani y J. Friedman, *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*, 2nd ed., New York: Springer, 2009.
- [15] C. M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*, Berlin: Springer, 2006.
- [16] G. Pavlakos, V. Choutas, N. Ghorbani, T. Bolkart, A. A. A. Osman, D. Tzionas y M. J. Black, «Expressive Body Capture: 3D Hands, Face, and Body from a Single Image,» de *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Long Beach, CA, USA, 2019.

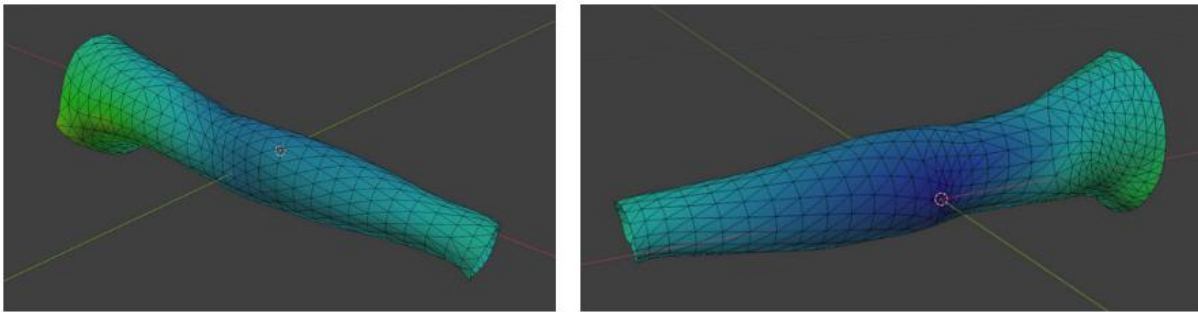
[17] MyActuator, «L-5010 Series Smart Actuator,» 30 May 2024. [En línea]. Available: <https://www.myactuator.com/l-5010-details>.

## Anexo A.

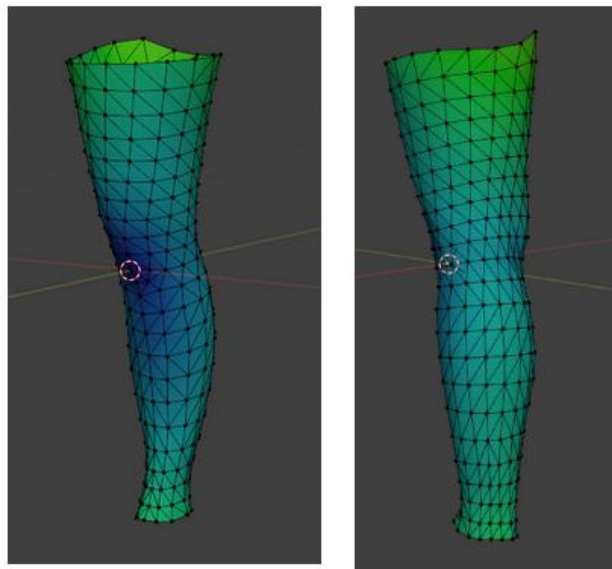
GitHub: <https://github.com/OuFo5/disenio-exoesqueleto-adaptativo/tree/main>



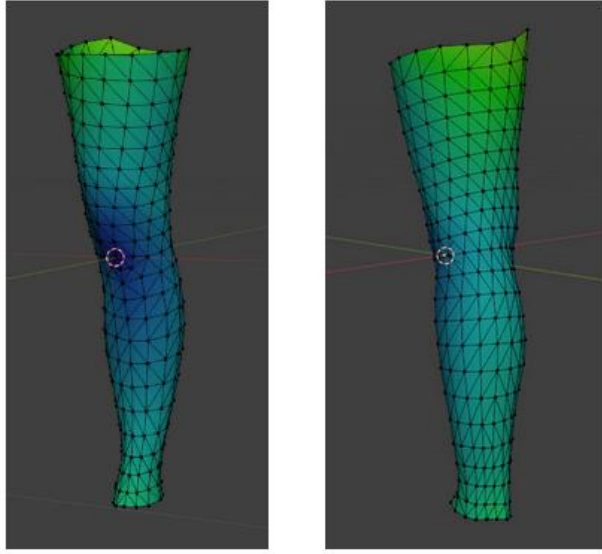
*Figura 31. Brazo izquierdo S promedio junto con visualización de la desviación estándar en la malla.*



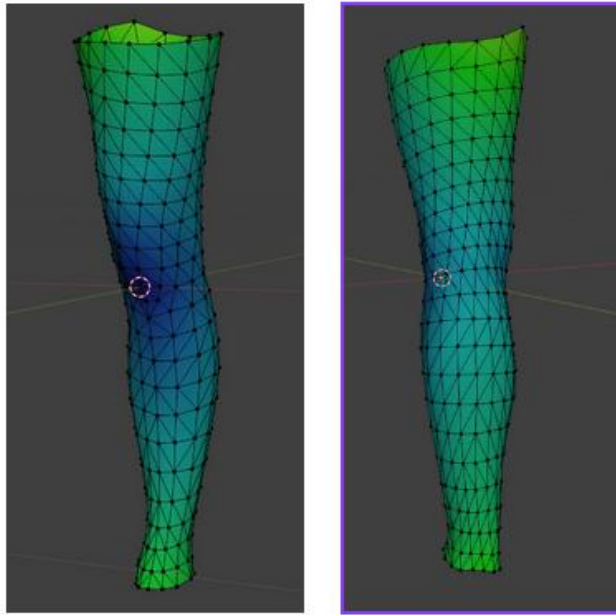
*Figura 32. Brazo izquierdo L promedio junto con visualización de la desviación estándar en la malla.*



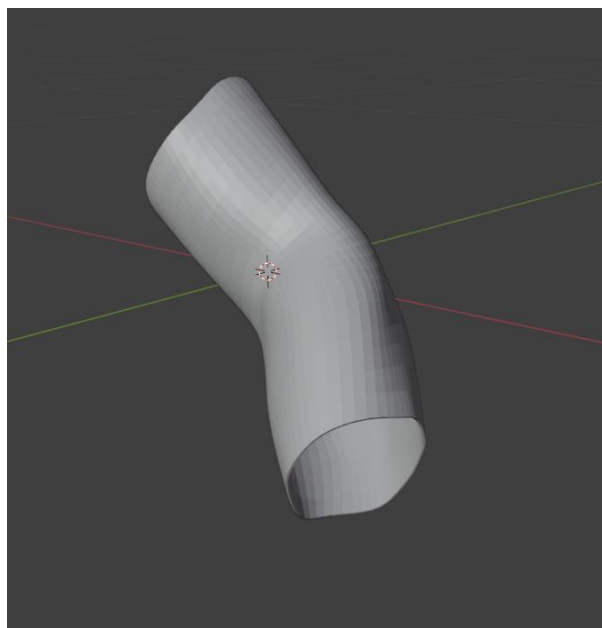
*Figura 33. Pierna derecha S promedio junto con visualización de la desviación estándar en la malla.*



*Figura 34. Pierna derecha M promedio junto con visualización de la desviación estándar en la malla.*



*Figura 35. Pierna derecha L promedio junto con visualización de la desviación estándar en la malla.*

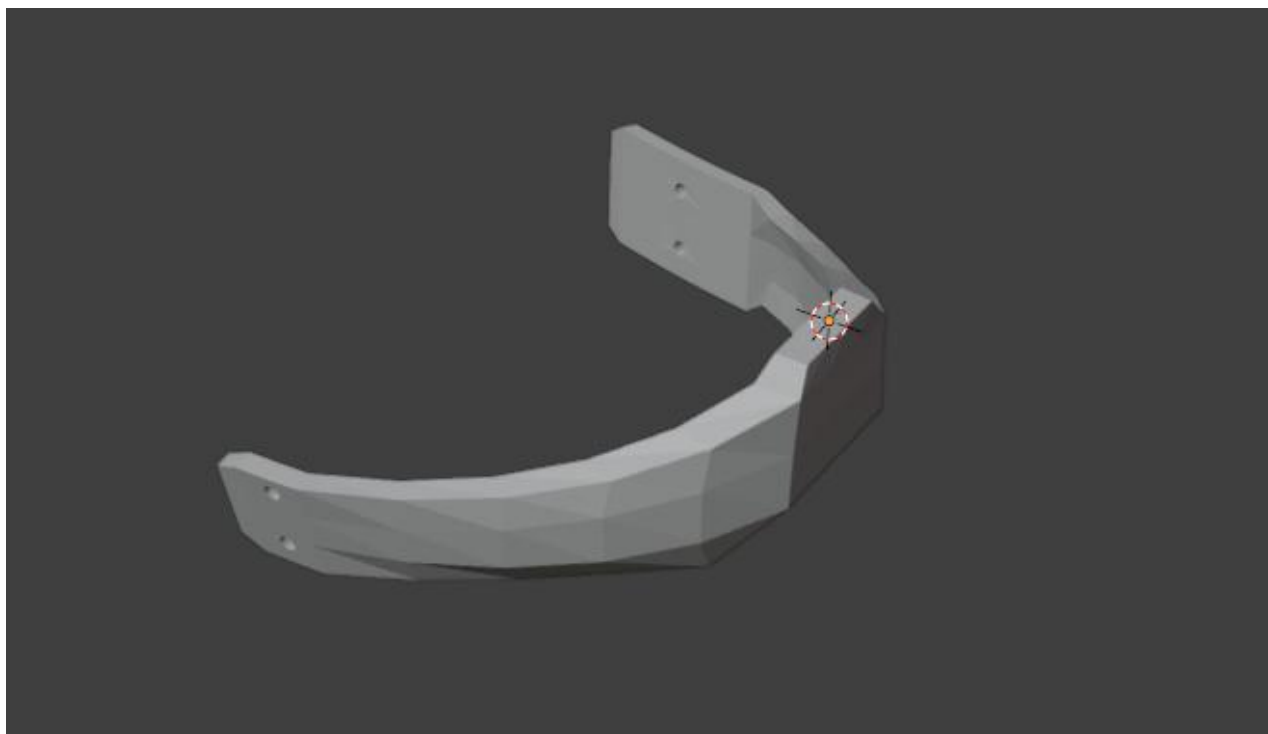


*Figura 36. CAD en Blender de manga.*

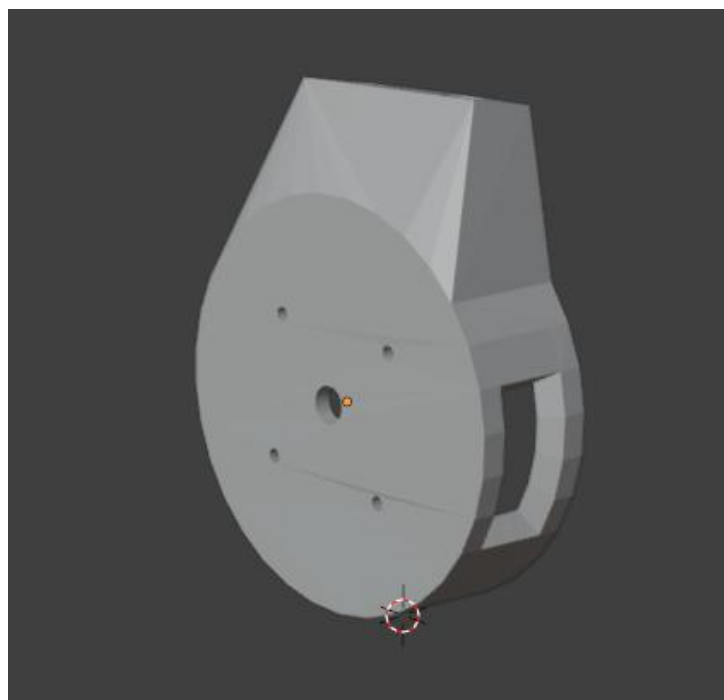


*Figura 37. CAD en Blender de elementos de sujeción.*

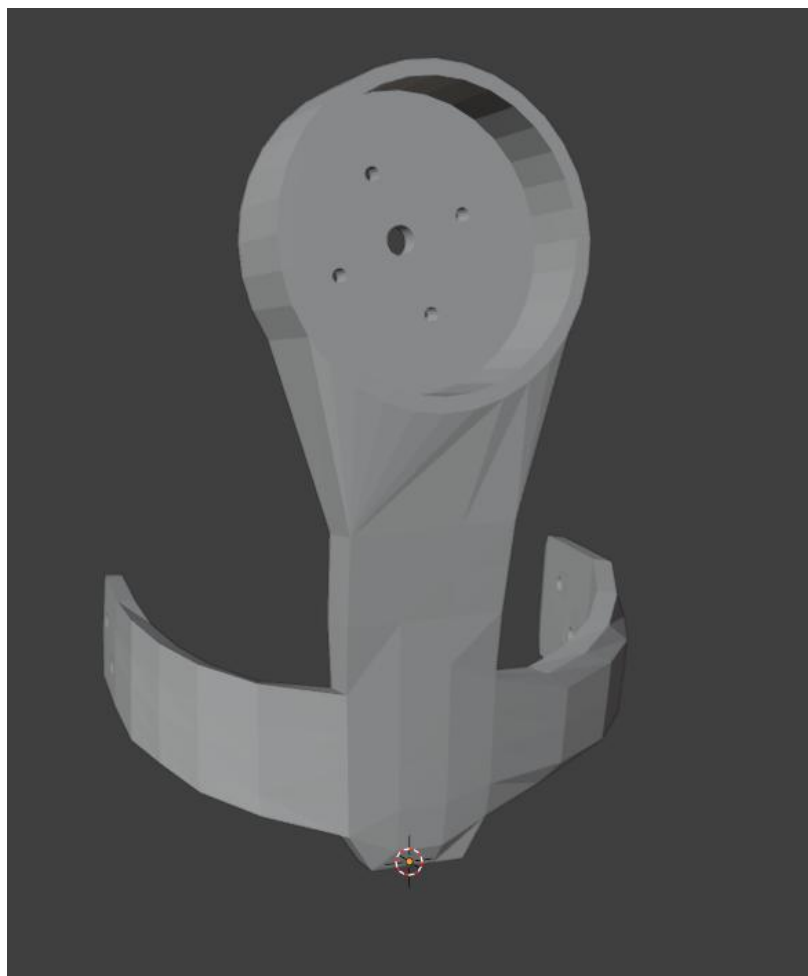




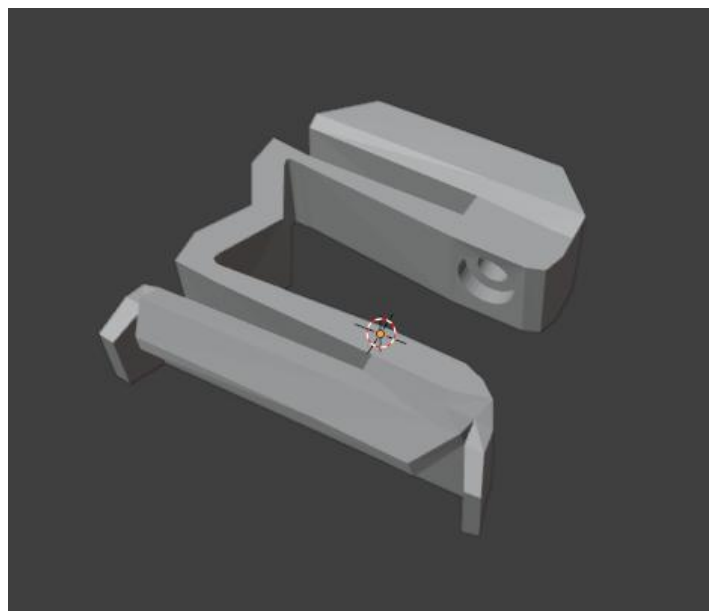
*Figura 38. CAD en Blender de soporte superior.*



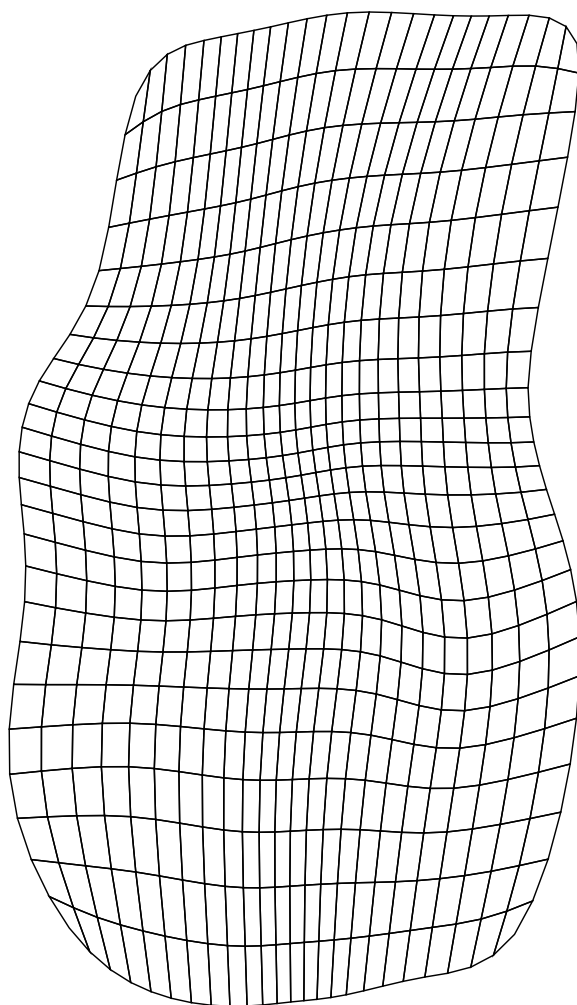
*Figura 39. CAD en Blender de soporte motor.*



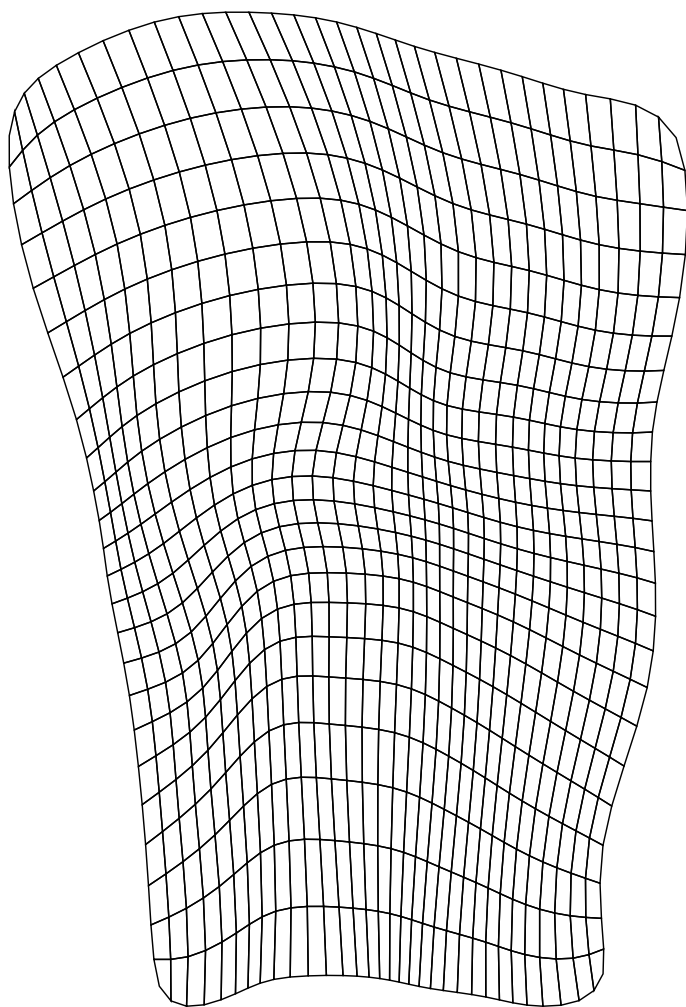
*Figura 40. CAD en Blender de soporte inferior.*



*Figura 41. CAD en Blender de ULV*



*Figura 42. Patronaje de manga A.*



*Figura 43. Patronaje de manga B.*