Escuela técnica Superior de Ingeniería Informática

Graduada en Ingeniería de la Salud
Mención en Ingeniería Biomédica

DESARROLLO Y DISEÑO DE UNA PRÓTESIS DE BRAZO EN CÓDIGO ABIERTO IMPRESA EN 3D.

DEVELOPMENT AND DESIGN OF AN OPEN SOURCE ARM PROSTHESIS PRINTED IN 3D.

Realizado por
Cristina Molina Moreno

Tutorizado por
Víctor Manuel Smith Fernández
Francisco Antonio Díaz Montero

Departamento
Anatomía Humana, Medicina Legal e Historia de la Ciencia

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA
MÁLAGA, JUNIO DE 2019

Fecha de defensa:
El/la Secretario/a del Tribunal

Resumen

En este trabajo se ha diseñado una prótesis de brazo para un paciente real con una malformación congénita en el brazo izquierdo. Se enfatiza la importancia de la adaptación de cada prótesis a cada paciente, para lo cual el diseño asistido por ordenador y la impresión 3D se han convertido en herramientas muy útiles.

En primer lugar se han estudiado la anatomía y las razones fisiológicas por las que son importantes los distintos movimientos que el miembro superior puede realizar.

Tras analizar los datos del paciente, y habiendo determinado el rango de movimientos funcionales del miembro superior, se establece nuestra solución a la prótesis.

Posteriormente, se detalla el procedimiento del diseño asistido por computador en SolidWorks, además de describir la forma y funcionalidad de cada pieza de la prótesis.

Por último se imprime la prótesis en 3D y se comprueba el funcionamiento en el paciente.

Palabras clave: SolidWorks, prótesis de miembro superior, asistencias técnicas personales, impresión 3D, fabricación digital, flexoextensión, diseño protésico, CAD, focomelia.

Abstract

In this piece of work an arm prosthesis has been designed for a real patient with a congenital malformation in the left arm. It is emphasized the importance of adapting each prosthesis to each patient, for which computer-aided design and 3D printing have become very useful tools.

Firstly the anatomy and the physiological reasons for which the different movements that the upper limb can perform are important will be studied.

After analyzing the patient data, and having determined the range of functional movements of the upper limb, our solution to the prosthesis has been found.

Subsequently, we detail the procedure of computer-aided design in SolidWorks, as well as describing the shape and functionality of each piece of the prosthesis.

Finally, the prosthesis has been 3D printed and the performance on the patient is checked.

Keywords: SolidWorks, upper limb prosthesis, personal technical assistance, 3D printing, digital fabrication, flexoextension, prosthetic design, CAD, phocomelia.

A mi padre que me enseñó la importancia
de ayudar a los demás.
A mi madre que me ha apoyado
incondicionalmente.

Índice general

Resumen I

Abstract III

1. Introducción 1
1.1. Estado del arte . . . 1
1.1.1. Autofabricantes . . . 1
1.1.2. SuperGiz . . . 1
1.1.3. Descripción anatómica . . . 4
1.1.3.1. La importancia de los movimientos del codo. . . . 4
1.1.3.2. La importancia de la pronosupinación. . . . 6
1.1.3.3. La importancia de los movimientos de la muñeca. . . . 7
1.2. Importancia de una prótesis adecuada en nuestro paciente . . . 9

2. Objetivo 11

3. Material y método 13
3.1. Revisión del prototipo de Autofabricantes . . . 14
3.1.1. Mecanismo del codo de Autofabricantes . . . 15
3.1.2. Mecanismo de la muñeca de Autofabricantes . . . 15
3.1.3. Mecanismo de la pinza de Autofabricantes . . . 15
3.1.4. Problemas que encontramos a este prototipo . . . 16
3.2. Primera fase del desarrollo del proyecto . . . 18
3.2.1. Toma de datos del paciente . . . 18
3.2.2. Bocetos iniciales del diseño . . . 18
3.2.3. Calculando los ángulos . . . 21
3.2.3.1. El rango de movimientos del paciente . . . 21
3.2.3.2. Corrección del ángulo . . . 23
3.2.4. Simplificando las imágenes 3D . . . 23
3.2.5. La toma de medidas . . . 24
3.2.6. Boceto definitivo . . . 28
3.3. Segunda fase del desarrollo del proyecto . . . 29
3.3.1. Herramientas empleadas en el diseño . . . 29
3.3.1.1. Geometrías de referencia . . . 29
3.3.1.2. Dibujando croquis . . . 29
3.3.1.3. Extrusión y recubrimiento . . . 30
3.3.1.4. Redondeo . . . 30

3.3.2. Primeras versiones de los modelos en SolidWorks 31
3.3.2.1. Primera versión del antebrazo 31
3.3.2.2. Primera versión del brazalete 31
3.3.2.3. Primera versión del codo 31
3.3.2.4. Ensamblaje de la primera versión de la prótesis . . . 34
3.4. Modelo definitivo de la prótesis 36
3.4.1. Alzado planta y perfil del antebrazo 38
3.4.2. Alzado planta y perfil del brazalete 39
3.4.3. Alzado planta y perfil del codo 40
3.4.4. Alzado planta y perfil del vástago de unión 41
3.4.5. Enganche con SuperGiz 42
3.5. Impresión 3D 43
3.5.1. Datos de la impresión 3D 43
3.5.2. Montaje y preparación de la prótesis 44

4. Resultados **47**
4.1. Impresión 3D y montaje de la prótesis 47
4.2. Pruebas con el paciente 50

5. Conclusiones **53**

Referencias **57**

Capítulo 1

Introducción

1.1. Estado del arte

1.1.1. Autofabricantes

Autofabricantes es una asociación con base en Madrid dedicada al desarrollo de diferentes tipos de asistencias técnicas personales como prótesis, instrumentos musicales adaptados, etc. Cuenta con un equipo de voluntarios de diferentes disciplinas y con el apoyo de Medialab Prado como centro que promueve y acoge su actividad y la Fundación Daniel y Nina Carasso con cierto apoyo económico. Toda su actividad se basa en realizar los proyectos de manera colaborativa incorporando a las familias afectadas en el proceso de diseño, desarrollando los proyectos en tecnologías accesibles de fabricación digital y publicando en código abierto todos los resultados de investigación.

1.1.2. SuperGiz

SuperGiz es uno de los mejores proyectos de Autofabricantes, descrito como un "concepto diferente de prótesis de mano y brazo en el que no se imita la forma y función de una mano. Consiste en una pieza principal colocada en la extremidad de la niña o niño y un conjunto de gadgets intercambiables mediante un sistema de anclaje. Cada gadget se utiliza para ayudar en una actividad concreta de la vida diaria de las niñas y niños, sobre todo centrados en sus aficiones y ocio"(Autofabricantes, s.f.). Ver Figura 1.1.

La pieza principal de estas prótesis se coloca en el muñón y se conoce como "pulpo"(ver Figura 1.2). El material usado para imprimir en 3D el pulpo suele ser Willowflex o TPU *(thermoplastic polyurethane)*, filamentos flexibles. (*WillowFlex 3D Print Filament*, 2019; *Ultimaker TPU 95A material: 3D print durable and flexible parts*, s.f.)

Al estar fabricado el pulpo en un material flexible se puede adaptar mejor a la forma anatómica de las niñas y niños, con la ayuda de unas cintas de velcro para la sujeción.

Para suavizar la superficie de contacto entre el brazo y el pulpo se coloca una capa de goma EVA *(Ethylene Vinyl Acetate)*.

(a) Pieza en el brazo llamada “pulpo”.

(b) Algunos de los gadgets que se diseñaron.

Figura 1.1: Prótesis con gadgets intercambiables SuperGiz. Fuente: (Autofabricantes, s.f.)

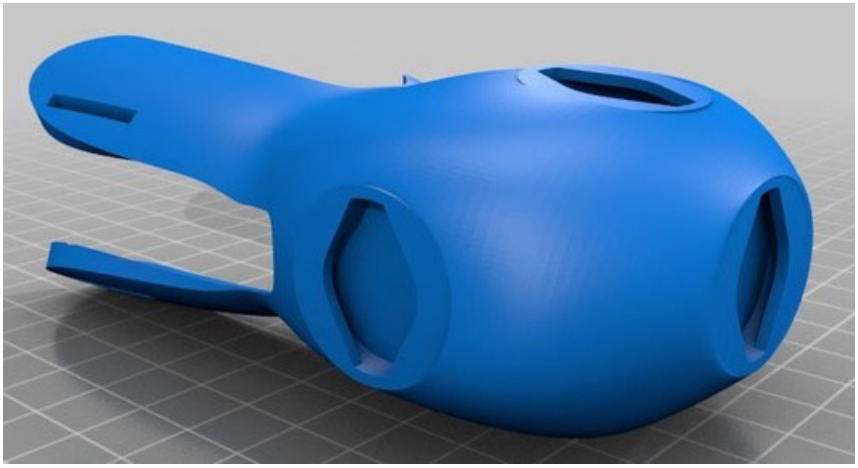
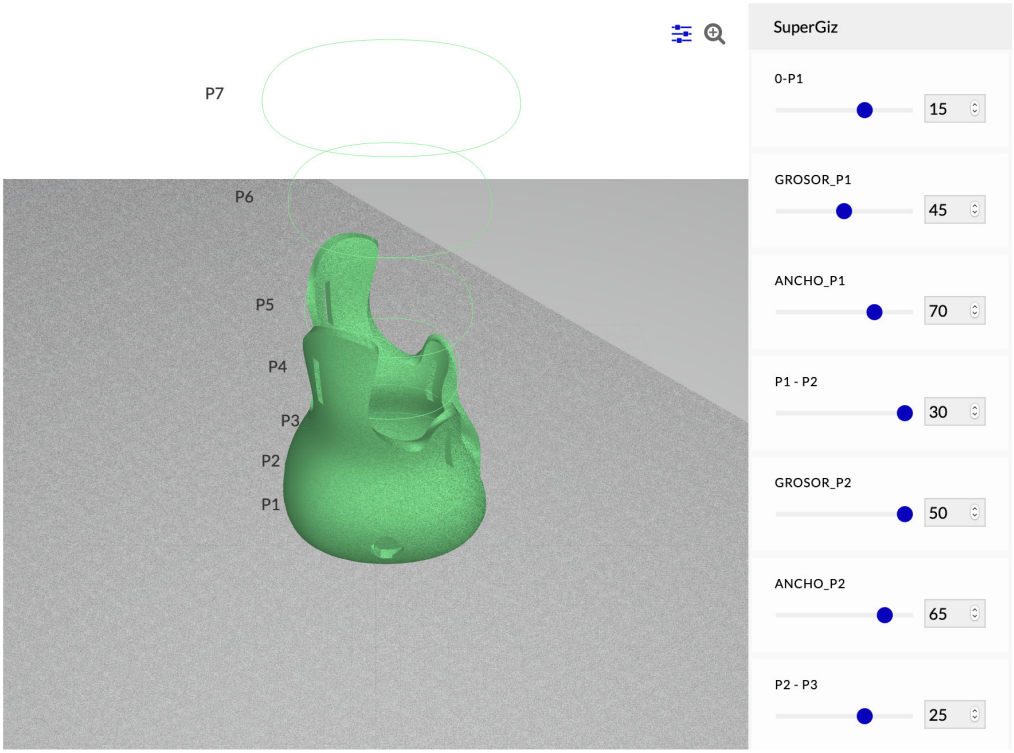


Figura 1.2: Pulpo de SuperGiz. Fuente: (Autofabricantes, s.f.)

Los gadgets de SuperGiz están fabricados en PLA *(polylactic acid)*, un filamento rígido ampliamente usado para la impresión 3D. (*Ultimaker PLA material: Highly versatile, easy to print*, s.f.)

Los resultados del proyecto de SuperGiz están publicados en código abierto. A través de Thingiverse podemos descargar los archivos imprimibles de los gadgets. Además, en la página web de Autofabricantes se puede diseñar un pulpo desde casa con las medidas del muñón que necesitemos para poder imprimirlo en 3D (ver Figura 1.3).



(a) Vista previa del pulpo diseñado en la página web de Autofabricantes.

(b) Instrucciones de cómo tomar las medidas para diseñar el pulpo.

Figura 1.3: Diseño del pulpo con los parámetros del muñón. Fuente: (Autofabricantes, s.f.)

1.1.3. Descripción anatómica

La utilidad de todo el miembro superior se centra en la capacidad de manipulación y prensión (soporte) de objetos. Para realizar estas actividades los grupos musculares se organizan de forma específica en músculos extrínsecos e intrínsecos.

La mayoría de músculos que mueven la mano se encuentran en el antebrazo y se conocen como extrínsecos. Sus largos tendones pasan a través de la muñeca, proporcionándonos una importante fuerza prensora, además de cumplir las funciones de orientar en el espacio el objeto.

Por otro lado, los músculos intrínsecos, que como su nombre indica encontramos en la mano, nos aporta matices de adaptación a la forma del objeto y funciones manipulativas sobre un objeto que nos permiten realizar hasta el trabajo más delicado. (BBC, s.f.)

Las capacidades manipulativas y de prensión (sujeción) se ven reducidas cuando el alcance del codo no es el adecuado, por lo que se podría deducir que el ángulo entre el brazo y el antebrazo condiciona el rango espacial de referencia donde podemos realizar el trabajo manipulativo.

Mientras que el codo puede realizar los movimientos de flexión y extensión, la muñeca puede flexionar, extender, y realizar abducción y aducción. El movimiento de pronación y supinación se realiza conjuntamente entre el codo y la articulación radiocarpiana. Analizamos estos movimientos en las siguientes secciones.

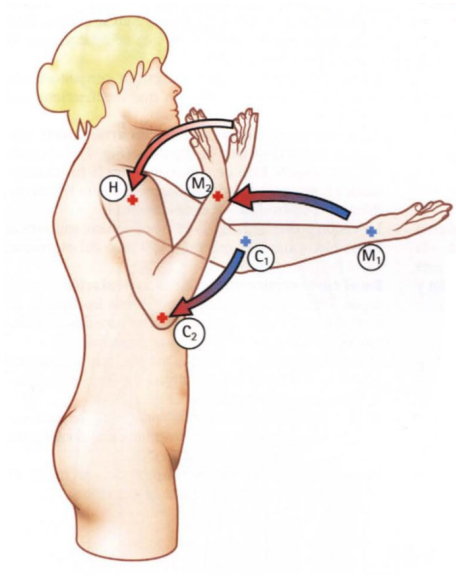
1.1.3.1. La importancia de los movimientos del codo.

El codo es la articulación encargada de acortar o prologar la longitud del miembro superior y en consecuencia, la distancia de la mano a la cabeza y los ojos, siendo responsable de marcar una distancia de trabajo para la manipulación de objetos.

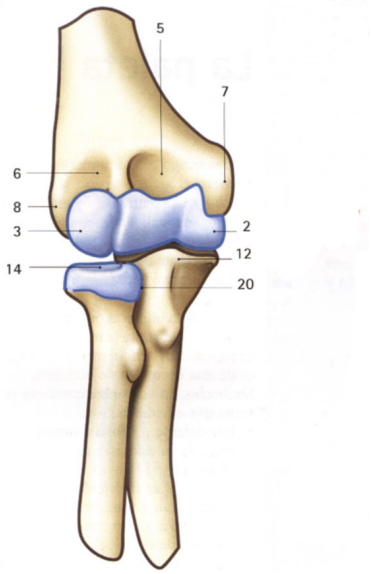
Por consiguiente, la flexión y extensión del codo es fundamental para alimentarnos, ya que nos permite llevar alimentos a nuestra boca (ver Figura 1.4a). Este movimiento se lleva a cabo gracias al **bíceps, la tróclea y el cóndilo humeral**, definiendo estos dos últimos la superficie articular del codo y, asimismo, el eje de flexoextensión del codo (ver Figura 1.4b). (Kapandji, Tubiana, y Torres Lacomba, 2009)

La amplitud de movimientos del codo va desde la extensión completa mostrada en la Figura 1.5a, hasta los $140-145^o$ de flexión, aproximadamente hasta una distancia en la que cabe un puño cerrado entre la muñeca y el hombro según se muestra en la Figura 1.5b. (Kapandji y cols., 2009)

Se establece que la amplitud más útil de flexión y extensión del codo se halla entre los $60-120^o$. Esta sería, por tanto, la distancia de trabajo acorde con las posibilidades de enfoque del ojo humano y, al mismo tiempo, la que permite el acercamiento del objeto a la boca ayudado de movimientos compensatorios del resto del cuerpo. (Steindler, 1949)

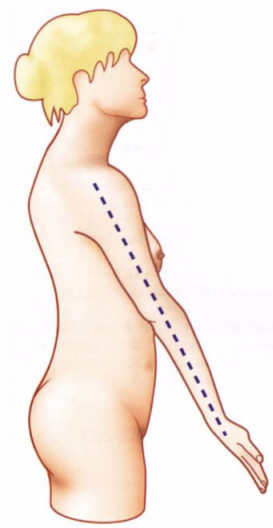


(a) Gracias a la flexoextensión del codo podemos alimentarnos.

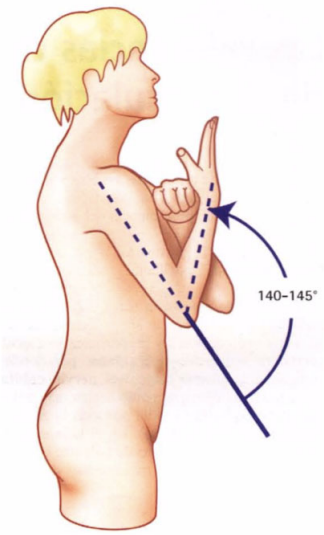


(b) Las superficies articulares del codo. 2.Tróclea humeral. 3.Cóndilo humeral.

Figura 1.4: El codo. Fuente: (Kapandji y cols., 2009)



(a) Extensión completa del codo.



(b) Flexión activa del codo

Figura 1.5: Amplitud de movimientos del codo. Fuente: (Kapandji y cols., 2009)

1.1.3.2. La importancia de la pronosupinación.

La pronosupinación es el movimiento que nos permite voltear la mano para poner la palma hacia arriba o hacia abajo (ver Figura 1.6). Gracias a este movimiento la mano puede coger un objeto en cualquier posición y controlarlo, lo que le dota de una gran importancia en la alimentación, así como en trabajos manuales. El movimiento se lleva a cabo gracias a dos articulaciones, la **radiocubital proximal** y la **radiocubital distal** (ver Figura 1.7a). (Kapandji y cols., 2009)

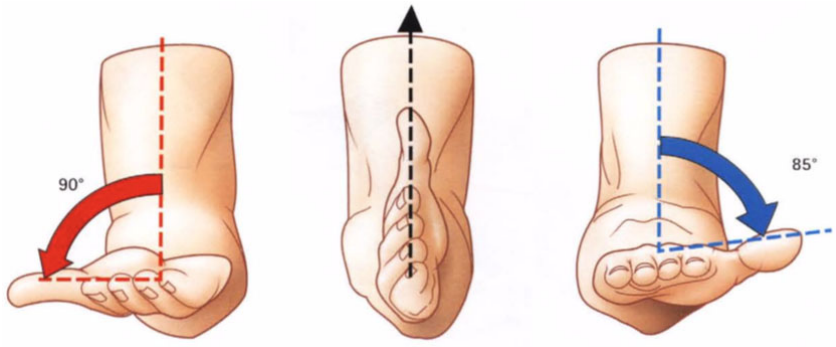
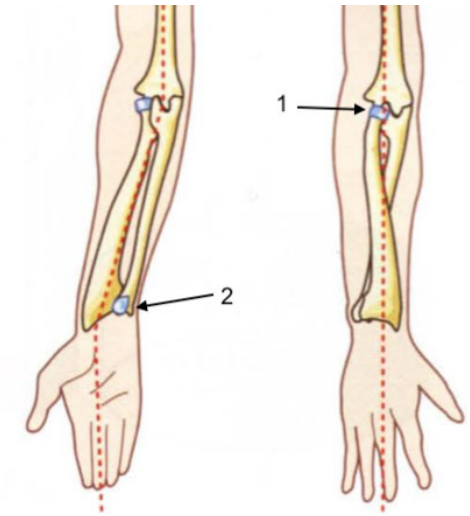


Figura 1.6: En rojo la supinación y el azul la pronación. Fuente: (Kapandji y cols., 2009)

Se establece que la amplitud más útil de pronación se halla en 80^o y la de supinación en 45^o. (Steindler, 1949)



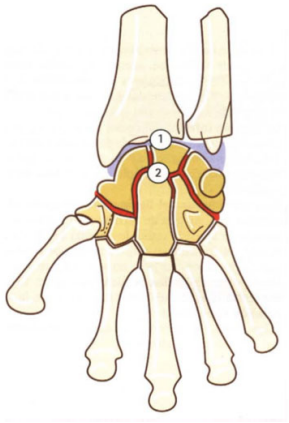
(a) Articulaciones que intervienen. 1. Radiocubital proximal. 2. Radiocubital distal.

(b) Sin la pronosupinación no podríamos alimentarnos.

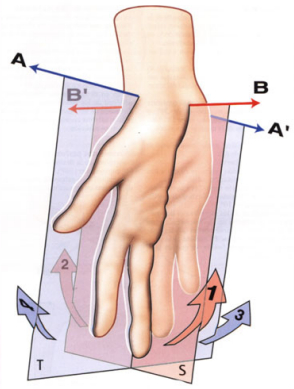
Figura 1.7: Fuente: (Kapandji y cols., 2009)

1.1.3.3. La importancia de los movimientos de la muñeca.

Si sumamos los movimientos de la **articulación radiocarpiana y la mediocarpiana** (ver Figura 1.8a) a los de la pronosupinación obtenemos una mano con tres grados de libertad, por lo que se puede mover hacia cualquier posición para coger un objeto. Los movimientos propios de la muñeca son los de flexoextensión y abducción-aducción como se muestran en la figura 1.8b. (Kapandji y cols., 2009)



(a) 1. Articulación radiocarpiana. 2. Articulación metacarpiana.



(b) Flexoextensión en el eje A-A'. Aducción-abducción en el eje B-B'. 1. Flexión. 2. Extensión. 3. Aducción. 4. Abducción.

Figura 1.8: Fuente: (Kapandji y cols., 2009)

La amplitud de movimientos de la muñeca va desde los 85^o en extensión hasta los 85^o en flexión según se muestra en la Figura 1.9, y desde los 15^o en abducción hasta los 45^o en aducción según se considera en la práctica, como se muestra en la Figura 1.10. (Kapandji y cols., 2009)

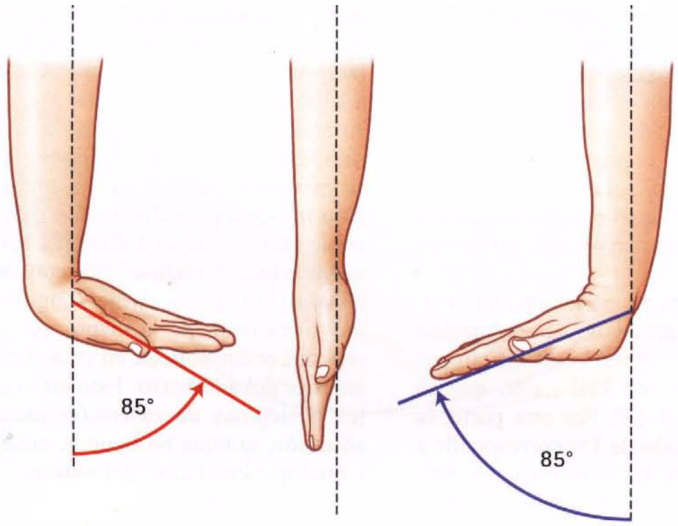


Figura 1.9: En rojo la flexión activa y el azul la extensión activa. Fuente: (Kapandji y cols., 2009)

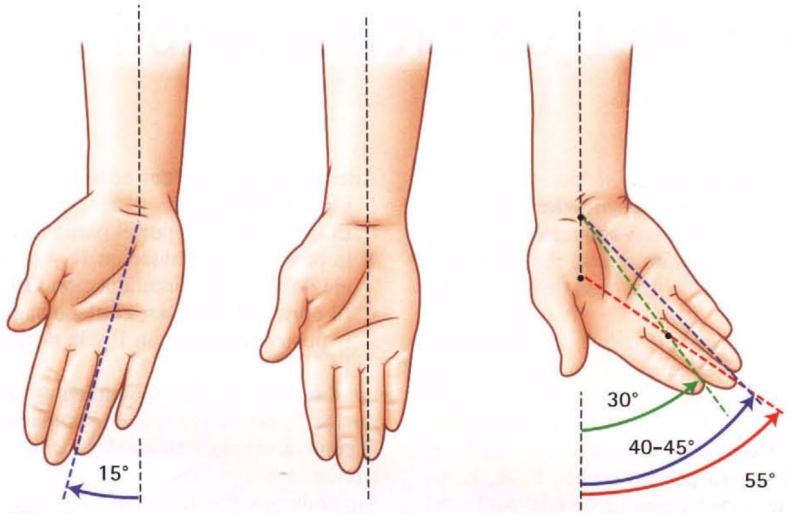


Figura 1.10: A la izquierda la abducción activa y a la derecha la aducción activa, siendo 45^o la que se considera en la práctica. Fuente: (Kapandji y cols., 2009)

La posición funcional de la muñeca es aquella en la que la fuerza de prensión es mayor y corresponde a una extensión de 45^o y aducción de 15^o.(Kapandji y cols., 2009)

1.2. Importancia de una prótesis adecuada en nuestro paciente

El paso más importante en la elaboración de cualquier prótesis es la adaptación y adecuación. La estructura anatómica de cada persona es distinta, al igual que sus necesidades y condiciones económicas. El hecho de diseñar prótesis de mano data de miles de años atrás, pero gracias a los avances tecnológicos de los últimos años se ha contado con la concurrencia de métodos diagnósticos, técnicas de modelado, metodologías de diseño, tecnologías de materiales, control y automatización suficientemente avanzadas como para obtener prótesis personalizadas a un bajo costo. (Arzola y Loaiza, 2011)

En el trabajo se pusieron en práctica estas nuevas tecnologías para diseñar una prótesis adaptada a las necesidades de un paciente.

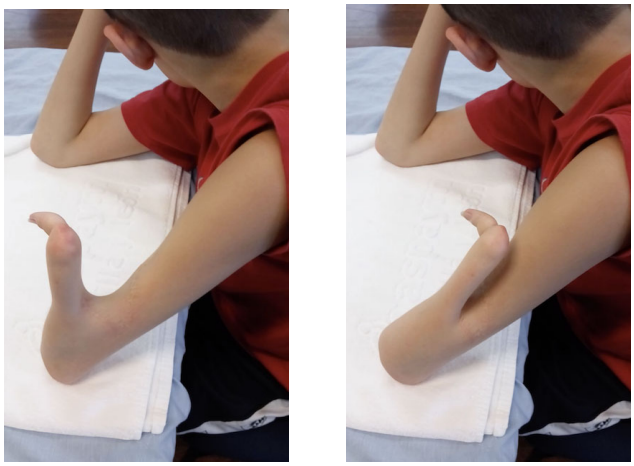
Para el paciente con una alta complejidad motora y movilidad reducida debido a su deformidad, el uso de estas nuevas tecnologías de diseño por computador e impresión 3D es crucial porque nos aportó la posibilidad de crear una prótesis personalizada a sus necesidades.

El paciente tiene una malformación congénita en el brazo izquierdo, conocida como focomelia, que hace que le falten elementos óseos y su antebrazo sea delgado y corto. El movimiento de flexoextensión que puede realizar es de una amplitud muy reducida y está en un rango articular muy próximo al brazo, haciendo que la posición del antebrazo no sea funcional (ver Figura 1.11).

El codo cambia su forma al flexionar y extender el brazo debido a la posición en la que está colocado su hueso radio. Además tiene un dedo remanente que no es funcional.

Por otro lado, el brazo derecho, aunque también sufre una malformación y tiene ciertas limitaciones, es funcional.

Hasta ahora ninguna prótesis clásica ha podido solucionar estos problemas, probablemente debido a que no se adecúan a la complicada morfología del paciente.



(a) Brazo extendido. (b) Brazo flexionado.

Figura 1.11: Movimiento que puede realizar el paciente.

Capítulo 2

Objetivo

El objetivo de este proyecto es el desarrollo y diseño de una prótesis de brazo impresa en 3D adaptada a la anatomía de un paciente con una focomelia en su miembro superior izquierdo.

Capítulo 3

Material y método

Se analizó la propuesta de Autofabricantes y su prototipo, llegando a la conclusión de que había que rediseñar completamente la prótesis desde cero.

Habiendo estudiado cuáles eran los movimientos imprescindibles de un brazo entendimos que lo que realmente necesitaba el paciente era un punto de apoyo que estuviera dentro de su espacio visual, cuya amplitud de movimiento fuera funcional y donde gracias al sistema SuperGiz fuera capaz sujetar un objeto para que la extremidad contralateral pudiera manipularlo. Para ello utilizaríamos el movimiento que él ya tenía en su antebrazo para, con una corrección de ángulo, trasladar el cono de referencia espacial del extremo de la prótesis a un cono espacial más funcional.

De esta forma, con una idea mucho más simplificada podríamos obtener una solución más útil que el paciente pudiera usar en su día a día.

Después de un boceto con la idea inicial, se procedió a tomar las medidas del brazo y antebrazo del paciente y comenzamos a diseñar la prótesis en SolidWorks.

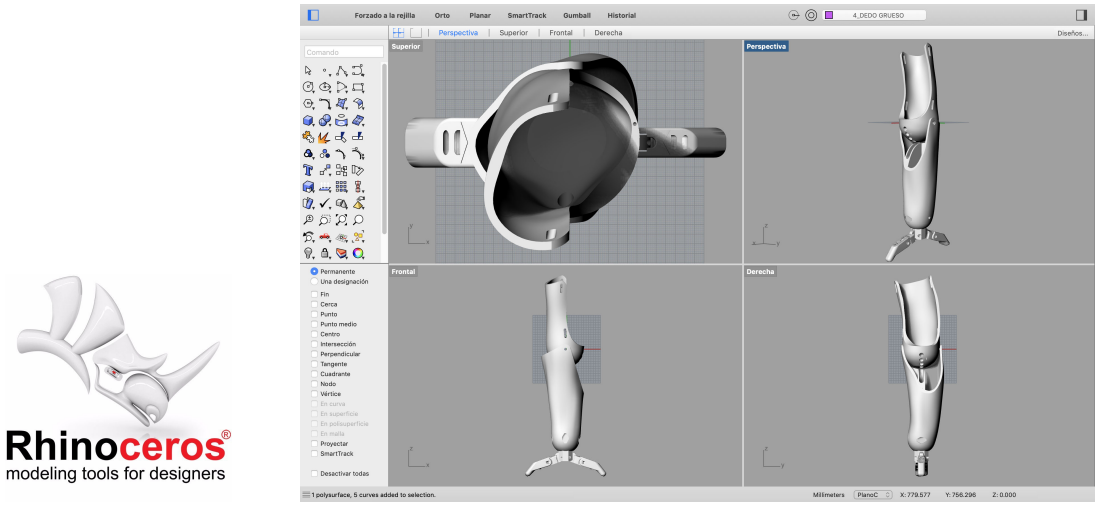
Tras una serie de pruebas y prototipos dentro del programa CAD, se llegó a un modelo a partir del cual se empezó a trabajar simultáneamente con el escáner 3D del brazo y antebrazo del paciente. Gracias a esta técnica no sólo utilizábamos unas medidas tomadas del brazo y antebrazo, sino que también nos basábamos en el brazo y antebrazo completo del paciente para poder diseñar una prótesis totalmente a medida.

3.1. Revisión del prototipo de Autofabricantes

Anteriormente se propuso otra solución distinta independiente a nuestro proyecto, mostrada en la figura 3.1, diseñada por un conjunto de alumnas de ingeniería mecánica, industrial y aeronáutica con la supervisión de ingenieros industriales, mecánicos, terapeutas ocupacionales y fisioterapeutas del equipo de Autofabricantes.

Figura 3.1: Prototipo inicial diseñado por Autofabricantes.

Esta prótesis se diseñó con el software Rhinoceros (ver Figura 3.2). La forma en la que se trabajó fue usando un modelo escaneado del brazo del paciente dentro del programa, consiguiendo que la superficie que se pinta para la prótesis siga la forma de la superficie del brazo real.



(a) Logo. (b) Vista del prototipo de Autofabricantes en Rhinoceros.

Figura 3.2: Software empleado para el diseño 3D del prototipo de Autofabricantes.

Este prototipo consta de tres partes, el soporte del bíceps, el antebrazo y la pinza. El soporte del bíceps encaja con el brazo del paciente.

3.1.1. Mecanismo del codo de Autofabricantes

Con codo nos referiremos a la unión entre el soporte del bíceps y el antebrazo. Ambas piezas se unen mediante dos tornillos y pueden cambiar su ángulo con un mecanismo que permite flexionar y extender la prótesis.

Un accionador sobresale por la parte interna. El paciente puede presionar ese vástago con el brazo derecho y cambiar el ángulo del codo.

El accionador está insertado en la pieza del antebrazo y tiene un muelle en la parte interna. Al colocar la pieza del bíceps y atornillarla, el accionador queda presionado contra unos surcos que funcionan a modo de angulador.

La pieza se muestra en la Figura 3.3.

(a) Codo desmontado.

(b) Montaje del codo.

Figura 3.3: Mecanismo del codo del prototipo de Autofabricantes.

3.1.2. Mecanismo de la muñeca de Autofabricantes

Con muñeca nos referimos a la unión entre el antebrazo y la pinza. Las piezas se unen con un vástago octogonal que se inserta en el antebrazo protésico. Este vástago puede girarse manualmente para cambiar la orientación de la pinza.

Por otra parte, en el extremo del antebrazo encontramos tres huecos circulares donde se pueden colocar tres enganches con los gadgets del proyecto SuperGiz.

3.1.3. Mecanismo de la pinza de Autofabricantes

El control de la pinza se realiza mediante un tensor que recorre la prótesis pasando por el bíceps y se engancharía en el antebrazo del paciente, y unas gomillas elásticas que la mantienen abierta.

(a) Muñeca desmontada. (b) Montaje de la muñeca.

Figura 3.4: Mecanismo de la muñeca del prototipo de Autofabricantes.

Mientras el paciente esté ejerciendo fuerza en el tensor con su antebrazo la pinza se mantiene cerrada. Cuando el paciente deja de ejercer fuerza la pinza se abre gracias a las gomillas que incorpora.

De esta forma, la apertura y cierre del antebrazo del paciente se traduce a la apertura o cierre de la pinza con control directo y sensibilidad de la fuerza ejercida.

3.1.4. Problemas que encontramos a este prototipo

El mayor inconveniente es que para cambiar el ángulo del codo el paciente tendría que usar la mano derecha para pulsar el accionador. Creemos que la mano derecha y la izquierda tienen que ser independientes para realizar un movimiento tan simple como es la flexoextensión.

Por otro lado el encaje del codo es muy cerrado. Teniendo en cuenta que la forma del codo del paciente cambia con la flexoextensión, creemos que podría ser doloroso y podría notar una molesta presión en esta zona.

Figura 3.5: Mecanismo de la pinza del prototipo de Autofabricantes.

3.2. Primera fase del desarrollo del proyecto

En esta fase se recogen los datos del paciente, se fija una idea inicial del diseño de la prótesis y se calcula el resto de datos necesarios. A partir de estos datos se establece el boceto definitivo, base del diseño en SolidWorks.

3.2.1. Toma de datos del paciente

El equipo de Autofabricantes se encargó de proporcionar las imágenes en 3D, mostradas en la Figura 3.7. Estas imágenes fueron capturadas mediante una aplicación móvil llamada *Captevia* y con un complemento que actúa como sensor de la marca *Structure Sensor*, expuesto en la Figura 3.6.

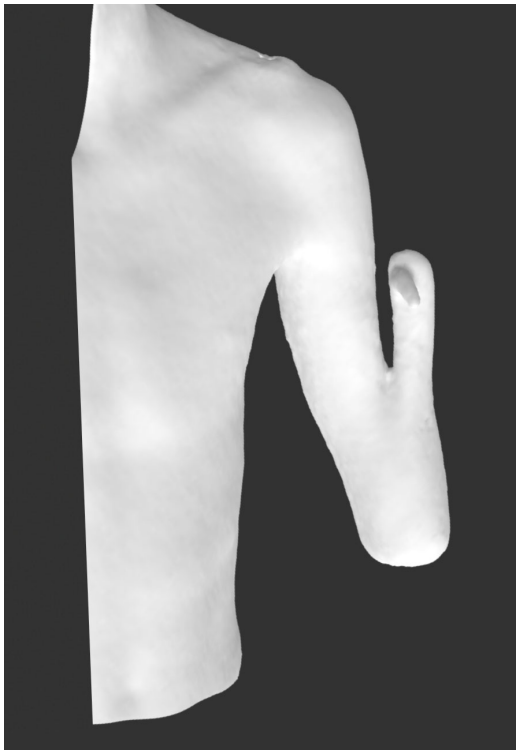
La escala de las imágenes 3D es 1:10, por lo que 1cm equivale a 10cm en la realidad y podemos obtener las medidas del brazo del paciente.

Figura 3.6: Escáner. Fuente: (*Structure Sensor - Rodin4D*, s.f.)

3.2.2. Bocetos iniciales del diseño

Partimos de una idea inicial mostrada en la Figura 3.8 en la que la zona del codo queda cubierta. Se compondría de dos piezas unidas por un tornillo.

Posteriormente se modificó el enganche en la zona del codo según se muestra en la Figura 3.9. Se pensó que para que no fuera tan restrictivo ni causara demasiado rozamiento tendríamos que evitar sujetar el brazo cerca del codo. Esta modificación necesitaría, por otra parte, una pieza a modo de brazalete que impidiera que la prótesis girase alrededor del antebrazo del paciente.



(a) Codo flexionado.

(b) Codo en posición intermedia.

(c) Codo extendido.

Figura 3.7: Vista previa de las imágenes en 3D.

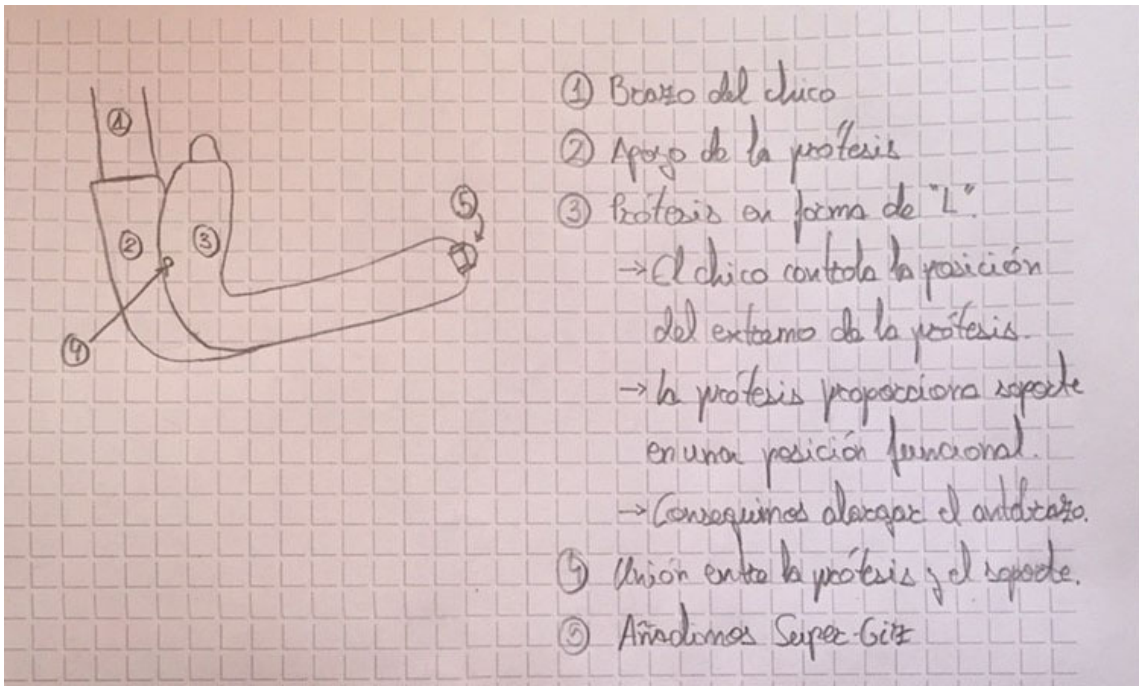


Figura 3.8: Boceto inicial de la prótesis.

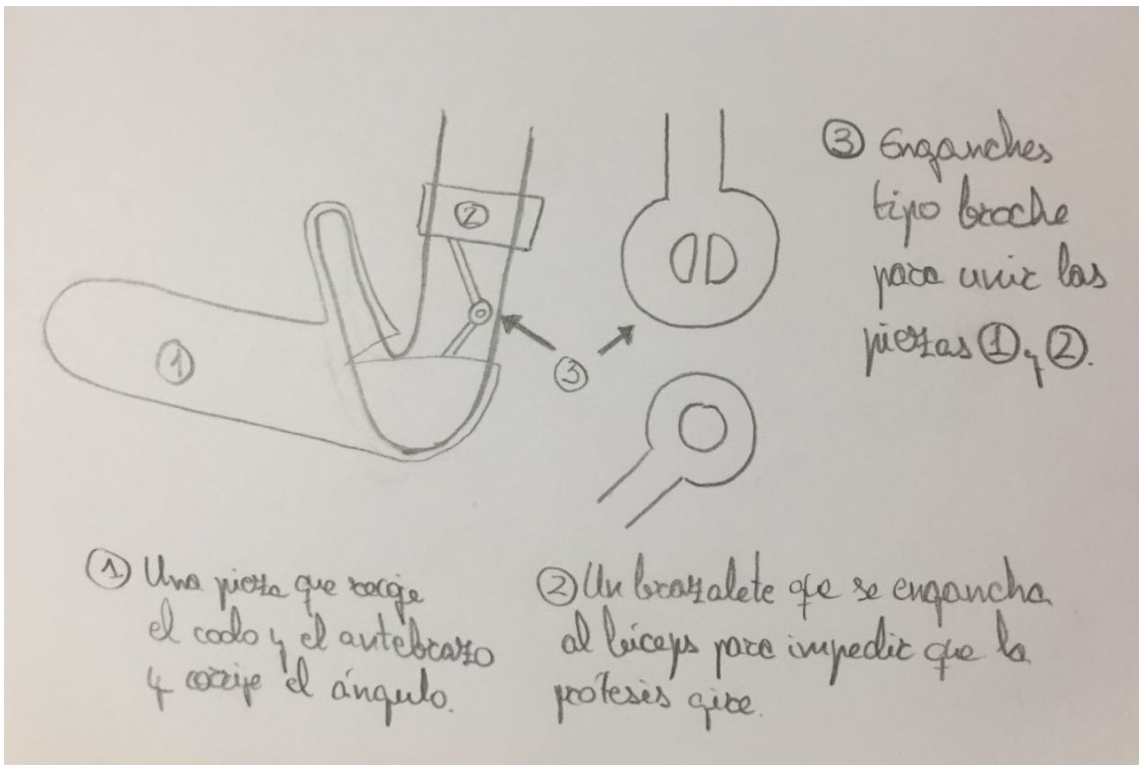


Figura 3.9: Segundo boceto de la prótesis.

3.2.3. Calculando los ángulos

En el capítulo anterior se describieron las posiciones funcionales del codo y la muñeca, cuyos ángulos se resumen en la Tabla 3.1.

	Rango de movimientos	**Ángulos funcionales**
Flexoextensión de codo	$0^o - 140^o/145^o$	$60^o - 120^o$
Pronación	$0^o - 85^o$	$0^o - 80^o$
Supinación	$0^o - 90^o$	$0^o - 45^o$
Flexión de muñeca	$0^o - 85^o$	-
Extensión de muñeca	$0^o - 85^o$	45^o
Abducción de muñeca	$0^o - 15^o$	-
Aducción de muñeca	$0^o - 45^o$	15^o

Tabla 3.1: Comparación entre el rango de movimientos y los ángulos funcionales de distintas partes del brazo.

3.2.3.1. El rango de movimientos del paciente

El siguiente paso sería analizar las imágenes 3D del paciente con el objetivo de determinar su rango de movimientos.

Para saber el ángulo que forma el brazo con el antebrazo se dibujaron dos ejes a lo largo de ambos segmentos. El punto en el que se cortan ambos ejes es donde se midió el ángulo. Esta medición se realizó en dos imágenes 3D, una en la que el paciente flexionaba su codo y otra en la que lo extendía al máximo. El procedimiento se muestra en la Figura 3.10.

Una vez detallado el ángulo de máxima y mínima apertura pudimos calcular con bastante precisión la forma en la que el paciente puede mover su antebrazo remanente.

$$180^o - 14,1^o = 165,9^o \tag{3.1}$$

$$180^o - 43,6^o = 136,4^o \tag{3.2}$$

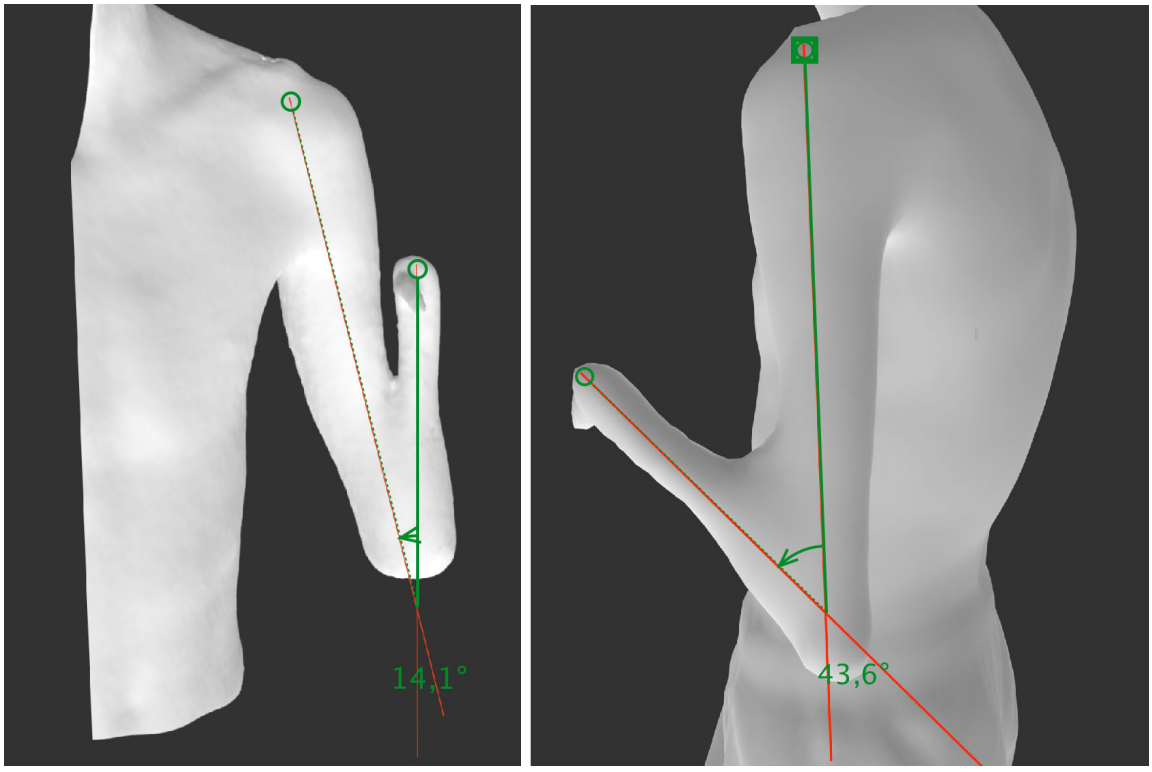
$$RangoFuncional = 210^o - 60^o = 60^o \tag{3.3}$$

$$RangoDelPaciente = 165,9^o - 136,4^o = 29,5^o \tag{3.4}$$

Con la conversión realizada en las Ecuaciones 3.1 y 3.2, el cálculo de las Ecuaciones 3.3 y 3.4, y con la Tabla 3.1, completamos la Tabla 3.2.

	Ángulos funcionales	Paciente
Flexoextensión de codo	$60^o - 120^o$ (60^o)	$136,4^o - 165,9^o$ $(29,5^o)$
Pronación	$0^o - 80^o$	-
Supinación	$0^o - 45^o$	-
Flexión de muñeca	-	-
Extensión de muñeca	45^o	-
Abducción de muñeca	-	-
Aducción de muñeca	15^o	-

Tabla 3.2: Comparación entre los ángulos funcionales y los que el paciente es capaz de realizar.



(a) Ángulo mínimo. (b) Ángulo máximo.

Figura 3.10: Medición de ángulos y tamaños en las imágenes 3D.

3.2.3.2. Corrección del ángulo

Utilizamos una corrección de ángulo para trasladar el movimiento del antebrazo del paciente al espacio funcional.

El paciente puede moverse en un rango de $29,5^o$, lo que, trasladado al centro de la ventana deseada de $60^o - 120^o$, equivaldría a mover el brazo entre $75,25^o - 104,75^o$.

Para convertir $136,4^o$ en $75,25^o$, y $165,9^o$ en $104,75^o$ habría que restar $61,15^o$.

De este modo se llegó a la conclusión de que habría que realizar una corrección de ángulo de $61,15^o$ en nuestra prótesis, es decir, el ángulo entre el antebrazo del paciente y el antebrazo protésico debe ser de $61,15^o$.

3.2.4. Simplificando las imágenes 3D

Las imágenes en 3D están en formato STL (*Standard Triangle Language*), un tipo de archivo CAD con la información necesaria del modelo. Sin embargo, este tipo de archivos están compuestos por un gran número de superficies o caras, vértices y aristas, es decir, una malla muy compleja que hace que SolidWorks no funcione de forma fluida.

Por esta razón optamos por simplificar las imágenes usando un programa en código abierto llamado MeshLab.

Inicialmente teníamos 19.504 caras. Tras una simplificación de malla con una reducción de un 0,02 quedarían en 390 caras. En las Figura 3.11 y 3.12 se detalla el procedimiento.

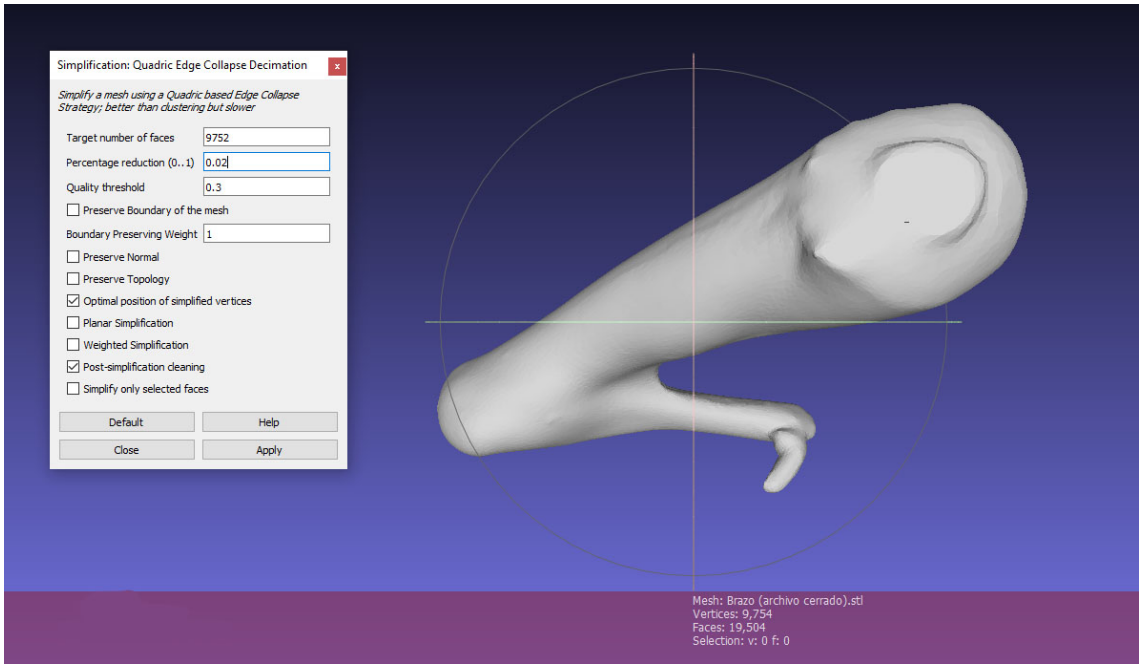


Figura 3.11: Modelo sin simplificar con 19.504 caras. Seleccionamos la reducción de malla de 0,02.

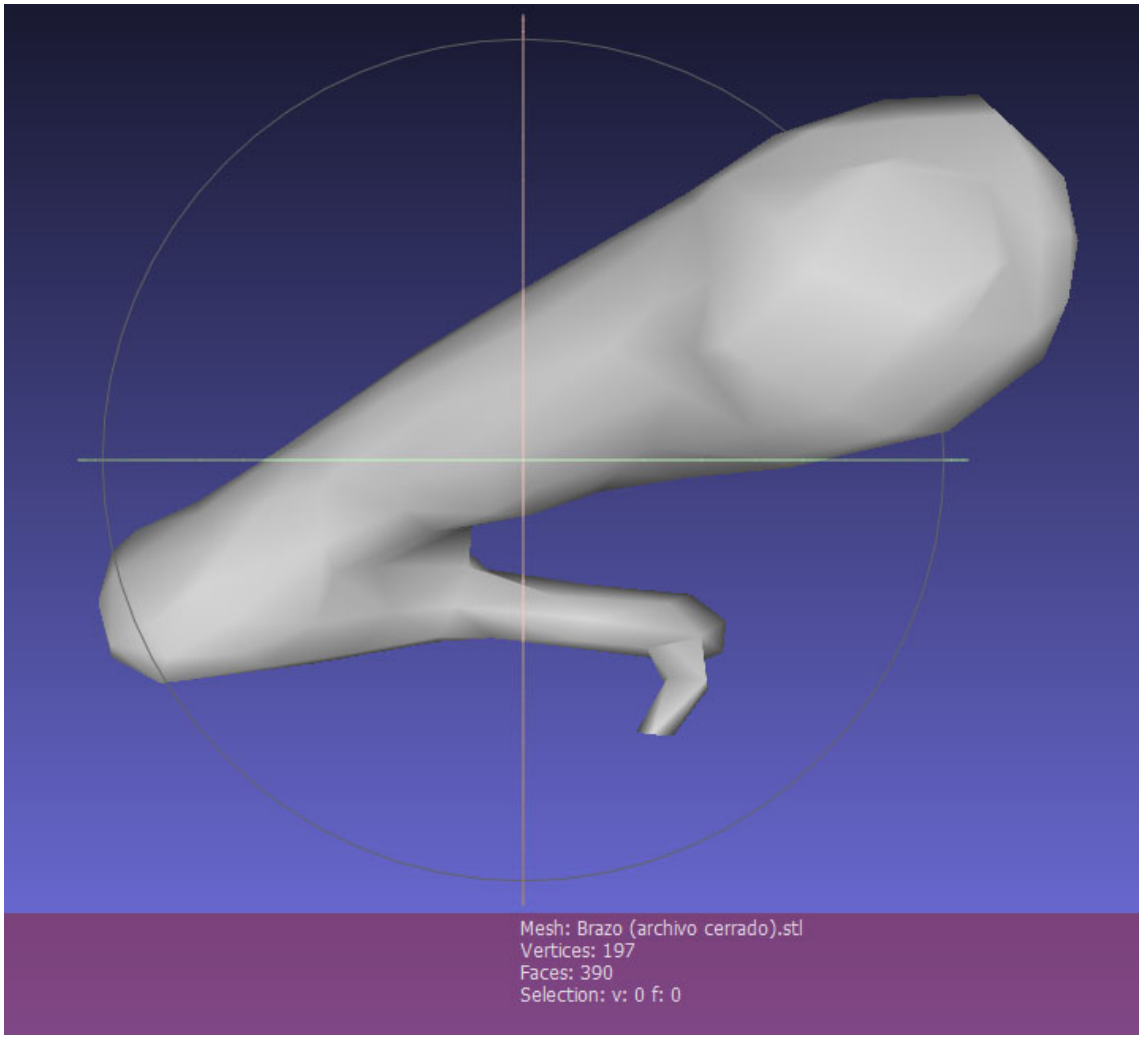


Figura 3.12: Modelo simplificado con 390 caras.

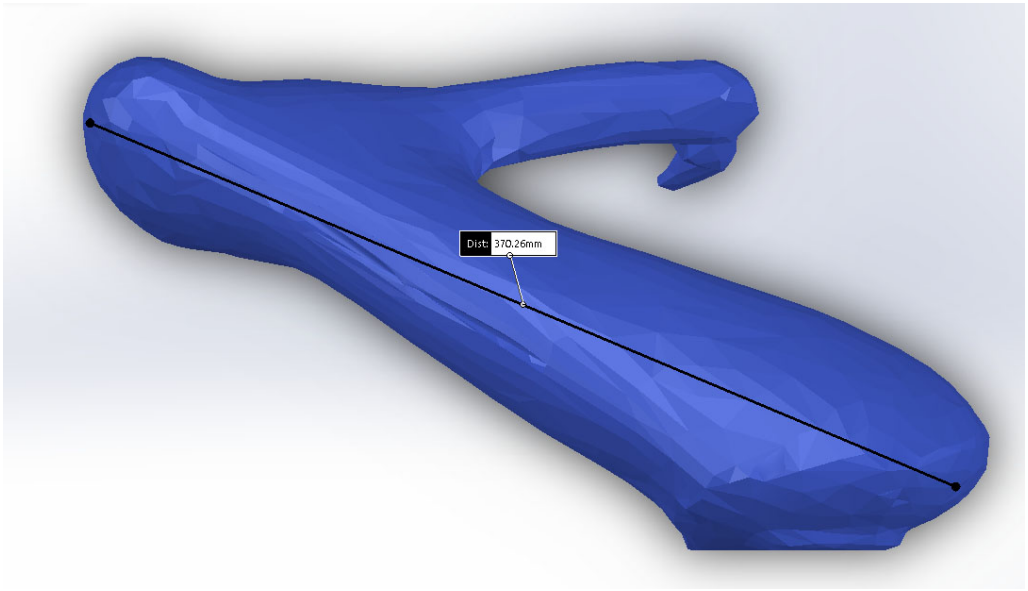
3.2.5. La toma de medidas

Al haber simplificado el modelo 3D del brazo y antebrazo del paciente con el procedimiento seguido en la Sección 3.2.4, pudimos abrir el archivo en SolidWorks para tomar las medidas necesarias.

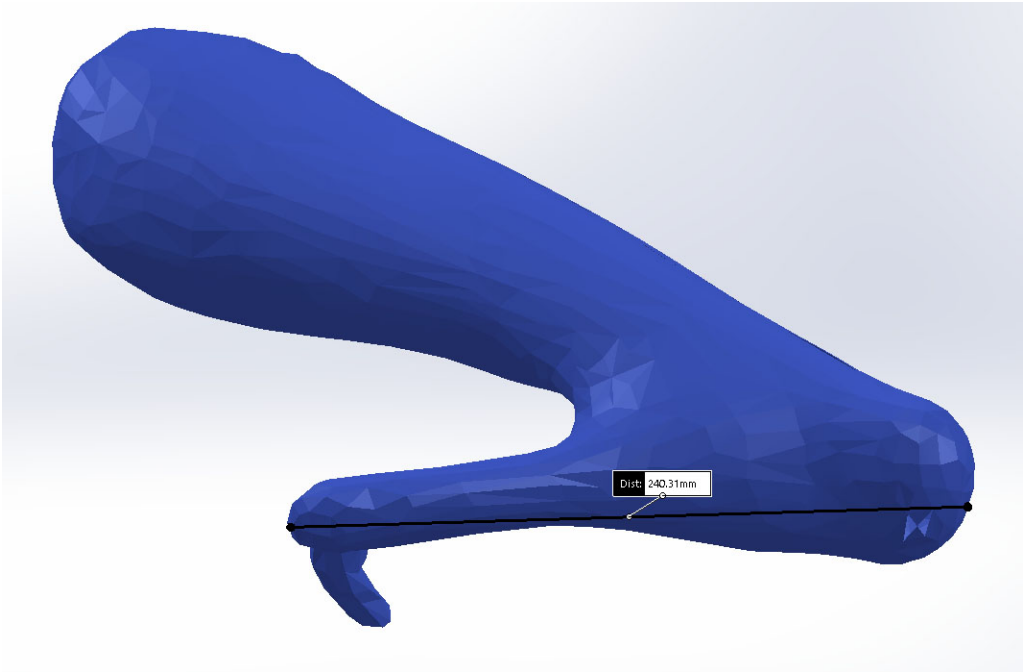
Para calcular la distancia mínima entre dos puntos del modelo usamos la herramienta *Medir* de la barra de herramientas y desactivamos la opción *Mostrar medidas de XYZ*. (*2019 Ayuda de SOLIDWORKS - Herramienta Medir*, s.f.)

En primer lugar se midió la longitud de los distintos segmentos como se muestra en la Figura 3.13. Luego se fue seccionando el brazo en distintos cortes para medir el diámetro mayor y menor según se detalla en la Figura 3.14. Por último se recogieron todas las medidas en la Figura 3.15.

Para seccionar el brazo en los cortes marcados en la Figura 3.15a se utilizó la herramienta *Vista de sección* que corta la figura en planos para mostrar el interior de la pieza. (*2019 Ayuda de SOLIDWORKS - Vistas de sección en los modelos*, s.f.)

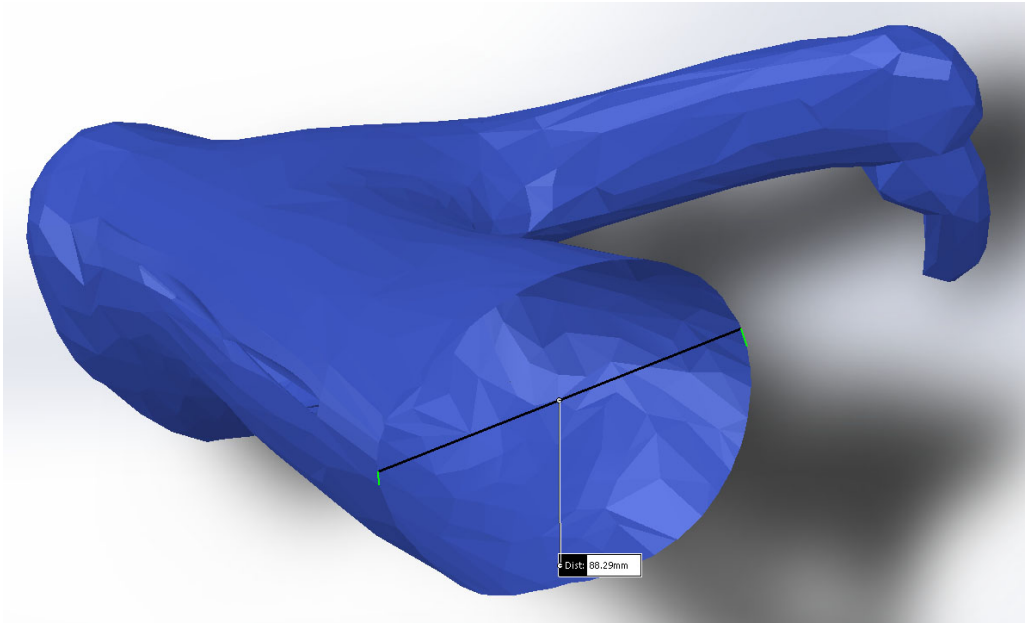


(a) Longitud del brazo del paciente.

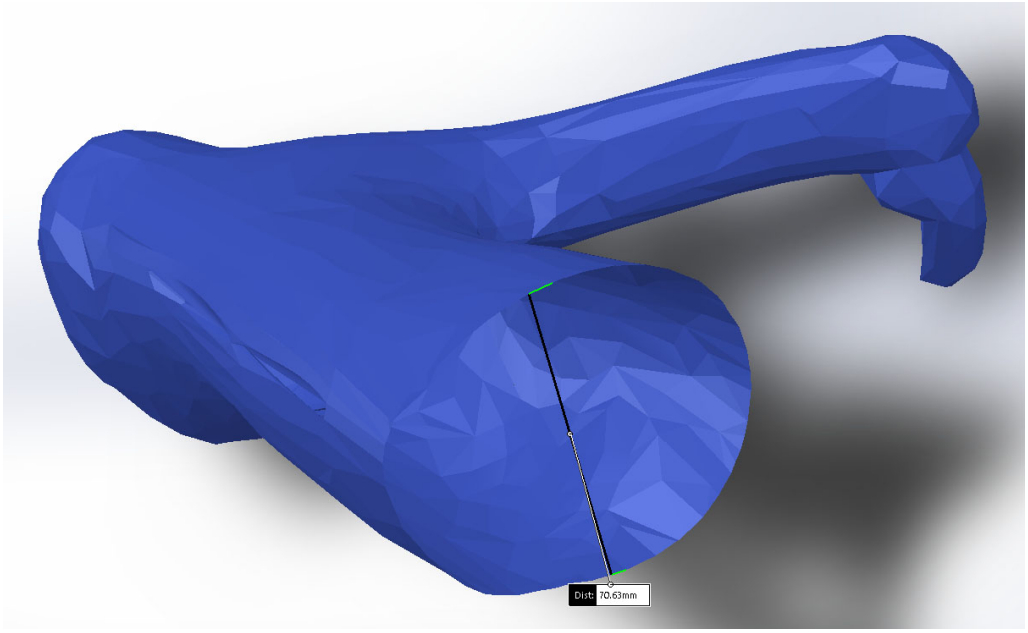


(b) Longitud del antebrazo del paciente.

Figura 3.13: Ejemplo del proceso de medida del escáner 3D del brazo del paciente.

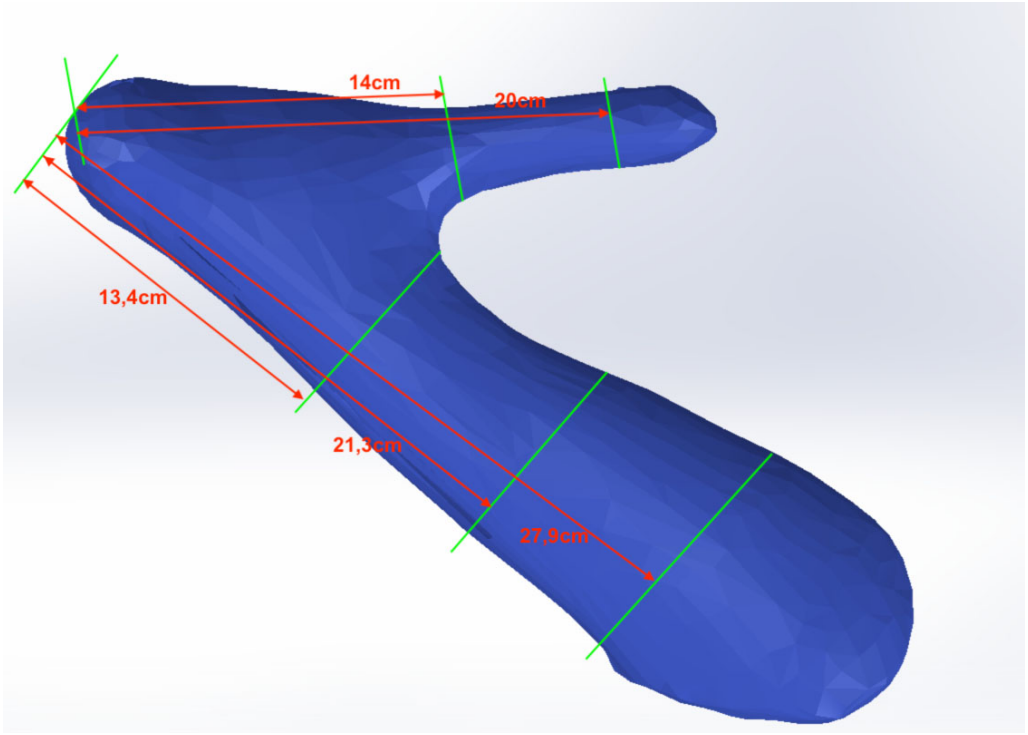


(a) Diámetro mayor en el corte a 21,3cm del codo.

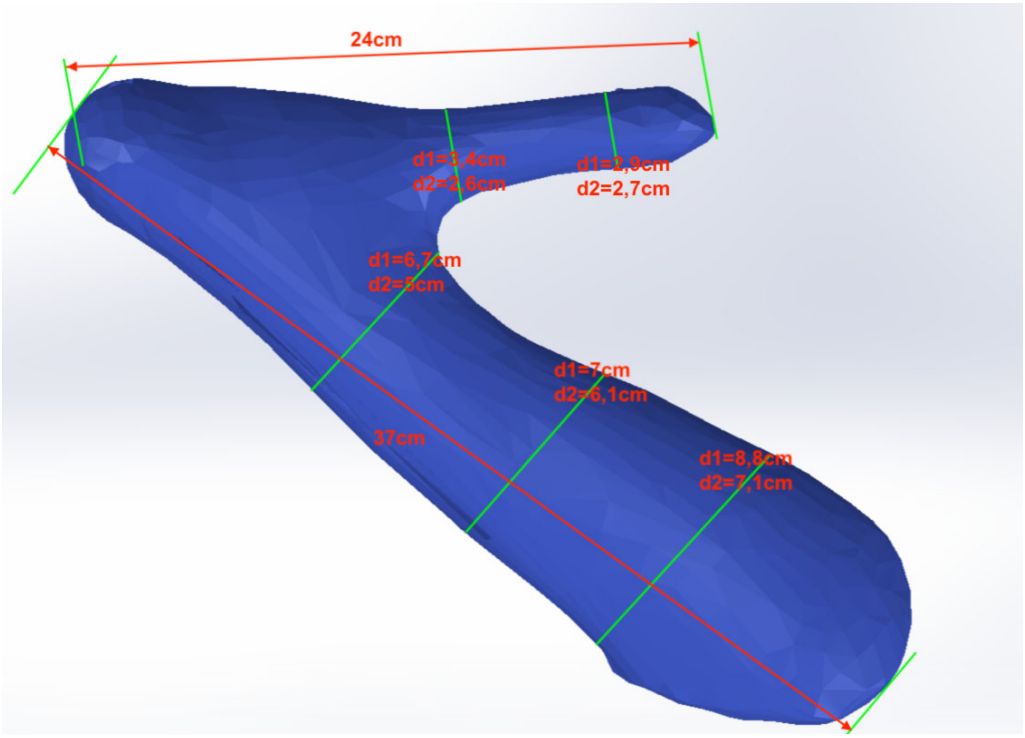


(b) Diámetro menor en el corte a 21,3cm del codo.

Figura 3.14: Ejemplo del proceso de medida de los diámetros del brazo en un corte realizado a 21,3cm del codo.



(a) Secciones en las que se midió el diámetro mayor y menor del brazo.



(b) Medidas de los diámetros y longitudes mayores.

Figura 3.15: Resumen del proceso de toma de medidas del escáner 3D del brazo del paciente.

3.2.6. Boceto definitivo

Una vez que habíamos calculado todas las medidas necesarias para nuestro modelo pudimos construir un nuevo boceto con todas las cotas necesarias. El boceto se muestra en la Figura 3.16. A partir de este boceto se empezaron a diseñar en SolidWorks los prototipos.

En nuestro boceto final la prótesis se compondría de tres piezas principales: el antebrazo, el codo y el brazalete. La razón por la que se separó el antebrazo del codo es porque mientras que el antebrazo tendría que ser de PLA, el codo sería de un material flexible tipo TPU o Willowflex que se adaptase a la anatomía del paciente.

Además se dejaría una apertura en la parte de atrás del codo para que no quedara tan cerrado y se pudiera adaptar a la anatomía del brazo del paciente. Además se engancharía al antebrazo del paciente solo en la parte central.

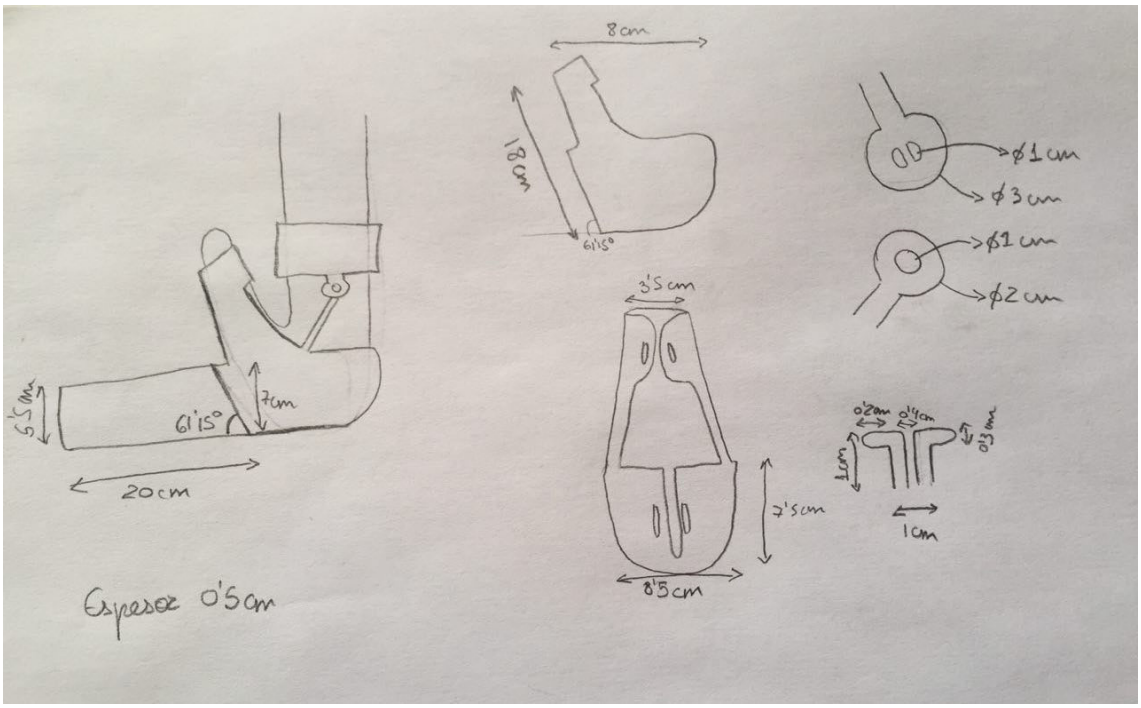


Figura 3.16: Boceto final de la prótesis con las medidas necesarias para empezar a diseñar en SolidWorks.

3.3. Segunda fase del desarrollo del proyecto

En esta fase, basándonos en los datos recogidos en la primera fase, se detalla el diseño de la prótesis en SolidWorks. Primero se exponen las herramientas de SolidWorks usadas y luego las distintas versiones de la prótesis.

3.3.1. Herramientas empleadas en el diseño

3.3.1.1. Geometrías de referencia

Para realizar cualquier diseño necesitamos, a parte del origen de coordenadas y la planta, alzado y perfil, una serie de planos y ejes auxiliares que nos ayudarán a orientarnos y definir las direcciones de extrusión. Utilizaremos las geometrías de referencia, en particular los ejes y los planos.

Se pueden crear ejes de referencia a partir de una línea, arista o eje previamente definidos, como intersección de dos planos, como unión de dos puntos, como eje de una superficie cilíndrica o cónica, y como proyección de un punto sobre una cara o plano. (*2019 Ayuda de SOLIDWORKS - Creación de ejes de referencia*, s.f.)

Podemos crear planos paralelos a otros planos, perpendiculares o con cierto ángulo, que pasen por un punto o una recta, etc. Por ejemplo, en nuestro diseño se creó un plano a $61,15^o$ de la planta que pasara por un eje. Este plano es la base de la corrección de ángulo de nuestra prótesis y se muestra en la Figura 3.17. (*2019 Ayuda de SOLIDWORKS - Creación de planos*, s.f.)

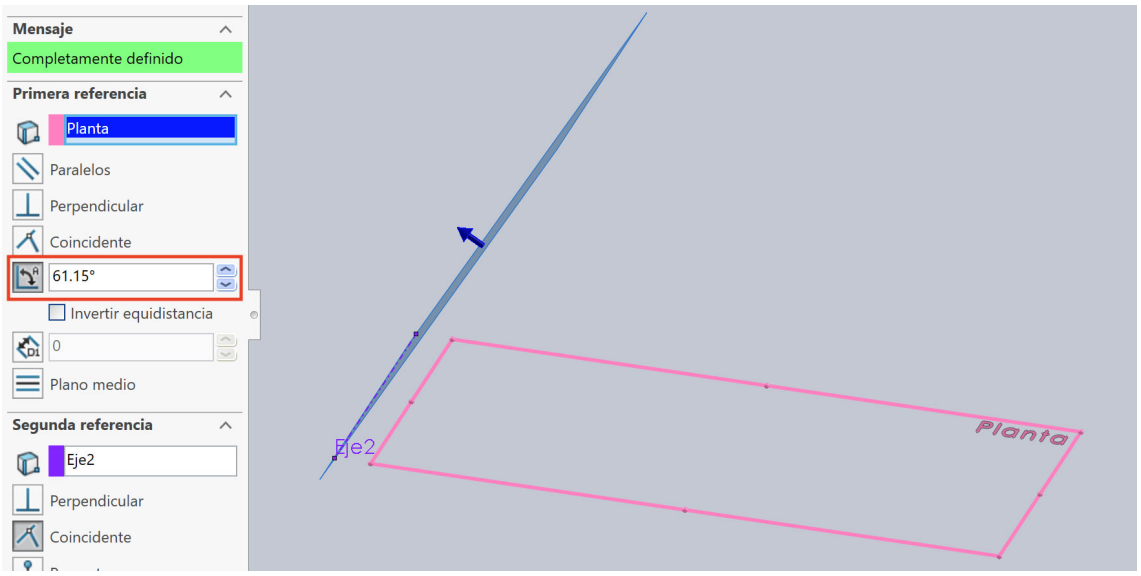


Figura 3.17: Creación de un plano de referencia a $61,15^o$ de la planta, base de la corrección de ángulo.

3.3.1.2. Dibujando croquis

Los diseños en SolidWorks se realizan a partir de croquis que contienen las medidas deseadas. Las relaciones entre los trazo de los croquis hacen que un croquis

esté definido. A estos croquis se les dará forma posteriormente extruyendo salientes o cortes en 3D. (*2019 Ayuda de SOLIDWORKS - Croquis*, s.f.)

Se pueden dibujar croquis sobre un plano, una cara plana o una arista. En el menú de diseño de un croquis hemos utilizado varias herramientas:

- Línea, arco, círculo y elipse para dibujar trazos simples.
- Cota inteligente para establecer las cotas necesarias.
- Convertir y recortar entidades para añadir o eliminar del croquis actual trazos de otros croquis dibujados anteriormente.

3.3.1.3. Extrusión y recubrimiento

A partir de un croquis se extruye un saliente o un corte. (*2019 Ayuda de SOLIDWORKS - Extrusiones*, s.f.)

Para la operación de recubrimiento se necesita más de un croquis en el espacio a partir de los cuales se realiza una transición y se crea un perfil. Por ejemplo en la pieza del antebrazo se utilizaron dos croquis y el programa nos dibuja un perfil continuo entre ambos, como se muestra en la Figura 3.18. (*2019 Ayuda de SOLIDWORKS - Recubrimientos*, s.f.)

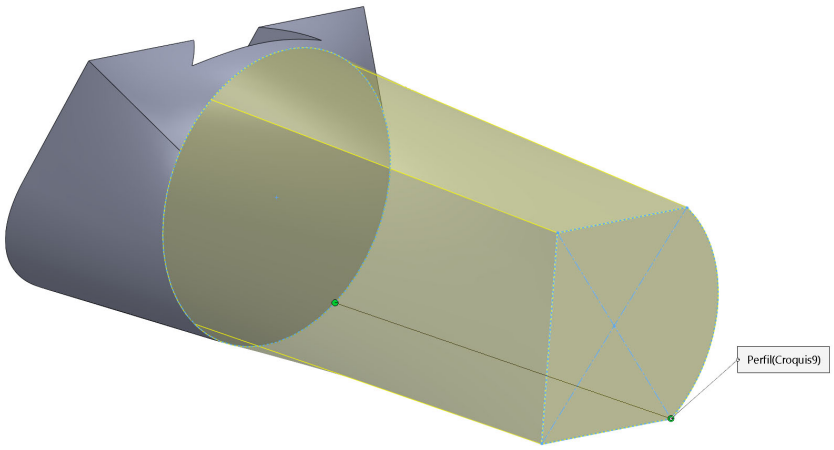
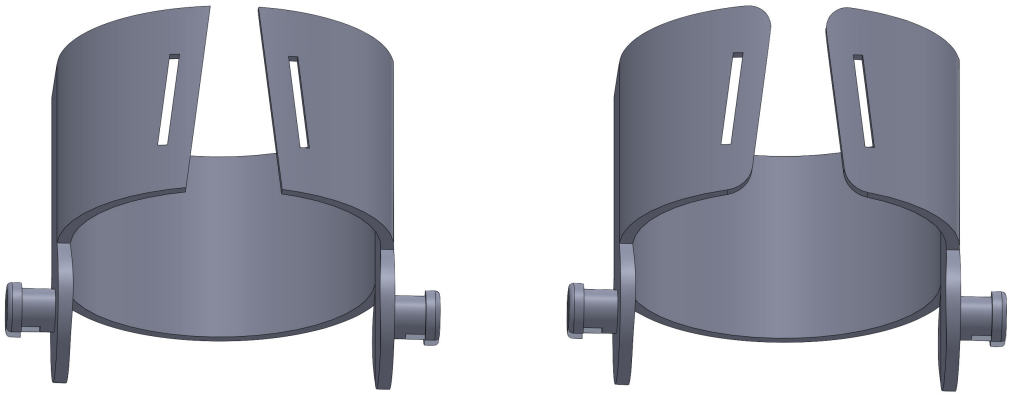


Figura 3.18: Recubrimiento creando una transición entre dos croquis.

3.3.1.4. Redondeo

Para crear superficies romas que no se claven en el brazo del paciente se redondearon todas las esquinas y picos. Se muestra un ejemplo del brazalete en la Figura 3.19. (*2019 Ayuda de SOLIDWORKS - Perspectiva general de Redondeo*, s.f.)



(a) Antes de redondear. (b) Después de redondear.

Figura 3.19: Comparación entre la pieza del antebrazo antes y después de redondear.

3.3.2. Primeras versiones de los modelos en SolidWorks

Para trabajar simultáneamente con el escáner 3D del brazo del paciente primero teníamos que diseñar un prototipo en SolidWorks que siguiera las medidas detalladas en el boceto de la Sección 3.2.6.

3.3.2.1. Primera versión del antebrazo

Para el diseño del antebrazo se usó una operación de recubrimiento entre el enganche con el codo y el inicio de la extensión cilíndrica, y una extrusión de superficie por el resto. En en extremo del antebrazo irían los cuatro enganches de SuperGiz. El modelo se muestra en la Figura 3.20.

Sin embargo más tarde se modificaría para que la superficie en la que van los enganches de SuperGiz fuera plana en lugar de cilíndrica y lograr así una superficie mayor y un mejor aguante.

3.3.2.2. Primera versión del brazalete

Para el brazalete se empezó diseñando un modelo básico de paredes gruesas al que luego le fuimos dando forma. El modelo se muestra en la Figura 3.21.

3.3.2.3. Primera versión del codo

Siguiendo el boceto de la Sección 3.2.6 se diseñó, en primer lugar, una pieza (mostrada en la Figura 3.22) en la que el codo quedaba cerrado y sujeto por la parte de atrás. Sin embargo, analizando los movimientos del brazo del paciente, y viendo que el codo cambiaba de forma con la flexoextensión, se pensó que si hacíamos esta pieza muy cerrada podría causar molestias. Por esta razón preferimos abrir la parte de atrás y liberar la zona, como se muestra en la Figura 3.23.

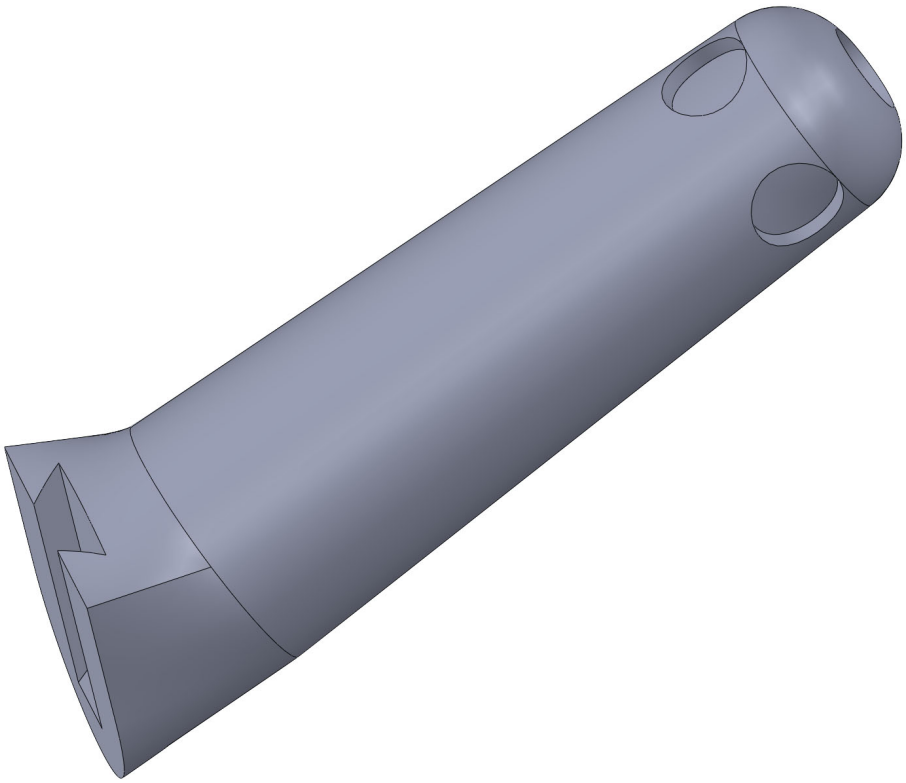


Figura 3.20: Primera versión del antebrazo.

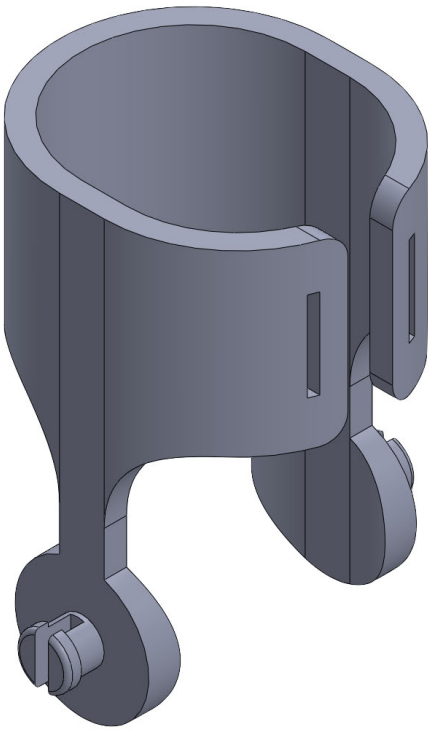


Figura 3.21: Primera versión del brazalete.

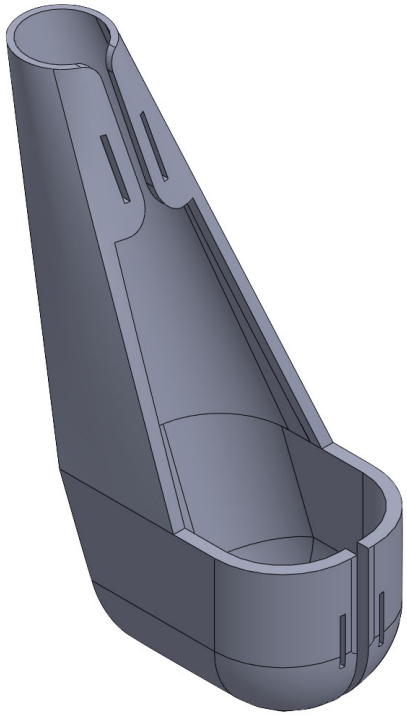


Figura 3.22: Primera versión del codo con la parte de atrás cerrada.

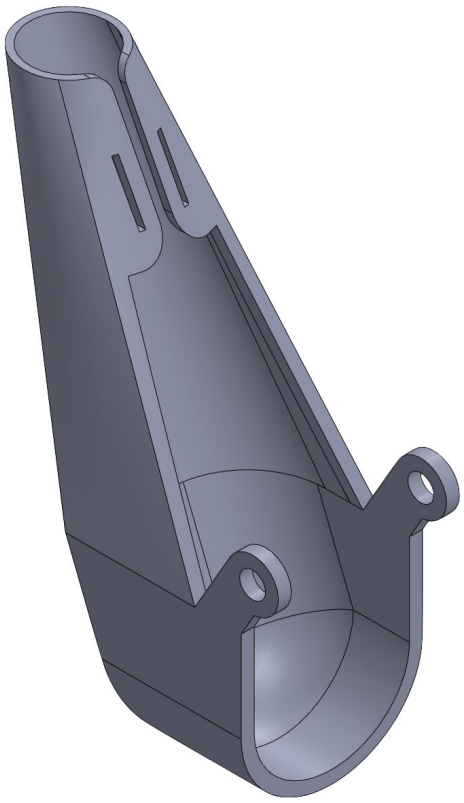


Figura 3.23: Primera versión del codo mejorada, con la parte de atrás liberada.

3.3.2.4. Ensamblaje de la primera versión de la prótesis

Después de diseñar las piezas se ensamblaron en SolidWorks para analizarlas en conjunto, según se muestra en la Figura 3.24. El brazalete se uniría al codo con un broche a presión.

Una vez que teníamos este prototipo se pudo trabajar simultáneamente con el escáner 3D del brazo del paciente, mostrado en la Figura 3.25. A partir de este punto se pudo adaptar la prótesis al brazo del paciente y hacerla a medida.

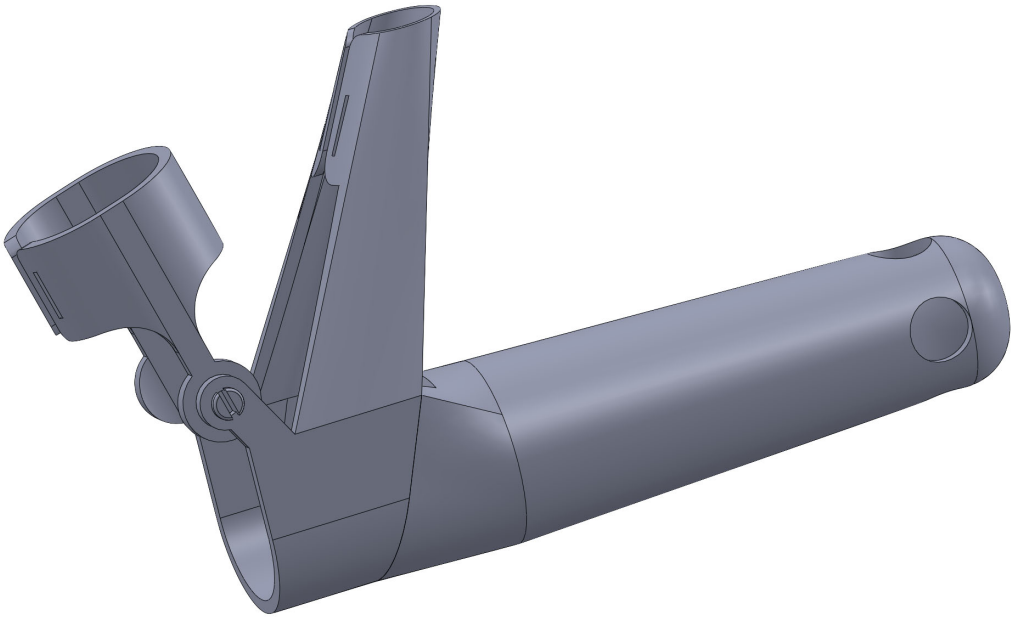


Figura 3.24: Ensamblaje de la primera versión de la prótesis.

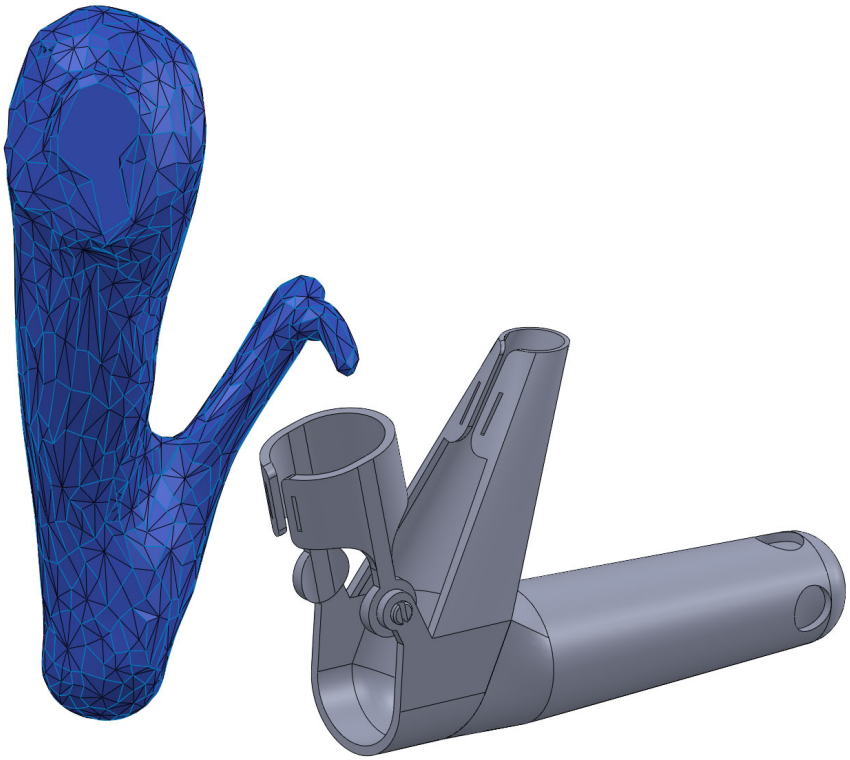


Figura 3.25: Añadiendo el escáner 3D del brazo del paciente al ensamblaje.

3.4. Modelo definitivo de la prótesis

Al trabajar simultáneamente con el brazo del paciente se cambiaron algunas medidas para que la prótesis encajara mejor. El cambio más significativo entre la primera versión y la definitiva fue el enganche entre el antebrazo y el brazalete.

Para que la prótesis no girara sobre el antebrazo del paciente necesitaba un brazalete que impidiera el giro. En un primer modelo se pensó que el brazalete podría unirse al codo mediante unos broches a presión, sin embargo, esta idea se descartó. Como en nuestro paciente es muy complicado calcular el eje de giro de su codo, necesitábamos una solución que permitiera tener un eje de giro menos restrictivo pero que siguiera impidiendo el giro de la prótesis sobre su pequeño antebrazo.

Por esta razón se diseñó un enganche tipo bolsillo donde se insertaba un vástago unido al brazalete. El vástago podría desplazarse libremente dentro del bolsillo, adaptándose al movimiento del codo del paciente, pero impidiendo a la vez que la prótesis girara sobre el antebrazo del paciente.

En la Figura 3.26 se muestran el alzado planta y perfil de la prótesis sin el modelo 3D del brazo del paciente. En la Figura 3.27 se ha añadido el modelo 3D del brazo del paciente para comprobar que encaja perfectamente dentro de la prótesis.

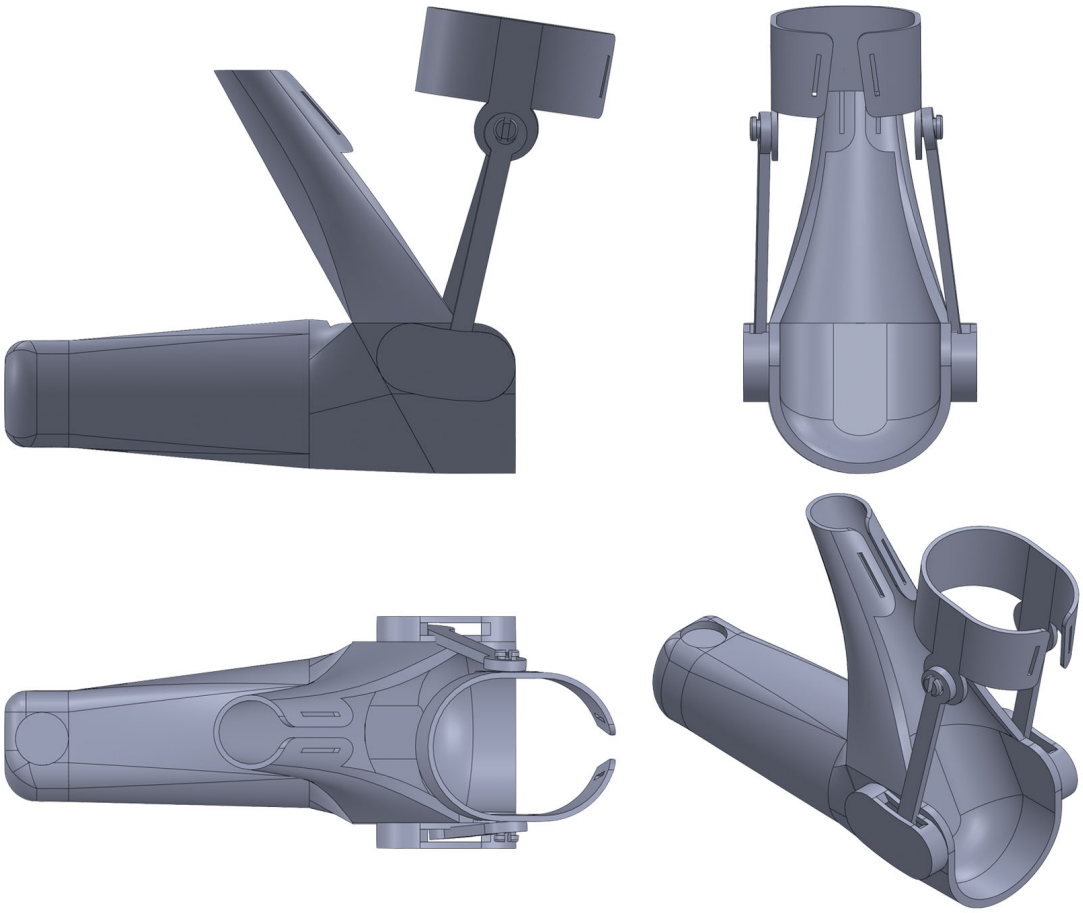


Figura 3.26: Alzado, planta, perfil derecho y vista isométrica del modelo definitivo de la prótesis.

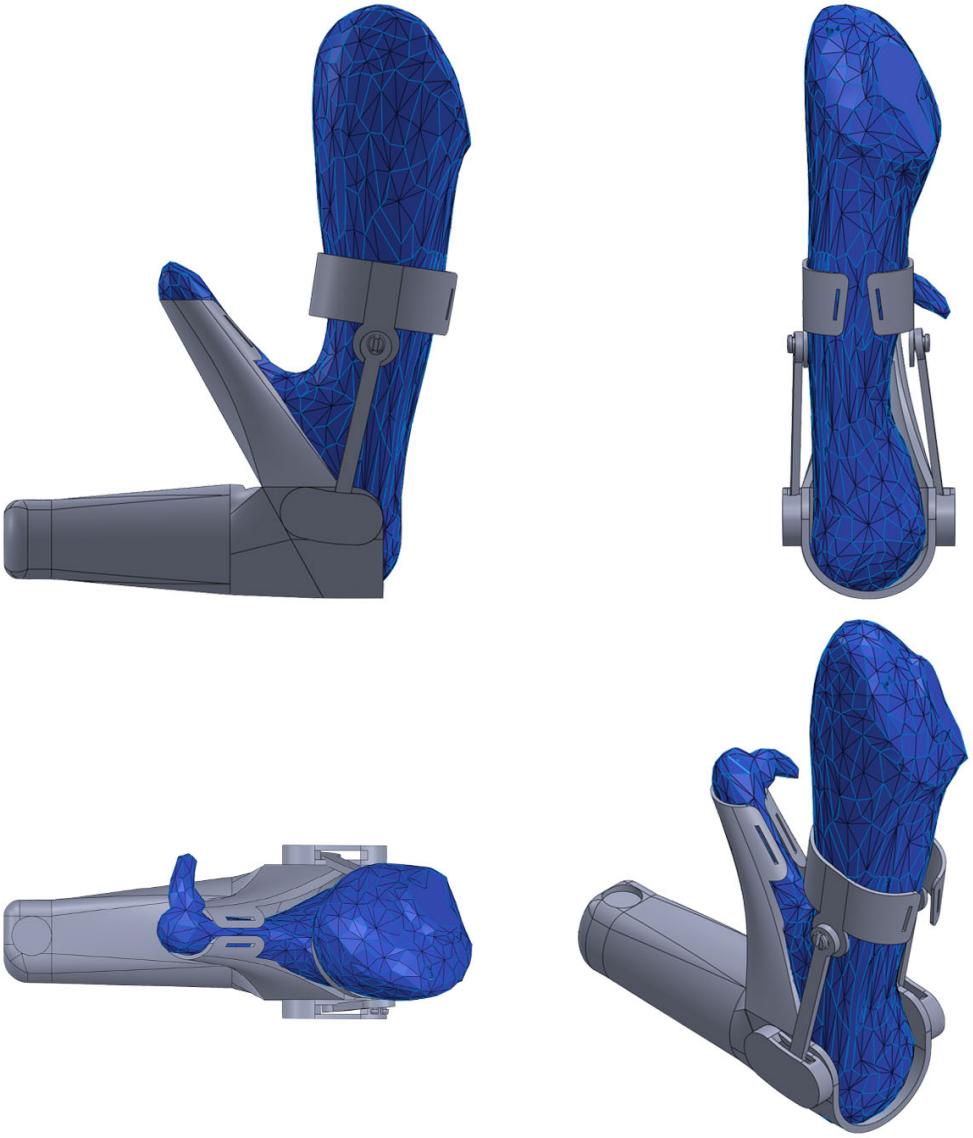


Figura 3.27: Comprobación de que el brazo encaja en la prótesis. Vistas de alzado, planta, perfil derecho e isométrica.

3.4.1. Alzado planta y perfil del antebrazo

En la Figura 3.28 se muestran el alzado planta y perfil del antebrazo. En la Figura 3.29 se muestran otras vistas de esta pieza.

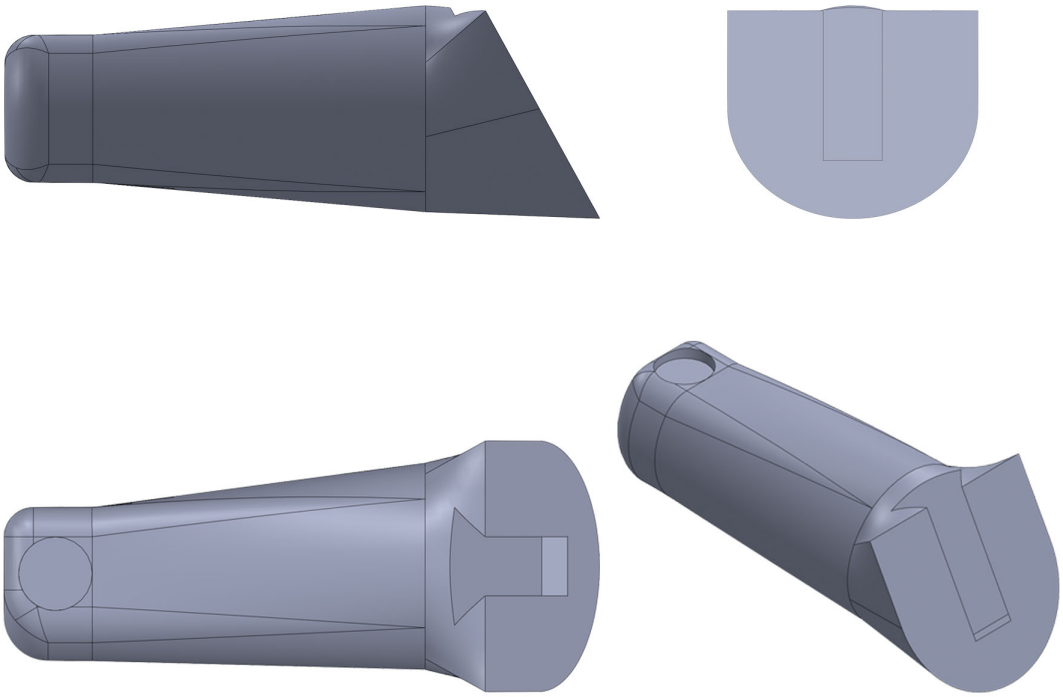
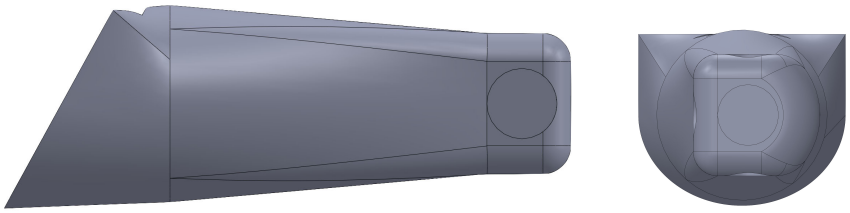


Figura 3.28: Alzado planta, perfil derecho y vista isométrica del antebrazo.



(a) Perfil izquierdo. (b) Vista posterior.

Figura 3.29: Otras vistas del antebrazo.

3.4.2. Alzado planta y perfil del brazalete

En la Figura 3.30 se muestran el alzado planta y perfil del brazalete.

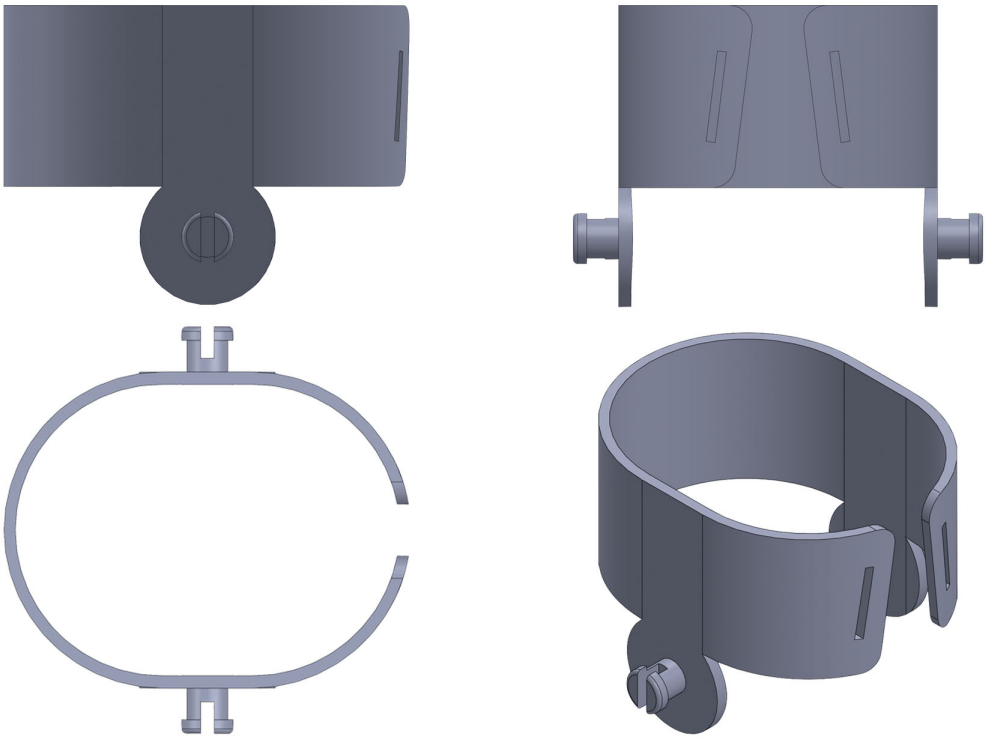


Figura 3.30: Alzado planta, perfil derecho y vista isométrica del brazalete.

3.4.3. Alzado planta y perfil del codo

En la Figura 3.31 se muestran el alzado planta y perfil del codo.

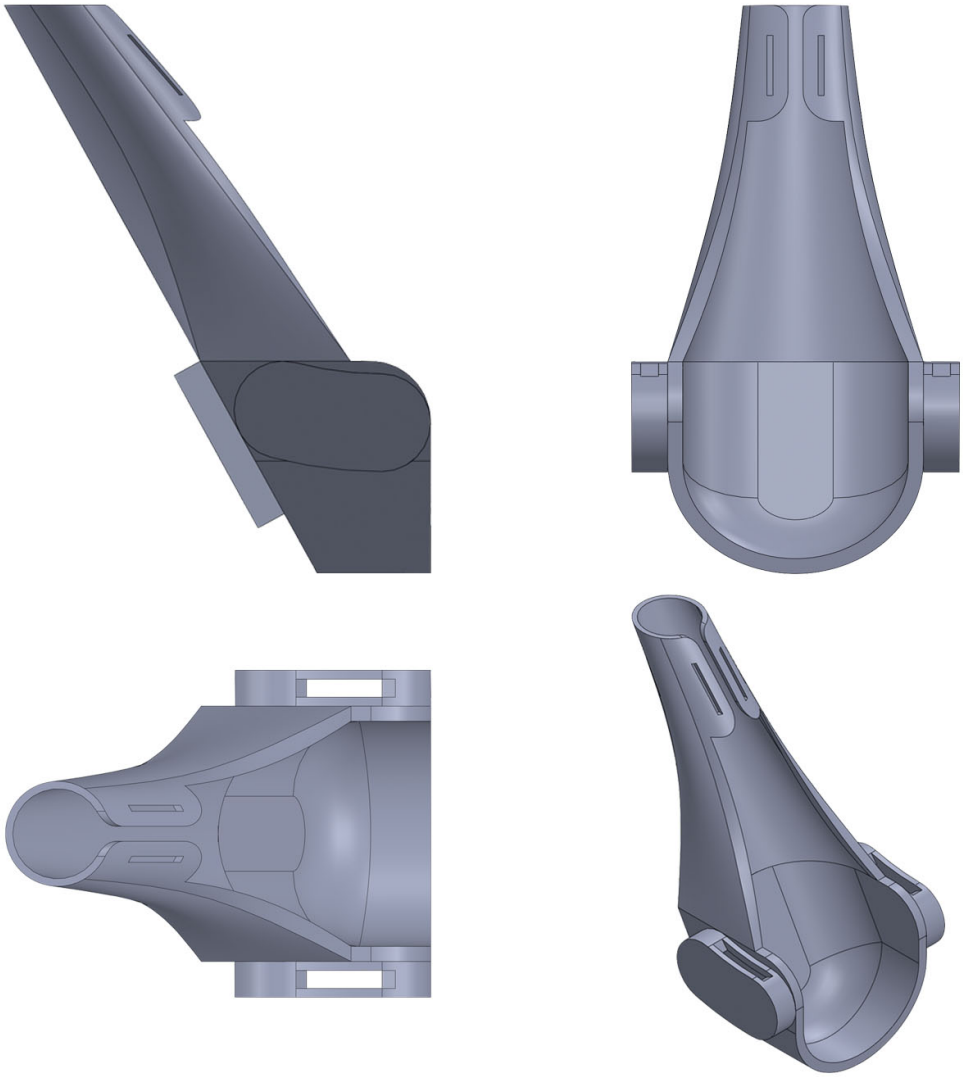


Figura 3.31: Alzado planta, perfil derecho y vista isométrica del codo.

3.4.4. Alzado planta y perfil del vástago de unión

En la Figura 3.32 se muestran el alzado planta y perfil del vástago de unión entre el codo y el brazalete.

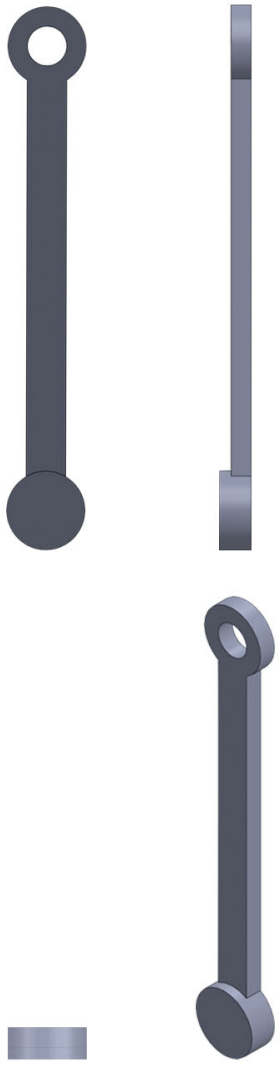
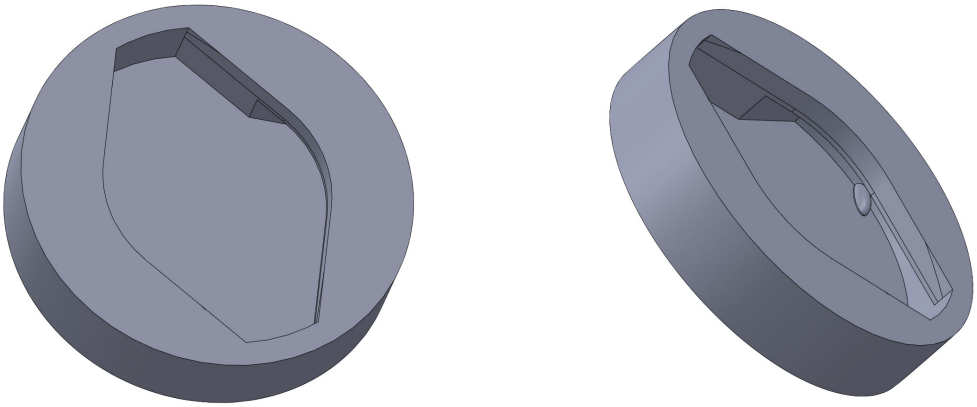


Figura 3.32: Alzado, planta, perfil derecho y vista isométrica del vástago de unión entre el codo y el brazalete.

3.4.5. Enganche con SuperGiz

Esta pieza sigue las medidas del proyecto de Autofabricantes SuperGiz. Se diseñó la misma pieza en SolidWorks.En la Figura 3.33 se muestra el enganche con los gadgets de SuperGiz.



(a) Enganche con SuperGiz.

(b) Detalle del enganche.

Figura 3.33: Enganche con los gadgets de SuperGiz. Los gadgets se enganchan con media vuelta de tuerca y el pequeño saliente en el interior ejerce rozamiento para que las piezas no se salgan.

3.5. Impresión 3D

Desde SolidWorks se exportaron los archivos SLDPRT *(SolidWorks Part)* de las piezas a STL, el formato usado en impresión 3D.

El proceso de impresión 3D del primer diseño del proyecto ha sido llevado a cabo por la Asociación Autofabricantes en las instalaciones de Medialab Prado (Madrid).

En la Figura 3.34 se muestran las piezas una vez impresas, sin limpiar.

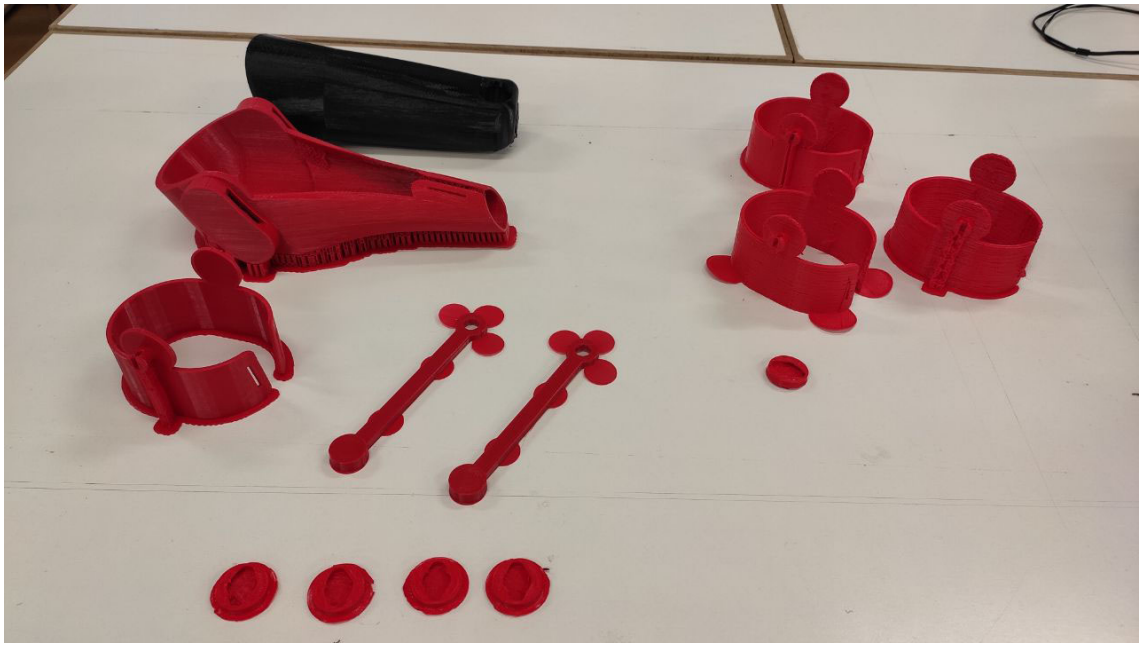


Figura 3.34: Piezas recién impresas, sin limpiar.

3.5.1. Datos de la impresión 3D

Se han utilizado impresoras tipo FDM marca Makerbot modelo Replicator 2+ y marca Prusa modelo MK3. Se ha impreso un objeto de cada parte del diseño excepto del brazalete que ha conllevado tres pruebas de impresión por motivos de fallos de material. Las máquinas son parte de las instalaciones de Medialab Prado y los materiales y tiempo han sido facilitados por Autofabricantes.

El tiempo total empleado en la impresión 3D ha sido de 41,5 horas aproximadamente, en la limpieza de los objetos 1 hora aproximadamente y en el montaje y acabado 3 horas aproximadamente.

El coste comercial estimado de producción podría ser de 250€, que bajo la colaboración con la UMA no han sido imputados.

El antebrazo fue la única pieza que se imprimió en PLA. El tiempo de impresión fue de 15 horas. Se utilizó 0,25mm de altura de capa, 30 % de relleno interno y 4 capas de perímetro exterior.

El codo se imprimió en TPU 98A. El tiempo de impresión fue de 20 horas. Se utilizó 0,25mm de altura de capa, 30 % de relleno interno y 4 capas de perímetro exterior.

El brazalete se imprimió en TPU 98A. El tiempo de impresión fue de 2,5 horas. Se utilizó 0,25mm de altura de capa, 30 % de relleno interno y 4 capas de perímetro exterior.

Las dos piezas de unión entre el codo y el brazalete se imprimieron en TPU 98A. El tiempo de impresión fue de 1,5 horas. Se utilizó 0,20mm de altura de capa, 40 % de relleno interno y 4 capas de perímetro exterior.

Los cuatro enganches de SuperGiz se imprimieron en Willowflex. El tiempo de impresión fue de 0,5 horas. Se utilizó 0,20mm de altura de capa, 40 % de relleno interno y 4 capas de perímetro exterior.

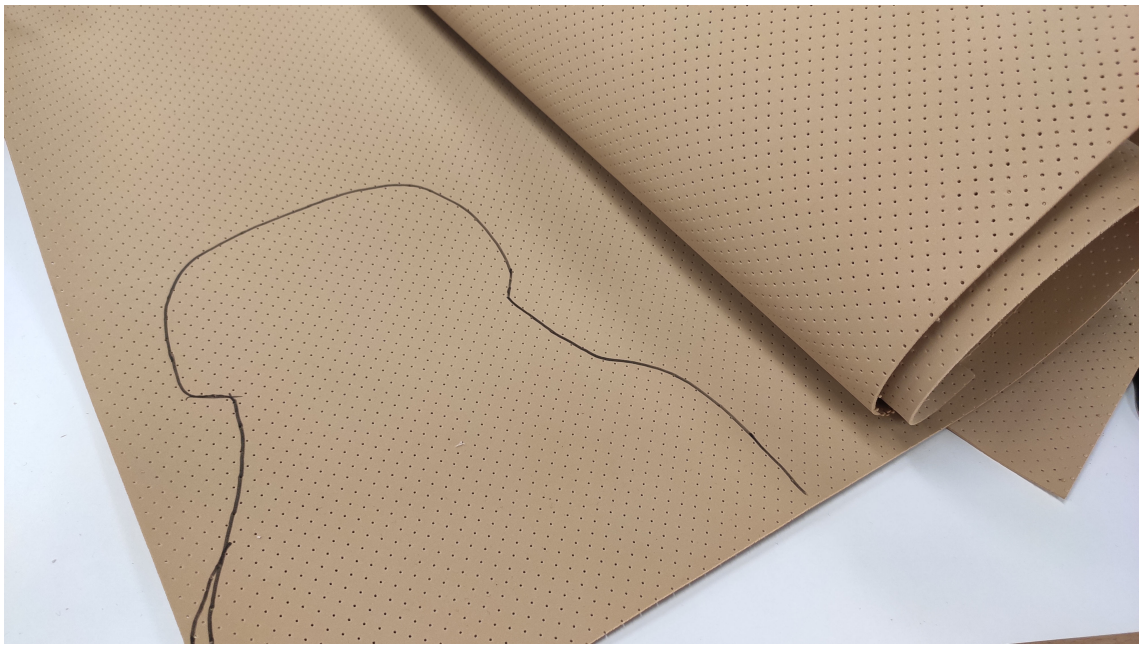
3.5.2. Montaje y preparación de la prótesis

Cuando se imprime en 3D quedan restos de material sobrante que se tienen que retirar. En la figura 3.35 se muestra la prótesis limpia.

Figura 3.35: Piezas montadas después de limpiar el material sobrante.

Además, cuando dos piezas son de distinto material hay que ensamblarlas y pegarlas. Esto ocurre entre el codo y el antebrazo, y entre el antebrazo y los enganches con SuperGiz. Para pegar las piezas se utilizó silicona caliente.

Para la adaptación y comodidad de la prótesis se colocaron los velcros y se pegó la goma EVA a medida para recubrir las partes en contacto con el paciente. La goma EVA se puede recortar con tijeras y pegar con silicona caliente. El proceso de recubrimiento de la prótesis con goma EVA se muestra en la Figura 3.36.



(a) Recortando la goma eva.

(b) Pegando la goma eva con silicona caliente.

Figura 3.36: Proceso de recubrimiento de la prótesis con goma EVA.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Impresión 3D y montaje de la prótesis

Una vez montada, la prótesis quedaría como se muestra en las Figuras 4.1 y 4.2. Los gadgets del proyecto SuperGiz de Autofabricantes encajan en el extremo de la prótesis. En las Figuras 4.3 y 4.4 se muestra el encaje de un gadget con la prótesis.

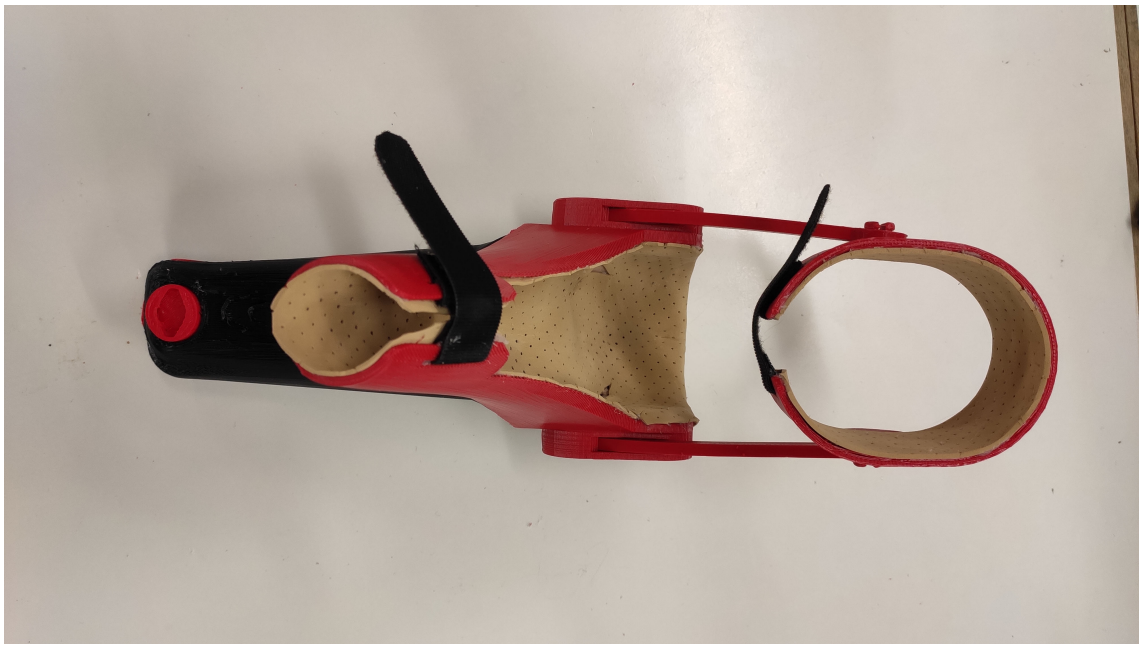


Figura 4.1: Vista superior de la prótesis tras el montaje.

Figura 4.2: Vista lateral de la prótesis tras el montaje.

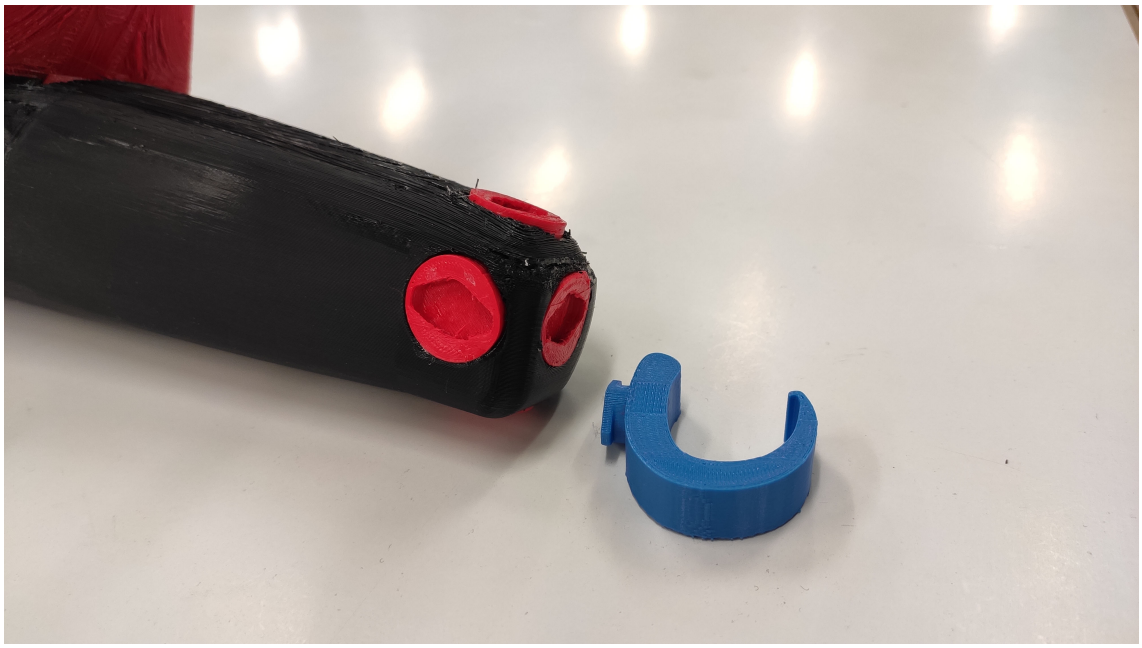


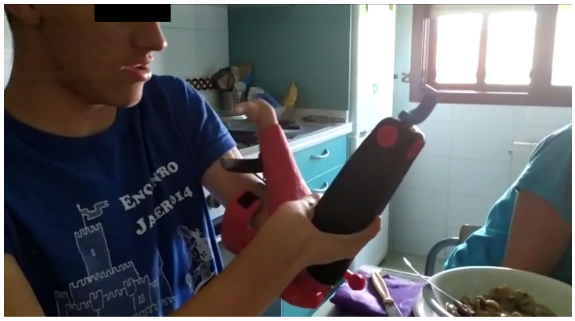
Figura 4.3: El enganche macho del gadget encaja con el enganche hembra de la prótesis.

Figura 4.4: Con media vuelta de tuerca se engancha el gadget.

4.2. Pruebas con el paciente

Una vez el paciente tenía la prótesis no le fue complicado colocársela. Para que le fuera más fácil y como el diseño se lo permitía, giró el brazalete de forma que el velcro quedaba por la parte delantera del brazo.

El paciente tarda aproximadamente 20 segundos en colocarse la prótesis. Los pasos se muestran en la figura 4.5.



(a) Primera aproximación.

(b) Ajuste del primer velcro.

(c) Ajuste del segundo velcro.

(d) La prótesis está colocada.

Figura 4.5: Colocación de la prótesis por el paciente.

Con nuestro diseño se ha conseguido que el paciente pueda manipular objetos con un control directo sobre ellos, ya que el movimiento que realiza en su antebrazo se traduce en un movimiento proporcional en la prótesis. En la Figura 4.6 se muestra cómo puede levantar un plato para ayudarse a comer.

Además de manipular objetos puede utilizar la prótesis como soporte de otros objetos, por ejemplo en la figura Figura 4.7 el paciente se ayuda de la prótesis para sujetar una tostada.

Según el testimonio del paciente, el mecanismo del codo funciona bien. Con la prótesis se consigue un accesorio útil a la vez que fácil de usar.

(a) El antebrazo está extendido.

(b) El antebrazo se contrae.

Figura 4.6: El paciente, con un gadget, levanta un plato para ayudarse a comer.

(a) Sujetando la tostada.

(b) La tarea se completó sin complicaciones.

Figura 4.7: El paciente utiliza la prótesis como soporte para ayudarse a untar mantequilla.

Capítulo 5

Conclusiones

Se ha conseguido una prótesis de fácil colocación por el propio paciente.

Gracias al empleo de la prótesis el paciente puede manipular objetos bajo un control directo de los mismos y en un campo de referencia espacial funcional.

El uso de la prótesis aporta una ergonomía muy alta al paciente, siendo considerada por él mismo como útil y de fácil manejo.

Agradecimientos

Quisiera agradecer a Víctor la dedicación y cariño que ha tenido conmigo tanto como profesor como tutor de este trabajo. Ha sido una pieza indispensable del proyecto.

Gracias a Fran por su ayuda y la enorme labor con todos los niños y niñas, y al equipo de Autofabricantes por construir sonrisas.

Por último, gracias a Denis por haberme acompañado en esta aventura y transmitirme paz y serenidad.

Referencias

2019 *Ayuda de SOLIDWORKS - Creación de ejes de referencia.* (s.f.). Descargado 2019-06-20, de http://help.solidworks.com/2019/spanish/SolidWorks/sldworks/t_Creating_Reference_Axes.htm

2019 *Ayuda de SOLIDWORKS - Creación de planos.* (s.f.). Descargado 2019-06-20, de http://help.solidworks.com/2019/spanish/SolidWorks/sldworks/t_Creating_Planes.htm

2019 *Ayuda de SOLIDWORKS - Croquis.* (s.f.). Descargado 2019-06-20, de http://help.solidworks.com/2019/spanish/SolidWorks/sldworks/c_Sketch.htm

2019 *Ayuda de SOLIDWORKS - Extrusiones.* (s.f.). Descargado 2019-06-20, de http://help.solidworks.com/2019/spanish/SolidWorks/sldworks/Hidd_dve_end_spec_dlg.htm?id=63555eae376548b29c1ce1da435c6140#Pg0

2019 *Ayuda de SOLIDWORKS - Herramienta Medir.* (s.f.). Descargado 2019-06-19, de http://help.solidworks.com/2019/spanish/SolidWorks/sldworks/HIDD_MEASURE.htm?id=e73e9d50acb843c8a89fa52b3ec59b0b#Pg0

2019 *Ayuda de SOLIDWORKS - Perspectiva general de Redondeo.* (s.f.). Descargado 2019-06-20, de http://help.solidworks.com/2019/spanish/SolidWorks/sldworks/c_Fillet_Overview.htm?id=f075bd700a9c4628ab70a8026c79bab9#Pg0

2019 *Ayuda de SOLIDWORKS - Recubrimientos.* (s.f.). Descargado 2019-06-20, de http://help.solidworks.com/2019/spanish/SolidWorks/sldworks/c_Lofts_top.htm?id=b7d41292db4949bea649c2292e5a2166#Pg0

2019 *Ayuda de SOLIDWORKS - Vistas de sección en los modelos.* (s.f.). Descargado 2019-06-19, de http://help.solidworks.com/2019/spanish/SolidWorks/sldworks/t_section_views_models.htm

Arzola, N., y Loaiza, J. L. (2011, septiembre). Evolución y tendencias en el desarrollo de prótesis de mano. *DYNA*, *78*(169), 191–200. Descargado 2019-03-14, de https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/19354

Autofabricantes. (s.f.). *Supergiz.* Descargado 2019-03-05, de http://autofabricantes.org/investigacion/supergiz/

Autofabricantes. (s.f.). *SuperGiz by Autofabricantes.* Descargado 2019-04-01, de https://www.thingiverse.com/thing:2390382

BBC, G. M. (s.f.). *Las increíbles extremidades del ser humano: manos y pies.* Descargado 2019-03-14, de https://www.bbc.com/mundo/noticias/2014/03/140227_ciencia_manos_y_pies_jgc_finde

Kapandji, A. I., Tubiana, R., y Torres Lacomba, M. (2009). *Fisiología articular: esquemas comentados de mecánica humana. T. 1, T. 1,.* Madrid: Editorial

Médica Panamericana. (OCLC: 863314084)

Steindler, A. (1949). The reconstruction of the upper extremity in spinal and cerebral paralysis. *Instructional Course Lectures, The American Academy of Orthopaedic Surgeons*, *6*, 120–133.

Structure Sensor - Rodin4d. (s.f.). Descargado 2019-05-10, de `http://rodin4d.com/es/productos/adquisicion/structure-sensor`

Ultimaker PLA material: Highly versatile, easy to print. (s.f.). Descargado 2019-06-07, de `https://ultimaker.com/materials/pla`

Ultimaker TPU 95a material: 3d print durable and flexible parts. (s.f.). Descargado 2019-06-07, de `https://ultimaker.com/materials/tpu-95a`

WillowFlex 3d Print Filament. (2019, enero). Descargado 2019-06-04, de `https://www.willow-flex.com/faq/`