



POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid
Tel.: 91 336 3060
info.industriales@upm.es

www.industriales.upm.es



Manuel Repullo Menéndez

05 TRABAJO FIN DE GRADO

INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

DESARROLLO DE UN GUANTE HÁPTICO CON REALIMENTACIÓN TÁCTIL

NOVIEMBRE 2021

Manuel Repullo Menéndez

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE GRADO:

Antonio Barrientos

COTUTORA DEL TRABAJO FIN DE GRADO:

Silvia Terrile

TRABAJO FIN DE GRADO PARA
LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
GRADUADO EN INGENIERÍA EN
TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



POLITÉCNICA

Agradecimientos

Me gustaría dar las gracias a todas aquellas personas que han colaborado conmigo desinteresadamente para que esta investigación salga adelante.

En primer lugar, a mis tutores, Antonio Barrientos y Silvia Terrile, por confiar en mí y elegirme para este proyecto, y por la ayuda y los conocimientos adquiridos durante la investigación.

En segundo lugar, a mi familia, sobre todo a mis padres, a mi hermana y a mis abuelos, por ser un pilar fundamental en mi vida y en mi formación. También me gustaría hacer una mención especial a mi tía Asun, modista de profesión, que ha sido la persona que me ha ayudado a coser las partes blandas de los prototipos.

Por último, quisiera mostrar mi agradecimiento a todas las personas que se han ofrecido voluntarias en la caracterización experimental de esta investigación por regalarme parte de su valioso tiempo para probar el prototipo.

A todos ellos, mil gracias.

Resumen

La percepción háptica es la sensación que se percibe a través de la piel cuando se entra en contacto con un objeto. En base a este principio, se han desarrollado dos guantes hápticos con tecnologías diferentes que son capaces de recrear esta sensación táctil en los entornos de realidad virtual con la idea de mejorar la experiencia cuando se entra en contacto con un objeto en la simulación.

El primer prototipo (Prototipo I) se ha construido colocando motores de vibración en las yemas de los dedos y en la palma de la mano.

El segundo prototipo (Prototipo II) se ha construido utilizando muelles de SMA (aleaciones con memoria de forma). Su principio de funcionamiento se basa en poner en contacto las yemas de los dedos con un dedal que alberga una plataforma móvil en su interior.

Tras el diseño y la construcción de ambos prototipos, se ha realizado una caracterización experimental con 12 voluntarios para poder testear su funcionamiento. Los resultados obtenidos han sido del todo satisfactorios, dictaminando que el prototipo II da una sensación más realista, pero que el prototipo I funciona mejor globalmente debido a su mayor ligereza, comodidad y capacidad de respuesta más rápida.

Abstract

The term haptic perception is used to describe a feeling perceived through the skin when it comes into contact with an object. Based on this principle two pairs of haptic gloves have been developed with different technologies which can recreate this tactile sensation in virtual reality environments with the idea of improving the experience when coming into contact with an object in the simulation.

The first prototype (Prototype I) has been built by placing vibration motors in the fingertips and in the palm.

The second prototype (Prototype II) has been built using SMA springs (Shape Memory Alloys). Its principle of operation is based on bringing the fingertips into contact with a thimble containing a movable platform inside.

After both prototypes' design build process, an experimental characterization was with 12 volunteers to test its functioning. The results have been entirely satisfactory, ruling that Prototype II gives a more realistic feeling, but Prototype I works better overall as it is lighter, more comfortable and has faster responsiveness.

Resumen ejecutivo

Hoy en día, la realidad virtual es una herramienta presente en muchos sectores como la industria, la educación o el entretenimiento. Esta tecnología permite crear entornos virtuales a través de estímulos visuales y sonoros. Sin embargo, para llevar un paso más allá esta técnica y emular la realidad de la forma más fiel posible es necesario incorporar un sentido fundamental en la vida del ser humano: el tacto. A través de la piel, el ser humano es capaz de experimentar lo que se conoce como percepción háptica. La percepción háptica es la sensación que combina la información táctil (la forma, textura y temperatura del objeto que se está tocando) y la información kinestésica (la retroalimentación de fuerza y resistencia al avance de los dedos que se produce al agarrar un objeto). En base a este principio, se va a desarrollar un guante háptico centrado en simular la percepción táctil en las manos. En el mercado ya están disponibles algunos dispositivos de este tipo, sin embargo, la mayoría de ellos son demasiado pesados y voluminosos, haciendo que sean poco prácticos para la vida cotidiana. Por tanto, el guante háptico que se va a desarrollar ha de ser ligero, flexible y adaptable para cualquier tipo de mano.

Haciendo una revisión bibliográfica de las tecnologías utilizadas para fabricar estos guantes, se determinó que las mejores opciones para poder construir un guante ligero y poco aparatoso son dos: utilizar motores de vibración y utilizar actuadores SMA (aleaciones con memoria de forma). Se decide por tanto construir un prototipo con cada tecnología y comparar los resultados.

El principio de funcionamiento del prototipo I es colocar los motores en las zonas más sensibles al tacto de forma que sean capaces de suministrar una vibración suave al usuario para notificarle de que está tocando el objeto que se quiere simular. Se decidió por tanto poner un motor en cada yema del dedo y 5 motores repartidos por la palma que se conectan en paralelo para ser controlados por una única señal. Para sujetarlos a la mano, se diseñaron unos dedales y una plataforma para la palma y se fabricaron en PLA con una impresora 3D. Por último, se diseñó y se imprimió un brazalete que alberga toda la electrónica del guante. Cabe destacar que tanto los dedales como la plataforma de la palma se montan y funcionan de manera independiente, algo que será muy útil para poder combinarlo con el prototipo II en las pruebas experimentales.

El sistema de control del guante está regulado por una placa de Arduino UNO. El esquema general del prototipo I es el que se muestra en la figura 1.

Los motores elegidos se controlan por corriente, es decir, regulando la intensidad que se les suministra, se ajusta la vibración que se le da al usuario a través de una señal PWM. De esta forma, los motores de los dedales se conectan directamente a los puertos de Arduino, tal y como se muestra en la figura 1. Los motores de la palma, al estar en paralelo, requieren mayor potencia para funcionar, por lo no se pueden conectar directamente al Arduino para su control, ya que sus puertos están limitados en tensión e intensidad. Entonces, se diseñó un circuito de conmutación con un transistor MOSFET que funciona como un interruptor controlado por tensión que va a apagar y encender el circuito a una frecuencia muy alta para regular la

intensidad que se quiere ofrecer. El interruptor estará controlado por una señal PWM conectada a la puerta del MOSFET, tal y como se muestra en la figura 1.

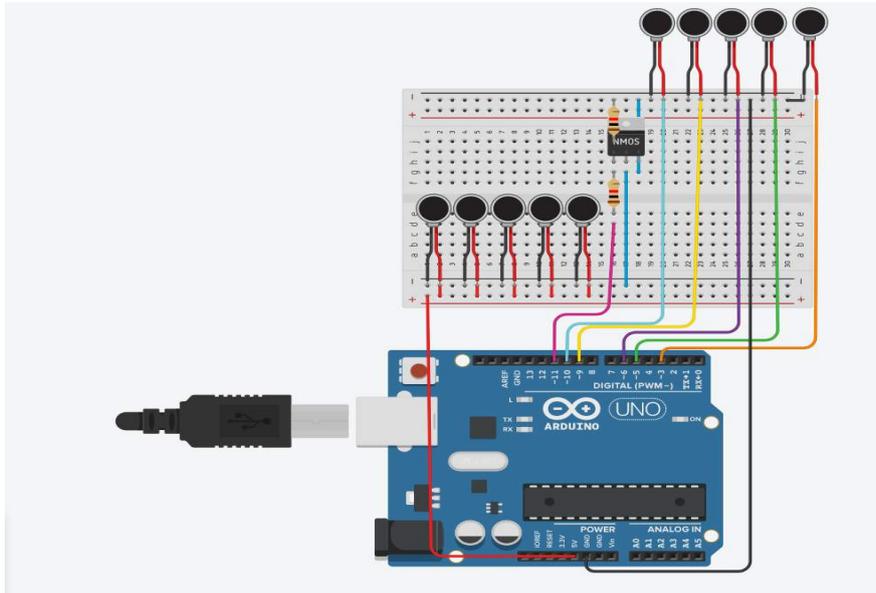


Figura 1: Esquemático general del prototipo I

La versión final del prototipo I quedaría así:

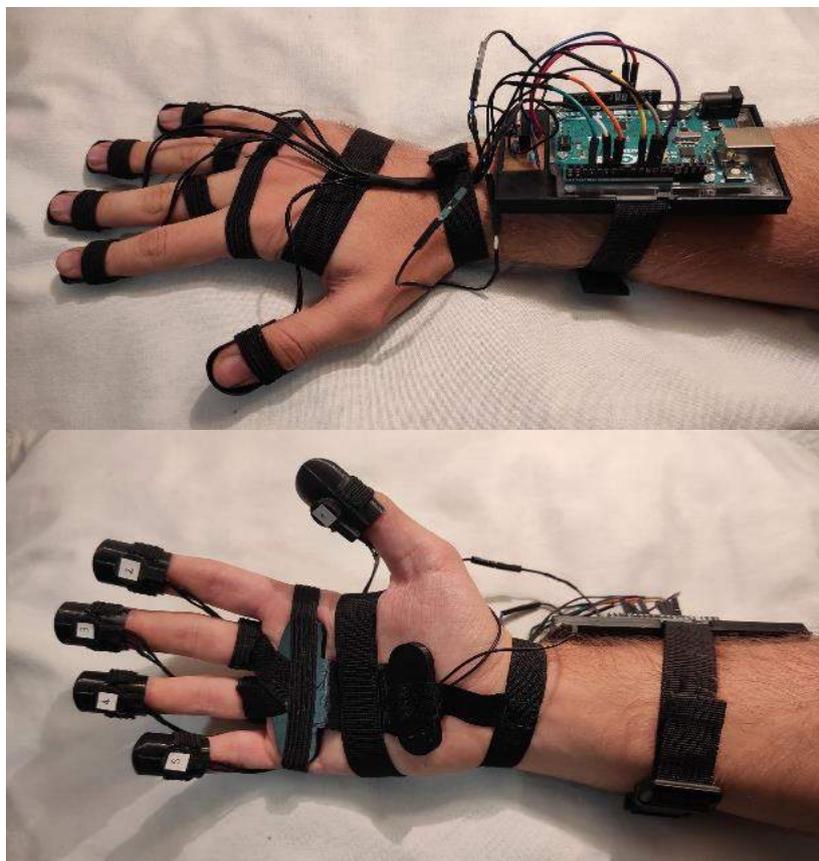


Figura 2: Prototipo I

El prototipo II basa su funcionamiento en utilizar las aleaciones de memoria de forma, también conocidas como SMA (*Shape Memory Alloy*). Están hechas de un material llamado “nitinol” (una aleación de níquel y titanio). Estos materiales “inteligentes” son capaces de volver a su forma original cuando son sometidos a un calentamiento. Esto se debe a que el nitinol sufre una transformación en su estructura cristalina y pasa de su fase martensítica (a temperatura ambiente) a su fase austenítica (a una temperatura llamada “temperatura de transformación”). Si después de calentarlo se deja enfriar, el nitinol volverá a su fase martensítica siguiendo un ciclo de histéresis.

Los actuadores que se han empleado son unos muelles de SMA. Estos muelles van a estar estirados y cuando se les haga pasar una corriente eléctrica se van a calentar y se van a contraer a su forma memorizada, que es cuando el muelle está completamente contraído. Esta contracción se va a aprovechar de la siguiente manera: se pondría en los dedos unos dedales con unas plataformas móviles alojadas en su interior. A estas plataformas móviles iría enganchadas unas cuerdas que a su vez estarían enganchadas a un muelle de SMA. Al contraer el muelle, las cuerdas tirarían de estas plataformas haciendo que suban y entren en contacto con las yemas de los dedos, simulando así la sensación de tacto. Los dedales se diseñan en dos piezas: la plataforma móvil y el soporte que se ajusta al dedo. Ambas piezas van unidas por medio de un vástago (véase la figura 3).

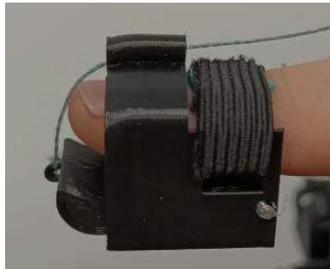


Figura 3: Dedal del prototipo II

Para que el prototipo funcione, es necesario que el muelle vuelva a estirarse una vez contraído. Para esto se ha configurado la disposición mostrada en la figura 4. Durante la fase de enfriamiento (cuando se quiere que la sensación de tacto cese), un ventilador refrigera la SMA mientras que otro muelle de SMA (puesto de forma antagonista) se contrae, estirando así la SMA convencional. Todo esto ha sido montado en una estructura previamente diseñada que va sujeta en el brazo. Además, se ha utilizado un guante convencional con unos tubos de silicona pegados que guían las cuerdas y protegen al usuario de las temperaturas. Por último, se ha diseñado también un brazalete que alberga toda la electrónica del guante. Todas las piezas se han fabricado en PLA con una impresora 3D.

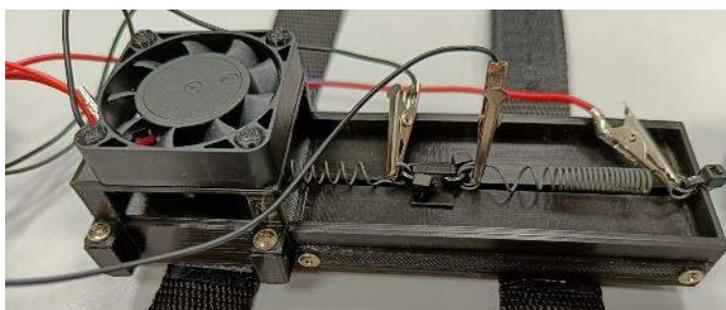


Figura 4: Disposición de los muelles de SMA y el ventilador del prototipo II

El sistema de control del guante es muy similar al del prototipo I. Para calentar los muelles de SMA es necesario suministrar una corriente eléctrica superior a la que puede ofrecer los puertos de Arduino. Por tanto, se ha utilizado una fuente externa de 12V y 3A y se ha diseñado un circuito basado en el circuito de conmutación que ya se usó en el prototipo I. En este caso, habrá un transistor MOSFET por cada muelle, y para regular la intensidad que se quiere suministrar, se ha conectado cada puerta del transistor a un pin PWM. Para controlar el ventilador, se ha utilizado el mismo circuito de conmutación, pero conectando la puerta del transistor a un pin digital sin PWM. El esquemático general se muestra en la figura 5.

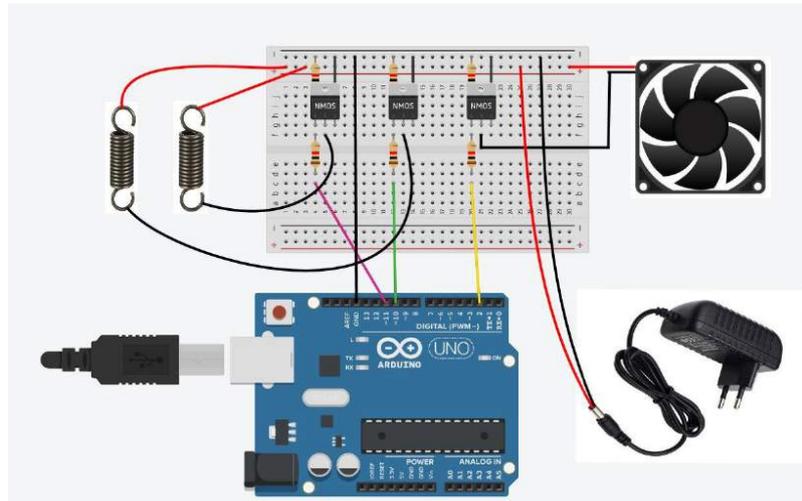


Figura 5: Esquemático general del prototipo II

La versión final del prototipo II quedaría así:

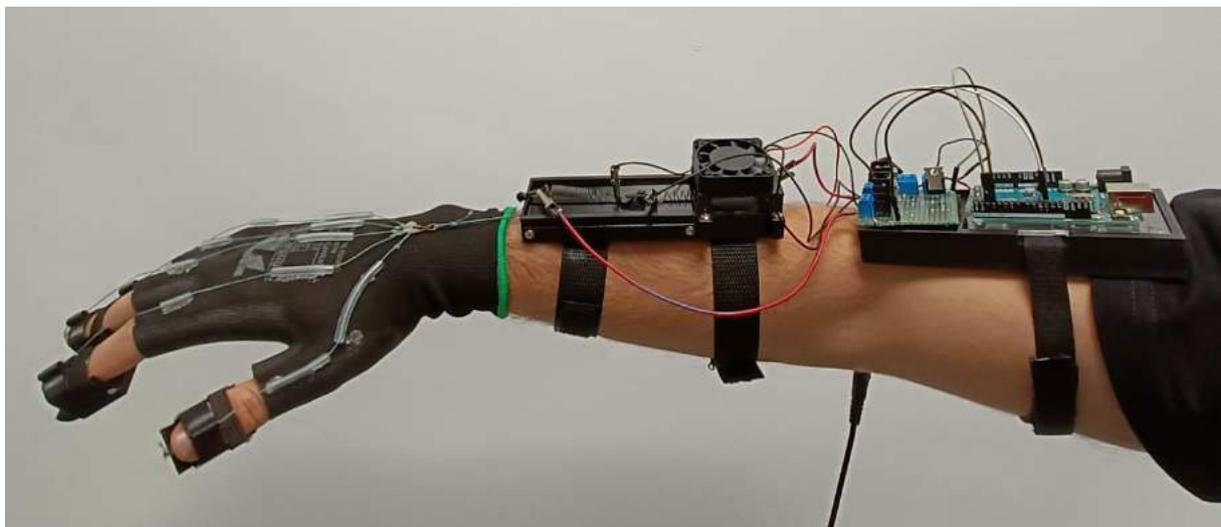


Figura 6: Prototipo II

Para testear el funcionamiento de ambos prototipos, se ha llevado a cabo una serie de experimentos con 12 voluntarios. Para estas pruebas, se ha utilizado la realidad virtual. El software utilizado ha sido Unity, que se ha comunicado con Arduino a través del puerto serie. Para detectar el guante se ha incorporado el sensor Leap Motion a las gafas de RV. Se han

construido tres escenarios distintos en los que el usuario ha tenido que interactuar con distintos objetos virtuales. En el primer escenario se cogían objetos macizos, en el segundo objetos huecos, y en el último se simulaba un teclado, activando en consecuencia diferentes motores para cada escenario. Las simulaciones se han probado en un primer momento sin guante y después con el guante, para que el usuario pudiese notar la diferencia.



Figura 7: Experimentos con RV

Los resultados obtenidos han sido satisfactorios. Ambos prototipos devuelven una sensación háptica correcta. Además, cumplen con la mayoría de objetivos propuestos, pues ambos son ligeros, poco voluminosos (el prototipo II no ha cumplido del todo este objetivo), se adaptan bien a la mano y su coste de fabricación es bajo en comparación con los guantes hápticos actualmente disponibles en el mercado. La mayoría percibe que la sensación que ofrece el segundo prototipo es más fiel a la realidad. Por otro lado, la mayoría piensa que el prototipo I es más cómodo y fácil de poner, pero que el prototipo II se adapta mejor a la mano. Cabe destacar que se ha notado que ambos guantes se adaptan mejor a las manos grandes que a las pequeñas. Además, el prototipo I es más ligero y tiene una respuesta más rápida. Por último, integrar la plataforma de la palma en el prototipo II ha mejorado la experiencia.

Palabras Clave: háptico, táctil, SMA, vibración, realidad virtual.

Códigos UNESCO:

120309 DISEÑO CON AYUDA DEL ORDENADOR

330412 DISPOSITIVOS DE CONTROL

330703 DISEÑO DE CIRCUITOS

Índice

1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Motivación.....	12
1.2. Objetivos.....	13
2. FISIOLÓGÍA DEL TACTO	14
2.1. El tacto y la piel.....	14
2.2. Tipos de percepciones a través del tacto	16
3. ESTADO DEL ARTE.....	17
3.1. Prototipos de sobremesa	17
3.2. Prototipos wearables	18
3.2.1. Motores DC y servomotores	20
3.2.2. Shape Memory Alloy	21
3.2.3. Actuadores electromagnéticos.....	22
3.2.4. Actuadores neumáticos	24
3.3. Conclusiones	25
4. TECNOLOGÍA UTILIZADA.....	27
4.1. Motores de vibración.....	27
4.1.1. Motores de vibración de masa giratoria excéntrica	27
4.1.2. Actuadores de resonancia lineal.....	28
4.2. Aleaciones con memoria de forma (SMA).....	30
5. DISEÑO Y DESARROLLO	33
5.1. Prototipo I	33
5.1.1. Planteamiento inicial.....	33
5.1.2. Diseño de los dedos	34
5.1.3. Diseño de la plataforma de la palma.....	36
5.1.4. Diseño del brazalete	40
5.2. Prototipo II	42
5.2.1. Diseño y desarrollo fallido con cables de SMA	42
5.2.2. Diseño y desarrollo con muelles de SMA	45
5.2.2.1. Planteamiento inicial	45
5.2.2.2. Diseño de los dedos.....	45
5.2.2.3. Diseño de la estructura de control de SMA	47
5.2.2.4. Diseño del brazalete	49
6. ELECTRÓNICA DEL GUANTE	50
6.1. Sistema de control	50

6.2. Ccircuitería	51
6.2.1. Ccircuitería prototipo I	54
6.2.2. Ccircuitería prototipo II	55
7. FABRICACIÓN Y MONTAJE.....	57
7.1. Fabricación y montaje prototipo I	59
7.1.1. Fabricación de piezas.....	59
7.1.2. Montaje electrónico	61
7.1.3. Versión final del guante	62
7.2. Fabricación y montaje prototipo II	63
7.2.1. Fabricación de piezas.....	63
7.2.2. Montaje electrónico	66
7.2.3. Versión final del prototipo II	67
8. CONTROL Y CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL	68
8.1. Sistema de control	68
8.2. Caracterización experimental.....	69
9. RESULTADOS	72
10. LÍNEAS FUTURAS	75
Anexo I: Presupuesto	76
Coste total	77
Anexo II: Planificación temporal	78
Estructura de descomposición del proyecto.....	78
Diagrama de Gantt	79
Anexo III: Estudio de impacto.....	80
Impacto medioambiental.....	80
Impacto económico.....	80
Impacto social.....	80
Anexo IV: Referencias.....	81
Anexo V: Índice de figuras.....	85
Anexo VI: Índice de tablas.....	87
Anexo VII: Códigos de Arduino.....	88
Programa prototipo II	88
Programa prototipo II	89
}.....	90
Anexo VIII: Glosario y abreviaturas	91
Anexo IX: Planos.....	92

1. INTRODUCCIÓN

En la última década, la realidad virtual ha ido adquiriendo una gran trascendencia en numerosos sectores como el entretenimiento, la medicina o la educación. A través de los sentidos de la vista y el oído, es posible crear entornos virtuales muy cercanos a la realidad. Con la ayuda de accesorios como cascos, gafas o sensores de posición, la experiencia provista en estos entornos ha ido mejorando hasta dar una sensación inmersiva muy alta.

Sin embargo, para poder “engañar” al cerebro y emular la realidad de la forma más fiel posible, es necesario incorporar uno de los sentidos del ser humano que mejor permite entender lo que ocurre a su alrededor: el tacto. Aquí es donde entran en juego los dispositivos hápticos, que permiten tocar, sentir o manipular objetos dentro de un entorno virtual. Estos dispositivos suelen confeccionarse en forma de guantes.

1.1. Motivación

En los últimos años, la tecnología háptica se ha incorporado en varias disciplinas, sobre todo en aquellas que ya utilizaban la realidad virtual para algún propósito. Las principales aplicaciones de estos dispositivos se pueden ver en los siguientes ámbitos:

- En la medicina, se están utilizando simuladores para entrenar técnicas de cirugía mínimamente invasiva. Otro de sus usos es en la rehabilitación en pacientes que han sufrido ataques cerebrales y han perdido parte de la movilidad en alguna extremidad. Los entornos de realidad virtual, junto con el refuerzo del sentido del tacto, permite que practiquen sus tareas cotidianas y su motivación mejore recreando actividades que aún no son capaces de hacer en la realidad [1].
- En el mundo de los videojuegos, la retroalimentación háptica también se ha empezado a incorporar. Por ejemplo, la empresa Sony sacó en 2020 al mercado el mando DualSense de la Playstation 5, que incorpora unos activadores que son capaces de recrear elementos del entorno a través de la vibración [2].
- En la industria, también se ha utilizado para hacer simulaciones de prototipos sin necesidad de tener que construirlos, abaratando así los costes y aumentando su versatilidad. Por ejemplo, la compañía de automóviles Volkswagen utilizó un guante háptico para realizar análisis virtuales en el interior de los automóviles [3].
- En el campo de la enseñanza, se utiliza para recrear entornos difíciles o situaciones muy concretas con el objetivo de preparar al usuario para cuando se dé esa situación en la vida real. De esta forma, es posible entrenar en simulaciones sin correr ningún riesgo. Entidades como el ejército estadounidense o la NASA ya utilizan estas técnicas [4].

Hoy en día, existen numerosas alternativas de guantes hápticos en el mercado. Sin embargo, estos dispositivos no están pensados aún para incorporarlos al uso cotidiano. Como se ha ilustrado en los anteriores ejemplos, los clientes de estos productos suelen ser grandes empresas u organizaciones. Esto es diferente respecto a otros periféricos de realidad virtual

como las gafas, donde cada vez es más común tener unas para el disfrute personal y el entretenimiento. ¿A qué se puede deber esto?

Una de las explicaciones es que la mayoría de estos dispositivos suelen ser pesados y voluminosos, haciendo que sean muy poco prácticos en el día a día. Además, su precio suele ser muy elevado. Por otro lado, tampoco existe una tecnología determinada que se haya impuesto respecto a las demás. Cada fabricante apuesta por una tecnología distinta dependiendo de la sensación que quiere recrear y la forma de uso y la experiencia varía mucho entre unos modelos y otros.

1.2. Objetivos

El objetivo de este proyecto va a ser construir un guante háptico centrado en emular la sensación de tacto.

El dispositivo ha de ser cómodo y ligero, buscando por tanto actuadores con una alta relación potencia-peso y materiales resistentes pero livianos. Además, se intentará optimizar el diseño para que sea lo menos voluminoso posible y sea fácil de quitar y poner.

Otro aspecto fundamental es que el guante ha de ser flexible, es decir, el guante no debe impedir los movimientos de la mano en la medida de lo posible. Para ello, el guante tendrá partes blandas que permitan al usuario doblar la mano y mover los dedos con libertad y naturalidad.

Por último, el guante ha de ser adaptable, es decir, debe moldearse perfectamente a la mano de cualquier persona adulta. Para ello, se utilizarán materiales elásticos y sistemas ajustables para que todo el mundo pueda utilizar el guante sin problemas.

2. FISIOLOGÍA DEL TACTO

Para poder recrear la sensación del tacto, es fundamental entender cómo funciona este sentido y qué formas tiene el organismo de percibirlo. Por tanto, este capítulo se va a centrar en el sentido del tacto.

2.1. El tacto y la piel

Los sentidos son el conjunto de procesos y mecanismos fisiológicos que permiten captar estímulos del exterior. Para percibir esta información del entorno, el ser humano dispone de órganos sensoriales capaces de transformar esta información en impulsos eléctricos que viajan hasta el cerebro a través del sistema nervioso. [5]

El sentido del tacto es aquel que permite percibir presión, dolor y temperatura.

La piel es el órgano sensorial que hace posible la experimentación del tacto [5]. Consta de tres capas:

- Epidermis: es la capa más externa.
- Dermis: es la capa intermedia, donde se hallan los receptores nerviosos y, por tanto, es la capa que percibe el sentido del tacto. Estos receptores nerviosos, de los que se va a hablar a continuación, no están repartidos uniformemente, siendo más sensibles aquellas zonas que tienen mayor densidad de estos. Las zonas más sensibles del cuerpo humano son la punta de la lengua, los labios, la cara, el dorso de la mano y la yema de los dedos.
- Hipodermis: es la capa más interna. [6]

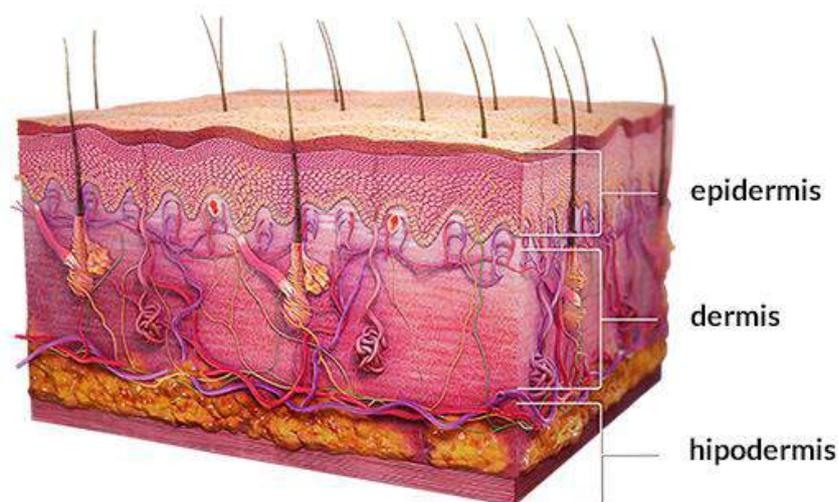


Figura 8: Capas de la piel [7]

La piel posee distintos receptores nerviosos. Cada receptor está destinado a percibir un tipo de sensación:

- Mecanorreceptores: son los encargados de percibir la diversa variedad de percepciones táctiles. Los corpúsculos de Meissner son los receptores encargados de percibir sensaciones táctiles ligeras. Los corpúsculos de Pacini se encargan de percibir cambios en la presión profunda y en las vibraciones. Los corpúsculos de Merkel se encargan de percibir cambios en la presión y en las texturas. Por último, los corpúsculos de Ruffini se encargan de percibir estiramientos en la piel.
- Termorreceptores: son los encargados de percibir los cambios de temperatura que se producen en el medioambiente. Los corpúsculos de Ruffini identifican cuando se produce un aumento de temperatura mientras que los corpúsculos de Krause registran cuando se produce una disminución de esta.
- Nociceptores: son los encargados de percibir el dolor. [8]

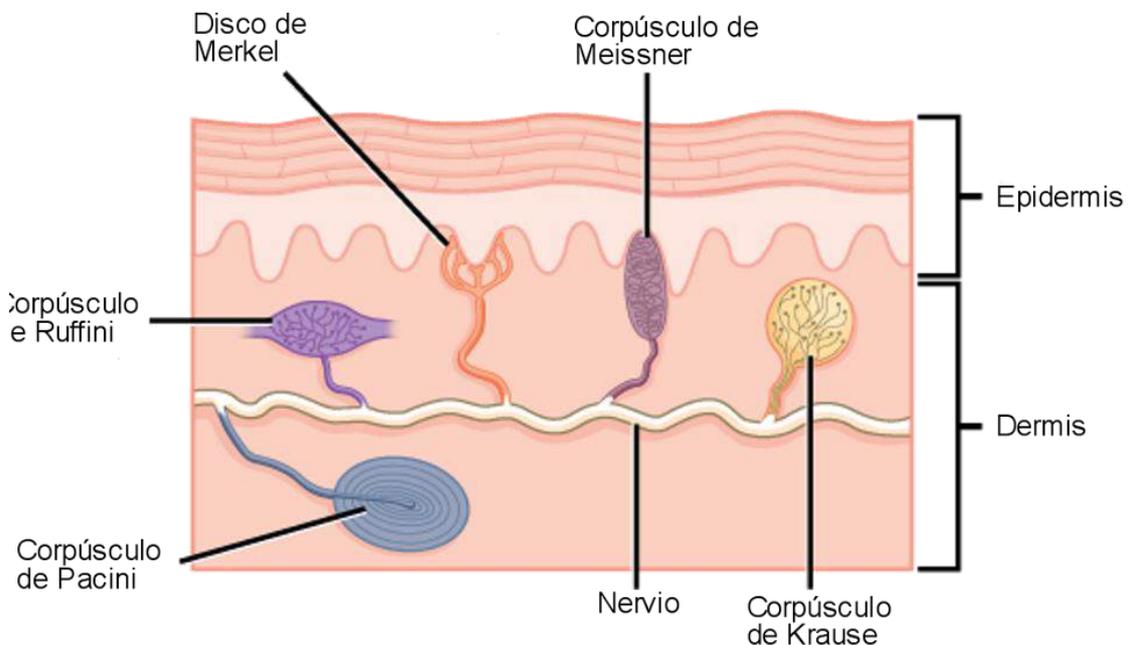


Figura 9: Esquema de los corpúsculos de la piel [7]

En la aplicación al guante háptico, los receptores interesados van a ser los mecanorreceptores. Concretamente, como se verá más adelante, se van a diseñar dos prototipos. El primero de ellos se realizará con motores de vibración y la sensación de tacto se centrará en los corpúsculos de Pacini mientras que el segundo prototipo utilizará actuadores que mueven una plataforma en las puntas de los dedos y se centrarán por tanto en los corpúsculos de Meissner.

2.2. Tipos de percepciones a través del tacto

Se pueden distinguir dos tipos de percepciones a través del sentido del tacto.

1. La percepción táctil hace referencia a la información que se recibe a través de la piel. Esta información consiste en la forma, la textura e incluso la temperatura del objeto que se está tocando.
2. La percepción kinestésica hace referencia a la información que se recibe a través de los músculos y los tendones. Esta información proporciona la retroalimentación de fuerza y resistencia al avance de los dedos que se produce al agarrar un objeto.

En la realidad, ambas percepciones se combinan dando lugar a lo que se llama percepción háptica. [9]

El guante que se va a diseñar en este proyecto se va a centrar exclusivamente en la percepción táctil, dejando para proyectos futuros la incorporación de la percepción kinestésica.

3. ESTADO DEL ARTE

En la actualidad, existe un gran abanico de guantes hápticos en el mercado. Este capítulo se va a centrar en clasificar las diferentes tecnologías que incorporan y establecer ventajas e inconvenientes de cada una de ellas.

Los prototipos que se han fabricado hasta ahora se pueden clasificar en dos grandes grupos: los guantes de sobremesa y los guantes *wearables*.

3.1. Prototipos de sobremesa

Estos dispositivos están caracterizados por tener su base fijada en una superficie. La principal ventaja que ofrecen estos prototipos es que causan una sensación muy fidedigna de la realidad. Son dispositivos muy potentes y pueden suministrar un amplio rango de fuerzas. Como desventajas se puede establecer que son muy voluminosos y pesados, resultando algo incómodos y poco prácticos para un uso cotidiano. Cabe destacar también que son dispositivos que incorporan un gran número de actuadores y sensores, por lo que su precio es elevado.

Ejemplos de guantes de este tipo son la familia de guantes Phantom Premium [10] y el guante CyberForce [11].

La familia de guantes Phantom Premium ha sido fabricada por la compañía 3D Systems. Son dispositivos de alta precisión que ofrece distintos rangos de movimiento y retroalimentación de fuerza. Las distintas versiones de este guante de sobremesa son el Phantom Premium 1.0, el Phantom Premium 1.5 y 1.5 HIGH FORCE, y el Phantom Premium 3.0.



Figura 10: Phantom Premium 1.5 [10]

El CyberForce, de la compañía CyberGlove Systems, es un dispositivo que lleva integrado otro guante de la marca, el CyberGrasp [12], del que se hablará a continuación. De esta forma, se aporta una mayor retroalimentación de fuerza en cada dedo que dota de una mayor resistencia a los objetos virtuales. El sistema resultante es capaz de generar la sensación de sentir peso e inercia al recoger un objeto digital y de sentir el tacto de superficies virtuales.



Figura 11: CyberForce [11]

3.2. Prototipos wearables

Estos dispositivos están caracterizados por llevar montado en el propio guante toda la tecnología necesaria para su funcionamiento.

El término *wearable* hace referencia al concepto de “llevar puesto”. Por lo tanto, el objetivo de estos dispositivos no se va a centrar únicamente en la sensación háptica que son capaces de recrear si no en que sean cómodos, ligeros y flexibles.

Uno de los primeros guantes de esta categoría que salió al mercado fue el CyberGrasp. Este guante es un exoesqueleto que permite sentir el tamaño y la resistencia de objetos virtuales. Proporciona una retroalimentación de fuerza de 12 N por dedo.

Las desventajas de este guante son su precio desorbitado (en torno a los 50.000 dólares), su rigidez, su alto peso y volumen y que solo proporciona percepción kinestésica.



Figura 12: CyberGrasp [12]

Otro de los pioneros en este tipo de guantes fue el Rutgers Master II [13], con una retroalimentación de fuerza de 16 N en cada dedo.

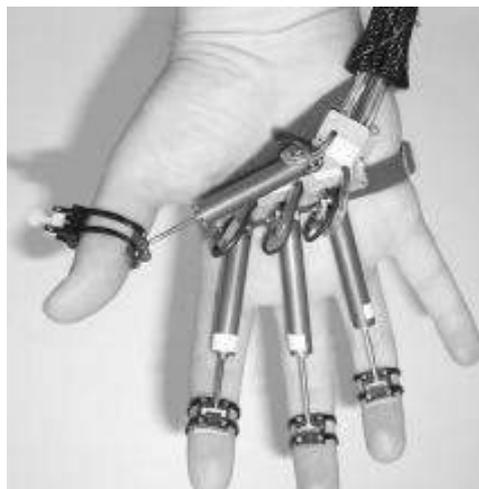


Figura 13: Rutgers Master II [13]

Otros modelos con prestaciones similares son el HGlove [14] y el Dexmo [15].



Figura 14: HGlove [14]



Figura 15: Dexmo [15]

En todos estos modelos, los fabricantes se han centrado más en la percepción kinestésica que en la percepción táctil.

Ahora se va a hacer un estudio más a fondo de las tecnologías que se han ido implementando a lo largo de los años para recrear la percepción táctil.

3.2.1. Motores DC y servomotores

Una de las técnicas más usadas para recrear la percepción táctil es usar motores DC y servomotores.

En una recopilación bibliográfica [16], se recogen varios prototipos que utilizan esta tecnología, a pesar de que la forma de implementarlos es distinta en función del tipo de sensación que se quiere simular. Sin embargo, el principio de funcionamiento es el mismo: mover plataformas hacia las yemas de los dedos o en los laterales de estos para recrear la sensación táctil. La figura 16 muestra algunos prototipos que ilustran este principio.



Figura 16: Prototipos con contacto normal a la yema del dedo [16]

Otros modelos, como los representados en la figura 17, buscan proporcionar un estiramiento lateral de la piel o movimiento tangencial relativo a la yema del dedo para simular la percepción táctil.



Figura 17: Prototipos con estiramiento lateral de la piel o movimiento tangencial relativo [16]

La principal ventaja de estos diseños es que son capaces de recrear la percepción táctil utilizando diferentes sensaciones: contacto normal y tangencial, estiramiento de la piel, vibración, etc. Sin embargo, como se puede apreciar en las imágenes anteriores, estos

dispositivos son muy aparatosos y pueden resultar algo pesados y complejos si se quiere extender el diseño a la mano entera.

3.2.2. Shape Memory Alloy

Otra opción para simular la sensación táctil en la yema de los dedos es emplear la tecnología *Shape Memory Alloy* (SMA). El material utilizado en este tipo de aleaciones es el nitinol (aleación níquel-titanio), que tiene la capacidad de adoptar una forma concreta cuando se le somete a un aumento de temperatura. En las aplicaciones que se van a ver a continuación, se utilizan cables de SMA que al hacerles pasar una corriente eléctrica van a aumentar su temperatura y como resultado, se van a encoger.

Un estudio realizado por la compañía de Volkswagen y la Universidad Bauhaus de Weimar [3] ha construido un guante para realizar simulaciones y análisis virtuales en el interior de los automóviles.

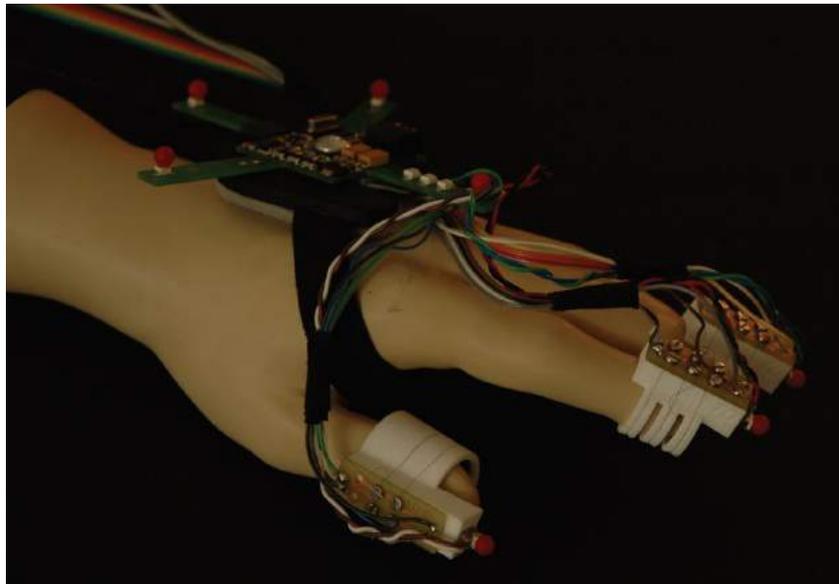


Figura 18: Prototipo SMA [3]

Tal y como muestra la figura 18, esta opción consiste en enrollar cables de SMA alrededor de unos dedales (creados por láser en un proceso aditivo por poliamida). De esta forma, los cables de SMA forman unos anillos alrededor de las yemas de los dedos y van sujetas al dedal mediante tornillos. Los cables de SMA empleados tienen 80 micras de grosor y unos 50 mm de longitud. Mediante un microcontrolador y un sistema VR, se controla el funcionamiento haciendo que los cables de SMA se contraigan cuando se entra en contacto con el objeto para dar la percepción del tacto.

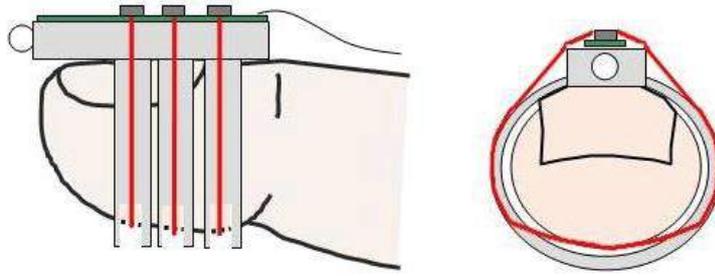


Figura 19: Dedales de SMA

Otro estudio similar [17] utiliza unos cables de SMA de 150 micras. El funcionamiento y la construcción del guante es muy similar al anterior salvo porque estos cables van alojados en tubos de silicona que sirven para proteger de cortocircuitos al usuario y también de las temperaturas elevadas a las que van a estar sometidos los cables. Además, este modelo ha puesto cables de SMA por toda la falange de los dedos, mientras que el modelo anterior solo se podía sentir tacto en las yemas.

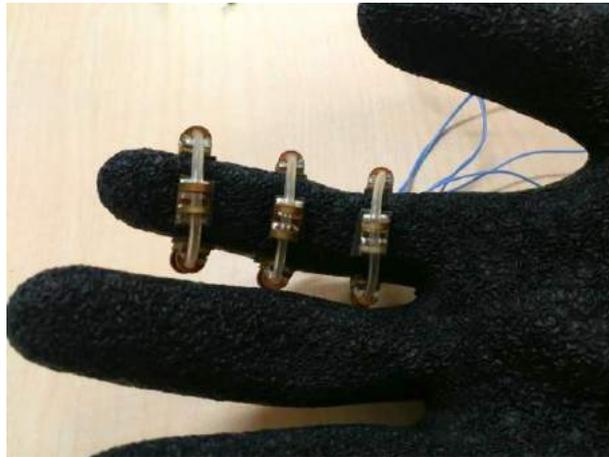


Figura 20: Anillos de SMA alrededor de la falange de un dedo [17]

Este tipo de tecnología tiene la ventaja de que es muy ligera, silenciosa y flexible. El principal inconveniente que tiene es que, si bien el calentamiento de los cables es bastante inmediato contrayéndose rápidamente, el enfriamiento es algo más lento y necesita más tiempo. Por otro lado, dependiendo del grosor del cable, la temperatura puede llegar a ser un problema ya que puede molestar al usuario.

3.2.3. Actuadores electromagnéticos

Otra forma de recrear la percepción táctil es emplear actuadores electromagnéticos. Estos actuadores son básicamente motores de vibración de un tamaño muy reducido. La vibración indica al usuario cuando se tiene contacto con el objeto virtual.

Un prototipo de la Universidad de Sungkju [18] se utilizó para recrear el tacto de diferentes tipos de arcilla. El guante se construyó con 5 motores de vibración controlados mediante una placa de Arduino. Cada motor iba alojado en una yema del dedo. También se utilizó una pila

de 9 voltios y un módulo Bluetooth para comunicarse con el ordenador sin necesidad de emplear cables. Además, se realizó un análisis de la textura de los materiales convirtiendo imágenes de estos en mapas de frecuencia mediante la transformada de Fourier (FFT).

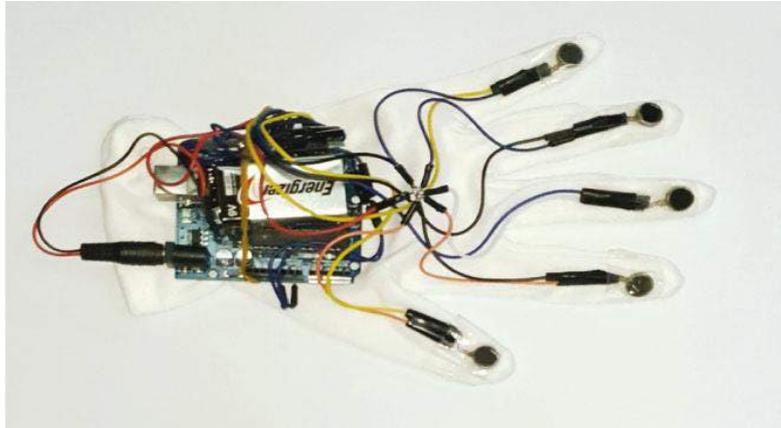


Figura 21: Prototipo motores de vibración [18]

El Virtual Touch [19] tiene una construcción muy parecida. Dentro de un guante común de motocicleta van ubicados los motores de vibración (uno en cada yema del dedo). Estos motores a su vez van incrustados en unas piezas de acrílico hechas con una impresora 3D. Además, sobre cada falange se ha situado un sensor flexible para medir en tiempo real la posición de cada dedo. Por último, se ha controlado la circuitería con una placa de Arduino Mega.



Figura 22: Virtual Touch [19]

Un modelo que ha sido comercializado es el Gloveone [20], de la compañía española Neurodigital Technologies. Tiene 10 actuadores distribuidos por la palma de la mano y los dedos, que vibran independientemente y con diferentes frecuencias e intensidades.



Figura 23: Gloveone [20]

3.2.4. Actuadores neumáticos

La neumática es la tecnología que emplea un gas (normalmente aire comprimido) como modo de transmisión de la energía necesaria para mover y hacer funcionar mecanismos.

El Haptx Glove DK2 [21] es un modelo que ha tenido mucho éxito desde su lanzamiento. Tiene 133 puntos de contacto táctil por mano y 175 N de retroalimentación de fuerza. Tiene una gran precisión y da una sensación muy realista.



Figura 24: Haptx Glove DK2 [21]

Para recrear la percepción táctil [22], el guante tiene por su parte interior una serie de burbujas de aire. Estas burbujas están reguladas por válvulas y conectadas a un compresor que es el que se va a encargar de proporcionar el aire comprimido. De esta forma, cuando el usuario

va a hacer contacto con el objeto virtual, las válvulas se abren y estas burbujas se hinchan de manera independiente dando una sensación muy realista del objeto que se pretende simular.

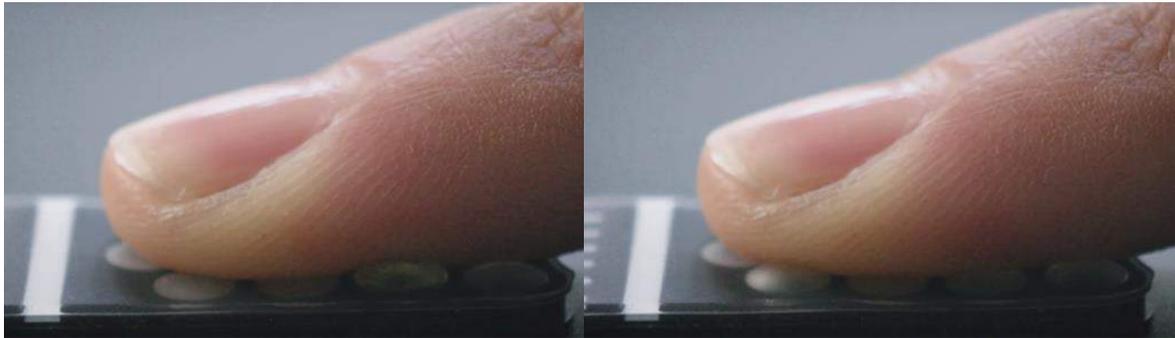


Figura 25: a) Burbuja deshinchada del Haptx Glove b) Burbuja hinchada del Haptx Glove [22]

Los grandes inconvenientes de estos sistemas, dejando a un lado el precio y la complejidad de su implementación, es el peso y el volumen que ocupan estos sistemas.

3.3. Conclusiones

A continuación, se verá de forma resumida una tabla donde se recogen todos los actuadores utilizados para recrear la percepción táctil.

Tabla 1: Comparación de tecnologías para recrear la percepción táctil

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Motores DC y servomotores	Sensación fidedigna a la realidad y posibilidad de sentir diferentes estímulos táctiles.	Son actuadores pesados, voluminosos y rígidos.
SMA	Ligeros, flexibles, poco voluminosos y silenciosos.	Funcionamiento menos instantáneo que otros actuadores al necesitar tiempo para enfriarse y posibles incomodidades al llevarlo puesto debido a las altas temperaturas.
Motores de vibración	Ligeros, flexibles, poco voluminosos y fáciles de controlar.	Sensación táctil menos realista que otros actuadores.
Actuadores neumáticos	Gran precisión y realismo.	Son actuadores complejos de implementar, voluminosos y ruidosos al ir alimentados con un compresor.

Tras este análisis y teniendo en cuenta los objetivos del proyecto, se ha determinado que las tecnologías más ventajosas son los motores de vibración y la SMA. Se va a desarrollar un prototipo distinto con cada tecnología y se va a comparar las sensaciones que ofrece cada prototipo. En función de los resultados experimentales, cabría la posibilidad de integrar ambas tecnologías en un mismo guante.

4. TECNOLOGÍA UTILIZADA

En este capítulo se va a estudiar más a fondo las tecnologías elegidas para analizar la mejor forma de incorporarlos en el guante.

4.1. Motores de vibración

Los primeros motores de vibración fueron desarrollados en la década de 1960. Inicialmente, se utilizaban para productos de masaje. Sin embargo, a partir de 1990, esta tecnología se empezó a incorporar en los teléfonos móviles, utilizando la vibración para notificar al usuario de cualquier evento. Hoy en día, el uso de los motores de vibración está muy extendido. Las principales aplicaciones de estos dispositivos pueden verse en la tecnología (teléfonos móviles, rastreadores GPS, mandos de consola, escáneres...), en la industria (minera, plástica, procesado de alimentos...) y en instrumentos médicos. [23]

Existen dos tipos básicos de motores de vibración: el motor de vibración de masa giratoria excéntrica (ERM) y el actuador de resonancia lineal (LRA).

4.1.1. Motores de vibración de masa giratoria excéntrica

Es la manera más simple y popular de generar vibración. El ERM es un motor de corriente continua convencional al que se le ha añadido una masa no simétrica en su eje. Cuando se le suministra corriente al motor y empieza a girar, la masa excéntrica genera una fuerza centrípeta. Al anclar el motor a un objeto, se producen constantemente unos desplazamientos y movimientos del motor a altas revoluciones por minuto debido a estas fuerzas asimétricas. Este desplazamiento repetido es lo que se percibe como una vibración.

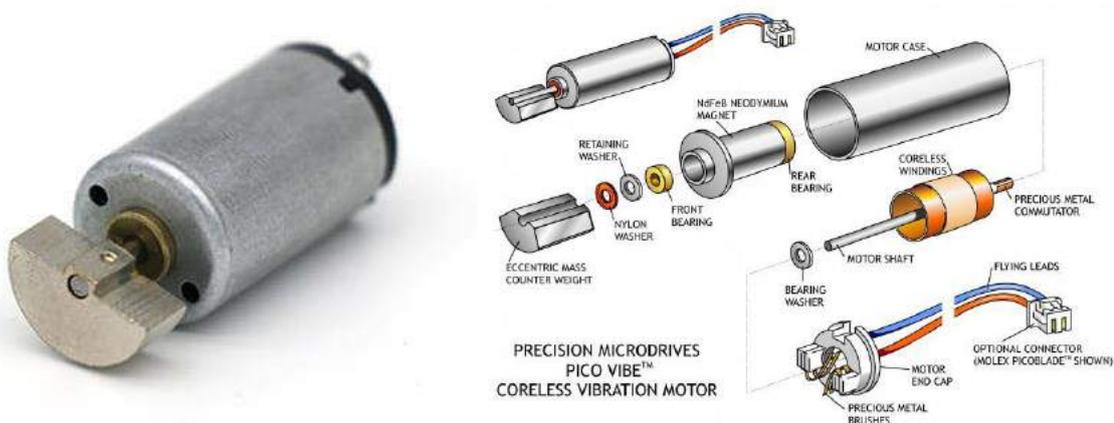


Figura 26: ERM [24] [25]

La vibración se caracteriza por dos parámetros: la frecuencia y la amplitud.

La frecuencia de vibración hace referencia al número de vueltas que da el motor por unidad de tiempo. En el Sistema Internacional de Unidades, la frecuencia se mide en hercios (Hz), que refleja el número de ciclos por segundo. También es muy común ver en las hojas de especificaciones ver la frecuencia en RPM o revoluciones por minuto.

La amplitud de vibración hace referencia a la magnitud de la fuerza centrípeta que genera el motor. Esta fuerza centrípeta viene determinada por la siguiente ecuación:

$$F = mrw^2$$

Donde:

F: representa la fuerza centrípeta en newtons (N)

m: representa la masa de la carga excéntrica en kilos (kg)

r: representa la excentricidad en metros (m)

w: representa la velocidad angular en radianes por segundo (rad/s)

Sin embargo, la amplitud también depende del objeto al que va unido. La amplitud de vibración se suele medir en unidades de aceleración. Sabiendo el valor de la fuerza centrípeta y la masa del objeto, se puede calcular esta aceleración mediante la fórmula de la Segunda ley de Newton ($F = ma$). Además, se suele expresar en unidades de fuerza g (G), donde 1G equivale a 9.8 m/s^2 . [26]

La forma más sencilla de controlar un ERM es conectando sus terminales a una fuente de corriente continua. Dependiendo del valor de esta fuente, habrá una frecuencia y amplitud determinadas. Es importante destacar que en estos dispositivos no se puede variar la frecuencia y la amplitud de manera independiente. De esta forma, si se incrementa el voltaje, la frecuencia se incrementará proporcionalmente, y la amplitud lo hará de forma cuadrática. [27]

4.1.2. Actuadores de resonancia lineal

El LRA es la alternativa a los ERM para generar vibración. En realidad, ambos tipos de motores se basan en el mismo principio: utilizar una masa en movimiento para crear una fuerza desequilibrada y generar desplazamientos repetitivos para recrear la vibración. Sin embargo, la diferencia entre ellos es cómo generan esa fuerza.

El LRA es un dispositivo que alberga en su interior una bobina y una masa magnética unida a un muelle. Cuando se hace pasar corriente por la bobina, se genera un campo magnético que hace que la masa se mueva hacia arriba y hacia abajo constantemente. El muelle ayuda a la masa a regresar al centro. Este movimiento oscilatorio es lo que provoca el

desplazamiento y la consecuente vibración. Este movimiento lineal de la masa magnética es lo que da nombre a este tipo de actuadores.

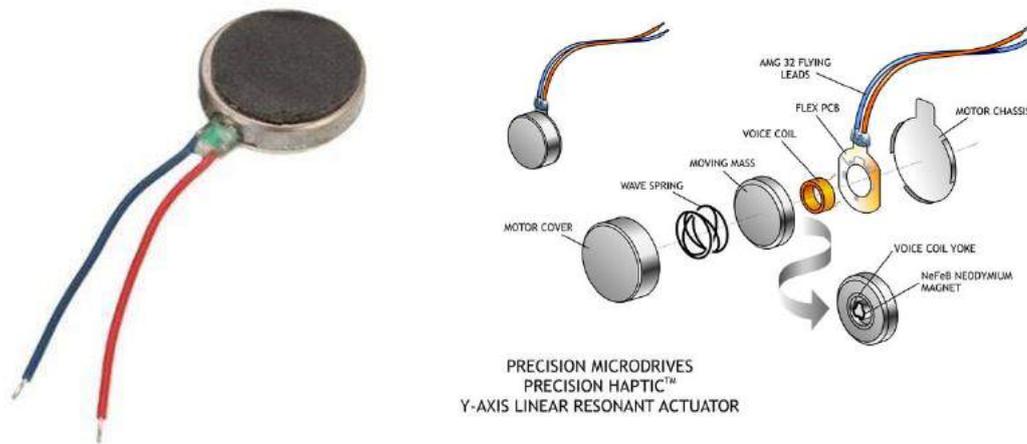


Figura 27: Motor LRA [28] [29]

Como la bobina permanece quieta y lo que se mueve es la masa, para hacer que ésta oscile arriba y abajo es necesario cambiar la polaridad de la corriente para cambiar el sentido de la fuerza. Por tanto, el LRA requiere una señal de corriente alterna para funcionar.

Una característica fundamental de estos actuadores es que oscilan con una mayor amplitud a frecuencias particulares. Para explicar este fenómeno, es necesario conocer el circuito equivalente de estos dispositivos:

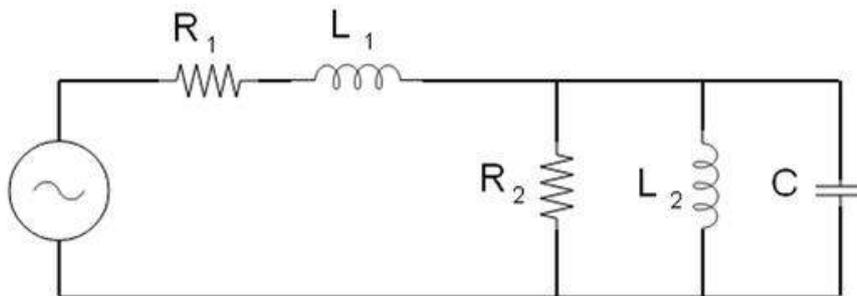


Figura 28: Circuito equivalente LRAs

La rama serie representa la impedancia de la bobina y la rama paralelo, la impedancia de la masa magnética. La impedancia total de la rama paralelo viene dada por la siguiente fórmula:

$$\frac{1}{Z_{total}} = \frac{1}{R_2} + j\omega C + \frac{1}{j\omega L_2}$$

Como se puede apreciar, la impedancia del condensador decrece con altas frecuencias y la impedancia de la inductancia crece con altas frecuencias. Por tanto, habrá un valor de frecuencia para el cual la impedancia total de la rama paralelo sea máxima, y, por tanto, la caída de tensión también lo sea. Cuanto mayor sea esa caída de tensión, con más fuerza se

moverá la masa magnética y mejor rendimiento y eficiencia tendrá el actuador. Esta frecuencia se conoce como frecuencia de resonancia y depende de las propiedades de los componentes del motor.

Otra diferencia de los LRA respecto a los ERM es que la frecuencia y la amplitud son totalmente independientes. Como hemos visto antes, la frecuencia depende de los componentes del sistema y no puede cambiarse, pero sin embargo la amplitud se puede cambiar variando el voltaje de entrada. Esto puede ser atractivo para algunas aplicaciones. [29]

La forma más sencilla de controlar estos dispositivos es utilizando señales PWM.

Como conclusión de este capítulo, todo parece indicar que los LRAs son más adecuados que los ERMs para incorporarlos al guante háptico. Si bien es cierto que, debido a su construcción, los LRAs están más limitados en amplitud de vibración, ofrecen mayores ventajas en el resto de aspectos. Por un lado, dan una respuesta más rápida, son capaces de empezar a vibrar y parar de hacerlo muy rápidamente. Por otro lado, son dispositivos más compactos y ligeros, y, por tanto, ideales para dispositivos portátiles. Por último, son dispositivos más duraderos, ya que son motores sin escobillas y no sufren el desgaste mecánico de los motores de corriente continua de los ERMs. [30]

4.2. Aleaciones con memoria de forma (SMA)

Las aleaciones de memoria de forma son materiales “inteligentes” capaces de volver a su forma original cuando son sometidos a un calentamiento. Tienen la capacidad de “recordar” la forma que tenían antes de ser deformados en frío. Estos efectos se denominan memoria de forma térmica (efecto memoria de forma) y memoria de forma elástica (superelasticidad) [31]. Aunque son efectos distintos, ambos tienen el mismo comportamiento [32].

Las aleaciones de memoria aparecieron por primera vez en el año 1932, cuando el físico sueco A. Ölander descubrió que la aleación Au-Cd poseía la propiedad de superelasticidad. Unos años después, Greninger y Mooradian observaron la aparición y desaparición de fase martensita a medida que aumentaba y disminuía la temperatura en una aleación de Cu-Zn. Sin, embargo, el descubrimiento más importante se realizó en 1962, cuando el ingeniero estadounidense William J. Buehler desarrolló una aleación de níquel y titanio (Ni-Ti) que presentaba un efecto de memoria de forma muy acusado, recuperando su forma original cuando se calentaba a una cierta temperatura. Se bautizó a esta aleación con el nombre de nitinol [31].

Hoy en día, y a pesar de la búsqueda de nuevas aleaciones con memoria de forma, el nitinol sigue siendo la SMA más ampliamente utilizada. Estas aleaciones suelen comercializarse en forma de hilos, muelles, placas finas, etc.

El efecto de memoria de forma se debe a la transformación de una estructura cristalina (martensita) en otra (austensita). Las transformaciones de estado en sólidos se pueden

producir por dos mecanismos diferentes: por difusión y por desplazamiento. A temperatura ambiente, el nitinol se encuentra en su fase martensítica, donde tiene un límite elástico muy bajo y se puede deformar con bastante facilidad, manteniendo la forma nueva como si fuera una deformación plástica. Sin embargo, cuando el material se calienta lo suficiente, el nitinol se transforma y pasa a su fase austenítica, recuperando así la forma original.

La transformación entre estas dos fases se rige por su ciclo de histéresis (véase la figura 29), que está caracterizado por 4 temperaturas de transformación. El proceso es el siguiente:

- Con el material en frío (en fase martensítica), si se le somete a un esfuerzo, se producirá una deformación que se mantendrá al cesar este esfuerzo. Si se somete el material a un calentamiento, cuando la temperatura llega a la temperatura A_i , comenzará la transformación en austenita.
- Cuando la temperatura llega a A_f , habrá finalizado el proceso de transformación, habiéndose transformado toda la martensita en austenita. Esto hará que se recupere la forma original del material.
- Si se produce ahora un enfriamiento del material, cuando la temperatura disminuye por debajo de la temperatura M_i , comenzará la transformación de austenita a martensita. Se produce así una reordenación de la estructura cristalina para generar una nueva estructura cristalina más estable. Este proceso finaliza cuando se llega a la temperatura M_f , donde toda la austenita se habrá convertido ya en martensita.

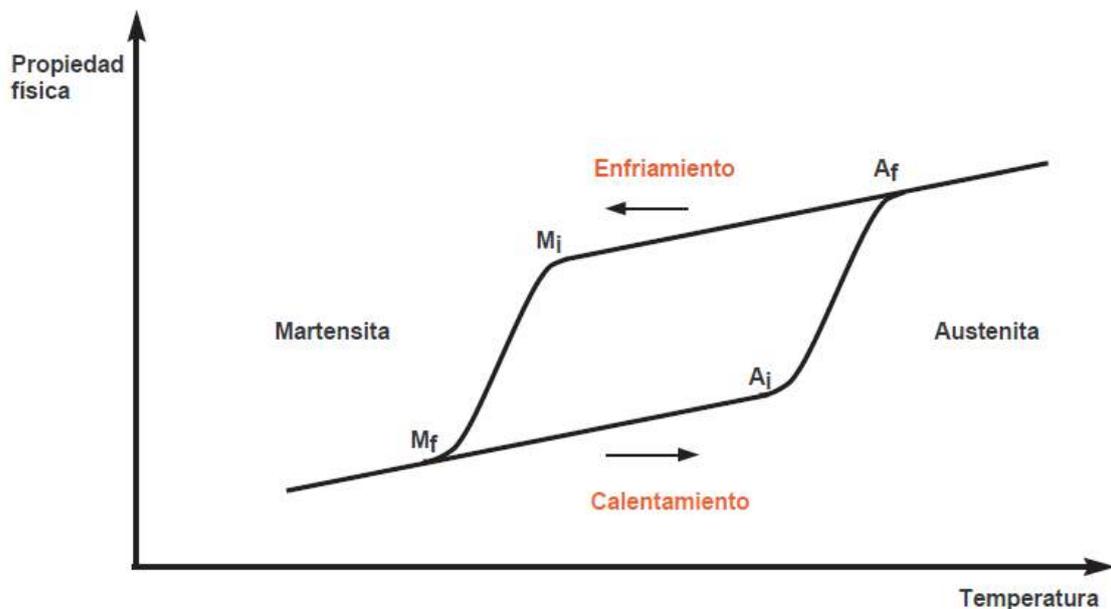


Figura 29: Ciclo de histéresis SMA [33]

Este mecanismo es lo que se conoce como memoria de forma simple o One-Way memory Effect (OWE), ya que sería necesario volver a deformar el material en frío para observar de nuevo el fenómeno.

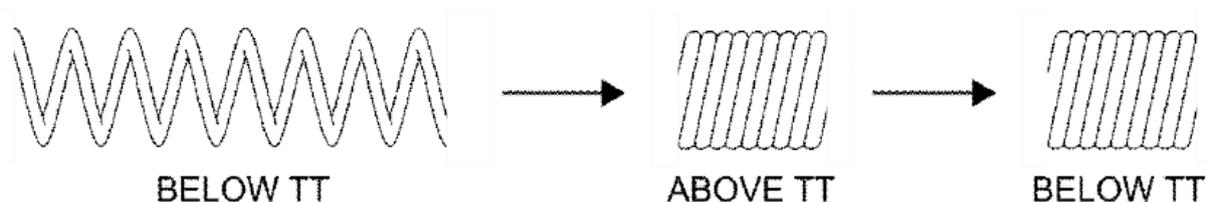


Figura 30: Mecanismo de transformación OWE [32]

Sin embargo, existe otro mecanismo conocido como memoria de forma doble o Two-Ways memory Effect (TWE), en el que se somete el material a un entrenamiento para que, además de recordar su forma a baja temperatura (fase martensítica) pueda recordar también su forma a alta temperatura (fase austenítica). Este entrenamiento consiste en someter al material a una serie de ciclos térmicos. Esto supone una gran ventaja, ya que no se necesitaría ninguna fuerza externa para devolverlo a la posición deformada en frío. Sin embargo, la deformación recuperable es aproximadamente la mitad de deformación que podría recuperar el material con el mecanismo de deformación simple.

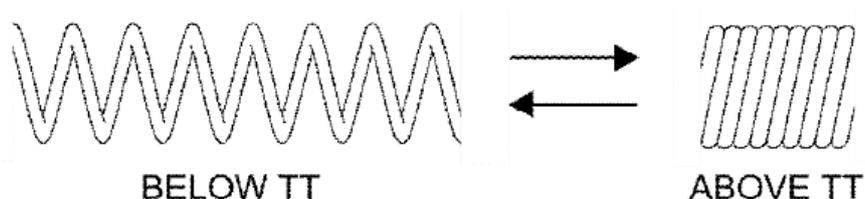


Figura 31: Mecanismo de transformación TWE [32]

Además, cabe destacar que se aprecian cambios en las propiedades eléctricas, térmicas y mecánicas durante el proceso de transformación.

En cuanto a su uso como actuador, lo más común es calentar la SMA haciéndole pasar una corriente eléctrica, aprovechando así la buena conductividad que poseen estos materiales. Son dispositivos con una gran relación fuerza-peso, ideales para aplicaciones ligeras como un guante háptico. También destacan por ser silenciosos, resistentes a la corrosión y por tener un precio no muy elevado. Sin embargo, también presentan algunos inconvenientes, pues tienen baja eficiencia energética, se degradan con el tiempo, son actuadores lentos (tardan un tiempo en contraerse) y su control es algo impreciso (debido a las características no lineales en sus fases de transformación) [34].

5. DISEÑO Y DESARROLLO

La etapa de diseño y desarrollo ha sido la más relevante del proyecto. Desde el primer boceto hasta el diseño definitivo se han ido probando distintas configuraciones hasta dar con la mejor solución.

5.1. Prototipo I

Se ha bautizado el prototipo de los motores de vibración como prototipo I.

5.1.1. Planteamiento inicial

Como primer acercamiento, se hizo un boceto con los componentes e ideas básicas de las que se quería partir. Como se puede ver en la figura 32, la idea inicial del guante era incorporar un motor de vibración en cada yema del dedo. Estos motores de vibración irían alojados en unos dedales para poder sujetarlos a la punta de los dedos. Por otro lado, se utilizaría un guante convencional que cumpliría una doble función: sujetar el cableado y proteger de posibles chispazos y sobrecalentamientos al usuario si los hubiera. Por último, habría un brazalete que aglutinaría toda la circuitería y el sistema de control del guante. Tanto los dedales como el brazalete se fabricarían con una impresora 3D.

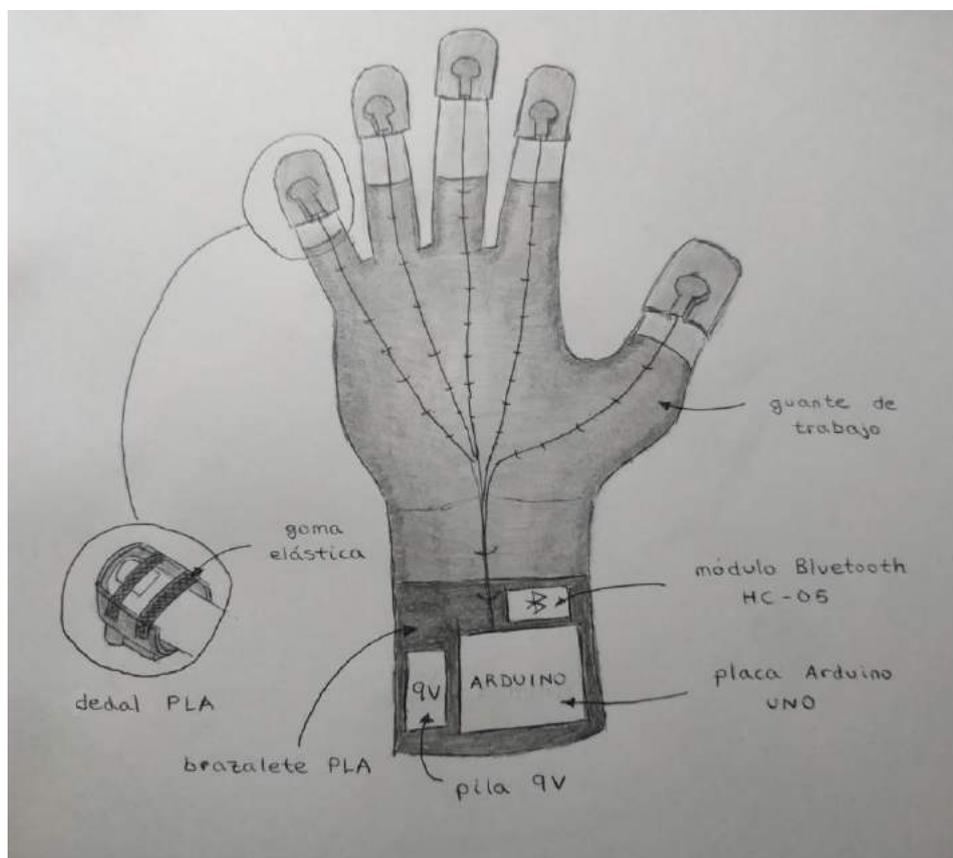


Figura 32: Boceto inicial prototipo II

A continuación, se va a profundizar en el diseño de cada parte del guante por separado.

5.1.2. Diseño de los dedos

Los dedos tienen la función de poner en contacto los motores de vibración con las yemas de los dedos.

El motor seleccionado para suministrar la vibración es un LRA tipo moneda de 2 mm de espesor y 10 mm de diámetro. Tiene un peso de 0.9 g. Este motor puede trabajar a una tensión de 3 V y suministra una amplitud de vibración de 0.8 G (cuando el objeto al que va unido es una masa de 80 g). Las características eléctricas se muestran en la tabla 2.



Figura 33: Motor de RS components

Tabla 2: Características eléctricas del motor

No.	Item	Measuring Condition	Specification
3-1	Rated Speed	At Rated Voltage and Rated Load	Min 10,000rpm
3-2	Rated Current	At Rated Voltage and Rated Load	80mA or less
3-3	Starting Voltage	At Rated Load and Step Voltage	DC2.3V or less
3-4	Insulation Resistance	DC100V between Lead wire and Case	10M Ω Min
3-5	Insulation Voltage	DC50V between Lead wire and Motor	-
3-6	Terminal Resistance	Measure between Terminals	75 Ω Max

Para su diseño, lo primero que se hizo fue tomar medidas de los dedos con la ayuda de un calibre digital, para que fuese lo más preciso posible. Adicionalmente, se miró en la hoja de especificaciones de los motores para saber sus medidas exactas y, de esta forma, incorporar un compartimento para acoplarlos en la parte inferior de los dedos.

Una vez estaban hechas todas las medidas, se utilizó el programa Fusion360 para realizar un primer modelo 3D. Sin embargo, como cabía esperar, al fabricarlo y probarlo directamente se vio que el dedal era demasiado grueso y voluminoso, siendo demasiado incómodo de llevar.



Figura 34: Primer dedal a) Modelo en Fusion360 b) Modelo impreso

Esto provocó un rediseño del dedal. Se redujo el espesor de la pared del dedal y se acortó para no restar movilidad al doblar el dedo. Se imprimieron algunos modelos más en los que se fue ajustando las medidas hasta obtener el dedal deseado.

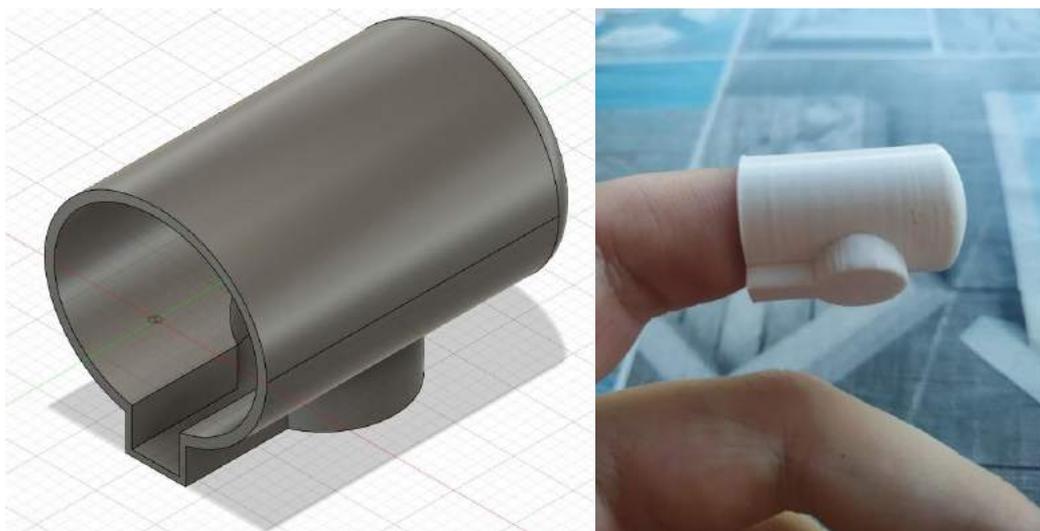


Figura 35: Segundo dedal a) Modelo en Fusion360 b) Modelo impreso

Sin embargo, con el objetivo de que el dedal se adaptase a cualquier dedo, se decidió sustituir la parte superior del dedal por una banda elástica. De esta forma, el dedal es mucho más cómodo y flexible para el usuario. Se utilizó el mismo diseño para todos los dedos excepto para el pulgar, en el que se ajustaron ligeramente las medidas.

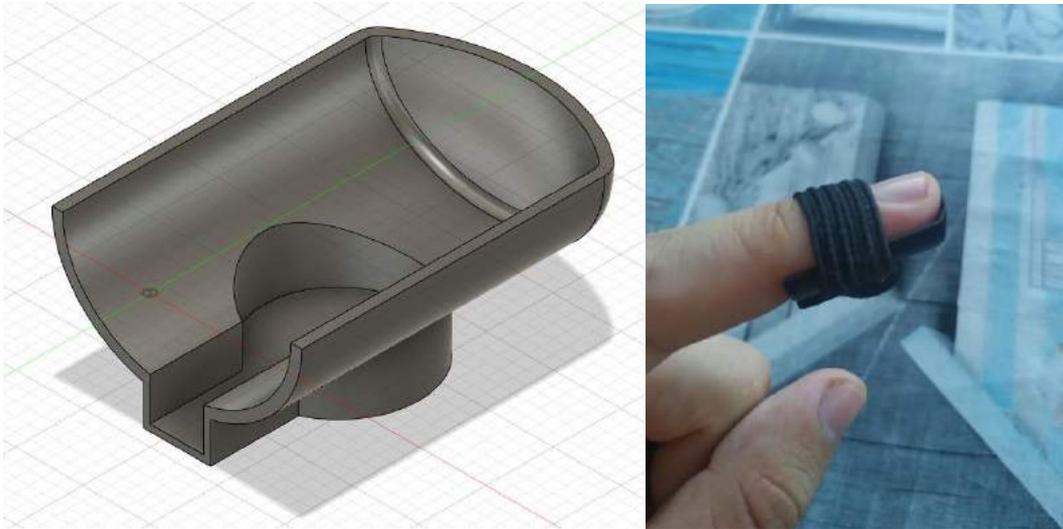


Figura 36: Dedal final a) Modelo en Fusion360 b) Modelo impreso

Todos estos modelos se hicieron tomando como referencia el dedo índice. Sin embargo, gracias a la adaptabilidad que proporciona la banda elástica, este dedal se puede utilizar para el dedo medio, anular y meñique sin tener que variar las medidas. Para el dedo pulgar sí que se tuvo que aumentar ligeramente el tamaño del dedal.

5.1.3. Diseño de la plataforma de la palma

En una primera instancia, el guante estaba concebido para dar sensación de tacto únicamente en las yemas de los dedos. Sin embargo, para mejorar la percepción táctil, se planteó poner algunos motores en la palma de la mano. Esto supuso un rediseño total en el guante.

Los motores que se utilizarán serán los mismos que los que se han utilizado en los dedales.

En una primera prueba, se decidió prescindir del guante de trabajo para incorporar una plataforma que alojaba 3 motores de vibración en su interior. Estos 3 motores iban en el centro de la mano pues no era posible separarlos mucho, ya que al ser la plataforma rígida impediría que el usuario pudiese doblar la mano correctamente. Para ello, se hicieron unas ranuras en el canto de la plataforma teniendo en cuenta desde donde vendría cada cable. Además, esta plataforma serviría para aunar los cables provenientes de los dedales. Para sujetarla a la mano, se pondría una tira elástica que rodearía la mano, tal y como puede verse en la figura 37.



Figura 37: Primer prototipo de la palma a) Modelo en Fusion360 b) Modelo impreso

Los resultados experimentales no fueron del todo satisfactorios, pues los motores no estaban puestos en las zonas en las que uno esperaría sentir tacto. Además, a pesar de que la plataforma era relativamente pequeña, no permitía cerrar la mano correctamente.

En base a las sensaciones obtenidas y en algunos antecedentes bibliográficos, como el GloveOneVR, se decidió que la mejor distribución era poner 5 motores en la palma, 3 en la parte superior y 2 en la inferior, tal y como se muestra en la figura 38.

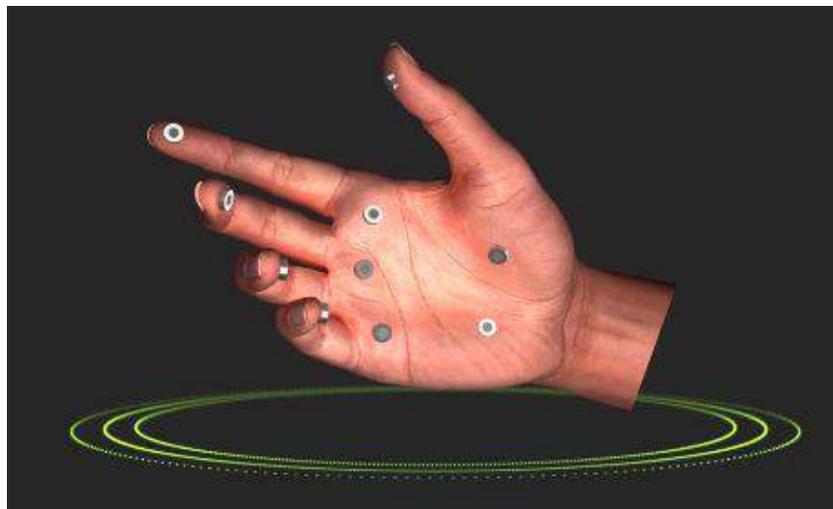


Figura 38: Distribución actuadores del guante GloveoneVR

Esta distribución era incompatible con la idea de alojar los motores en una plataforma rígida, ya que impedía doblar la mano con libertad. Por tanto, había que buscar otras opciones.

Se planteó entonces la opción de incrustar los motores en un guante convencional. Para su implementación, se diseñaron unas piezas que irían pegadas al guante y pudiesen alojar estos motores.

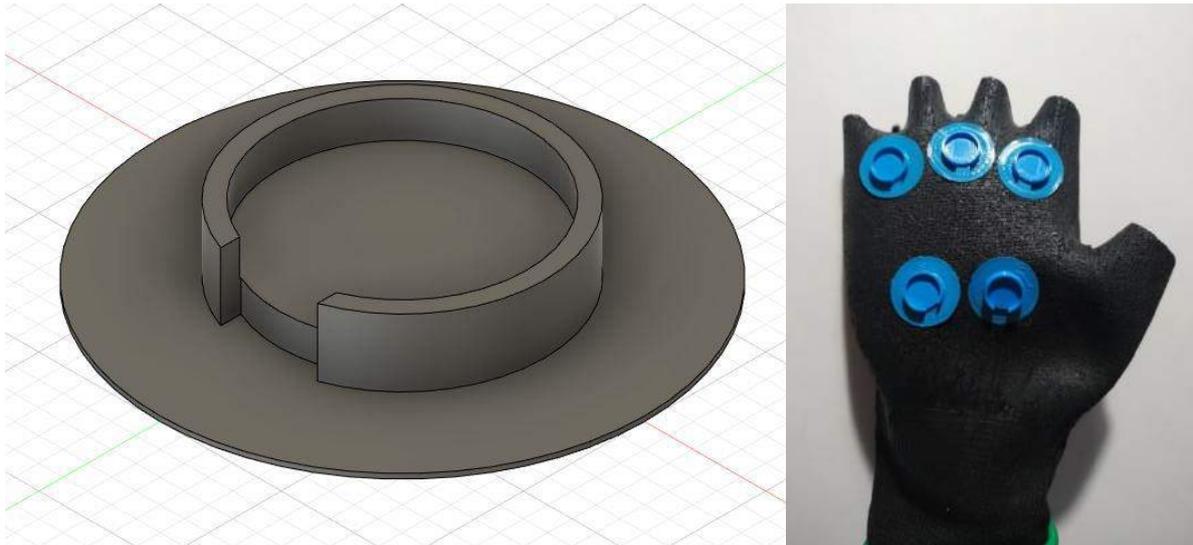


Figura 39: Segundo prototipo de la palma a) Modelo en Fusion360 b) Modelo impreso

Las pruebas experimentales de este prototipo tampoco fueron buenas. En primer lugar, el guante era incómodo de poner y no se ajustaba a todos los usuarios. En segundo lugar y aún más preocupante, al doblar la mano se producía un “efecto bolsa” que hacía que los motores dejaran de estar en contacto con la piel (véase la figura 40).



Figura 40: "Efecto bolsa"

Otra opción que se planteó fue utilizar filamento flexible, pero su incremento en el precio y su dificultad de impresión (requiere temperaturas más altas y tiende a despegarse de la cama de impresión) hicieron que se desechase esta idea.

Entonces se planteó dividir la plataforma en dos partes. Una de ellas alojaría los 3 motores superiores y la otra alojaría los 2 motores inferiores.

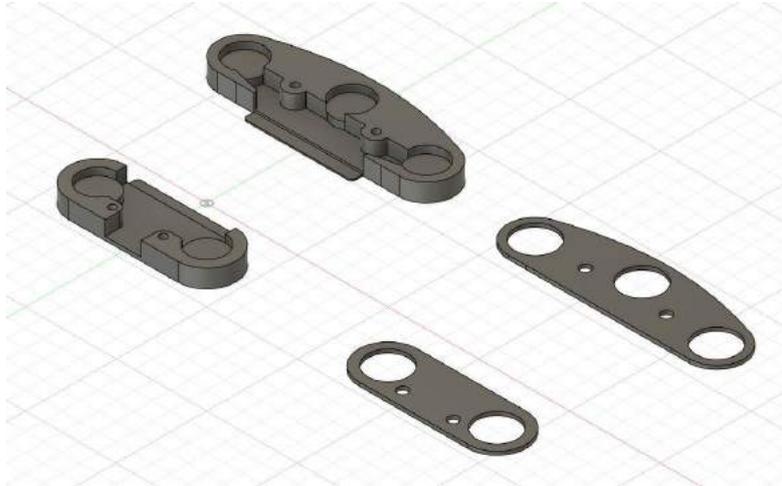


Figura 41: Modelo del prototipo final de la palma en Fusion360

Ambas estarían unidas por una tela, permitiendo así doblar la mano sin problemas. Para sujetar la parte superior, se pegarían dos bandas elásticas que se meterían en los dedos medio y anular (en el extremo de la tela se cosería otra tela en forma de anillo para poder meter el dedo). Para sujetar la parte central, se colocarían dos bandas elásticas, una en el puente que una la plataforma inferior y superior y otra en la parte superior (para evitar el “efecto bolsa” antes mencionado). Para sujetar la parte inferior, habría una tira de tela que engancha la plataforma inferior a la muñeca, para garantizar el contacto de los motores en todo momento. Por último, estas plataformas llevarían una tapa cada una, para asegurar la posición de los motores y esconder el cableado. Estas tapas irían ensambladas con 2 tornillos M2 de 5 mm de largo.

El diseño final quedaría así:



Figura 42: Prototipo final de la plataforma de la palma

5.1.4. Diseño del brazalete

El brazalete constituye la parte del guante en la que van montados la placa de Arduino UNO y el circuito de control.

Para hacer el guante lo más compacto posible, se pensó en montar la placa de Arduino directamente encima de la mano. Sin embargo, debido al peso y la incomodidad que esta distribución suponía, se desechó rápido esta idea.

Por tanto, se diseñó el brazalete que se muestra en la figura 43. El brazalete consta de dos huecos con forma rectangular. En el más pequeño de estos orificios irá alojada una PCB en la que está montado el circuito eléctrico que controla los motores de la palma del guante. En el orificio grande, se encajará el Arduino. Para que el Arduino esté fijo y no haya riesgo de que se caiga con ningún giro o movimiento brusco, se han hecho unas perforaciones en el brazalete donde se atornillará tanto la placa de Arduino como el soporte transparente que venía con ella. Se han utilizado tornillos M3 de distintas longitudes. Por último, para sujetar el brazalete al brazo se ha dejado un hueco entre el soporte del Arduino y el brazalete donde sale una tira de tela que se engancha mediante una hebilla de liberación rápida lateral (véase la figura 44).

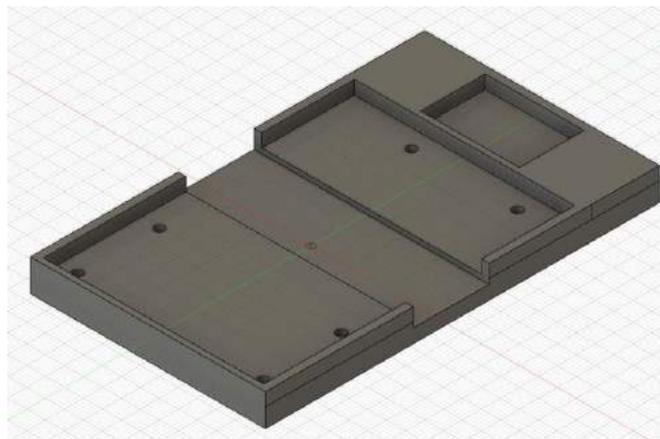


Figura 43: Modelo del brazalete en Fusion360



Figura 44: Hebilla de liberación rápida lateral [35]

El diseño final, con el soporte del Arduino ya anclado, quedaría así:



Figura 45: Brazaletes impreso con el soporte del Arduino atornillado

5.2. Prototipo II

Se ha bautizado el guante de la SMA como prototipo II.

5.2.1. Diseño y desarrollo fallido con cables de SMA

En primera instancia, se dibujó un boceto con los componentes e ideas básicas de las que se quería partir. En este caso, la idea inicial era enrollar hilos de SMA alrededor de las yemas de los dedos y contraerlos de forma que tocasen la piel cuando estuviesen contraídos, de forma muy similar al estudio realizado por la compañía de Volkswagen [3]. Los dedales irían montados en unos dedales y encima de ellos iría montada la PCB con todas las conexiones. Los hilos de SMA harían contacto con la PCB mediante unos tornillos, ya que no es recomendable soldar este tipo de aleaciones. Para sujetar los dedales a los dedos, se pegarían 2 bandas elásticas a cada dedal, adaptándose así a cada usuario. Por último, habría una plataforma que iría en el dorso de la mano que aglutinaría toda la circuitería y el sistema de control del guante. Tanto los dedales como la plataforma se fabricarían con una impresora 3D.

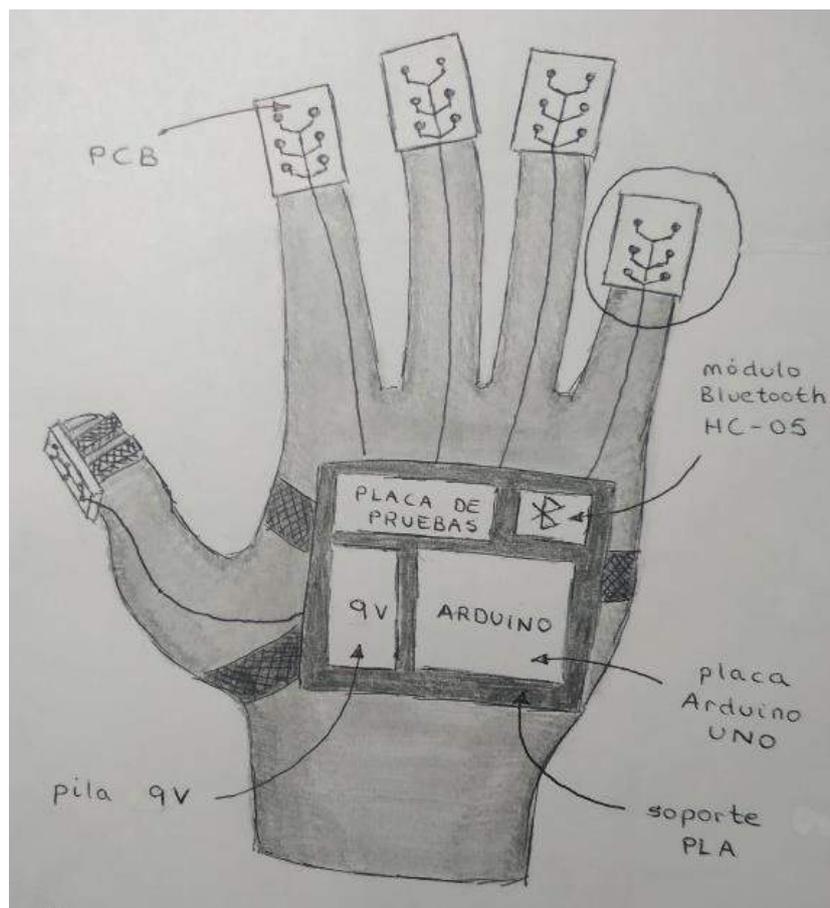


Figura 46: Boceto inicial prototipo II

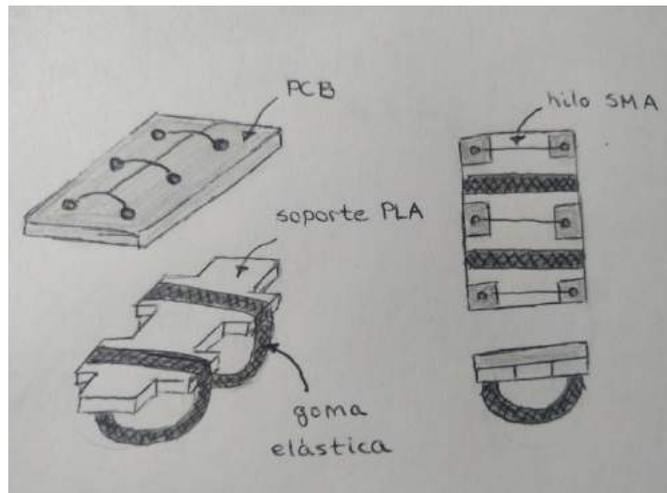


Figura 47: Boceto inicial dedal prototipo II

Una vez planteado el diseño, se compraron todos los componentes y se empezó a diseñar los dedos.

La SMA elegida fue un cable de Flexinol (un nombre comercial del nitinol) de un diámetro de 100 μm del fabricante Dynalloy. El motivo de que el cable fuese tan pequeño es que se pone a una temperatura muy alta (la temperatura de activación es de 70°C) de manera que, si el cable era así de fino, el usuario pudiese obviar la temperatura tan alta a la que se contraía y no se quemase. Además, el estudio de Volkswagen utilizaba un cable 80 μm .



Figura 48: Cable de flexinol [36]

Las propiedades de la SMA se pueden ver en la imagen 41. Como se ha comentado, la temperatura de activación es de 70°C. La resistencia es de 75 Ω/m y la corriente necesaria para contraer el cable es de 320 mA. La contracción del cable será de un 3-5%.

El siguiente paso fue diseñar el dedal. Se diseñó con 4 orificios donde irían alojados unos tornillos M3 de 5 mm de largo.

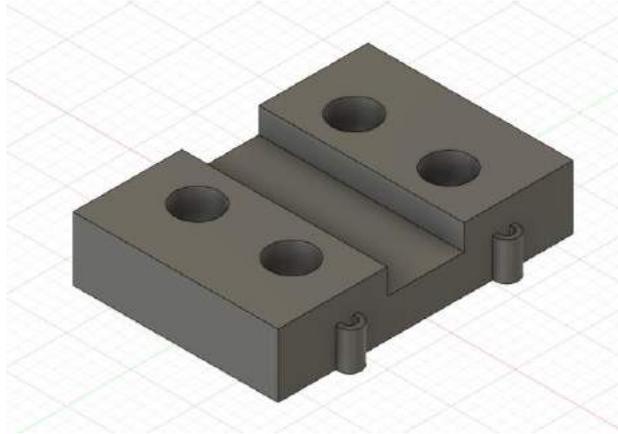


Figura 49: Modelo dedal inicial en Fusion360

Posteriormente, se cortó una PCB y se soldaron los caminos que llevarían la corriente hacia la SMA. El resultado final del montaje se aprecia en la figura 50.

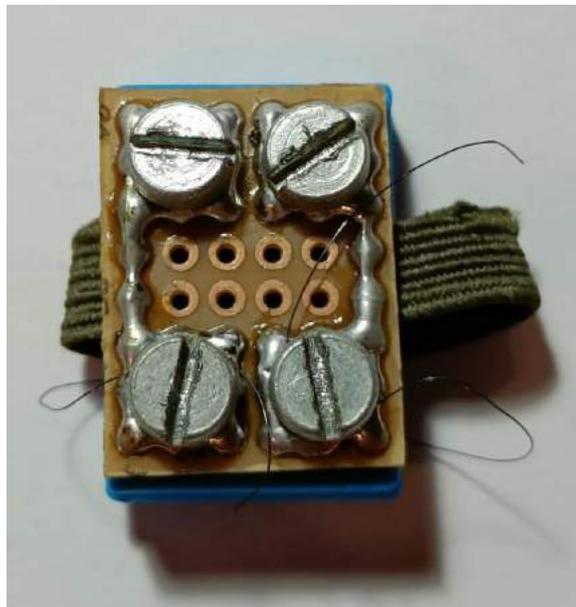


Figura 50: Dedal inicial montado

Antes de seguir desarrollando este prototipo, se decidió probar para ver cómo funcionaba. El resultado fue nefasto. Por un lado, el cable quemaba al usuario, con lo cual era inviable seguir con este diseño. Por otro, la contracción era muy pequeña (eso sí, bastante instantánea) y apenas perceptible, la única forma era ajustando mucho el cable a la yema del dedo. Aún así, se notaba una ligera sensación cuando se contraía el cable (la sensación era buena pero demasiado sutil), pero luego esa sensación desaparecía y aunque la corriente cesase y se volviese a activar, no se volvía a notar nada. Además, el hecho de ajustar tanto el cable a la yema del dedo hacía que cada usuario necesitase una medida distinta para poder percibir algo, chocando con el objetivo de adaptabilidad del guante.

Por todo lo dicho anteriormente y a pesar de haber planteado alternativas para solucionar estos problemas se decidió desechar por completo esta idea y buscar otras opciones.

5.2.2. Diseño y desarrollo con muelles de SMA

En vista de los resultados del diseño anterior, se decide cambiar por completo el diseño del prototipo II.

5.2.2.1. Planteamiento inicial

En primer lugar, para evitar problemas de temperatura, se decide alejar la SMA de los dedos. Se plantea por tanto una alternativa que tiene el siguiente principio de funcionamiento: se pondría en los dedos unos dedales con unas plataformas móviles alojadas en su interior. A estas plataformas móviles iría enganchadas unas cuerdas que a su vez estarían enganchadas a unos muelles de SMA. Al contraer los muelles, las cuerdas tirarían de estas plataformas haciendo que suban y entren en contacto con las yemas de los dedos, simulando por tanto la sensación de tacto.

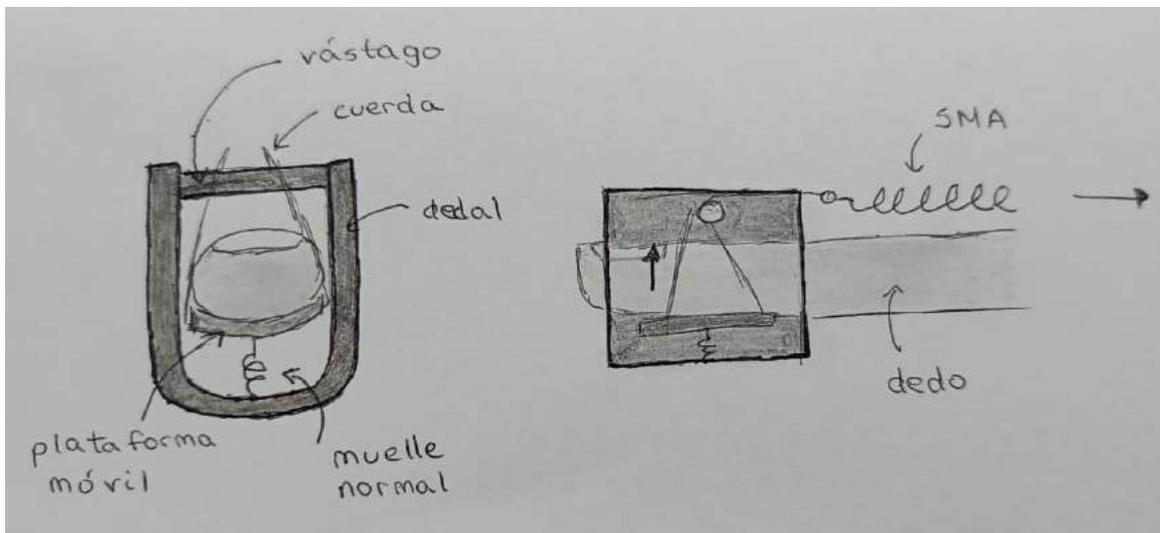


Figura 51: Boceto prototipo II con muelles de SMA

El motivo de utilizar muelles en vez de cables de SMA, es que son capaces de generar desplazamientos superiores al activarlos.

Por otro lado, para que el muelle de SMA sea capaz de estirarse de nuevo una vez contraído, se plantea inicialmente poner un muelle convencional en el dedal que haga fuerza en la fase de enfriamiento.

5.2.2.2. Diseño de los dedales

A la hora de diseñar el dedal en Fusion360, se intentó simplificar un poco el boceto inicial. De esta forma, en vez de tener una plataforma completamente móvil, se tendría una superficie anclada en un extremo con el dedal a través de un vástago. Cuando la cuerda ejerciese fuerza, la plataforma, en vez de subir toda entera, rotaría alrededor del vástago subiendo el otro extremo y tocando con la yema del dedo. Además, esto implica que se necesite una única cuerda para sostener la plataforma en vez de 4 para mantener el equilibrio (véase la figura 51).

Lo primero que se hizo fue diseñar el dedal. Se intentó hacer de la forma más reducida posible para que no molestase al usuario. Encima del dedo, se puso un conducto para poder guiar la cuerda hacia la mano. Además, para que la plataforma no tocase inicialmente los dedos, se hizo en la parte inferior del dedal una pendiente donde iría apoyada esta plataforma. también se realizaron unos agujeros pasantes para meter el vástago que sujeta la plataforma. Por último, se realizaron unos huecos en la parte media del dedal para hacer pasar unas bandas elásticas que envolverían el dedo, haciendo así que el dedal sea adaptable para todo el mundo. El resultado de todas estas operaciones se puede ver en la figura 52a.

En cuanto al diseño de la plataforma móvil, se hizo con una forma curva para que pudiese adaptarse lo mejor posible a la forma del dedo y pudiese tocar la totalidad de la yema al subir. En uno de sus extremos se hizo un agujero pasante para meter el vástago, y en el otro se puso una especie de arandela para anclar la cuerda. El resultado se muestra en la figura 52b.

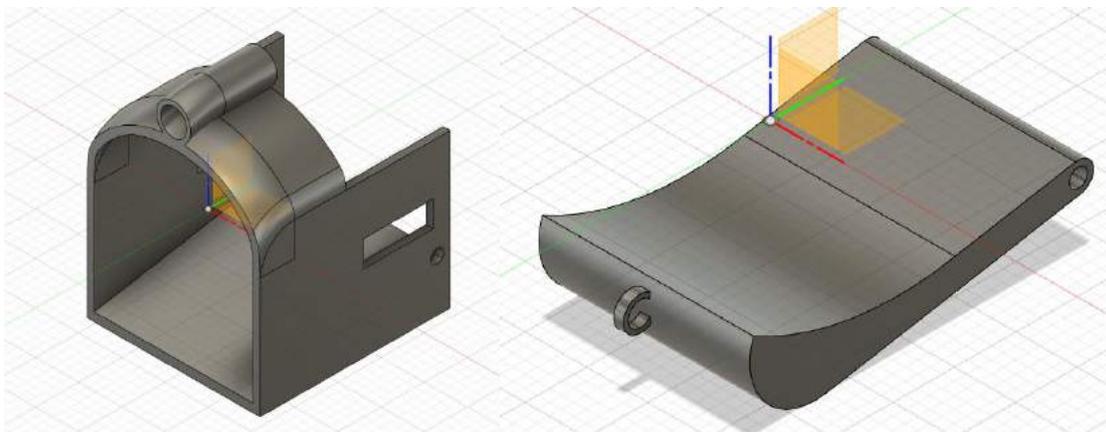


Figura 52: a) Dedal en Fusion360 b) Plataforma en Fusion360

Todo montado quedaría de la siguiente manera:

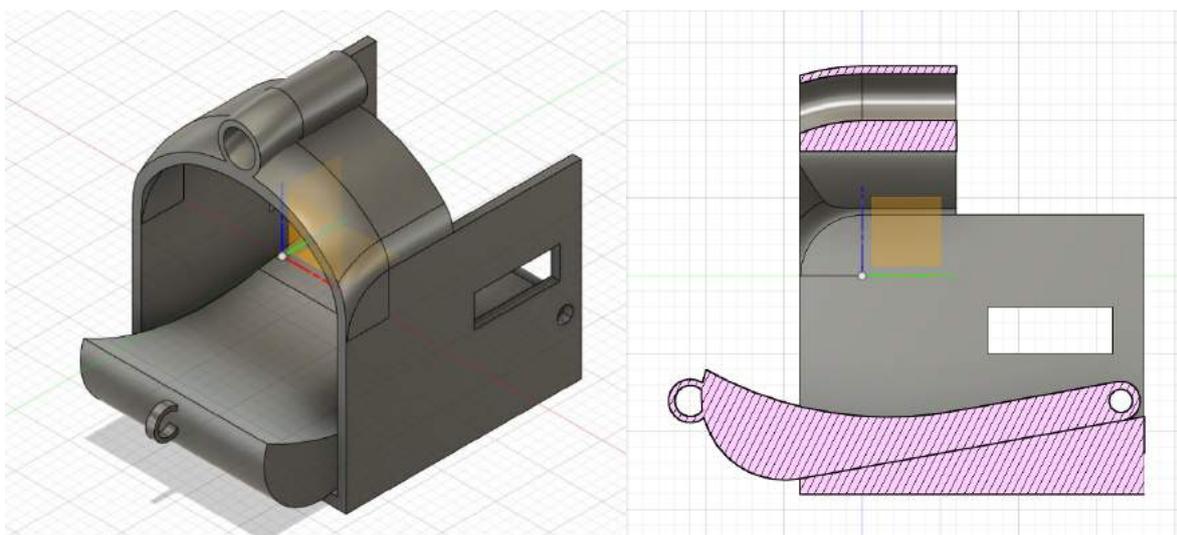


Figura 53: a) Dedal y plataforma montados b) Vista cortada del dedal

Por último, para el dedo pulgar y meñique se han rediseñado los dedales para ajustarlos a sus medidas.

5.2.2.3. Diseño de la estructura de control de SMA

Los muelles de SMA escogidos tienen un diámetro de 0.75 mm y una longitud en su forma inicial de unos 25 mm. Para que la plataforma móvil haga contacto con el dedo, es necesario que la cuerda sea capaz de desplazarse 1- 2 mm aproximadamente. Por tanto, los muelles deben estar estirados inicialmente con una longitud aproximadas de 40-45 mm. Además, un extremo del SMA debe estar fijo para que el otro ejerza la fuerza y arrastre la cuerda.

Se intentó realizar un primer experimento para ver cómo funcionaba esta idea. Se fabricó un dedal como el descrito en el apartado anterior y se le ató una cuerda. Posteriormente, se recubrió la muñeca y la mano con un guante convencional para no quemar la piel. Después, se puso el muelle encima y se enganchó un extremo a la cuerda mientras que el otro se ancló al brazalete donde iba el sistema de control del guante. El resultado fue que el muelle era capaz de contraerse la primera vez que se activaba sin problemas (era algo lento, eso sí) pero luego tardaba mucho en enfriarse y no era capaz de estirarse de nuevo por sí mismo. Esto hizo que se antojase necesario un sistema para poder hacer que el muelle recuperase su forma estirada.

Se plantearon varias opciones. La primera de ellas era buscar unos muelles convencionales que tuviesen la fuerza suficiente para estirar la SMA una vez contraída, pero que a su vez no opusiesen demasiada resistencia cuando se contrajese. Sin embargo, esta idea se acabó descartando por dos motivos: primero porque el fabricante de los muelles de SMA no ofrece suficiente información acerca de la fuerza que ejercen estos, y aunque se podría hacer algunas estimaciones, sería complicado encontrar un muelle con la constante elástica k exacta para que el dispositivo funcionase como se quiere. Segundo, porque deformar la SMA todavía caliente podría dañarla y no es un uso correcto del actuador.

Por tanto, para enfriar la SMA, se decide poner un ventilador que refrigere el sistema. El ventilador escogido tiene unas dimensiones de 40x40x10. Funciona con una tensión de alimentación de 12V y una corriente de 0.1 A.

Para incorporar este nuevo elemento al sistema, se decide hacer una estructura que sujete el ventilador y a la vez ancle el muelle de SMA por un extremo. Este nuevo dispositivo irá montado en el brazo, a continuación de la muñeca.

Además de este sistema de refrigeración, sigue siendo necesaria una fuerza que ayude a estirar la SMA. La primera opción fue diseñar un sistema en el que unas gomas elásticas irían agarradas al muelle por su extremo móvil ejerciendo la misma función que el muelle convencional. La ventaja de utilizar gomas elásticas en vez de un muelle es que en estas se puede regular la tensión que se quiere suministrar variando su longitud. El dispositivo que se montó se puede ver en la figura 54.



Figura 54: Disposición con gomas elásticas

Las pruebas experimentales no fueron del todo satisfactorias. Si la goma elástica se tensaba demasiado, impedía al muelle contraerse con libertad. En cambio, si se dejaba demasiado suelta, no era capaz de estirar del todo el muelle.

Se planteó entonces sustituir las gomas elásticas por otro muelle de SMA a continuación del otro. El sistema funcionaría de la siguiente manera: en la fase de contracción de la SMA convencional, la SMA antagonista, al estar frío, se deformaría sin ejercer apenas resistencia mientras que el otro recupera su forma original. En la fase de estiramiento del SMA convencional, se activaría el ventilador para enfriarlo y simultáneamente se activaría también la SMA antagonista, contrayéndose y por tanto estirando el otro muelle.

Se diseña así la siguiente estructura:

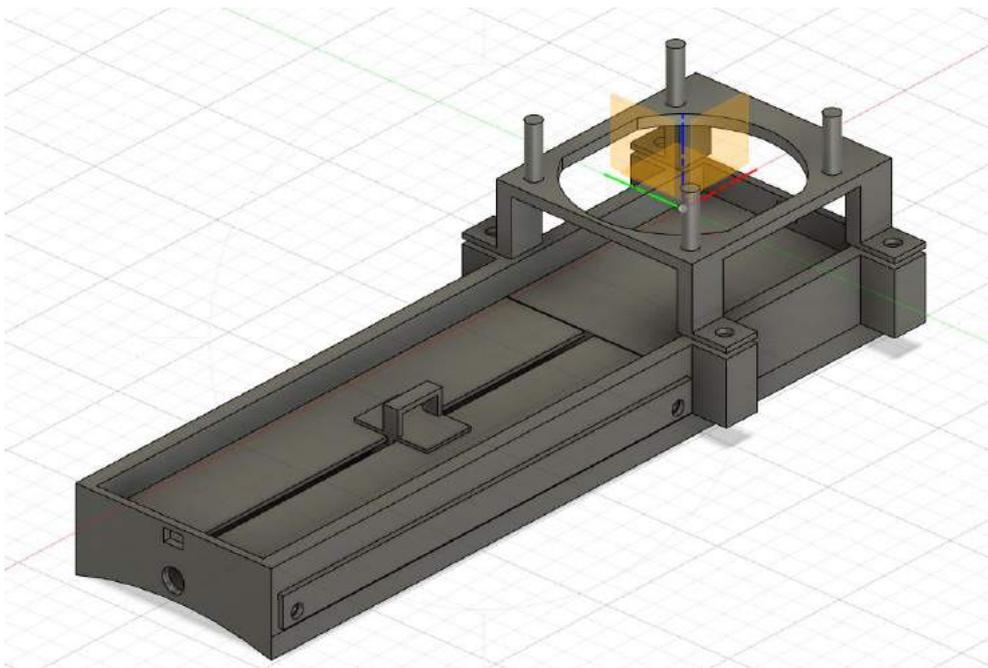


Figura 55: Modelo 3D de la estructura de control de SMA en Fusion360

En primer lugar, se diseñó el soporte que fija los muelles de SMA. En sus extremos hay unos huecos donde se van a unir los muelles mediante bridas. Además, este soporte lleva atornilladas dos piezas simétricas que se encargan de guiar el ancla móvil en su rango de movimiento.

Posteriormente, se diseñó fue el soporte que sujeta el ventilador, que va atornillada.

Por último, se diseñó el ancla móvil donde se va a unir los otros extremos de los muelles y la cuerda de los dedales. Como se puede ver en la figura 56, esta plataforma tiene un asa en su parte superior donde van unidos los muelles de SMA mediante bridas. En su parte inferior, se ha hecho un agujero para poder fijar la cuerda. Además, también se han hecho unas cavidades para alojar esta plataforma la estructura.

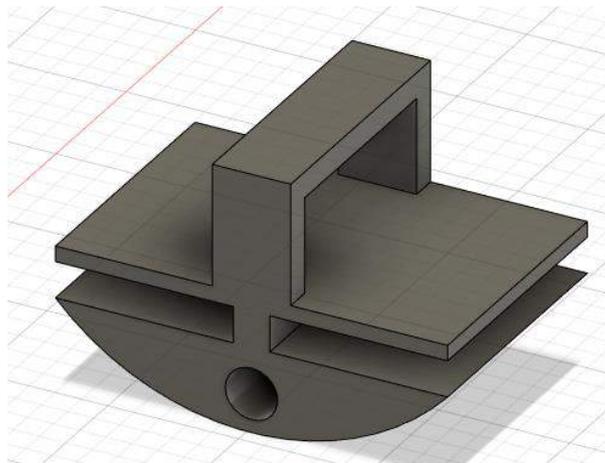


Figura 56: Modelo 3D del ancla móvil del prototipo II

Los resultados con este montaje fueron muy buenos, dando una respuesta bastante rápida tanto en la fase de contracción como en la de enfriamiento.

5.2.2.4. Diseño del brazalete

El diseño del brazalete es muy similar al del prototipo I. En este caso, el brazalete irá alojado en la parte superior brazo. Es un poco más grande, ya que el circuito del prototipo II ocupa más espacio. El diseño se puede ver en la figura 57.

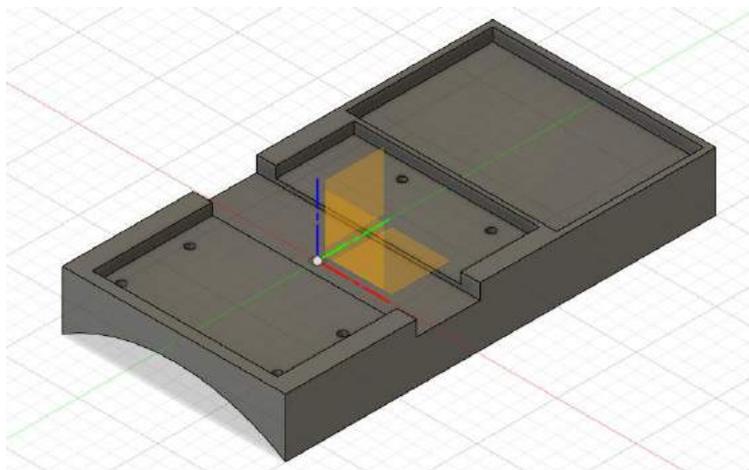


Figura 57: Modelo 3D del brazalete del prototipo II en Fusion360

6. ELECTRÓNICA DEL GUAANTE

6.1. Sistema de control

Toda la electrónica del guante va a ser controlada por un Arduino UNO. El Arduino Uno es una placa de microcontrolador de código abierto basado en el microchip ATmega328P. Se conecta al ordenador vía USB y se controla mediante el programa oficial de Arduino. En la siguiente figura 58 se muestra un esquema de la placa con todas sus conexiones y pines.

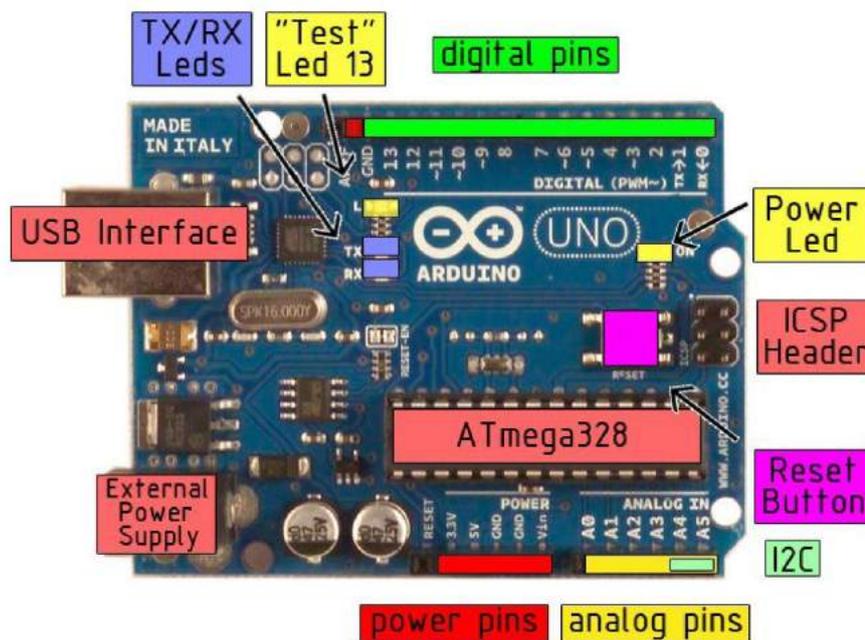


Figura 58: Esquema de conexiones de un Arduino UNO

Las especificaciones técnicas de la placa son las siguientes:

Summary	
Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Clock Speed	16 MHz

Figura 59: Especificaciones técnicas Arduino UNO

6.2. Circuitería

Tanto para el manejo del prototipo I como del prototipo II, es necesario realizar un circuito de conmutación que sea capaz de suministrar suficiente potencia, ya que la tensión máxima que puede suministrar el Arduino UNO es de 5V (sin fuente externa) y la intensidad máxima admisible es de 40 mA.

El principio de funcionamiento de este circuito es conmutar un transistor MOSFET entre su estado de corte y saturación para crear un ciclo de trabajo que permita elevar la potencia que se suministra a los actuadores. Básicamente lo que se está haciendo es utilizar el MOSFET como un interruptor controlado por tensión y se va a apagar y encender el circuito a una frecuencia muy alta para regular la intensidad que se quiere ofrecer.

El MOSFET escogido para esta aplicación ha sido el IRF530N de canal N. Sus principales características se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3: Características principales IRF530N

V_{DS}	Drain-to-Source Breakdown Voltage	100 V
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	90 m Ω
I_D	Continuous Drain Current, $V_{GS} = 10V$	17 A
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2-4 V
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	9.2 ns
t_r	Rise Time	22 ns
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	35 ns
t_f	Fall Time	35 ns
P_D	Power Dissipation	70 W

También se muestran la curva características del transistor:

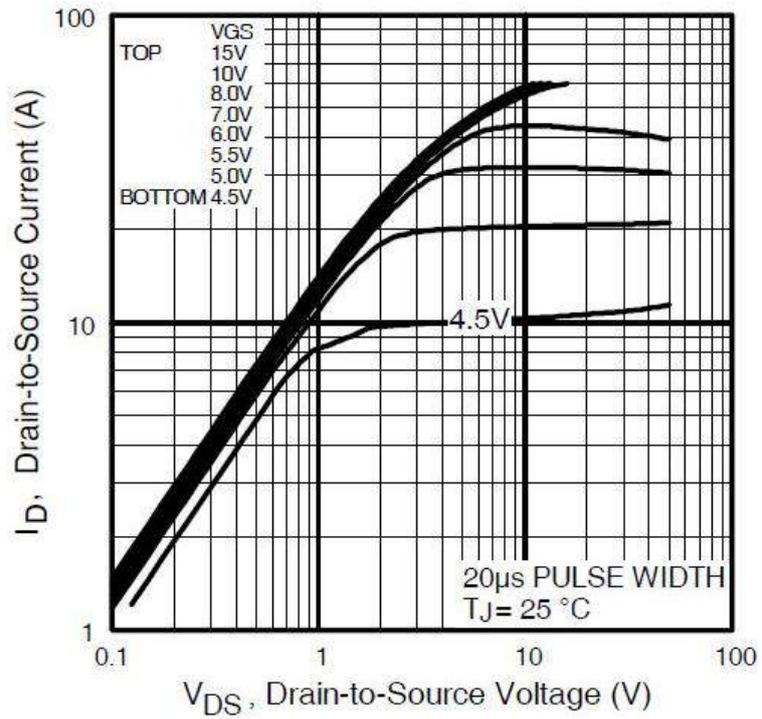


Figura 60: Curva característica $V_{DS} - I_D$

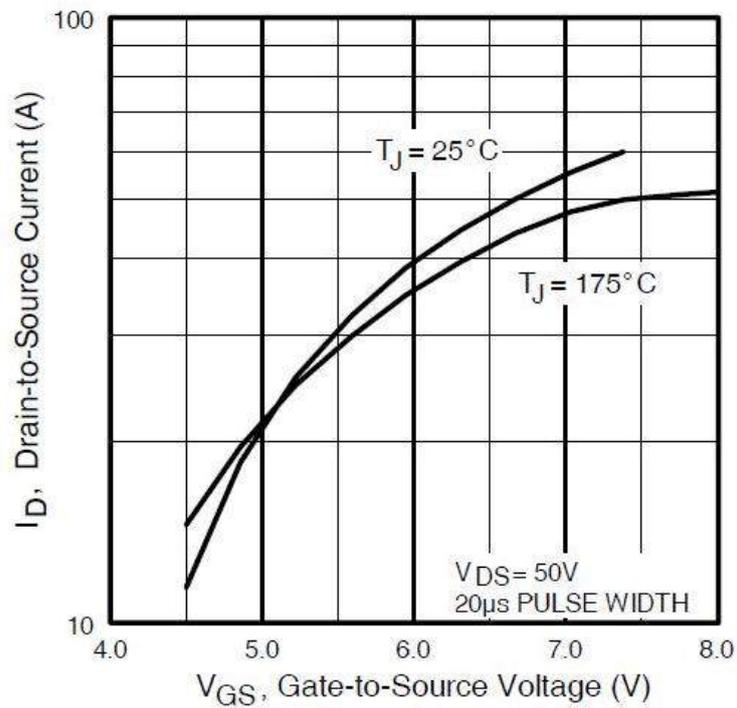


Figura 61: Curva característica $V_{GS} - I_D$

Los transistores MOSFET tienen tres zonas de operación [37]:

- Corte: en este modo el transistor se comporta como un circuito abierto.
- Óhmica: en esta zona el transistor se comporta como una resistencia controlada por voltaje.
- Saturación: en este modo el transistor se comporta como una fuente de corriente controlada por voltaje.

Para conmutar el transistor, se va a actuar directamente sobre la tensión V_{GS} .

El Arduino suministra un valor típico de tensión de 5V. Si se toma este valor como V_{GS} , se superará la tensión umbral V_{TH} (entre 2 V y 4 V) y el transistor dejará de estar al corte y empezará a conducir. Yéndose a la curva característica que relaciona V_{GS} con I_D , se observa que para $V_{GS} = 5$ V, la corriente drenador-fuente I_D tendrá un valor de unos 11 A aproximadamente.

El esquema del circuito es el siguiente:

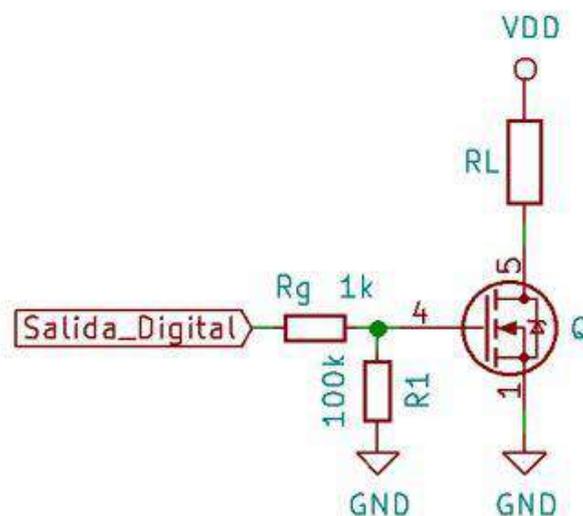


Figura 62: Esquema del circuito de conmutación [37]

La puerta del transistor irá conectada a un PIN digital con PWM del Arduino. Este pin generará una señal PWM que irá conmutando el MOSFET con el principio de funcionamiento que se ha comentado anteriormente. Las dos resistencias empleadas en el montaje son necesarias para el correcto funcionamiento del circuito y cumplen funciones diferentes.

La resistencia R_g se utiliza para ofrecer una protección adicional al Arduino. Limita la corriente que demanda la puerta del MOSFET y por tanto disminuye el consumo del Arduino.

La resistencia R_1 conecta a tierra (GND) el terminal de la puerta del MOSFET para que cuando esté en un estado indeterminado no se produzca ningún comportamiento errático. [38]

6.2.2. Circuitería prototipo II

Como se ha dicho en capítulos anteriores, se va a pasar una corriente eléctrica por los muelles de SMA para calentarlos y que recuperen su forma.

La corriente que se necesita para activar los muelles es variable, en función de lo rápida que se quiere que sea la respuesta del actuador. El manejo por software de estos dispositivos se verá en el siguiente capítulo.

Para alimentar el circuito se va a utilizar una fuente externa de 12 V y 3 A. Para manejar correctamente estos niveles de tensión e intensidad, se va a implementar el circuito de conmutación descrito en el apartado 6.2.

En este caso, al tener 2 muelles de SMA habrá 2 transistores MOSFET gobernando el control de cada uno de ellos. Se conectará a la puerta de cada MOSFET un pin PWM para manejar la magnitud de intensidad que se quiere suministrar. De esta forma, el MOSFET que controla la SMA normal irá asociado al pin 11 mientras que el que controla la SMA antagonista irá asociado al pin 3. Además, para que los MOSFET no se sobrecalienten, se ha tenido que poner unos disipadores.

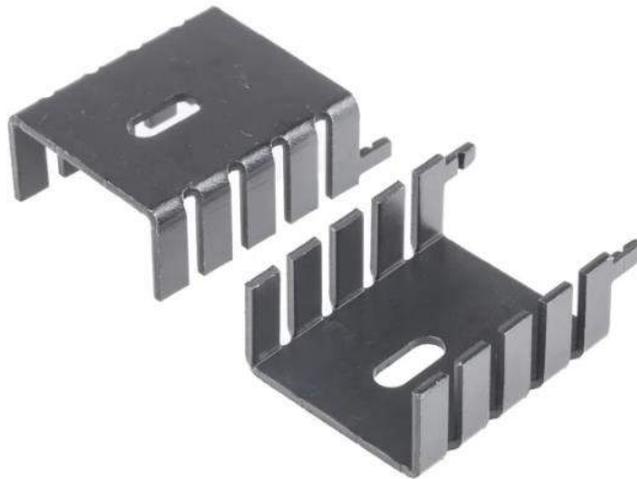


Figura 64: Disipadores MOSFET

Por otro lado, el ventilador que se encarga de refrigerar la SMA funciona con una tensión de alimentación 12 V. Para controlar el apagado y encendido del dispositivo por software se va a regular de nuevo con el mismo circuito de conmutación que en los casos anteriores. La única diferencia es que en este caso el MOSFET irá asociado a un pin digital sin PWM.

El esquemático general de este prototipo queda de la siguiente manera:

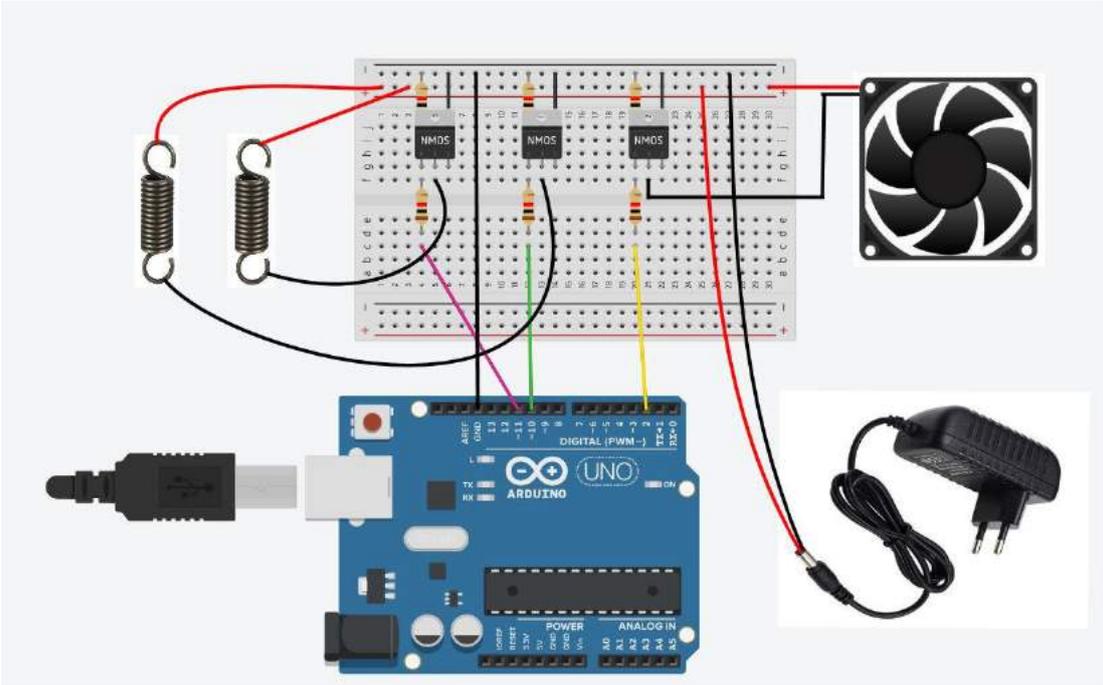


Figura 65: Esquemático general del prototipo II

7. FABRICACIÓN Y MONTAJE

Para fabricar todas las piezas mostradas anteriormente se ha utilizado una impresora 3D de tipo FDM. En concreto, se ha utilizado el modelo de extrusión directa Artillery Genius.



Figura 66: Artillery Genius

El filamento utilizado para la fabricación de las piezas está hecho de un tipo de plástico denominado ácido poliláctico o PLA. El PLA se caracteriza por su fácil impresión, su precio (más barato que otros materiales) y unas propiedades mecánicas que serán suficientes para el uso que se le va a dar en este proyecto. En este caso, se ha escogido un filamento de la marca i3D Tested de color negro y 1,75 mm de diámetro, que es el diámetro compatible con la Artillery Genius.

Una vez escogido el filamento, lo primero que hay que hacer es una torre de temperatura para saber cuál es la temperatura óptima a la que imprime el material. El fabricante suele dar un rango de temperaturas (en este caso 190°C – 220°C) en el que se puede trabajar, pero esta torre permite ver a qué temperatura concreta se fabrica mejor la pieza. Para ello, hay que fijarse en que el extrusor haga bien las retracciones de material y no queden hilos, en los voladizos, el acabado, etc.

El resultado de la torre de temperaturas obtenida (véase la figura 67) refleja que la temperatura óptima de impresión será de 190°C-205°C. Se escoge finalmente 195°C como temperatura de impresión.

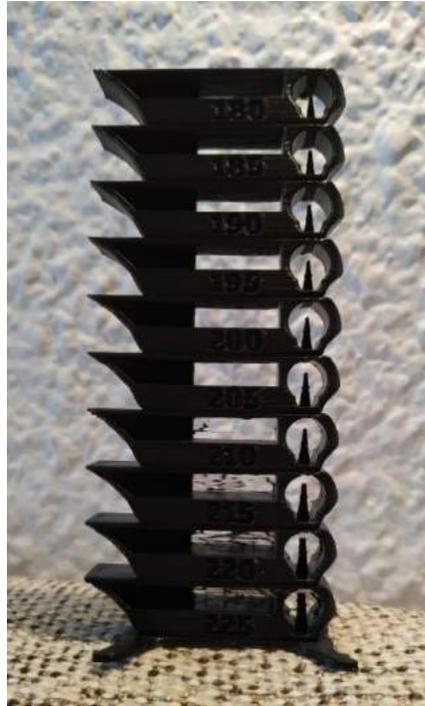


Figura 67: Torre de temperaturas PLA

Para la cama de impresión se va a escoger una temperatura de 60°C, ya que esto ayude a que la primera capa quede bien pegada y no surjan problemas de *warping* (despegue de la pieza).

Por último, antes de empezar a imprimir piezas, es necesario realizar algunas calibraciones para que las impresiones salgan lo mejor posible. Para ello, se hizo un test de retracciones (para evitar que queden hilos en los desplazamientos de la boquilla), un test de flujo (para ajustar las tolerancias de las piezas) y un test de vibraciones (para ver que toda la mecánica está bien ajustada y todas las capas se superponen correctamente). Todos los problemas que se pudiesen ver reflejados en estos test se solucionan o bien ajustando la máquina (tornillos sueltos, correas flojas, cama descalibrada...) o bien cambiando los parámetros de impresión en el software.

Por otro lado, para imprimir en 3D, es necesario un programa que convierta los modelos 3D (tienen que estar en formato STL) en formato gcode, que es el lenguaje que entiende la máquina. Para ello, se ha utilizado el software Ultimaker Cura. En este programa se ajustan los parámetros de impresión deseados (altura de capa, porcentaje de relleno, velocidad de impresión, temperatura, etc.). Este paso es fundamental y es lo que va a determinar, aparte de un diseño óptimo, la calidad de las piezas.

7.1. Fabricación y montaje prototipo I

7.1.1. Fabricación de piezas

Lo primero que se imprimió fueron los dedos. Los principales parámetros de impresión pueden verse en la figura 68. Las zonas que se ven en color azul son las capas auxiliares, que purgan la punta (líneas de falda) o hacen de soporte a los voladizos de la pieza.

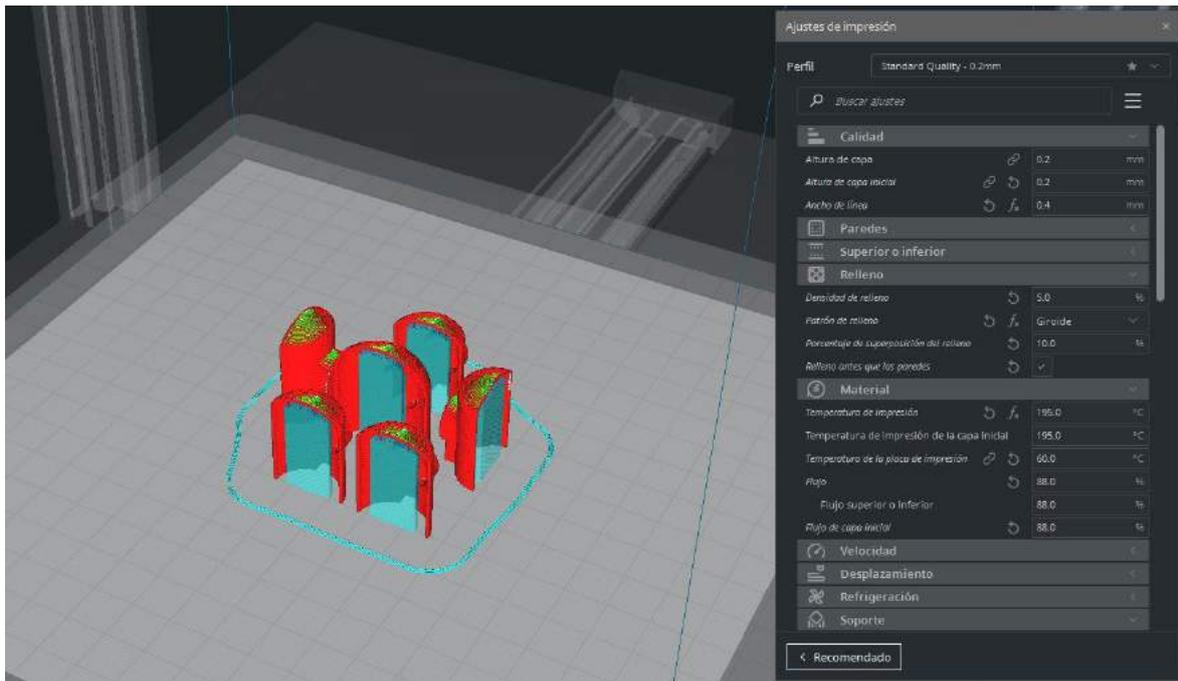


Figura 68: Impresión dedos del prototipo I en Ultimaker Cura

Una vez impresos lo único que hubo que hacer fue pegar las bandas elásticas de las que se habló en el apartado de diseño. Para ello se utilizó cola de contacto.

Posteriormente, se imprimió el brazaletes, con los mismos parámetros de impresión, excepto que se añadió algo más de relleno para que tuviese consistencia y se puso un valor negativo de expansión horizontal para que todo cupiese correctamente.

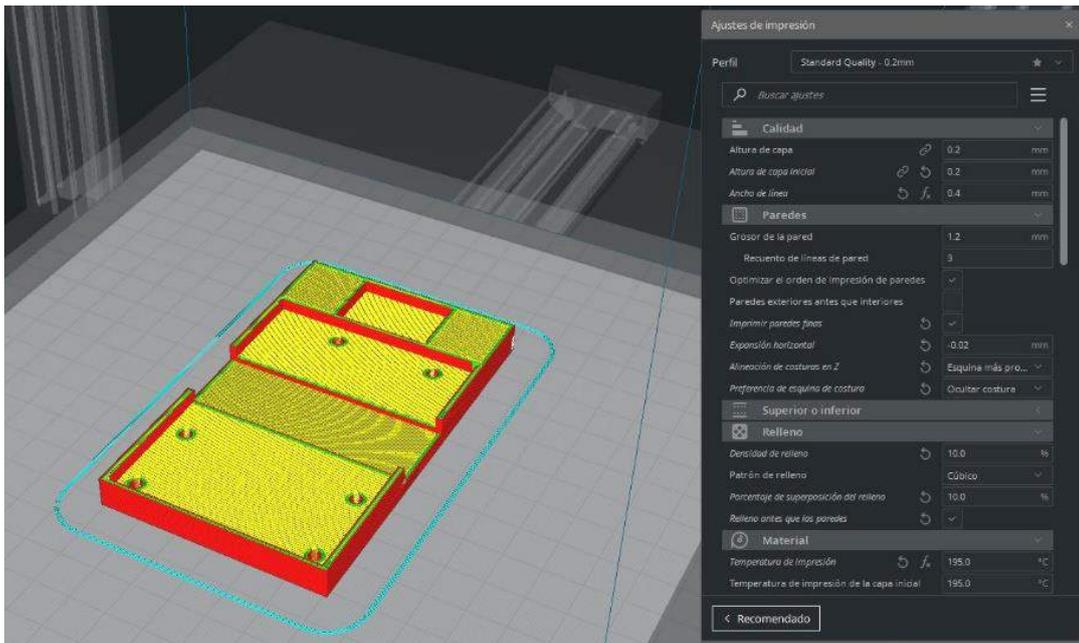


Figura 69: Impresión del brazalete del prototipo I en Ultimaker Cura

Una vez impreso, se tuvo que ensamblar los tornillos varias veces hasta hacer la forma de la rosca en los agujeros. Una vez hecho esto, se atornilló el Arduino, se puso la cinta que se ajusta al brazo y se encajó la PCB con el circuito de conmutación.

Por último, se imprimió todas las plataformas y tapas de la palma.

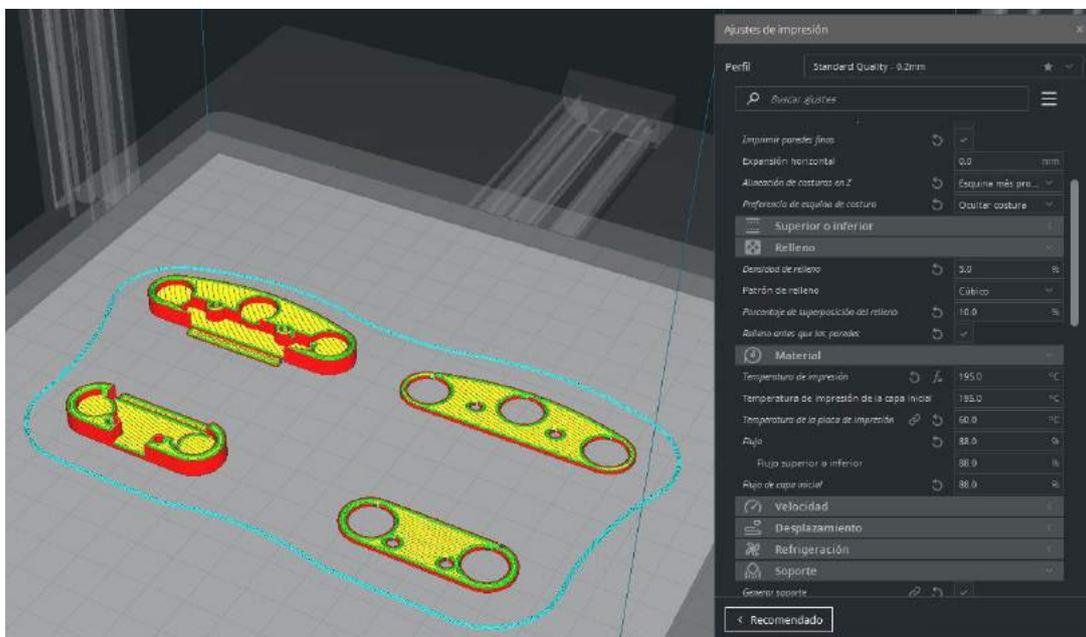


Figura 70: Impresión de la plataforma de la palma del prototipo I en Ultimaker Cura

Una vez fabricadas, se añadió el puente de tela y todas las bandas elásticas, bien pegadas con cola de contacto, o bien cosidas. También se hizo la rosca en los agujeros de la misma manera que en el brazalete.

7.1.2. Montaje electrónico

En primer lugar, se soldaron los cables de los motores que iban alojados en los dedos para darles una mayor extensión. Para ello se utilizó un soldador de estaño y tubos termorretráctiles para cubrir la soldadura. Además, todos los cables que iban a tierra se soldaron entre sí. En los extremos de los cables, soldó también unos terminales Dupont macho, para acoplarlos a la placa con mayor facilidad. Una vez se hizo esto, se pegaron los motores a los dedos con el adhesivo que llevan por detrás.

Posteriormente, se realizó el cableado de la palma. Se cortó una PCB con una herramienta Dremel y se soldaron todos los cables de los motores entre sí para que estuviesen en paralelo y pudiesen controlarse con una única señal PWM. También se soldaron otros dos cables adicionales que irían a la placa de Arduino (uno al pin 11 y el otro a tierra). Por último, se incrustaron los motores y se atornillaron las tapas.



Figura 71: a) Dedales del prototipo I montados b) Plataforma de la palma montada

Por último, se cortó otro trozo de PCB y se soldó el circuito de conmutación que se vio en el apartado 6.2.. Además, esta placa se aprovechó de punto de unión de todas las tierras del sistema.

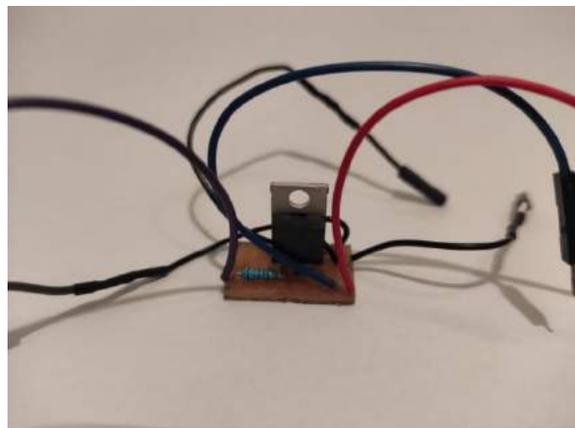


Figura 72: Circuito de conmutación del prototipo I

7.1.3. Versión final del guante

La versión final del guante es la que se muestra en la figura 73.

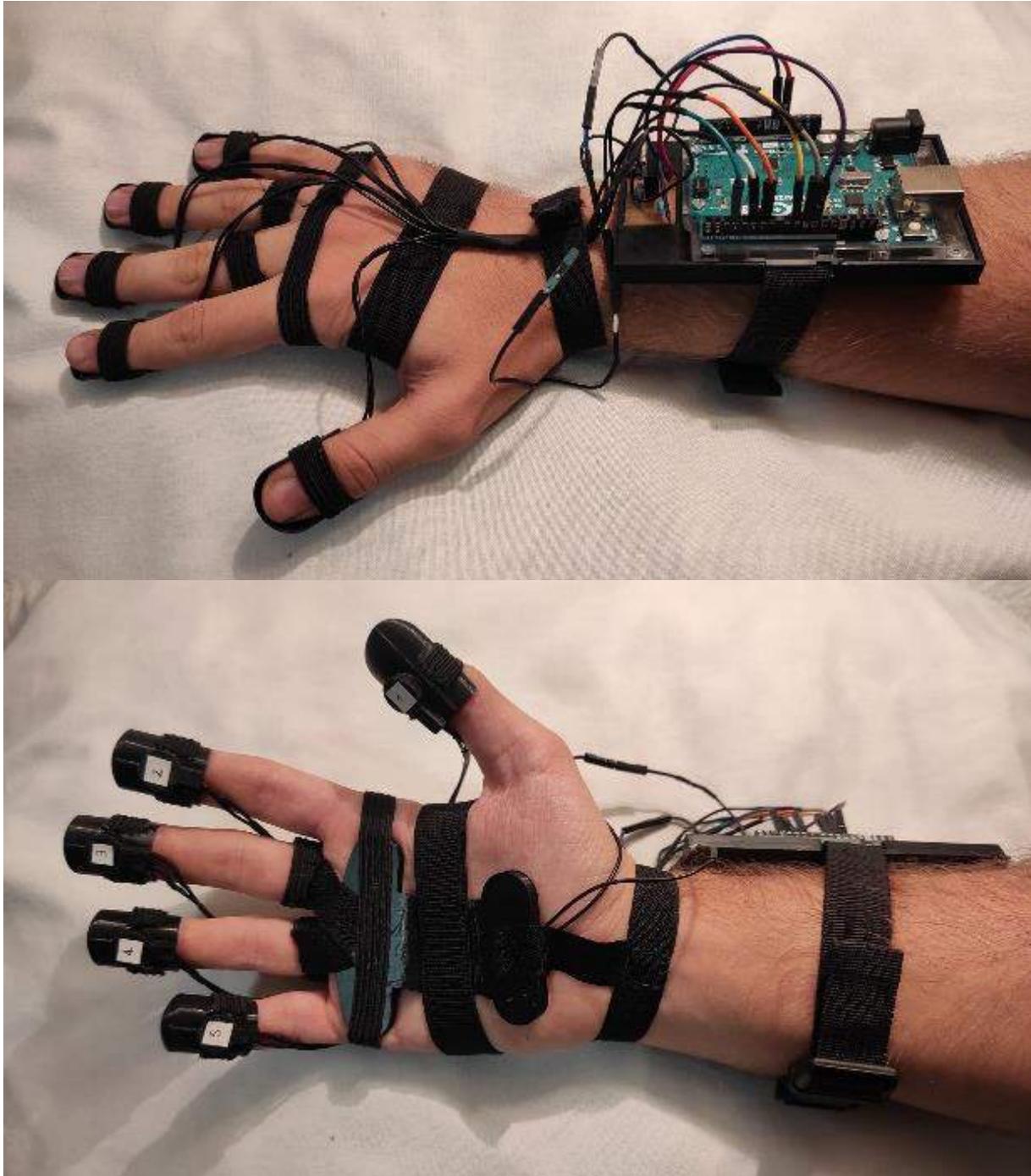


Figura 73: Versión final del prototipo I

7.2. Fabricación y montaje prototipo II

7.2.1. Fabricación de piezas

Al igual que en el prototipo I, el primer paso fue imprimir los dedales. Los parámetros de impresión son los mismos que se han utilizado para el resto de piezas, salvo porque en el parámetro “tipo de adherencia a la cama de impresión” se ha optado por la opción “balsa” en vez de la opción “falda”. La opción falda lo que hace es unas líneas al principio de la impresión para purgar la punta del extrusor mientras que la balsa realiza unas capas previas sobre las que se construirá después la pieza. Esto hace que el agarre de la pieza sea mayor y no se desprenda de la cama, ideal para imprimir piezas finas y esbeltas que son susceptibles de caerse.

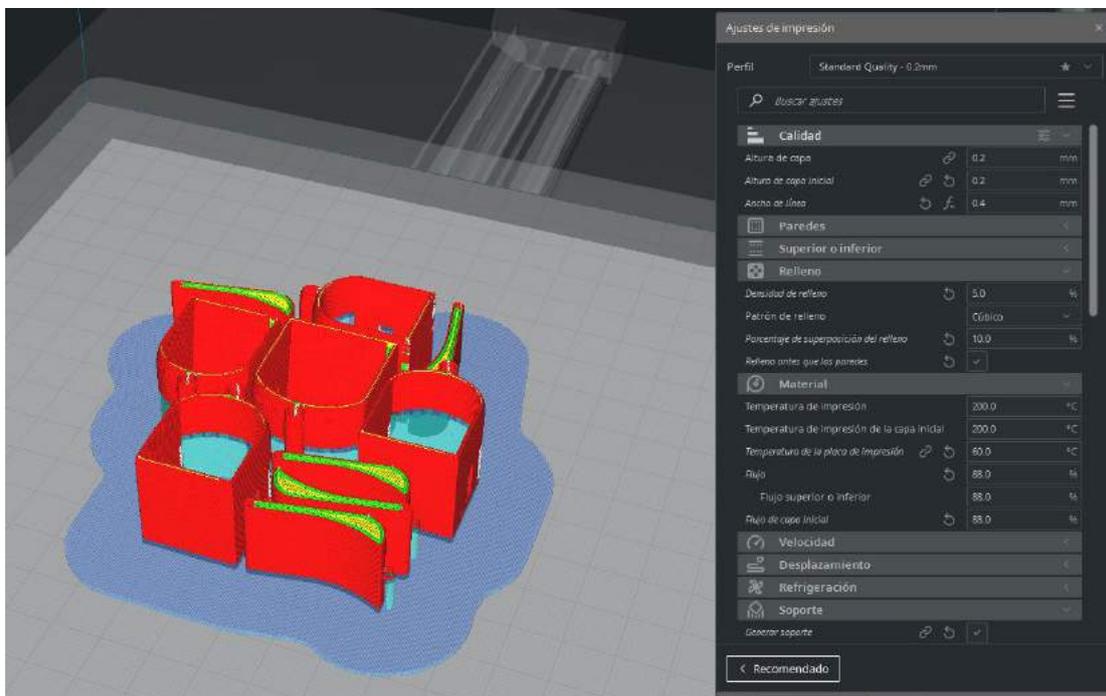


Figura 74: Impresión de dedales del prototipo II en Ultimaker Cura

Una vez fabricados los dedales y sus plataformas, se procedió a su montaje. Para anclar las plataformas a los dedales, se optó por pasar un alfiler de costura y se doblaron las puntas para que no se saliese. Posteriormente, se metieron las bandas elásticas por los huecos diseñados para ello y se cosieron. Por último, se enganchó la cuerda de nylon a la plataforma con un nudo. El resultado se muestra en la figura 75.



Figura 75: Dedal prototipo II

Para guiar la cuerda hasta la estructura donde están dispuestos los muelles de SMA, se utilizó un guante de trabajo convencional y se le pegaron unos tubos de plástico mediante una pistola de silicona caliente por donde iría la cuerda. Seguidamente se aunaron todas las cuerdas de los dedos en un enganche metálico a la altura de la muñeca.

Una vez acabada toda la parte de la mano, se procedió a imprimir la estructura donde iban a ir alojados los muelles de SMA y los ventiladores. Se imprimieron todas las piezas con los mismos parámetros de las impresiones anteriores.

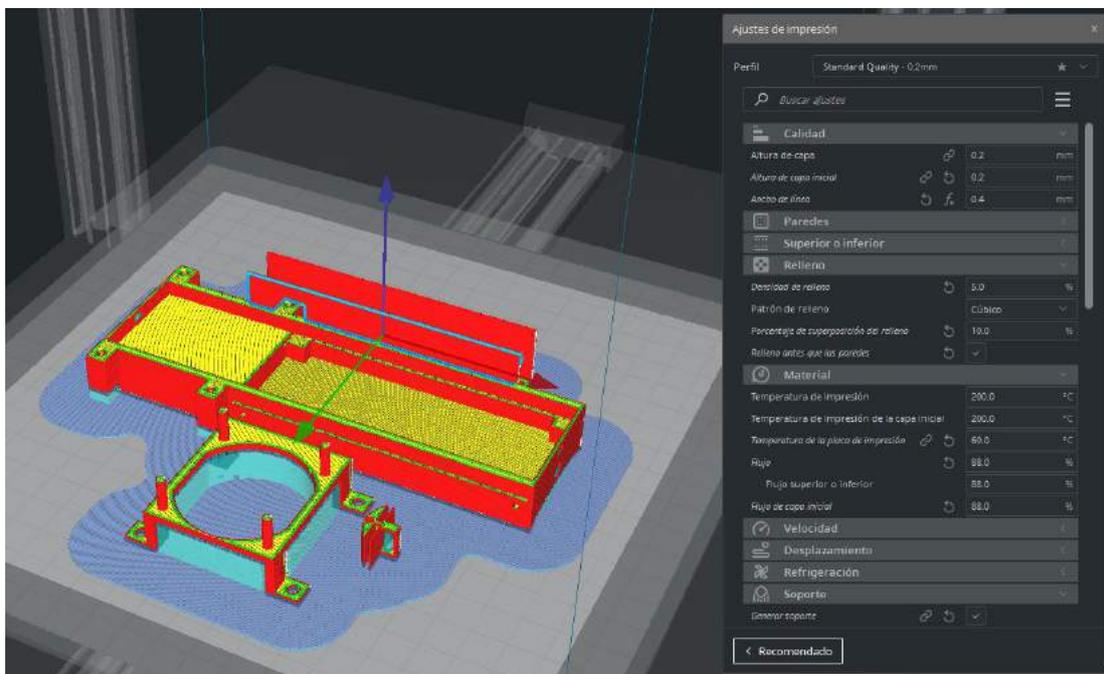


Figura 76: Impresión de la estructura de control del SMA en Ultimaker Cura

Posteriormente, se ensamblaron con tornillos M2 de 5 mm de largo. Seguidamente, se unió una cuerda pro un extremo al ancla móvil y por otro al enganche metálico donde estaban las cuerdas de los dedos. Por último, se engancharon los muelles con unas bridas de 2.5 mm

de grosor y se pegaron unas tiras de velcro para sujetar el soporte al brazo. El resultado se muestra en la figura 77.

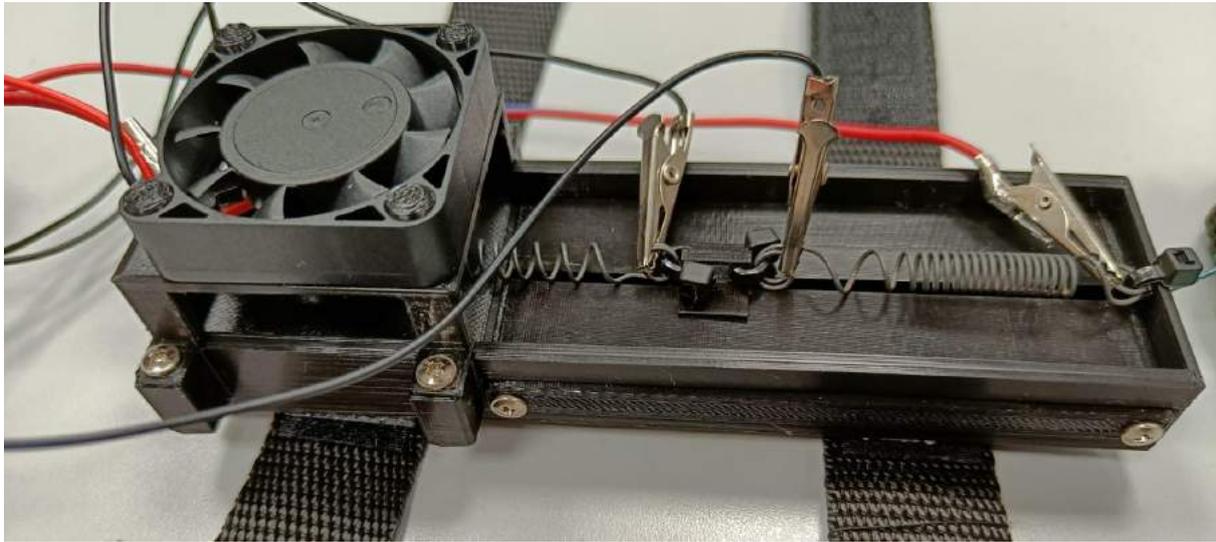


Figura 77: Estructura de control de SMA del prototipo II

Finalmente, se imprimió el brazaletes y se montó siguiendo la misma filosofía que el brazaletes del prototipo I.

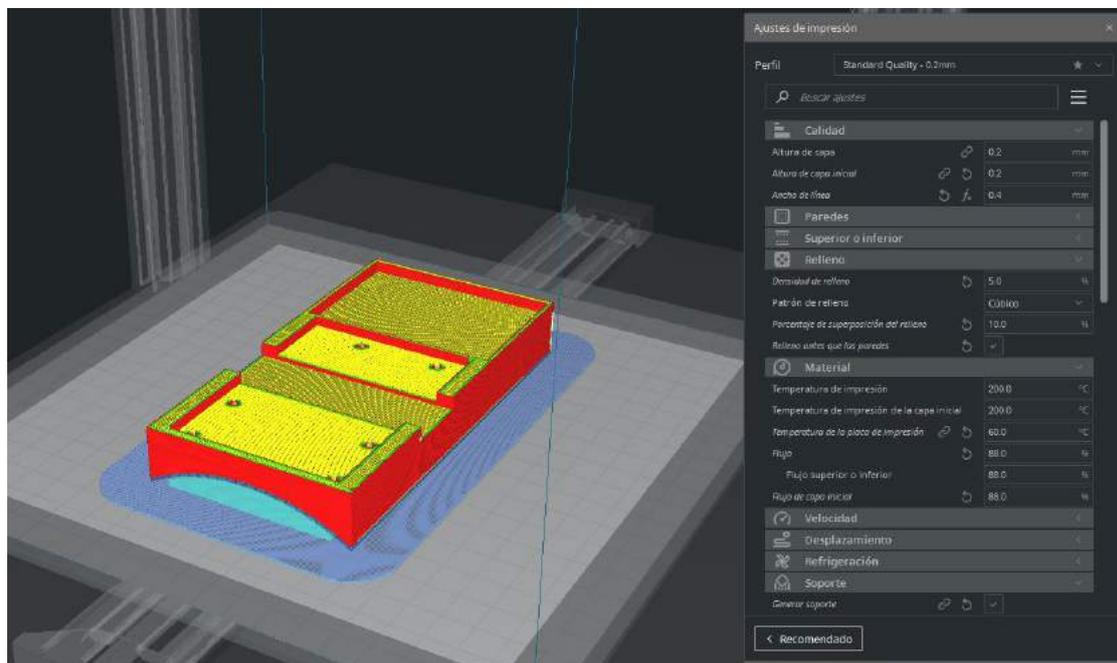


Figura 78: Impresión del brazaletes del prototipo II en Ultimaker Cura

7.2.2. Montaje electrónico

En primer lugar, se soldó todo el circuito visto en el apartado 6.2.1. en una PCB. Para conectar los muelles, la fuente y el ventilador, se utilizaron unas clemas de 2 puertos para que los cables no se soltasen durante los experimentos. También se atornillaron los disipadores a los MOSFET que controlan los muelles de SMA.

Por otro lado, se soldaron unas pinzas de cocodrilo a los cables que conectaban los muelles de SMA para que no se desconectase nada durante el movimiento de estos.

Por último, se soldó un interruptor en la fuente para controlar de manera sencilla el encendido y apagado de la alimentación del guante.

El resultado se muestra en la figura 79.

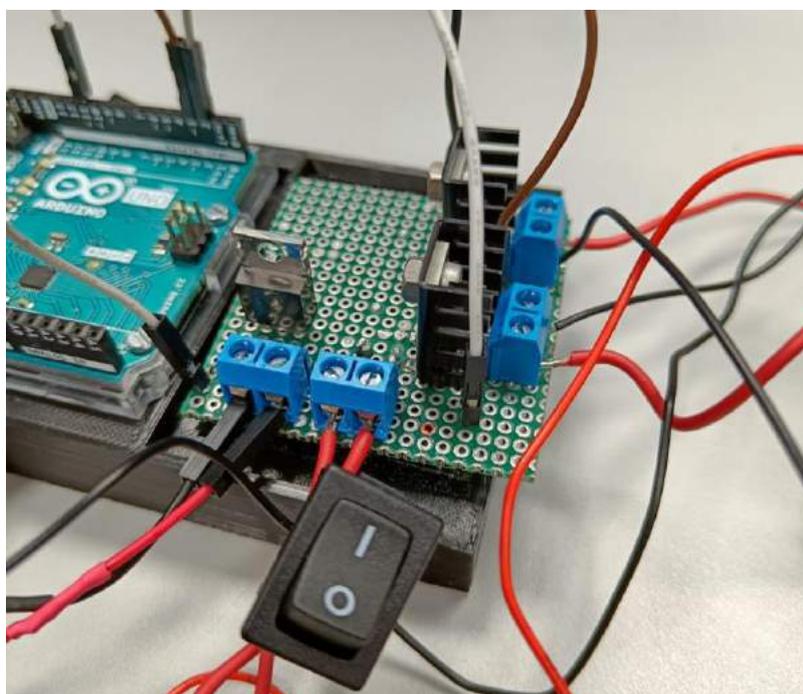


Figura 79: Circuito del prototipo II

7.2.3. Versión final del prototipo II

La versión final del prototipo II se muestra en la figura 80.

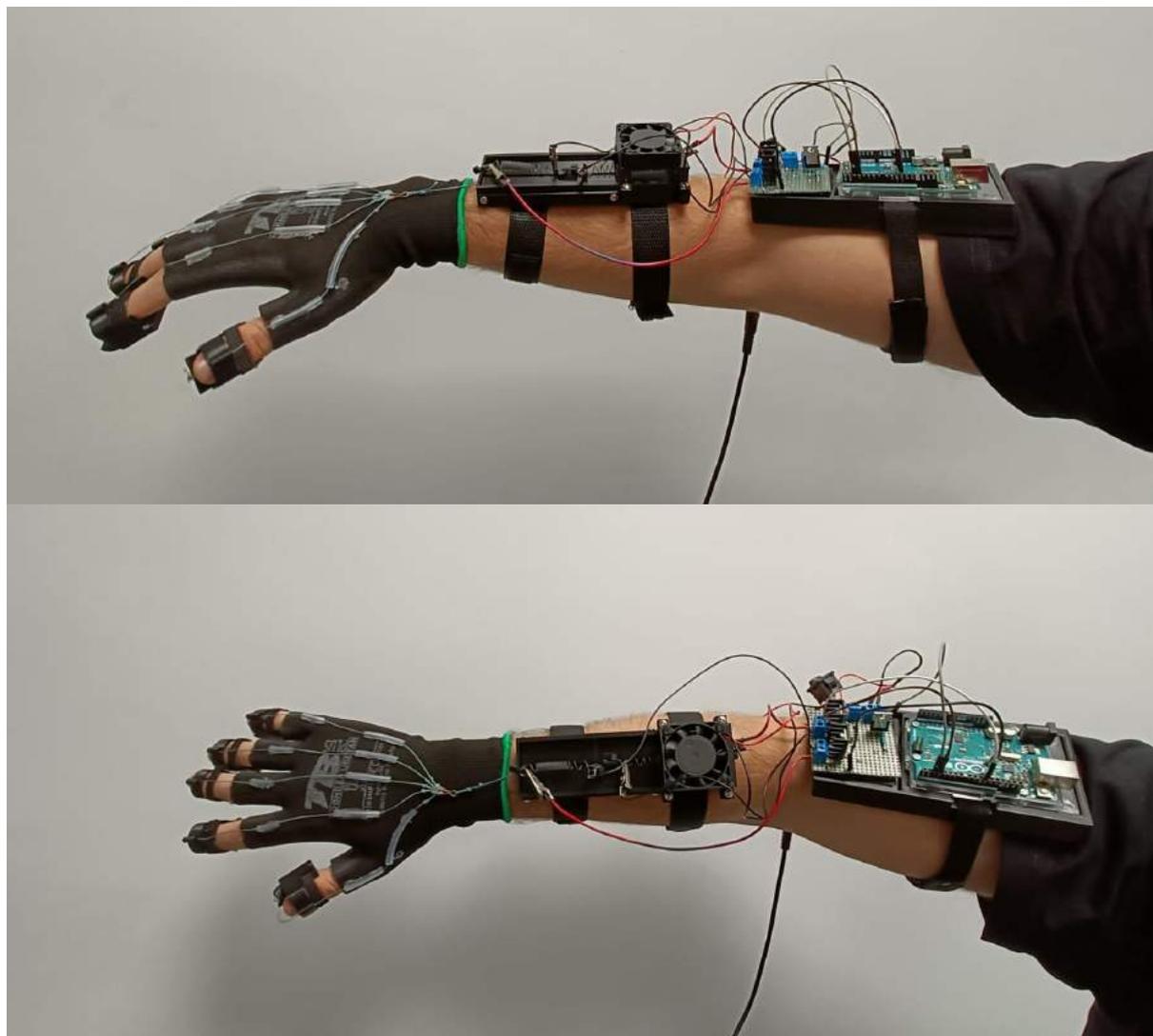


Figura 80: Versión final del prototipo II

8. CONTROL Y CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL

En este apartado se va a ver cómo se han controlado los guantes y qué experimentos se han realizado para probar su funcionamiento.

8.1. Sistema de control

Para el control de los dispositivos, se ha utilizado el software de Arduino.

El control del prototipo I es muy sencillo. Se construyó un programa en el que, a través del puerto serie de Arduino, se enviaban dos valores por teclado: el primero era el valor que se iba a dar a los motores de los dedos y el segundo era el valor que se iba a dar a los motores de la palma. También se construyó otro programa que permitía activar y desactivar los dedos por separado.

El control del prototipo II es algo más complejo. Para regular la activación y desactivación de los muelles de SMA y el ventilador, se construyó el siguiente diagrama de estados:

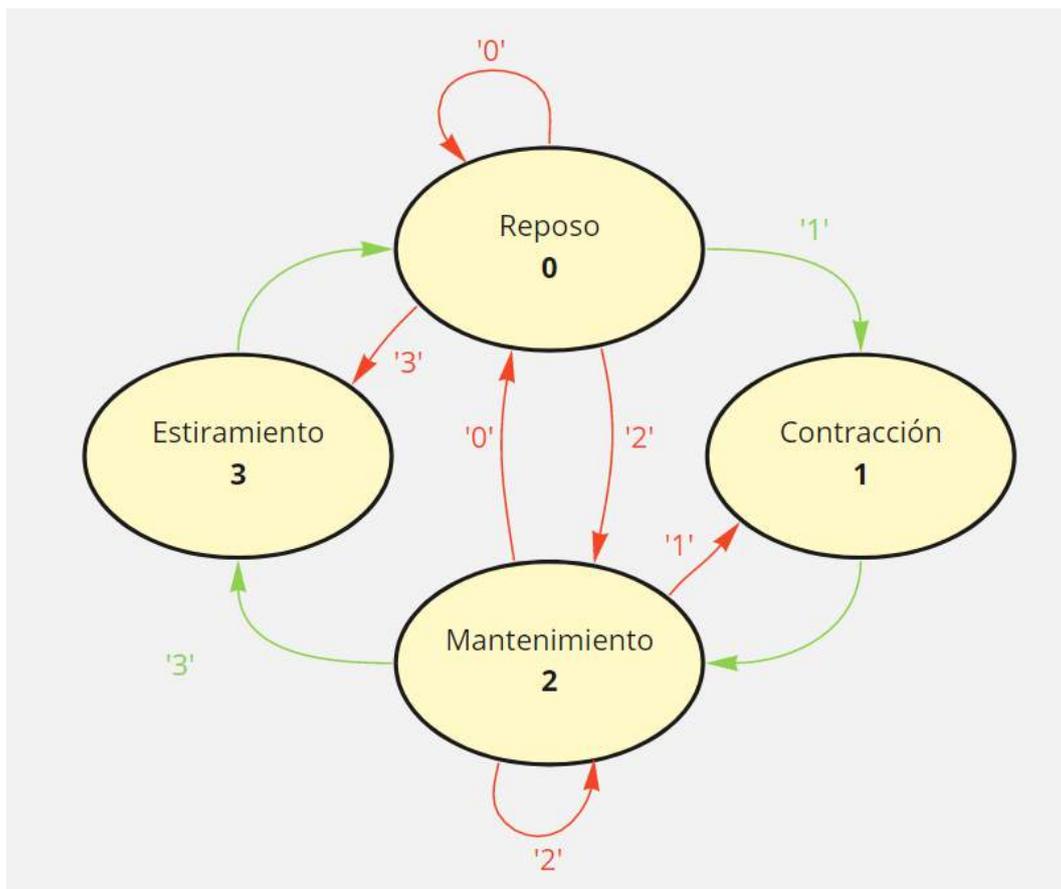


Figura 81: Máquina de estados del sistema de control del prototipo II

Las flechas en verde reflejan el flujo normal del programa. Las flechas en rojo muestran otras vías alternativas.

Dentro de los estados, estaban las siguientes funciones:

- `contraer(pin)`: Esta función recibe por argumento el pin al que se quiere enviar la señal, bien el pin al que está conectada la SMA convencional o bien al que está conectada la SMA antagonista. Para realizar la contracción, se envía una señal PWM variable. Los valores fueron elegidos en base a pruebas experimentales, escogiendo los valores que más rápido contraían los muelles, pero sin dar una corriente excesiva. Así, se envía un PWM inicialmente del 100% durante 5 segundos, después del 80% durante 4 segundos, y finalmente del 50% durante 4 segundos.
- `mantener()`: Esta función envía una señal PWM intermitente al pin conectado a la SMA convencional. Se envía una señal del 10% durante un segundo y luego se desactiva otro segundo. Esto se hace para mantener la SMA convencional caliente una vez se ha contraído del todo.
- `estirar()`: Esta función alberga la función `contraer()` antes descrita para contraer la SMA antagonista y estirar así la SMA convencional. Al mismo tiempo, activa la señal del ventilador.

De esta forma, en el estado 0 de reposo se desactivan todas las señales. En el estado 1, se encuentra la función `contraer()` asociada al pin del SMA convencional. Cuando cesa esta contracción, se pasa automáticamente al estado 2, en el que la función `mantener()` conserva la SMA convencional contraída. En el estado 3, se encuentra la función `estirar()`. Cuando cesa este proceso, se pasa automáticamente al estado 0 de reposo.

El diagrama de estados se ha construido con una sentencia `switch`. Las órdenes se envían a través del puerto serie de Arduino, de manera que poniendo el número del estado correspondiente se pasa ese estado. De manera práctica, lo que se hace es enviar un '1' si se quiere dar sensación de tacto y un '3' cuando se quiere que la sensación de tacto cese.

8.2. Caracterización experimental

Para evaluar los prototipos y poder compararlos, se van a realizar una serie de experimentos.

Las pruebas sin RV se han hecho con los códigos de Arduino descritos anteriormente.

Las pruebas con RV se han hecho a través del software Unity. Este software se ha conectado con Arduino por puerto serie. Los códigos se han adaptado para que el guante pueda responder a las acciones del usuario en la simulación. Las gafas que se han utilizado han sido las HTC Vive. Además, se ha integrado en las gafas el dispositivo Leap Motion, un sensor que es capaz de detectar los movimientos de la mano y los dedos.



Figura 82: Experimentos con RV

Para realizar las pruebas de RV, se han construido tres escenarios distintos para simular tres tipos de objetos distintos: objetos macizos, objetos huecos y teclas. Estos escenarios han sido los siguientes:

- El primer escenario (*box*) consiste en una caja que tiene unos huecos con formas geométricas. A los lados de la caja, se encuentran unas piezas que tienen las mismas formas geométricas que los huecos. El objetivo de esta simulación es que el usuario vaya cogiendo las piezas y las vaya metiendo en sus huecos correspondientes.
- El segundo escenario (*donuts*) consiste en unos objetos con forma toroidal. El objetivo de esta simulación es ir apilando los donuts en un objeto con forma de cilindro.
- El tercer escenario (teclado) es un teclado en el que el usuario va pulsando teclas y escribiendo lo que quiera.

Para la caracterización experimental, se decide realizar un ensayo con 12 personas. El experimento consistía en lo siguiente.

1. En primer lugar, se realizaría una prueba sin RV con prototipo I. Esta prueba consistía en una primera fase de calibración en la que el usuario ajustaba el nivel de vibración entre la palma y los dedos hasta que fuese lo más equilibrado posible. En una segunda fase, se le daría al usuario unos objetos (una pelota de tenis y un toroide de plástico) para que lo agarrase con la otra mano. Mientras, se le indicaría que pusiese lentamente la mano del guante de la misma forma mientras se le suministra vibración en el momento adecuado.

2. En segundo lugar, se realizaría la experiencia con realidad virtual sin el guante. Esta experiencia consiste en hacer los escenarios descritos anteriormente. Esto tenía dos propósitos: el primero de ellos era para que el usuario pudiera comparar como había sido la experiencia con y sin guante, y el segundo era para que entrenar al usuario y que le resultase más familiar la interfaz cuando tuviese que hacerlo con el guante puesto.
3. En tercer lugar, se realizaría la misma prueba con RV, pero con el guante puesto.
4. En cuarto lugar, se le pondría al usuario el prototipo II y se le realizaría una prueba sin realidad virtual. En algunos casos, a algunos voluntarios se decidiría realizarles una prueba adicional en la que tendrían puesta la plataforma de la palma del prototipo I junto con el prototipo II.

La prueba de realidad virtual con el prototipo II no ha sido posible. El principal inconveniente es que el Leap Motion no es infalible y a veces tiene problemas para detectar bien la mano. En el prototipo I esto se traduce en que a veces vibra o deja de vibrar cuando no tiene que hacerlo. Sin embargo, en el prototipo II un fallo de este tipo empeoraría significativamente la experiencia, ya que a la SMA le llegarían mensajes contradictorios y su respuesta más lenta hace que no sea capaz de procesarlos todos y acabaría dando una respuesta errónea.

Por último, se realizaría una encuesta en la que se evaluaría la experiencia.

La encuesta realizada constaba de 27 preguntas:

- 3 preguntas iniciales en las que se preguntaba la edad, la experiencia previa con dispositivos hápticos y la experiencia previa con entornos de realidad virtual.
- 6 preguntas relativas al prototipo I y 4 preguntas relativas al prototipo II en las que se evaluaba la facilidad de ponerse el guante, la comodidad, la adaptabilidad y la sensación háptica. En el caso del prototipo I había 2 preguntas adicionales acerca de la experiencia con la realidad virtual.
- 5 preguntas de comparación entre ambos prototipos.
- 9 preguntas acerca de la experiencia general de toda la prueba.

9. RESULTADOS

En las tablas 4 y 5 se muestran la media de resultados de las preguntas del prototipo I y II. En la tabla 6 se muestra el resultado de las preguntas comparativas entre ambos dispositivos.

Tabla 4: Resultados medios de las preguntas del prototipo I

Pregunta	Media de los resultados
¿ El prototipo I es fácil de poner?	7,92
¿El prototipo I es cómodo de llevar?	7,5
¿El prototipo I se adapta bien a tu mano?	7,5
¿El prototipo I da una buena sensación háptica?	7,75

Tabla 5: Resultados medios de las preguntas del prototipo II

Pregunta	Media de los resultados
¿ El prototipo II es fácil de poner?	6,58
¿El prototipo II es cómodo de llevar?	6,83
¿El prototipo II se adapta bien a tu mano?	8,5
¿El prototipo II da una buena sensación háptica?	8,67

Tabla 6: Resultados de las preguntas comparativas entre ambos prototipos

Pregunta	Prototipo I	Prototipo II
¿ Qué prototipo es más fácil de poner?	75,0%	25,0%
¿ Qué prototipo es más cómodo de llevar?	66,7%	33,3%
¿ Qué prototipo se adapta mejor a tu mano?	41,7%	58,3%
¿ Qué prototipo da una mejor sensación sin RV?	16,7%	83,3%
¿ Qué prototipo funciona mejor globalmente?	50,0%	50,0%

De estos valores se puede establecer las siguientes conclusiones:

- El prototipo I es más fácil de poner que el prototipo II. Los resultados de esta pregunta han salido un 75% a favor del prototipo I frente a un 25% a favor del prototipo II. Esto es algo esperable, ya que el prototipo II tiene 3 piezas y ocupa prácticamente el brazo entero.
- El prototipo I es más cómodo de llevar que el prototipo II. Los resultados de esta pregunta han salido un 66.7% a favor del prototipo I frente a un 33.3% a favor del prototipo II. De nuevo, estos resultados son esperables, pues el prototipo II tiene la desventaja de ser más pesado y voluminoso que el prototipo I.
- El prototipo II es algo más adaptable a la mano que el prototipo I. En esta pregunta, ha habido bastante división de ideas (un 58.3% a favor del prototipo II frente a un

- 41.7% a favor del prototipo I). Esto puede deberse a que cada mano es diferente y en función de su tamaño y su forma se adapta mejor un guante que otro.
- El prototipo II da una mejor sensación háptica sin RV. Los resultados han sido muy favorables al prototipo II (83.3% frente a 16.7%). Este resultado también es esperable en cierta medida.
 - En la pregunta acerca del funcionamiento global ha habido división de opiniones (50% para cada guante). Este resultado es bastante sorprendente, ya que antes de realizar la encuesta se pensaba que los voluntarios iban a elegir el prototipo I, ya que es más cómodo y ligero, tiene una respuesta más instantánea y tiene la posibilidad de usarse con RV.
 - La experiencia mejora cuando se combina la plataforma de la palma del prototipo I con el prototipo II. Esta prueba se realizó únicamente con 2 usuarios y ambos coincidieron en que da una mejor sensación.

En la prueba con RV del prototipo I, los resultados han sido buenos. Los voluntarios creen que añadir el prototipo I mejora la experiencia con realidad virtual (8.33 de puntuación media). Únicamente un voluntario no ha estado de acuerdo con esto con una puntuación de 2. Esto puede deberse a que al Leap Motion le cuesta un poco más detectar la mano con el guante puesto y es probable que a ese usuario no le detectase bien la mano en su experimento.

El escenario que mejor sensación ha dado ha sido el de los donuts (58.3% frente a un 25% del escenario box y un 16.7% del escenario del teclado).

La media de los resultados de las preguntas de la experiencia general se muestra en la tabla 7.

Tabla 7: Resultados medios de las preguntas de experiencia general

Pregunta	Media de los resultados
¿Ha sido fácil realizar los juegos propuestos?	10
Evalúa la exigencia mental	3,42
Evalúa la exigencia física	3,42
Evalúa el esfuerzo	4,25
Evalúa el rendimiento	7,33
Evalúa el nivel de frustración	3,75
La experiencia me ha parecido entretenida	9,58
He sentido cansancio en el brazo/mano	4,25
¿Cómo valorarías la experiencia global?	9,16

De estos resultados se puede establecer que a los usuarios no les ha requerido mucha exigencia realizar los ejercicios propuestos. Además, parece que la experiencia ha sido muy positiva. Ha habido un par de excepciones en las que algún voluntario ha puesto que se ha sentido frustrado realizando las pruebas, seguramente debido a que el Leap Motion

no captaba bien sus movimientos y le ha costado más realizar los juegos propuestos en la RV.

Como conclusión general se puede establecer que ambos dispositivos funcionan de manera correcta y cumplen con la mayoría de objetivos propuestos inicialmente. Ambos dispositivos son ligeros. El prototipo II se ha desviado más de los objetivos de comodidad y de ser poco voluminoso. En cuanto a la adaptabilidad, se ha visto que ambos dispositivos se adaptaban bien a manos grandes o de tamaño medio, mientras que con las manos pequeñas se han adaptado peor. Por último, ambos dispositivos devuelven una sensación táctil correcta, siendo más satisfactoria la del prototipo II.

10. LÍNEAS FUTURAS

Las líneas de mejora del prototipo I podrían ser las siguientes:

- Utilizar filamento flexible para construir la plataforma de la palma. Esto haría que el usuario se sintiese más cómodo y pudiese tener mayor libertad de movimientos con el guante puesto.
- Utilizar un microcontrolador más pequeño para que el guante sea aún más ligero. Si fuese lo suficientemente pequeño, se podría pensar en ponerlo en la mano y prescindir de esta forma del brazalete.
- Guiar los cables de los dedos para que sobresalgan lo mínimo posible y así el Leap Motion pueda captar mejor la mano en las simulaciones con realidad virtual.
- Incorporar más motores en los dedos para extender la sensación de tacto a toda la mano.
- Incorporar la percepción kinestésica para obtener una sensación háptica total.

Las líneas de mejora del prototipo II podrían ser las siguientes:

- Diseñar un circuito impreso para reducir al máximo posible su tamaño y poder ponerlo encima del microcontrolador y que de este modo ocupe menos espacio.
- Utilizar muelles de SMA TWE para que pueda memorizar dos formas y así se pueda prescindir del ventilador y de la SMA antagonista.
- Ajustar de forma más precisa las cuerdas para que todos los dedos perciban la sensación con la misma fuerza.
- Incorporar la realidad virtual en este guante.
- Incorporar la percepción kinestésica para obtener una sensación háptica total.

Otras líneas de mejora adicionales podrían ser mejorar el sistema de realidad virtual para que se detecten mejor las manos o la posibilidad de integrar ambas tecnologías en un mismo guante.

Anexo I: Presupuesto

Para hacer el estudio económico del proyecto, se han dividido los costes en dos grupos:

- Costes de mano de obra
- Costes materiales

Costes de mano de obra

Un Trabajo de Fin de Grado en la UPM tiene un peso de 12 crédito ECTS. Cada crédito ECTS equivale a 25 horas de trabajo del estudiante. Por tanto, el tiempo estimado para este proyecto es de 300 horas.

Por otro lado, el sueldo bruto anual de un Ingeniero Industrial que acaba de empezar a trabajar puede estimarse en 20450€ [39].

Concepto	Coste (€)
Sueldo anual	20450
Seguridad social (35%)	7157.5
Total	27607.5

Si esta cifra se divide entre las 1720 horas efectivas reales de trabajo de una jornada laboral anual [40], el sueldo efectivo por hora es de 16.05 €/hora. Si esto se multiplica por las horas dedicadas al proyecto, se obtiene un coste total en este apartado de 4815.26 €.

Costes materiales

En el cómputo del coste de los recursos materiales, se ha tenido en cuenta tanto los componentes que se han utilizado para construir los guantes como los recursos de hardware y software necesarios para elaborar el proyecto. De esta forma, se han dividido estos presupuestos en consumibles y amortizables respectivamente.

Costes amortizables

Se ha supuesto una amortización lineal teniendo en cuenta la vida útil estimada de los recursos utilizados. El valor residual de los productos se ha estimado en 0 €.

Se han depreciado los costes de amortización de las herramientas utilizadas para construir los guantes, así como los periféricos del ordenador. Tampoco se han añadido las licencias de software de algunos programas utilizados por ser gratuitas (Arduino, Ultimaker Cura, etc.).

Concepto	Coste (€)	Vida útil (años)	Coste amortización (€)
Ordenador	1000	10	100
Impresora 3D	220	10	22
Licencia Microsoft Office	69	1	69
Licencia Fusion360	503	1	503
Total			694

Costes consumibles

El coste de los componentes que se han utilizado para el desarrollo de este proyecto se refleja en la siguiente tabla:

Concepto	Coste (€)	Cantidad	Coste total (€)
Arduino Uno Rev 3 SMD	22.6	1	22.6
Motor de vibración	1.29	10	12.9
Muelles de SMA	4.89	2	9.78
Filamento PLA negro	20	1	20
Transistor MOSFET IRF530N	1.05	4	4.2
Ventilador 12V DC	15	1	15
Pack de cables Dupont	3.39	2	6.78
Placa de circuito impreso	2.2	2	4.4
Cable genérico	1.73	1	1.73
Guante trabajo	1.55	1	1.55
Resistencias	0.179	8	1.432
Clema 2 contactos	0.2	3	0.6
Fuente 12V 3A	13	1	13
Interruptor	1.8	1	1.8
Disipadores MOSFET	0.535	2	1.07
Tubo termorretráctil	1	1	1
Pack bridas 2.5 mm	0.89	1	0.89
Cinta elástica costura	4	1	4
Total			122.732

Coste total

Si se suman las cantidades anteriores, se obtiene un coste total del proyecto de 5632€.

Anexo II: Planificación temporal

A continuación, se muestran dos figuras. La primera hace referencia a la Estructura de Descomposición del Proyecto (EDP). La segunda representa el diagrama de Gantt del proyecto.

Estructura de descomposición del proyecto

En la EDP, se desglosan todas las tareas que se van a llevar a cabo durante la ejecución del proyecto. En este caso, se han agrupado en 5 fases: Estudios previos, Diseño, Desarrollo y montaje, Fase experimental y Memoria.

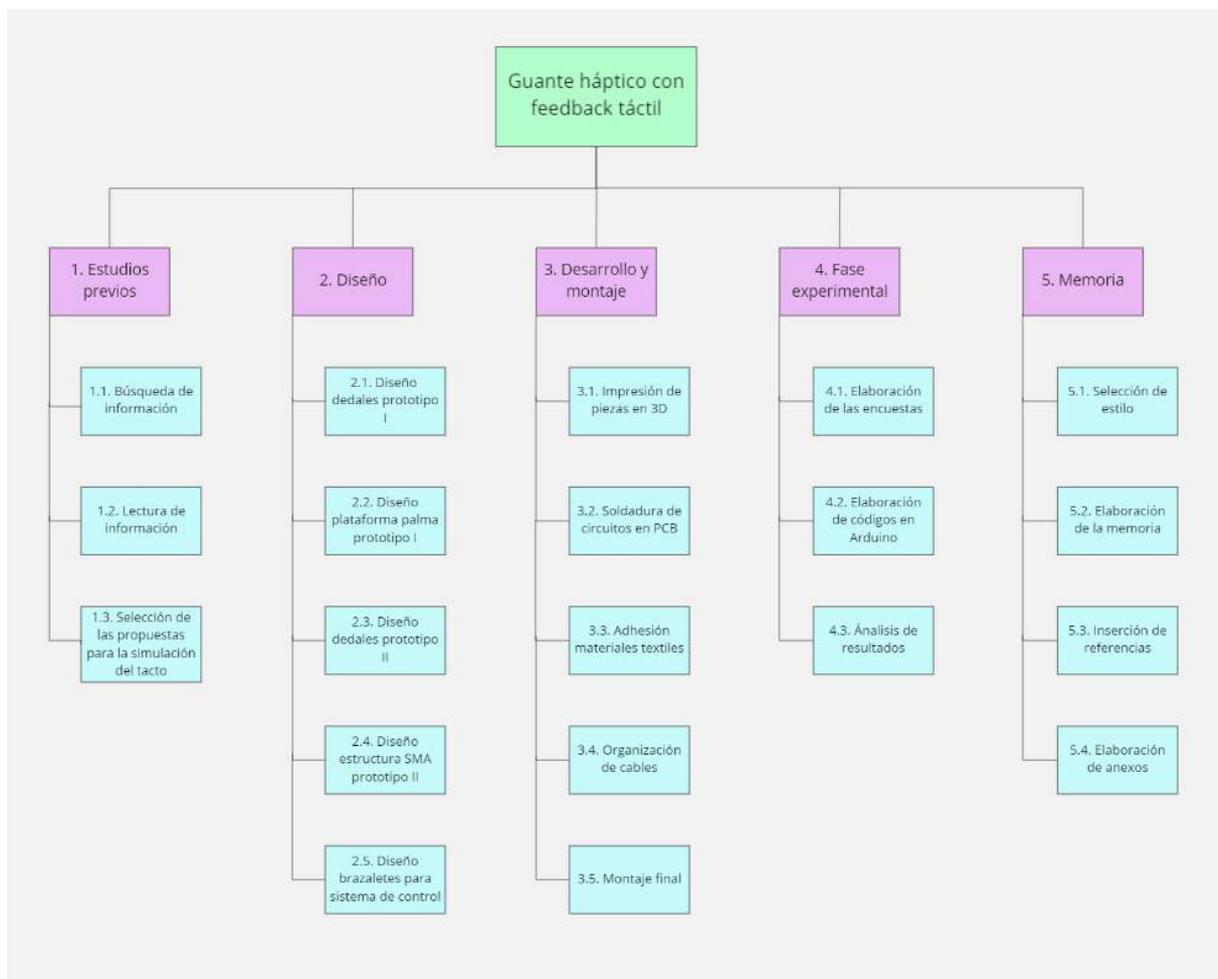


Figura 83: EDP

Diagrama de Gantt

El diagrama de Gantt es una gráfica que muestra la línea temporal que se ha llevado a cabo para realizar el proyecto. Cada actividad se representa por un segmento, donde el extremo izquierdo representa el inicio de la actividad y el extremo derecho representa el fin de la actividad. De esta forma, la longitud del segmento representa la duración de la tarea.

Este proyecto ha tenido una duración de 1 año. La división de actividades ha sido prácticamente idéntica a la que se había hecho anteriormente en la EDP.

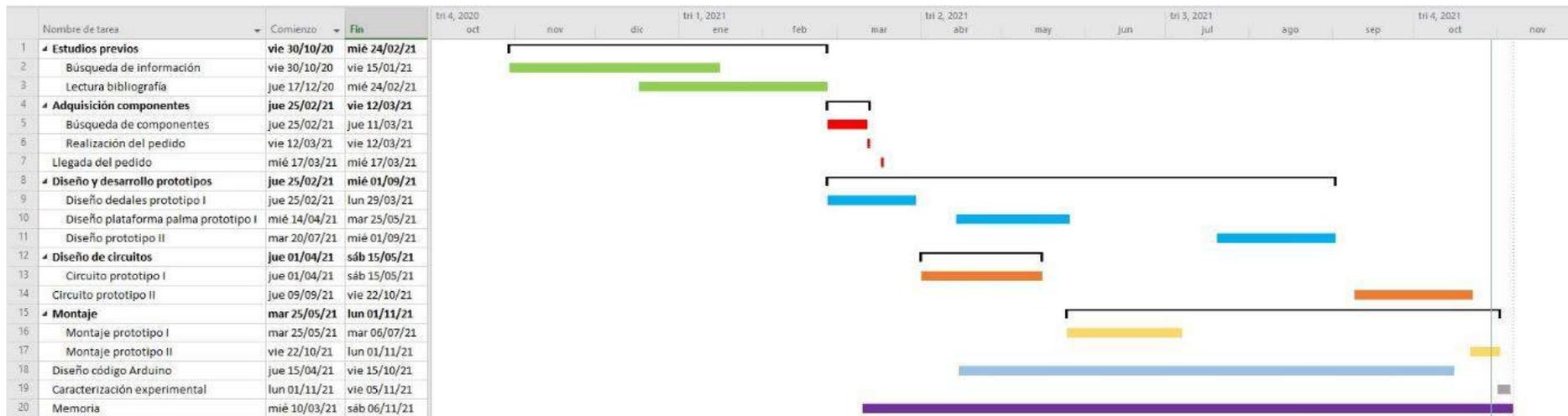


Figura 84: Diagrama de Gantt

Anexo III: Estudio de impacto

A continuación, se va a hacer un análisis del impacto del proyecto en el ámbito medioambiental, económico y social.

Impacto medioambiental

El impacto medioambiental de este proyecto es muy bajo. Los únicos factores que pueden afectar al medioambiente son los asociados al transporte de los componentes utilizados para el desarrollo de los guantes. La mayor parte de los guantes está hecha de plástico PLA que se puede reciclar, con lo cual, cuando se cumpliera la vida útil del dispositivo, se podría reciclar gran parte del mismo.

Impacto económico

Como ya se vio en el capítulo 1, los guantes son un producto relativamente novedoso y con un mercado en desarrollo. La introducción de un nuevo dispositivo al mercado, que funcione correctamente y con un precio reducido puede generar un gran impacto, sobre todo en sectores que hoy en día están en auge como el sector de los videojuegos.

Impacto social

El impacto social de este proyecto es sin duda el más relevante del proyecto. La implementación de estos guantes a los entornos de realidad virtual supone una mejora significativa en la percepción inmersiva que tiene el usuario.

Esto hace que, el sector sanitario y algunas organizaciones internacionales ya utilicen estas técnicas para instruir a sus operarios en entornos que serían difícilmente reproducibles en la realidad, bien por su peligrosidad o por su probabilidad de que ocurra.

Por otro lado, el sector industrial también está empezando a utilizar esta tecnología para realizar maquetas y prototipos sin tener que construirlos físicamente, abaratando mucho los costes y haciendo que sea mucho más fácil modificarlos.

Anexo IV: Referencias

- [1] T. J. K. R. V. L. M. P. Varalakshmi B D, «Haptics: State of the Art Survey,» 2012.
- [2] Playstation, «Mando inalámbrico DualSense,» [En línea]. Available: <https://www.playstation.com/es-es/accessories/dualsense-wireless-controller/>.
- [3] M. M. B. F. Robert Scheibe, «Tactile Feedback at the Finger Tips for Improved Direct Interaction in Immersive Environments,» 2007.
- [4] M. Ramos, «NeuroDigital, la startup andaluza que ayuda a entrenar a los astronautas de la NASA,» [En línea]. Available: <https://www.eleconomista.es/andalucia/noticias/10164735/10/19/NeuroDigital-la-startup-andaluza-que-ayuda-a-entrenar-a-los-astronautas-de-la-NASA.html>. [Último acceso: 24 10 21].
- [5] P. K. M. G. C. Kolarsick, Anatomy and Physiology of the Skin, 2011.
- [6] J. M. B. F. M. C. M. Agustín Buendía Eisman, «Anatomía y fisiología de la piel,» 2018.
- [7] Y. Hertzman, «The role of touch in manual therapy - an integrative literature review,» 2016.
- [8] A. C. G. John E. Hall, «Tratado de fisiología médica,» 2011.
- [9] S. Ballesteros, «Percepción háptica de objetos y patrones realizados: una revisión,» vol. 5, nº 2, 1993.
- [10] 3D Systems, [En línea]. Available: <https://es.3dsystems.com/haptics-devices/3d-systems-phantom-premium/features>. [Último acceso: 29 03 2021].
- [11] CyberGlove Systems, «CyberForce,» [En línea]. Available: <http://www.cyberglovesystems.com/cyberforce>. [Último acceso: 29 03 2021].
- [12] CyberGlove Systems, «CyberGrasp,» [En línea]. Available: <http://www.cyberglovesystems.com/cybergrasp>. [Último acceso: 03 04 2021].

- [13] G. B. P. R. B. Mourad Bouzit, «The Rutgers Master II - New Design Force Feedback Glove,» 2002.
- [14] Q. P. B. G. Jérôme Perret, «HGlove: A wearable force-feedback device for the hand».
- [15] Dexta Robotics, «Touch the untouchable,» [En línea]. Available: <https://www.dextarobotics.com/>. [Último acceso: 03 03 2021].
- [16] M. S. V. H. Claudio Pacchierotti, «Wearable Haptic Systems for the Fingertip and the Hand: Taxonomy, Review, and Perspectives,» 2017.
- [17] B. T. C. C. F. C. G. L. K. K. George Chernyshov, «Shape Memory Alloy Wire Actuators for Soft, Wearable Haptic Devices,» 2018.
- [18] D. M. S. C. YooChang Yoon, «Fine Tactile Representation of Materials for Virtual Reality,» 2020.
- [19] J. M. E. O. Ó. A. V. A. Mónica Rocío Díaz Tribaldos, «Interfaz háptica tipo guante con realimentación vibratoria,» 2015.
- [20] Kickstarter, «Gloveone: Feel Virtual Reality,» [En línea]. Available: <https://www.kickstarter.com/projects/gloveone/gloveone-feel-virtual-reality?lang=es>. [Último acceso: 03 04 2021].
- [21] Haptx, «Haptx Gloves DK2,» [En línea]. Available: <https://haptx.com/>. [Último acceso: 03 04 2021].
- [22] Adam Savage's Tester, «Hands-On with HaptX VR Haptic Gloves!,» [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=aEJWSPfFXmw&t=992s>. [Último acceso: 03 04 2021].
- [23] El procus, «Vibrator Motor Working and Applications,» [En línea]. Available: <https://www.elprocus.com/vibrator-motor-working-and-applications/>. [Último acceso: 19 09 2021].
- [24] «Nfpshop,» [En línea]. Available: <https://nfpshop.com/product/12mm-vibration-motor-20mm-type-model-nfp-n25caz-a>.
- [25] Precision Microdrives, «Eccentric Rotating Mass Vibration Motors - ERMs,» [En línea]. Available: <https://www.precisionmicrodrives.com/vibration-motors/eccentric-rotating-mass-vibration-motors-erms/>.

- [26] Precision microdrives, «Vibration Motors,» [En línea]. Available: <https://www.precisionmicrodrives.com/vibration-motors/>. [Último acceso: 19 09 2021].
- [27] Precision microdrives, «AB-004 : Understanding ERM Vibration Motor Characteristics,» [En línea]. Available: <https://www.precisionmicrodrives.com/content/ab-004-understanding-erm-vibration-motor-characteristics/>. [Último acceso: 19 09 2021].
- [28] e-ika, [En línea]. Available: <https://www.e-ika.com/motor-de-vibracion>. [Último acceso: 20 09 2021].
- [29] Precision microdrives, «AB-020 : Understanding Linear Resonant Actuator Characteristics,» [En línea]. Available: <https://www.precisionmicrodrives.com/content/ab-020-understanding-linear-resonant-actuator-characteristics/>. [Último acceso: 20 09 2021].
- [30] Precision microdrives, «VAB-03 : How Do LRAs Work?,» [En línea]. Available: <https://vimeo.com/132533086>. [Último acceso: 20 09 2021].
- [31] S. d. I. Flor, «Aleaciones con memoria de forma».
- [32] M. Cianchetti, «Fundamentals on the Use of Shape Memory Alloys in Soft Robotics,» 2013.
- [33] M. L. M. M. S. G. D. B. L. Moreno, «Materiales inteligentes: aleaciones con memoria,» 2008.
- [34] G. M. Martínez, «Introducción a las Aleaciones con Memoria de Forma: el Nitinol,» 2013. [En línea]. Available: <https://adquisiciondedatos.wordpress.com/2013/11/12/introsma/>. [Último acceso: 22 10 21].
- [35] [En línea]. Available: <https://www.amazon.es/Liberaci%C3%B3n-PI%C3%A1stico-Conexi%C3%B3n-Cintur%C3%B3n-Repuesto/dp/B00ARB579Q>.
- [36] RobotShop, «Cable Flexinol de 0.005",» [En línea]. Available: <https://www.robotshop.com/es/es/cable-flexinol-0005.html>. [Último acceso: 24 10 2021].
- [37] J. G. Carmenate, «Programarfacil.com,» [En línea]. Available: https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/transistor-mosfet-arduino-esp8266/#Transistor_MOSFET_modos_de_operacion. [Último acceso: 23 09 2021].

- [38] L. Llamas, «Controlar grandes cargas con Arduino y transistor MOSFET,» [En línea]. Available: <https://www.luisllamas.es/arduino-transistor-mosfet/>. [Último acceso: 23 09 2021].
- [39] «Jobted,» [En línea]. Available: <https://www.jobted.es/salario/ingeniero-industrial>. [Último acceso: 30 10 2021].
- [40] BOE, [En línea]. Available: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2020-1626#:~:text=Durante%20los%20a%C3%B1os%202018%20a,horas%20efectivas%20reales%20de%20trabajo..

Anexo V: Índice de figuras

Figura 1: Esquemático general del prototipo I	6
Figura 2: Prototipo I.....	6
Figura 3: Dedal del prototipo II	7
Figura 4: Disposición de los muelles de SMA y el ventilador del prototipo II.....	7
Figura 5: Esquemático general del prototipo II	8
Figura 6: Prototipo II.....	8
Figura 7: Experimentos con RV.....	9
Figura 8: Capas de la piel [7].....	14
Figura 9: Esquema de los corpúsculos de la piel [7].....	15
Figura 10: Phantom Premium 1.5 [10].....	17
Figura 11: CyberForce [11].....	18
Figura 12: CyberGrasp [12]	19
Figura 13: Rutgers Master II [13]	19
Figura 14: HGlove [14]	19
Figura 15: Dexmo [15]	19
Figura 16: Prototipos con contacto normal a la yema del dedo [16].....	20
Figura 17: Prototipos con estiramiento lateral de la piel o movimiento tangencial relativo [16]	20
Figura 18: Prototipo SMA [3]	21
Figura 19: Dedales de SMA	22
Figura 20: Anillos de SMA alrededor de la falange de un dedo [17]	22
Figura 21: Prototipo motores de vibración [18]	23
Figura 22: Virtual Touch [19]	23
Figura 23: Gloveone [20].....	24
Figura 24: Haptx Glove DK2 [21].....	24
Figura 25: a) Burbuja deshinchada del Haptx Glove b) Burbuja hinchada del Haptx Glove [22].....	25
Figura 26: ERM [24] [25]	27
Figura 27: Motor LRA [28] [29]	29
Figura 28: Circuito equivalente LRAs	29
Figura 29: Ciclo de histéresis SMA [33].....	31
Figura 30: Mecanismo de transformación OWE [32]	32
Figura 31: Mecanismo de transformación TWE [32].....	32
Figura 32: Boceto inicial prototipo II.....	33
Figura 33: Motor de RS components	34
Figura 34: Primer dedal a) Modelo en Fusion360 b) Modelo impreso.....	35
Figura 35: Segundo dedal a) Modelo en Fusion360 b) Modelo impreso	35
Figura 36: Dedal final a) Modelo en Fusion360 b) Modelo impreso	36
Figura 37: Primer prototipo de la palma a) Modelo en Fusion360 b) Modelo impreso.....	37
Figura 38: Distribución actuadores del guante GloveoneVR.....	37
Figura 39: Segundo prototipo de la palma a) Modelo en Fusion360 b) Modelo impreso....	38
Figura 40: "Efecto bolsa"	38
Figura 41: Modelo del prototipo final de la palma en Fusion360	39
Figura 42: Prototipo final de la plataforma de la palma	39
Figura 43: Modelo del brazalete en Fusion360	40
Figura 44: Hebilla de liberación rápida lateral [35]	40

Figura 45: Brazaletes impreso con el soporte del Arduino atornillado	41
Figura 46: Boceto inicial prototipo II.....	42
Figura 47: Boceto inicial dedal prototipo II	43
Figura 48: Cable de flexinol [36]	43
Figura 49: Modelo dedal inicial en Fusion360.....	44
Figura 50: Dedal inicial montado	44
Figura 51: Boceto prototipo II con muelles de SMA	45
Figura 52: a) Dedal en Fusion360 b) Plataforma en Fusion360.....	46
Figura 53: a) Dedal y plataforma montados b) Vista cortada del dedal.....	46
Figura 54: Disposición con gomas elásticas.....	48
Figura 55: Modelo 3D de la estructura de control de SMA en Fusion360	48
Figura 56: Modelo 3D del ancla móvil del prototipo II	49
Figura 57: Modelo 3D del brazaletes del prototipo II en Fusion360	49
Figura 58: Esquema de conexiones de un Arduino UNO.....	50
Figura 59: Especificaciones técnicas Arduino UNO	50
Figura 60: Curva característica $V_{DS} - I_D$	52
Figura 61: Curva característica $V_{GS} - I_D$	52
Figura 62: Esquema del circuito de conmutación [37]	53
Figura 63: Esquemático general del prototipo I	54
Figura 64: Disipadores MOSFET.....	55
Figura 65: Esquemático general del prototipo II	56
Figura 66: Artillery Genius	57
Figura 67: Torre de temperaturas PLA	58
Figura 68: Impresión dedales del prototipo I en Ultimaker Cura	59
Figura 69: Impresión del brazaletes del prototipo I en Ultimaker Cura.....	60
Figura 70: Impresión de la plataforma de la palma del prototipo I en Ultimaker Cura	60
Figura 71: a) Dedales del prototipo I montados b) Plataforma de la palma montada	61
Figura 72: Circuito de conmutación del prototipo I.....	61
Figura 73: Versión final del prototipo I	62
Figura 74: Impresión de dedales del prototipo II en Ultimaker Cura	63
Figura 75: Dedal prototipo II	64
Figura 76: Impresión de la estructura de control del SMA en Ultimaker Cura	64
Figura 77: Estructura de control de SMA del prototipo II.....	65
Figura 78: Impresión del brazaletes del prototipo II en Ultimaker Cura.....	65
Figura 79: Circuito del prototipo II.....	66
Figura 80: Versión final del prototipo II	67
Figura 81: Máquina de estados del sistema de control del prototipo II.....	68
Figura 82: Experimentos con RV.....	70
Figura 83: EDP.....	78
Figura 84: Diagrama de Gantt	79

Anexo VI: Índice de tablas

Tabla 1: Comparación de tecnologías para recrear la percepción táctil.....	25
Tabla 2: Características eléctricas del motor	34
Tabla 3: Características principales IRF530N.....	51
Tabla 4: Resultados medios de las preguntas del prototipo II.....	72
Tabla 5: Resultados medios de las preguntas del prototipo II.....	72
Tabla 6: Resultados de las preguntas comparativas entre ambos prototipos	72
Tabla 7: Resultados medios de las preguntas de experiencia general	73

Anexo VII: Códigos de Arduino

Programa prototipo II

```
//Declaración de variables

String str = "";
const char separador = ',';
int index;
int pwm_dedos = 0;
int pwm_palma = 0;

void setup() {

    Serial.begin(9600);

    pinMode(3, OUTPUT);
    pinMode(5, OUTPUT);
    pinMode(6, OUTPUT);
    pinMode(9, OUTPUT);
    pinMode(10, OUTPUT);
    pinMode(11, OUTPUT);

}

void loop() {

    if(Serial.available()){

        str = Serial.readStringUntil('\n');
        index = str.indexOf(separador);
        pwm_dedos = str.substring(0, index).toInt();
        pwm_palma = str.substring(index+1).toInt();

    }

    analogWrite(3, pwm_dedos);
    analogWrite(5, pwm_dedos);
    analogWrite(6, pwm_dedos);
    analogWrite(9, pwm_dedos);
    analogWrite(10, pwm_dedos);
    analogWrite(11, pwm_palma);
    Serial.print(pwm_dedos);
    Serial.print(" ");
    Serial.println(pwm_palma);

}
```

Programa prototipo II

```
#define SMA 5
#define SMA_antagonista 3
#define ventilador 2

//Declaración de variables

String str = "";
int pwm = 0;
int estado = 0;
int i = 0;
int d = 0;

void setup() {

  Serial.begin(9600);
  pinMode(ventilador, OUTPUT);
  pinMode(SMA, OUTPUT);
  pinMode(SMA_antagonista, OUTPUT);
}

void loop() {
  if (Serial.available()){

    str = Serial.readStringUntil('\n');
    estado = str.toInt();
    Serial.println(estado);
  }
  switch(estado){
    case 0: //En reposo
      Serial.println("La SMA está en reposo");
      analogWrite(SMA, 0);
      analogWrite(SMA_antagonista, 0);
      digitalWrite(ventilador, LOW);
      break;
    case 1: //Contrae el SMA y luego pasa al estado de mantenimiento
      Serial.println("La SMA se está contrayendo");
      analogWrite(SMA_antagonista, 0);
      digitalWrite(ventilador, LOW);
      contraer(SMA);
      Serial.println("La SMA está contraída");
      estado = 2;
      break;
    case 2: //Estado de mantenimiento
      Serial.println("La SMA se mantiene contraída");
      mantener();
      break;
    case 3: //Estira la SMA y luego se va al estado de reposo
      Serial.println("La SMA se está estirando");
      estirar();
      Serial.println("La SMA está estirada");
      estado = 0;
      break;
    default: //Por defecto pondrá todo en reposo
      Serial.println("La SMA está en reposo");
      analogWrite(SMA_antagonista, 0);
      analogWrite(SMA, 0);
      digitalWrite(ventilador, LOW);
      break;
  }
}
```

```
    }  
  }  
  //Función que controla el ciclo de trabajo que se quiere dar a un puerto  
  durante un tiempo determinado  
  void ciclo_pwm(int d, int segundos, int pin){  
    pwm = map(d, 0, 100, 0, 255);  
    analogWrite(pin, pwm);  
    delay(segundos*1000);  
  }  
  //Función que contrae la SMA (dependiendo del pin lo hará en la SMA  
  convencional o en la antagonista)  
  void contraer(int pin){  
    ciclo_pwm(100, 5, pin);  
    ciclo_pwm(80, 4, pin);  
    ciclo_pwm(50, 4, pin);  
  }  
  //Función que mantiene la SMA contraída  
  void mantener(){  
    ciclo_pwm(10, 1, SMA);  
    ciclo_pwm(0, 1, SMA);  
  }  
  //Función que activa el ventilador y contrae la SMA antagonista para  
  estirar la SMA convencional  
  void estirar(){  
    analogWrite(SMA, 0);  
    digitalWrite(2, HIGH);  
    contraer(SMA_antagonista);  
  }  
}
```

Anexo VIII: Glosario y abreviaturas

SMA: aleaciones con memoria de forma (*Shape Memory Alloy*).

ERM: motor de vibración de masa giratoria excéntrica (*Eccentric Rotating Mass*).

LRA: actuador de resonancia lineal (*Linear Resonance Actuator*).

OWE: memoria de forma simple (*One-Way memory Effect*).

TWE: memoria de forma doble (*Two-Ways memory Effect*).

PWM: señal de modulación por ancho de pulso (*Pulse Width Modulation*).

PLA: tipo de plástico para impresora 3D (*PolyLactic Acid*).

RV: realidad virtual.

Anexo IX: Planos

A continuación, se presentan los planos de los modelos impresos en 3D.

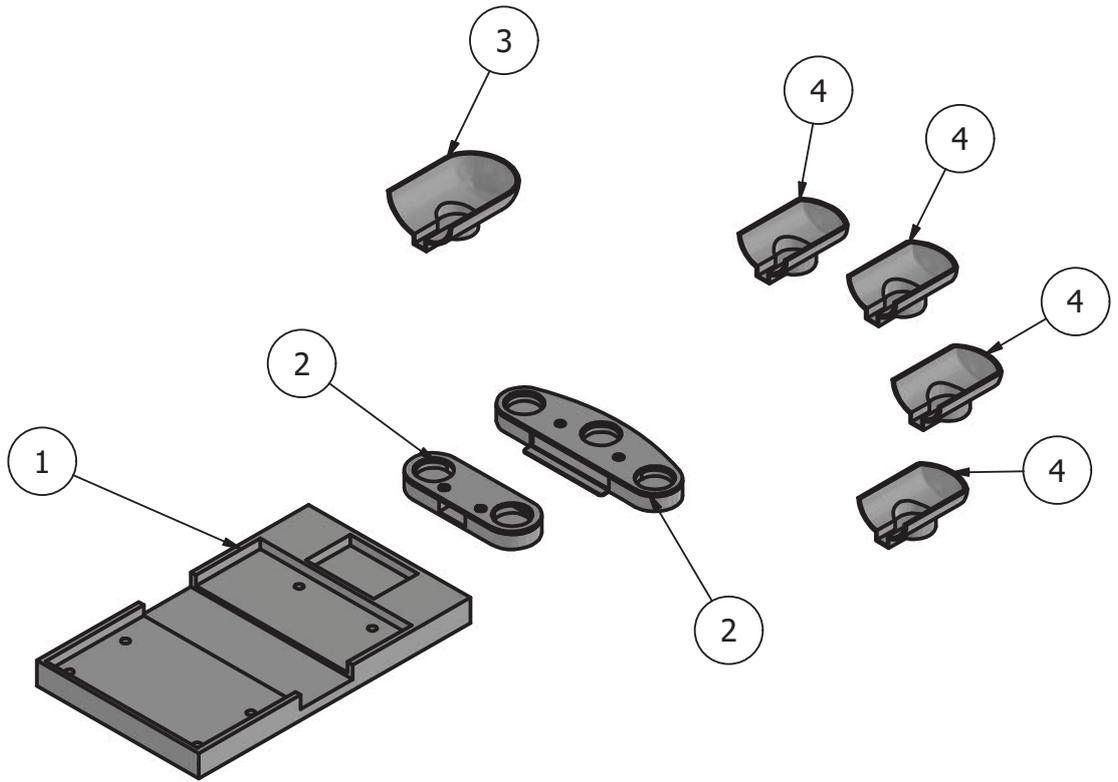
2



1

LISTADO DE PARTES

PIEZA	CANTIDAD	NOMBRE PARTE
1	1	Brazalete
2	4	Plataforma Palma
3	1	Dedal pulgar
4	4	Dedal



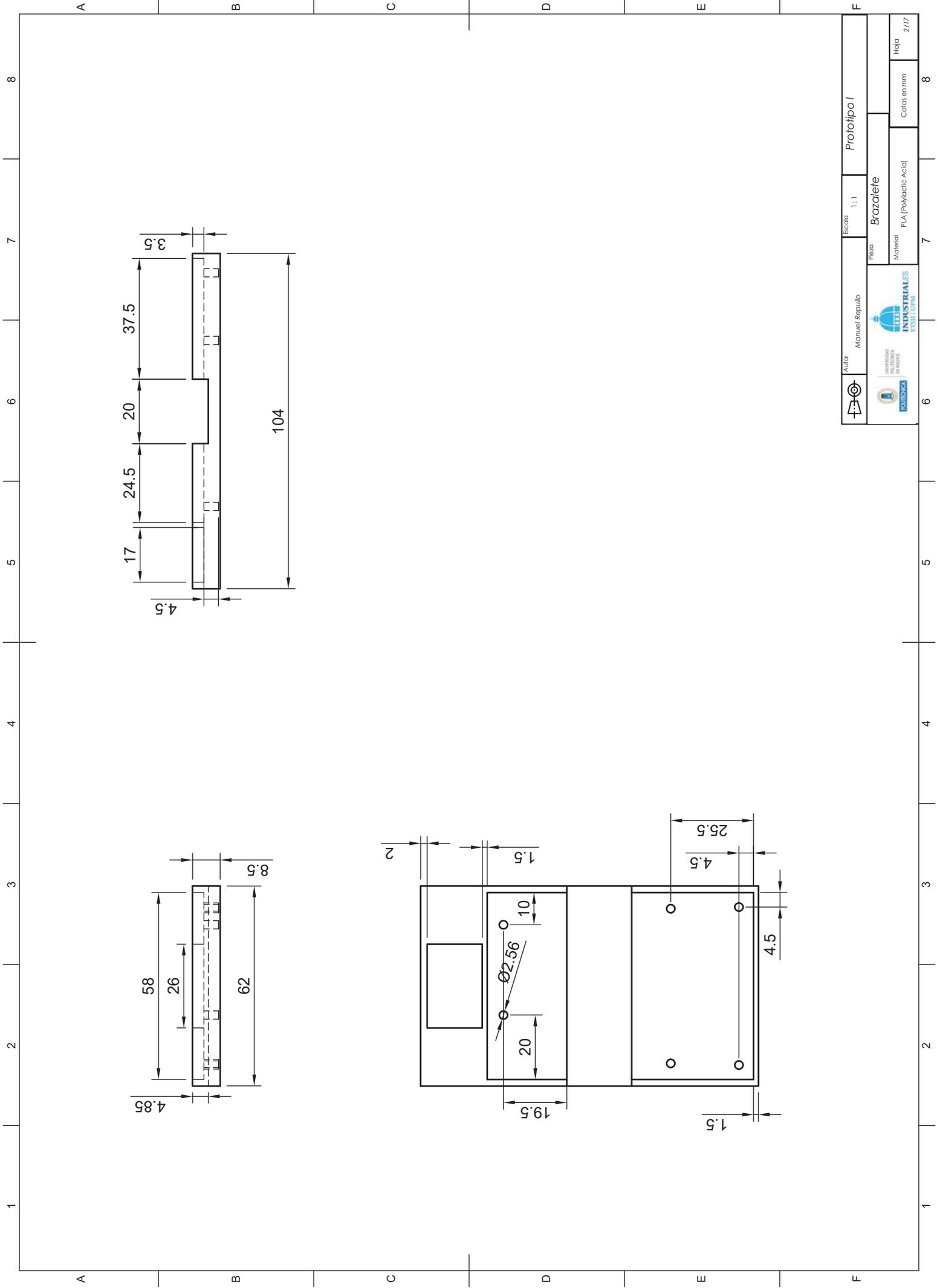
B

B

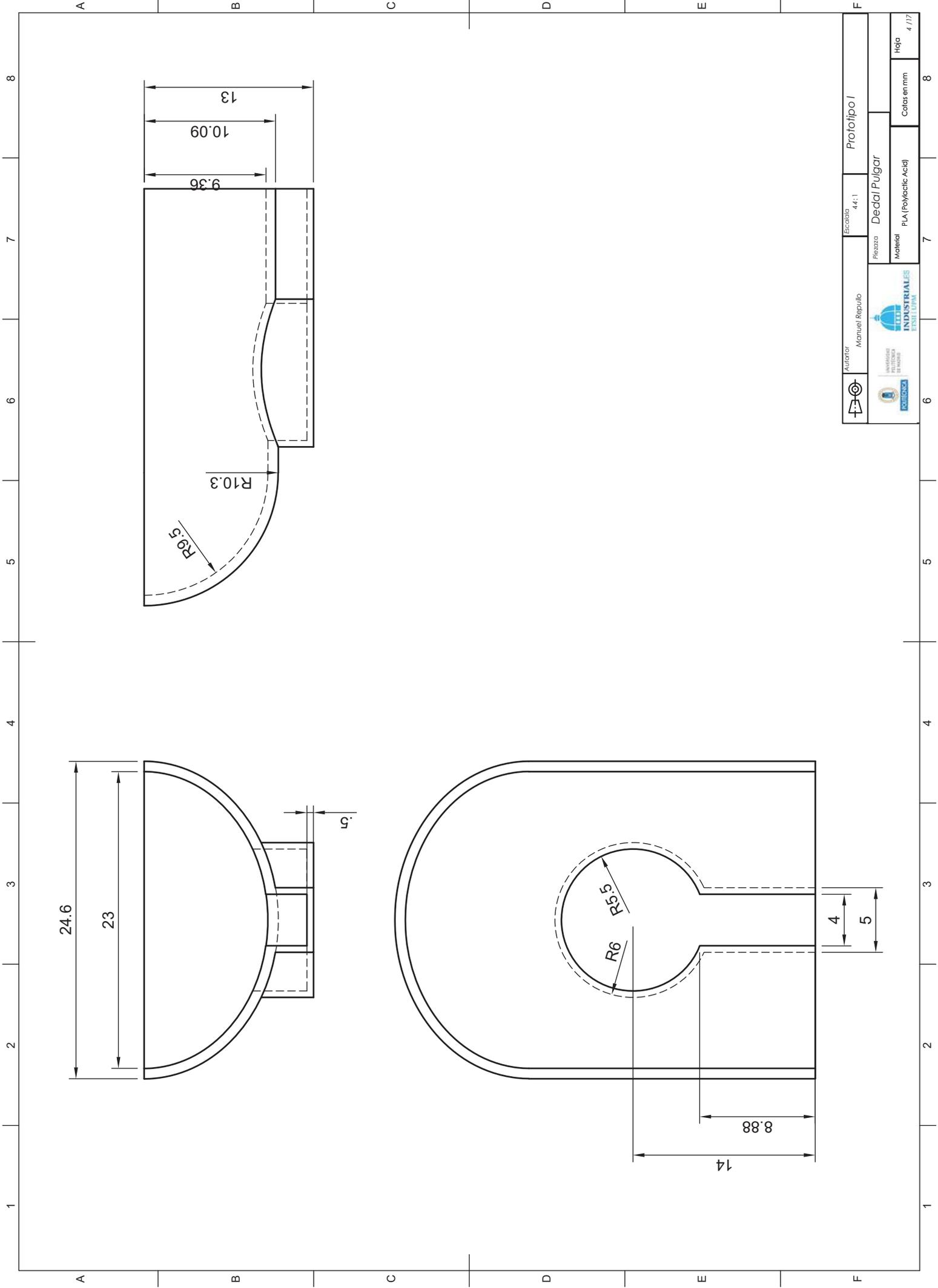
A

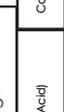
	Autor Manuel Repullo	Escala 1:2	Prototipo I	
			Pieza Plano de conjunto	Hoja 1/17
	Material PLA (Polylactic Acid)	Cotas en mm		

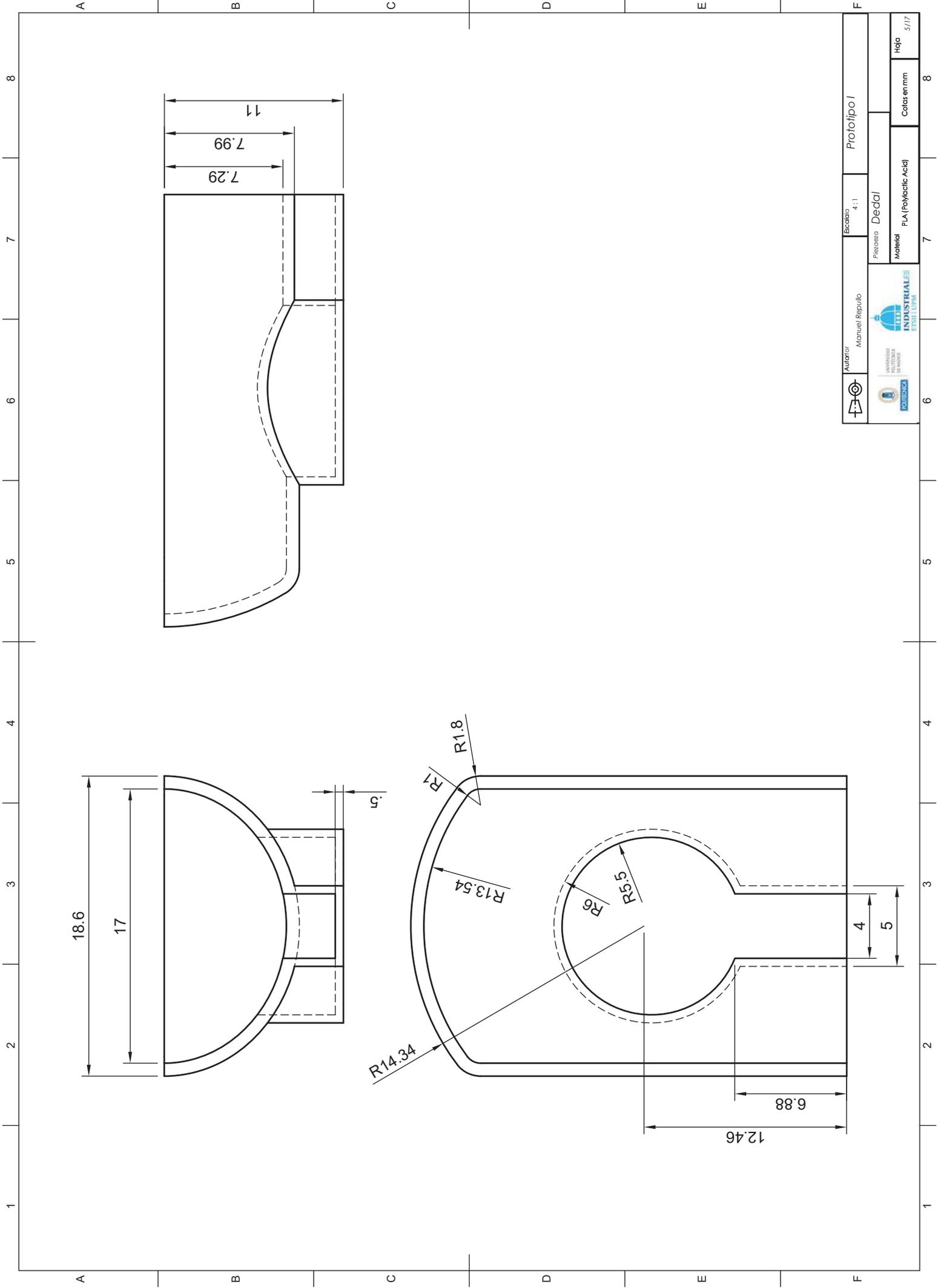




Autor: Manuel Repullo		Escala: 1:1		Prototipo I	
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VERACRUZ		Pieza: Brazalete		Hoja: 2/17	
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA		Material: PLA (Polylactic Acid)		Colores: mm	



Autor: Manuel Repullo		Escala: 4:1		Prototipo I	
 UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA		 INDUSTRIAS 3D		Pieza: Dedal Pulgar	
 MINISTERIO DE CIENCIA		 MINISTERIO DE INDUSTRIA		Material: PLA (Polylactic Acid)	
				Cotas en mm	
				Hoja 4 / 17	



		Autor: Manuel Repullo		Escala: 4:1		Prototipo I	
		Proyecto: Dedal		Material: PLA (Polylactic Acid)		Cotas en mm	
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PANAMÁ FACULTAD DE INGENIERÍA		INDUSTRIAS REPULLO		Hoyo 5/17		8	

2



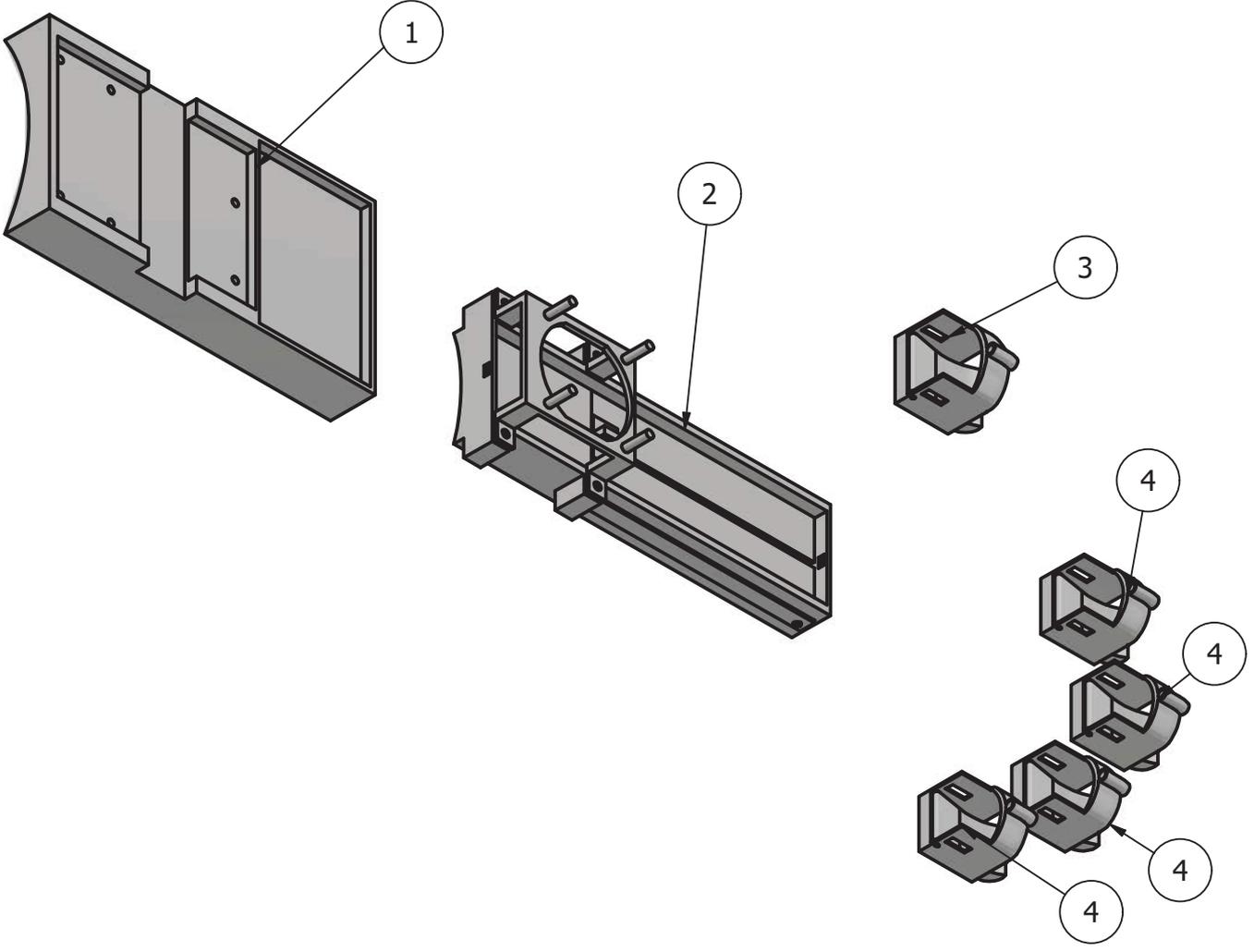
1

LISTADO DE PARTES

PIEZA	CANTIDAD	NOMBRE PARTE
1	1	Brazalete prototipo II
2	1	Soporte ventilador
3	1	Dedal SMA pulgar
4	4	Dedal SMA

B

B



A

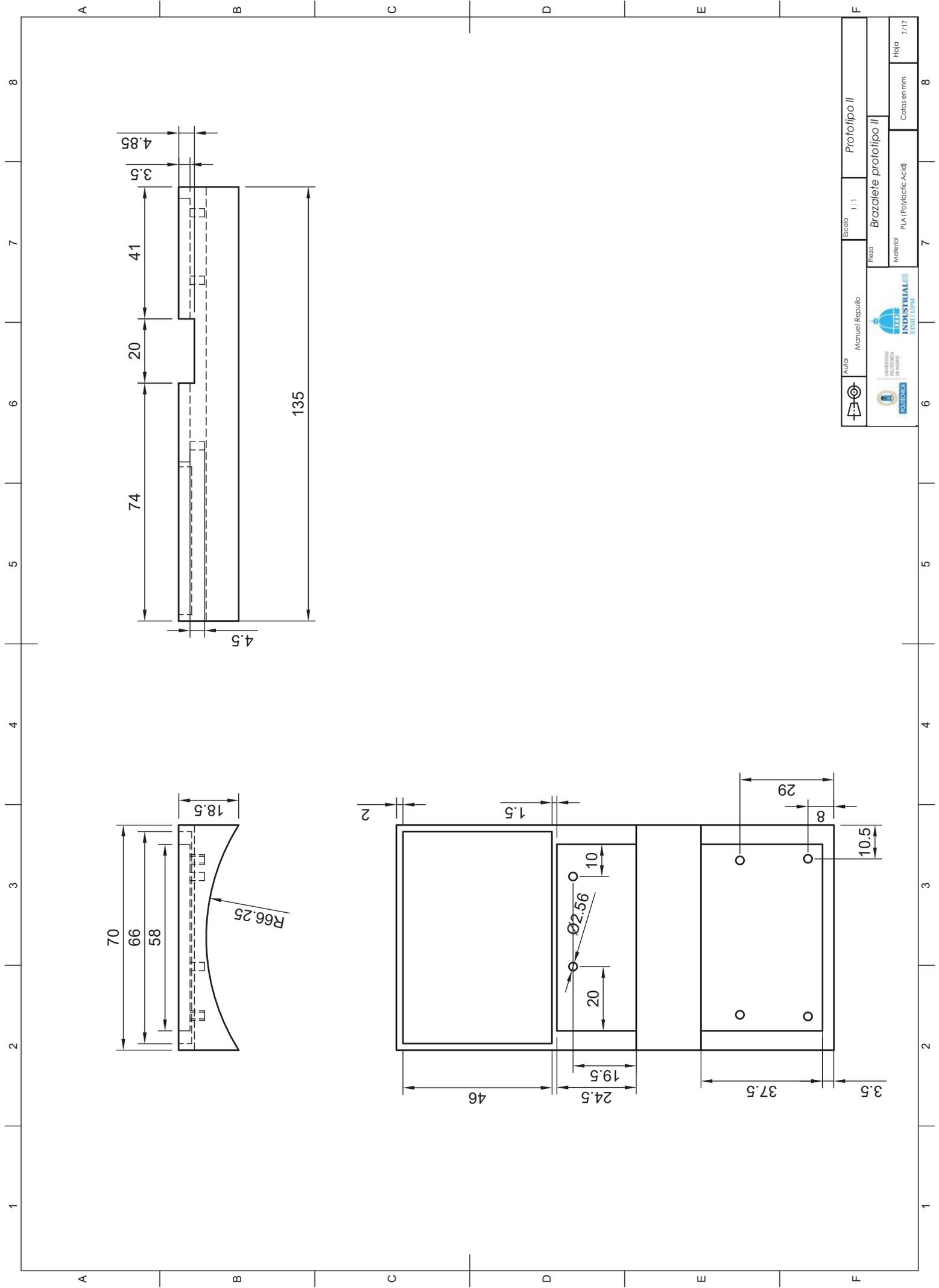
A

	Autor Manuel Repullo	Escala 1:3	Prototipo II	
	Pieza Plano de conjunto		Material PLA (Polylactic Acid)	Cotas en mm

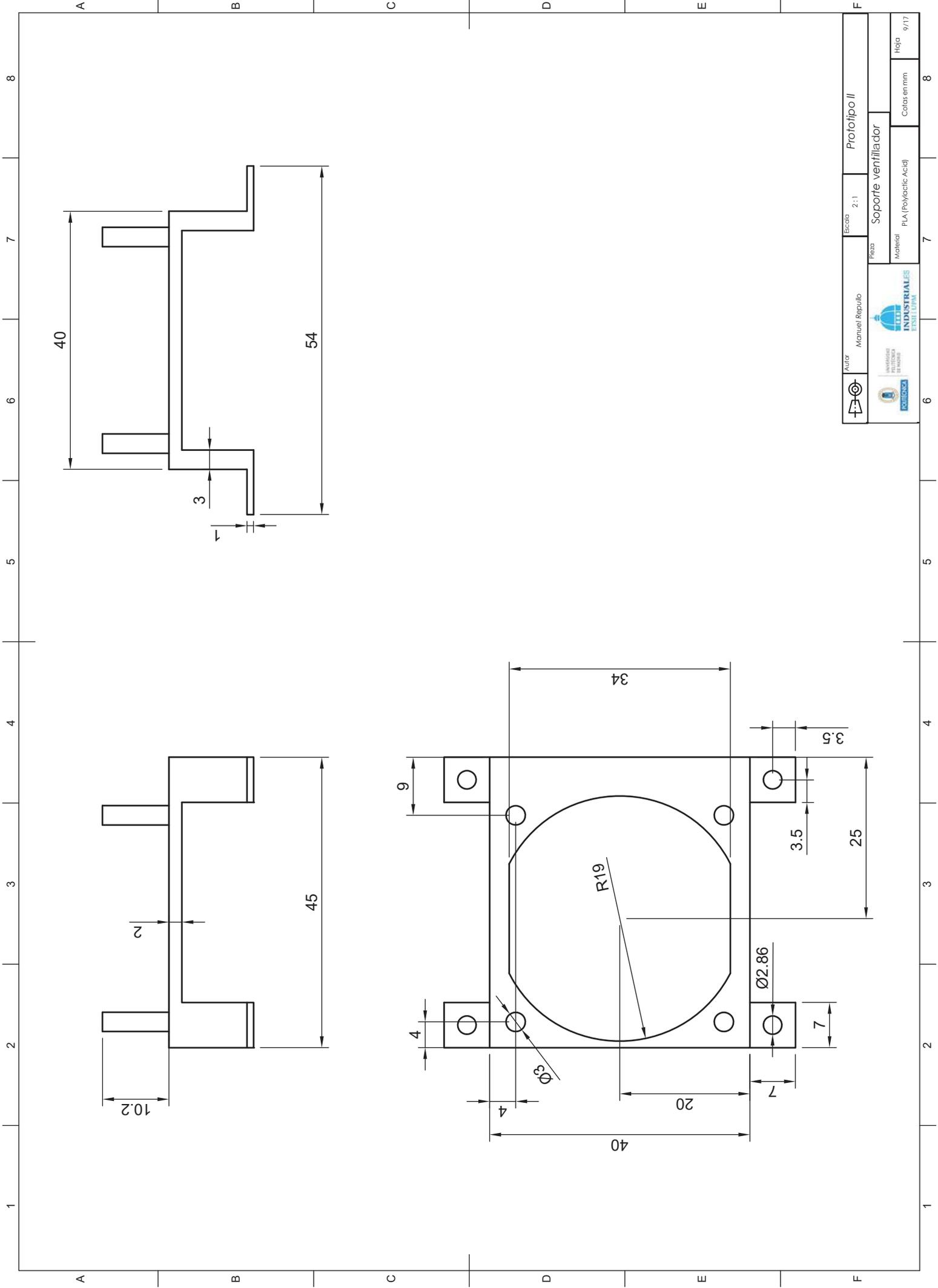
2



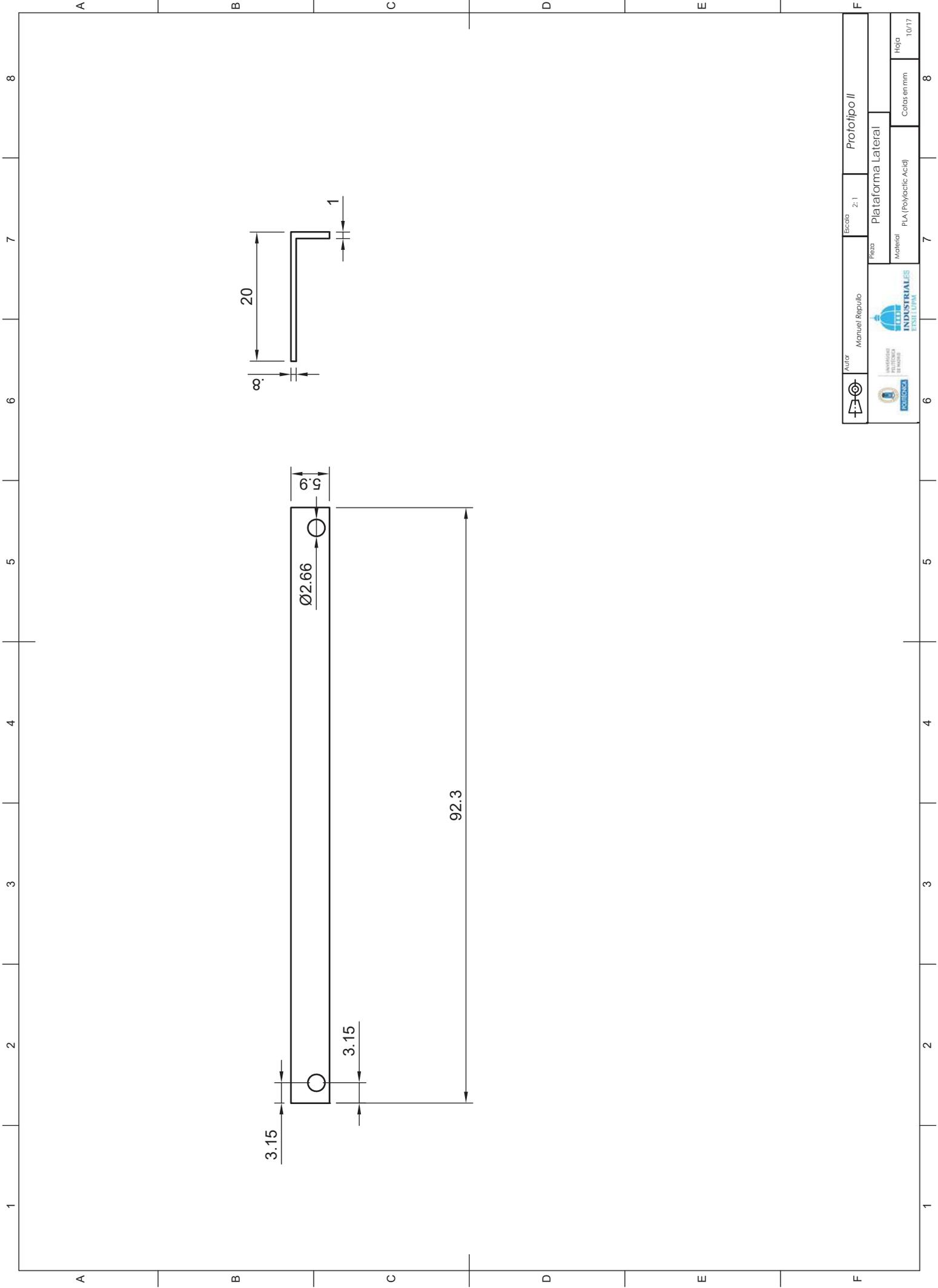
1



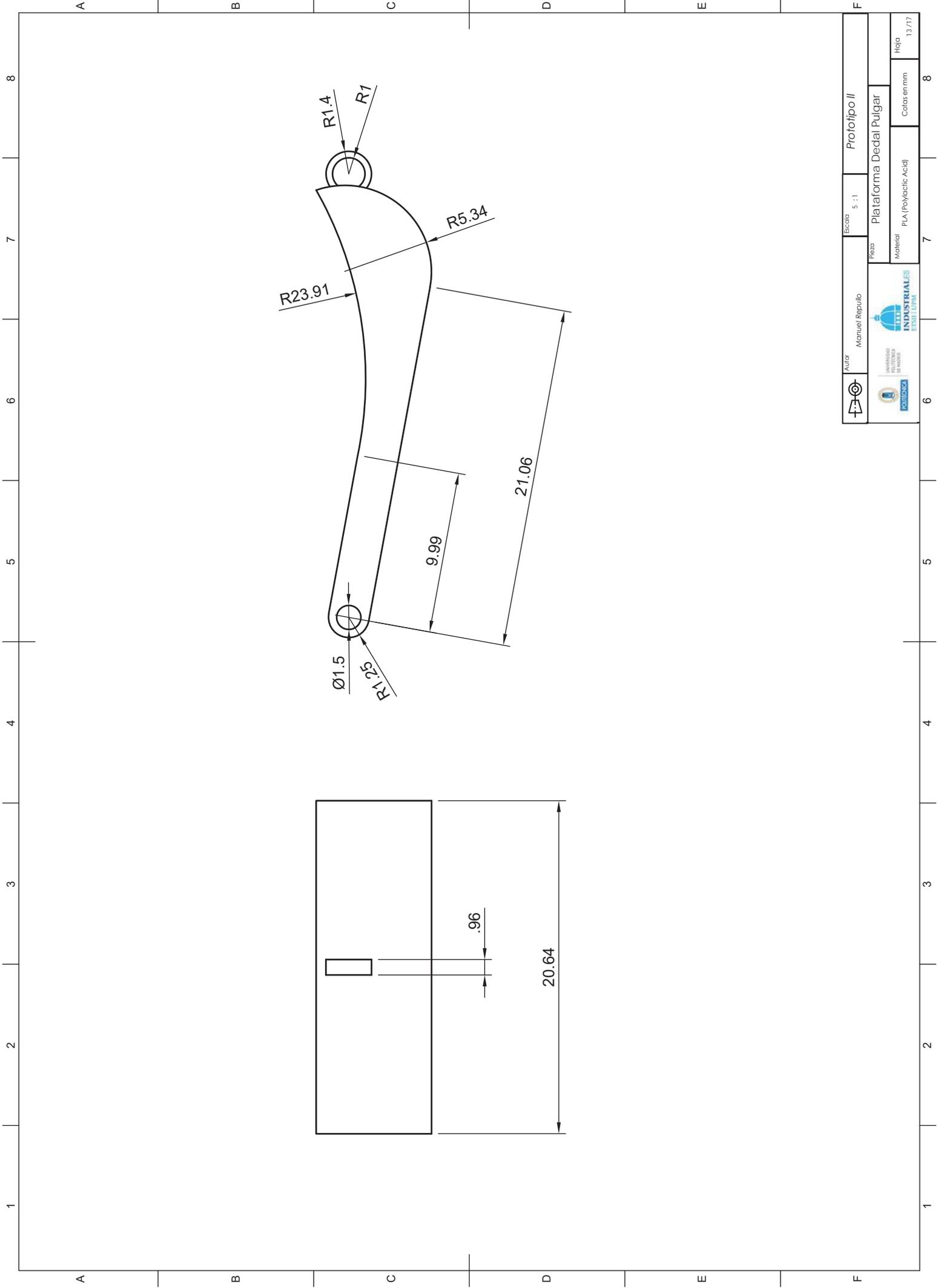
	Autor	Manuel Repullo	Escala	1:1	Prototipo II	
	Pieza		Brasalete prototipo II		Hoja	
Material		PLA (Polylactic Acid)		Cotas en mm		7/17



		Manuel Repullo Autor		Prototipo II Escala 2:1		Soporte ventilador Pieza	
		Material: PLA (Polylactic Acid)		Colas: en mm		Hoja: 9/17	

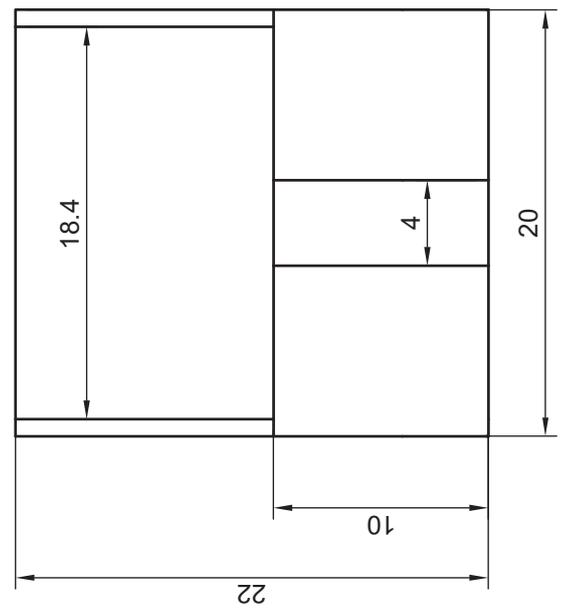
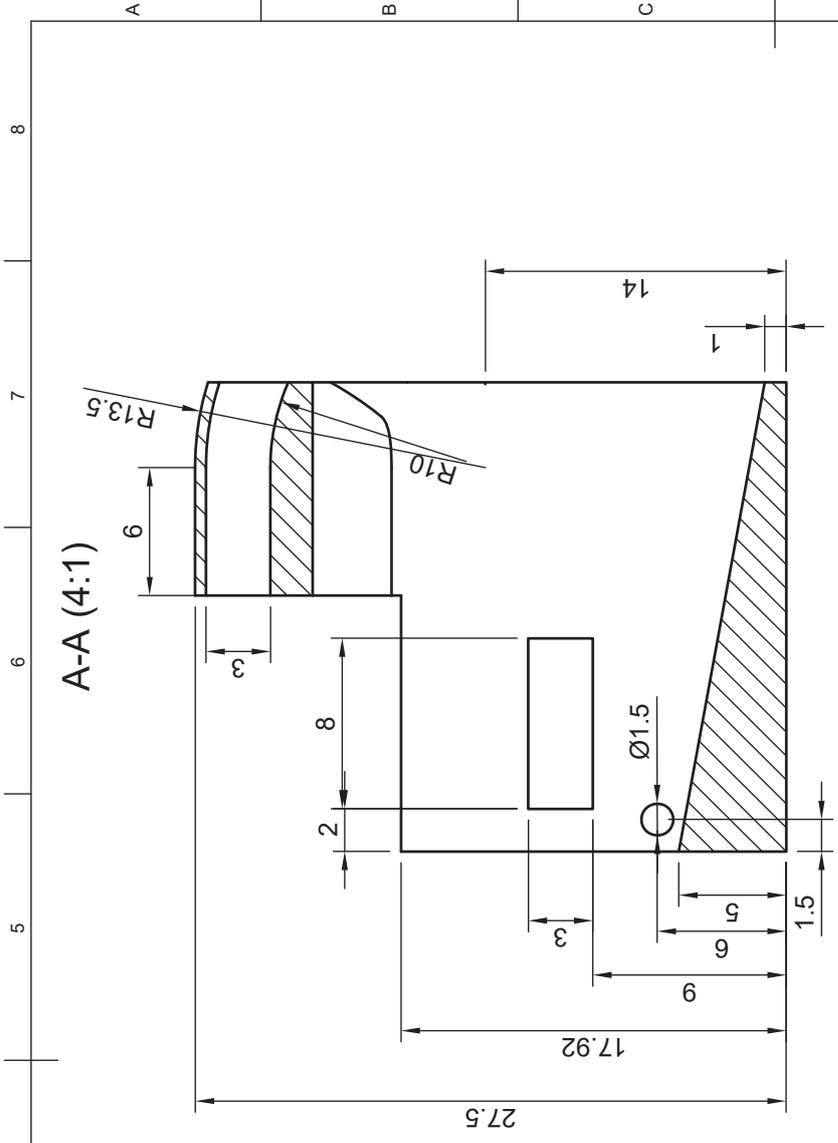


Autor Manuel Repullo	Escala 2:1	Prototipo II	
		Pieza Plataforma Lateral	
Material PLA (Polylactic Acid)		Hoja 10/17	



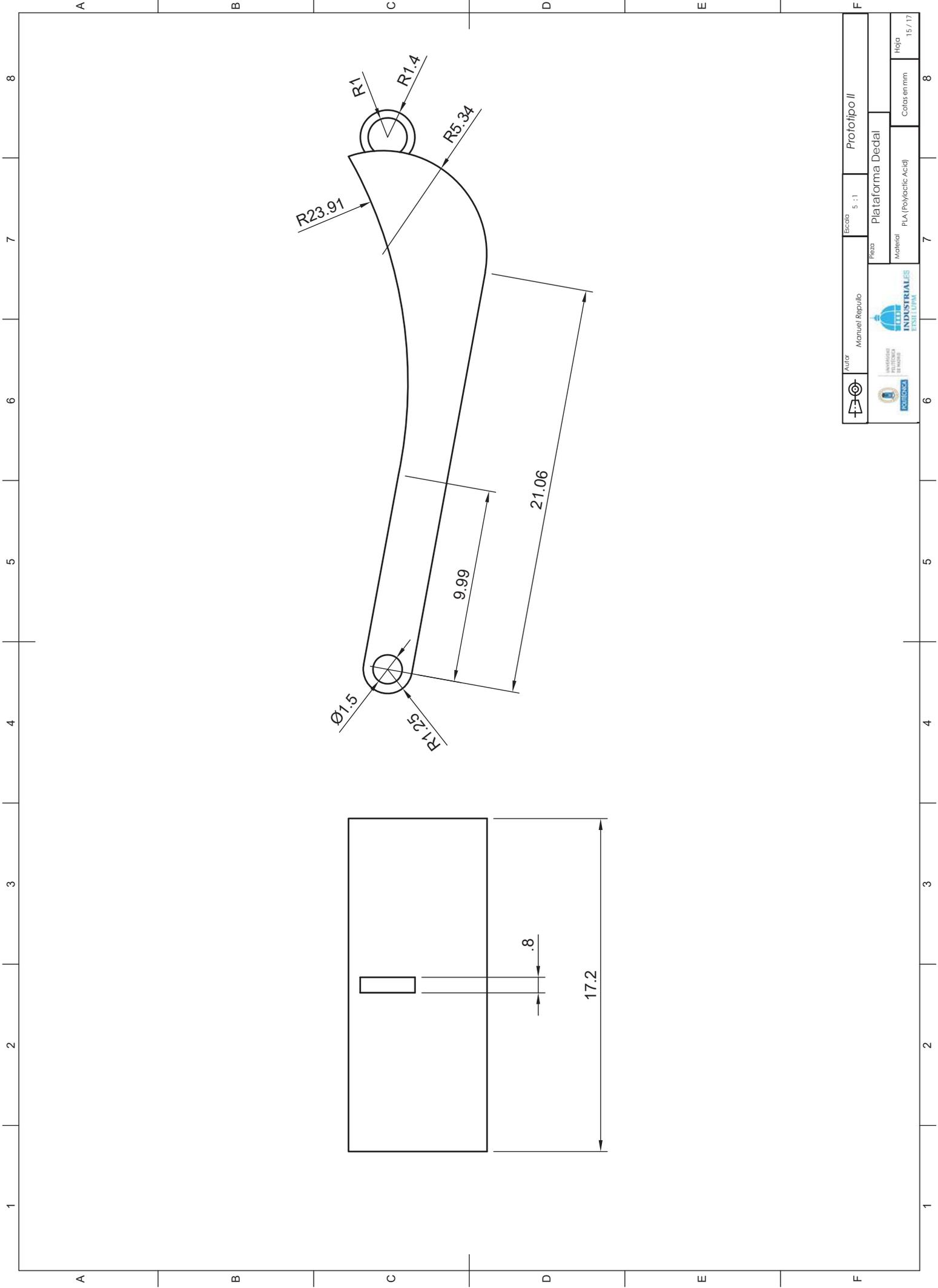
Autor	Manuel Repullo	Escala	5 : 1	Prototipo II	
		Pieza	Plataforma Dedal Pulgar		
		Materia	PLA (Polylactic Acid)	Cotas en mm	
					Hoja
					13 / 17

8 7 6 5 4 3 2 1 1 2 3 4 5 6 7 8



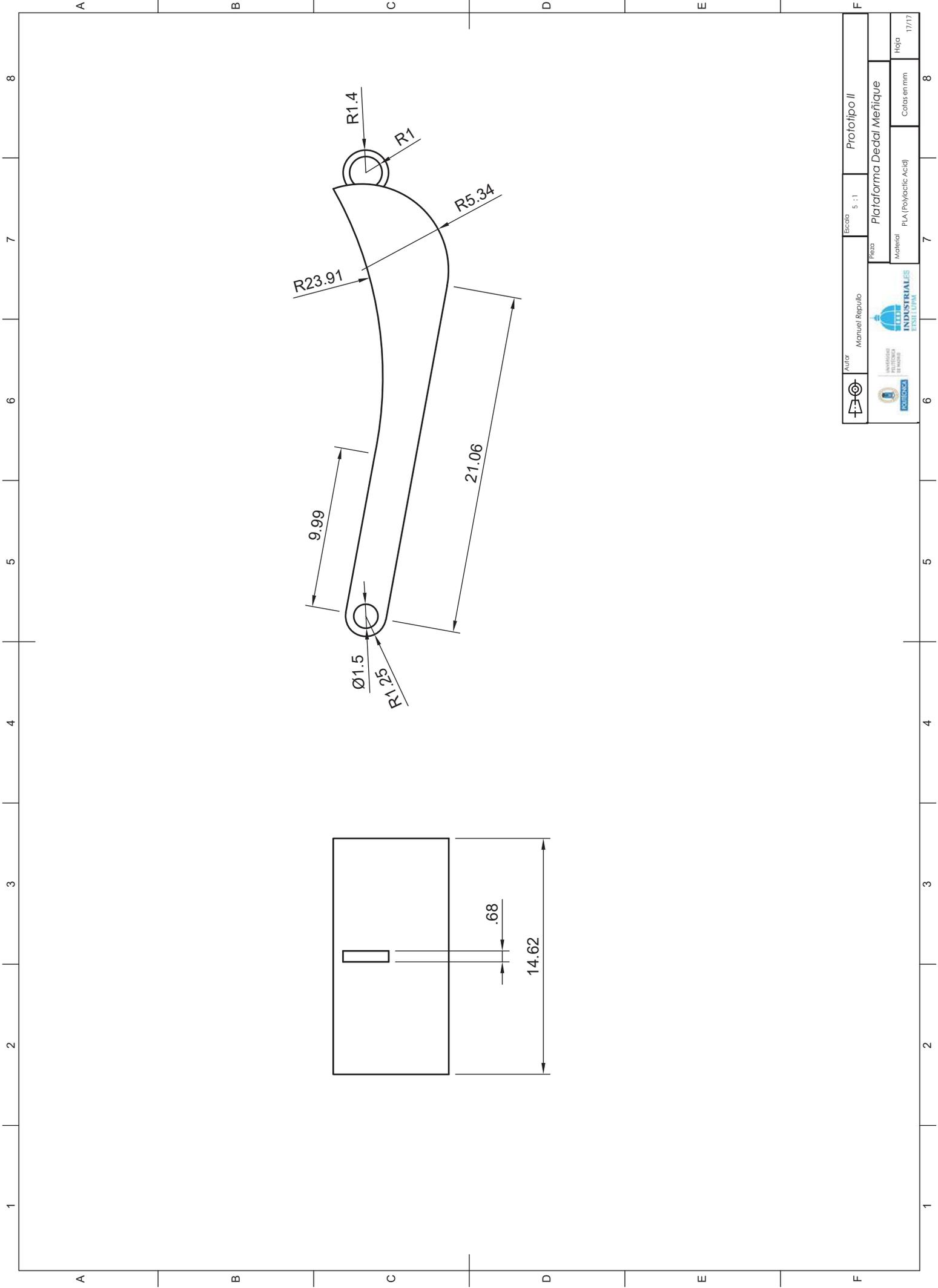
A-A (4:1)

	Autor: Manuel Repullo	Escala: 4 : 1	Prototipo II	
	Pieza: Dedal	Material: PLA (Polylactic Acid)	Colores/mm:	Hoja: 14/17



Autor		Manuel Repullo		Escala 5 : 1		Prototipo II	
Pieza		Plataforma Dedal		Material		PLA (Polylactic Acid)	
Hoja		15 / 17		Cotas en mm		8	





Autor Manuel Repullo		Escala: 5 : 1	Prototipo II	
		Pieza:	Plataforma Decal Métrique	
Material:		PLA (Polylactic Acid)	Colas en mm	Hoja 17/17