



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**Diseño y fabricación mediante impresión 3D  
de una prótesis de dedo con sensor de fuerza  
incorporado**

**Autor:**

**Benito Blanco, Javier**

**Tutor:**

**Mansilla Gallo, Alberto**

Dpto. Ciencia de los Materiales e Ingeniería  
Metalúrgica, Expresión Gráfica en la Ingeniería,  
Ingeniería Cartográfica, Geodesia y  
Fotogrametría, Ingeniería Mecánica e Ingeniería  
de los Procesos de Fabricación

**Valladolid, Julio de 2020.**



# Resumen

En este proyecto se abordará el diseño y fabricación de un dedo protésico que incluya un sensor de fuerza basándonos en tecnología de impresión 3D, centrándose en un coste reducido y simplicidad de funcionamiento.

En primer lugar, se analizarán las posibilidades de la impresión 3D en sus distintas variantes, así como la anatomía y movimientos de un dedo humano evaluando también distintas opciones comerciales disponibles.

Una vez completada la primera etapa se evaluarán distintos sensores que puedan adaptarse a las necesidades deseadas, calibrando cada uno y analizando sus capacidades para elegir el adecuado.

El proceso de diseño se realizará mediante un programa CAD, adaptándose al sensor elegido y a la anatomía y movimientos de un dedo. Tras esto se realizará un estudio para averiguar las capacidades del sensor una vez montado y en posición de funcionamiento.

Para terminar, se hará un estudio económico detallando los costes de fabricación. También se detallarán conclusiones y líneas futuras.

## **PALABRAS CLAVE:**

Impresión 3D, Dedo protésico, Sensor, Fuerza, Calibración.

# Abstract

On this project the design and manufacturing of a sensorized prosthetic finger using 3D printing technology will be approached, focusing on a reduced cost and an easy functioning.

First of all, the capabilities of 3D printing technology and its variants will be evaluated, as well as the anatomy and movement of a human finger. Several commercial options will be considered too.

When the first stage is completed, several force sensors that fit the requirements will be evaluated and calibrated, analyzing their performance to choose an appropriate one.

The design process will be done using a CAD software, adapted to the chosen sensor and to the anatomy and movement of a finger. After this, a research will be carried out to analyze the capabilities of the sensor when mounted and in working position.

To conclude, an economic study will be made, focusing on manufacturing cost. Conclusions and future lines will be detailed too.

## **KEYWORDS:**

3D printing, Prosthetic finger, Sensor, Force, Calibration.

# Índice de figuras

Las figuras no referenciadas son de elaboración propia.

Figura 1.- Prótesis activa (superior) y prótesis estética (inferior).....	1
Figura 2.- Máquina SLA-1, primera impresora 3D comercializada por 3D Systems <sup>[8]</sup> .....	5
Figura 3.- Esquema de la máquina de impresión en 3D por FDM presentada por Scott Crump <sup>[11]</sup> .....	5
Figura 4.- Mandíbula impresa a partir de polvo de titanio <sup>[15]</sup> .....	6
Figura 5.- Procesos de fabricación aditiva clasificados según el material base.....	7
Figura 6.- Esquema de fabricación por FDM/FFF <sup>[17]</sup> .....	8
Figura 7.- Esquema de funcionamiento de una impresora 3D de tecnología SLA <sup>[18]</sup> .....	9
Figura 8.- Esquema de impresión por procesamiento de luz digital <sup>[17]</sup> .....	10
Figura 9.- Funcionamiento del método de impresión SLM <sup>[20]</sup> .....	11
Figura 10.- Esquema de la tecnología por haz de electrones <sup>[17]</sup> .....	12
Figura 11.- Esquema de los huesos de la mano <sup>[32]</sup> .....	27
Figura 12.- Localización del músculo palmar corto <sup>[32]</sup> .....	28
Figura 13.- Tendones, músculos y ligamentos que intervienen en el movimiento del dedo <sup>[32]</sup> .....	30
Figura 14.- Movimientos de abducción y aducción <sup>[32]</sup> .....	31
Figura 15.- Movimiento de flexión y extensión <sup>[32]</sup> .....	32
Figura 16.- Prototipo HANDi Hand <sup>[33]</sup> .....	32
Figura 17.- Brunel Hand ya ensamblada <sup>[35]</sup> .....	33
Figura 18.- Partial Hand Solutions TITAN Full <sup>[50]</sup> .....	34
Figura 19.- Naked Prosthetics PIPDirver <sup>[51]</sup> .....	34
Figura 20.- Esquema de desarrollo del proyecto.....	36
Figura 21.- Sensor FSR 400 Short evaluado.....	37
Figura 22.- Dimensiones del sensor FSR400 Short <sup>[35]</sup> .....	38
Figura 23.- Esquema de montaje del sensor con una resistencia de 3K $\Omega$ .....	38
Figura 24.- Sensor SingleTact S8-100N evaluado.....	39
Figura 25.- Dimensiones del sensor SingleTact S8-100N <sup>[36]</sup> .....	40
Figura 26.- Chip electrónico sensor SingleTact S8-100N.....	40
Figura 27.- Dimensiones del sensor Tekscan A101 <sup>[38]</sup> .....	41
Figura 28.- Máquina de ensayos Mark-10 ES300.....	43
Figura 29.- Transductor de fuerza HBM U93.....	44
Figura 30.- Dimensiones del transductor de fuerza HBM U93 <sup>[41]</sup> .....	45

<i>Figura 31.- Acoples para colocar el sensor en el transductor de fuerza.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 32. - Acople y pulsador solidarios a la máquina de ensayos.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 33.- Tarjeta lectora NI USB-6000.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 34.- Tarjeta lectora NI-9237 y chasis NI cDAQ-9172.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 35.- Fuente de alimentación Velleman LABPS23023.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 36.- Programa para lectura de los datos provenientes del transductor de fuerza.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 37.- Programa para lectura de los datos provenientes del sensor.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 38.- Diseño CAD completo del dedo.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 39.- Diseño ensamblado de la falange proximal.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 40.- Pieza central de la falange proximal.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 41.- Almohadilla de la falange proximal.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 42.- Cubierta de la falange proximal.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 43.- Diseño ensamblado de la falange distal.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 44.- Pieza central de la falange distal.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 45.- Cubierta de la falange distal.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 46.- Parte inferior de la falange distal.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 47.- Almohadilla de la falange distal.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 48.- Pulsador que actuará sobre el sensor.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 49.- Ligamentos.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 50.- Impresora Anycubic i3 Mega-S.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 51.- PLA Blanco y negro BasicFil 175PLA1000.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 52. - TPU Smart Materials 3D SmartFil FLEX.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 53.- Colocación de las cubiertas en la bandeja de impresión.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 54.- Colocación de la falange proximal en la bandeja de impresión.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 55.- Colocación de la falange distal en la bandeja de impresión.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 56.- Colocación de la parte inferior de la falange distal en la bandeja de impresión.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 57.- Colocación de la parte inferior de la almohadilla de la falange proximal en la bandeja de impresión.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 58.- Colocación de la parte inferior de la almohadilla de la falange distal en la bandeja de impresión.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 59.- Colocación de la parte inferior de los ligamentos en la bandeja de impresión.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 60.- Colocación de la parte inferior del pulsador en la bandeja de impresión.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 61.- Piezas colocadas para ser imprimidas con PLA blanco (no se muestra el material soporte).....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 62.- Piezas colocadas para ser imprimidas con PLA negro (no se muestra el material soporte).....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 63.- Piezas colocadas para ser imprimidas con TPU.....</i>	<i>74</i>

<i>Figura 64.- Tornillo y tuerca usados para el montaje. Medida original (superior) y recortada (inferior).....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 65.- Muelle usados para el montaje.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 66.- Tuercas antes de ser colocadas en sendas falanges.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 67.- Colocación de los ligamentos (arriba) y el muelle de retroceso (abajo).....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 68.- Montaje del hilo accionador.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 69.- Montaje de la parte inferior de la falange distal.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 70.- Montaje del sensor.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 71.- Montaje de las cubiertas.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 72.- Pesas y útil utilizados para el ensayo.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 73.- Modelo CAD del útil para el ensayo.....</i>	<i>82</i>

# Índice de gráficas

Las gráficas no referenciadas son de elaboración propia.

<i>Gráfica 1.- Respuesta del sensor a diferentes resistencias asociadas<sup>[35]</sup>.....</i>	<i>39</i>
<i>Gráfica 2.- Respuesta del sensor FSR400 en función de la resistencia. Se detalla el método de aplicación de la carga<sup>[35]</sup>.....</i>	<i>42</i>
<i>Gráfica 3.- Respuesta ante una carga, calibrado y sin calibrar, del sensor SingleTact S8-100N<sup>[37]</sup>.....</i>	<i>43</i>
<i>Gráfica 4.- Gráfica de calibración del sensor FSR400 Short. ....</i>	<i>51</i>
<i>Gráfica 5.- Gráfica de histéresis del sensor FSR400 Short.....</i>	<i>53</i>
<i>Gráfica 6.- Gráfica de calibración del sensor SingleTact S8-100N.....</i>	<i>55</i>
<i>Gráfica 7.- Gráfica de histéresis del sensor SingleTact S8-100N.....</i>	<i>56</i>
<i>Gráfica 8.- Diferencia entre los valores de voltaje de salida del sensor durante el ensayo y obtenidos durante la calibración.....</i>	<i>82</i>

# Índice de tablas

Las tablas no referenciadas son de elaboración propia.

<i>Tabla 1.- Datos para la calibración del sensor resistivo FSR400 Short .....</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 2.- Datos de histéresis del sensor resistivo FSR400 Short.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 3.- Datos para la calibración del sensor capacitivo SingleTact S8-100N.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 4.- Datos de histéresis del sensor SingleTact S8-100N.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 5.- Comparativa entre el sensor FSR400 y SingleTact S8-100N.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 6.- Datos técnicos de la impresora Anycubic i3 Mega-S<sup>[47]</sup>.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 7.- Características técnicas del TPU utilizado<sup>[46]</sup>.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 8.- Diferentes parámetros utilizados en la impresión con ambos materiales.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 9.- Cantidad de material utilizado y tiempo empleado para la impresión de las cubiertas.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 10.- Cantidad de material utilizado y tiempo empleado para la impresión de la falange proximal.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 11.- Cantidad de material utilizado y tiempo empleado para la impresión de la falange dista l.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 12.- Cantidad de material utilizado y tiempo empleado para la impresión de parte inferior de la falange dista.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 13.- Cantidad de material utilizado y tiempo empleado para la impresión de la almohadilla de la falange proximal.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 14.- Cantidad de material utilizado y tiempo empleado para la impresión de la almohadilla de la falange distal.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 15.- Cantidad de material utilizado y tiempo empleado para la impresión los ligamentos.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 16.- Cantidad de material utilizado y tiempo empleado para la impresión del pulsador.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 17.- Cantidad de material utilizado y tiempo empleado para la impresión completa del dedo.....</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 18.- Valores de salida de voltaje para el caso de calibración (naranja), montado en el dedo (azul) y porcentaje de diferencia entre ambas (verde).....</i>	<i>82</i>
<i>Tabla 19.- Costes directos totales.....</i>	<i>87</i>

# Índice

<b>1.- Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1.- Justificación.....	2
1.2.- Objetivos.....	3
<b>2.- Estado del arte .....</b>	<b>4</b>
2.1.- Impresión 3D.....	4
2.1.1.- Historia de la impresión 3D.....	4
2.1.2.- Métodos de impresión 3D.....	7
2.1.2.1.- Modelado por deposición fundida.....	7
2.1.2.2.- Fabricación de objetos por laminación.....	8
2.1.2.3.- Estereolitografía.....	9
2.1.2.4.- Procesamiento de luz digital.....	9
2.1.2.5.- Material jetting.....	10
2.1.2.6.- Tecnologías láser a partir de polvo.....	11
2.1.2.7.- Tecnologías de electrones a partir de polvo.....	11
2.1.3.- Materiales para impresión 3D.....	12
2.1.3.1.- Materiales usados en el método FDM/FFF.....	12
PLA.....	13
PET-G.....	14
PVA.....	14
Nylon.....	14
TPU.....	15
ABS.....	15
Materiales compuestos.....	16
2.1.3.2.- Materiales usados en el método de laminación.....	16
2.1.3.3.- Materiales usados en estereolitografía.....	16
Precursores.....	16
Fotoiniciadores.....	17
Absorbentes.....	17

Aditivos.....	17
Resinas rellenas.....	17
2.1.3.4.- Materiales usados en procesado digital de luz.....	18
2.1.3.5.- Materiales usados en Material Jetting.....	18
2.1.3.6.- Materiales usados en fusión láser.....	19
Polímeros.....	19
Metales.....	19
Cerámicos.....	19
2.1.3.7.- Materiales usados en tecnología de electrones.....	20
2.1.4.- Parámetros fundamentales en impresión FDM/FFF.....	20
2.1.4.1.- Altura de capa.....	20
2.1.4.2.- Velocidad de impresión.....	21
2.1.4.3.- Temperatura de impresión.....	21
2.1.4.4.- Relleno.....	21
2.1.4.5.- Espesor de pared.....	21
2.1.4.6.- Otros parámetros de interés.....	22
Temperatura de la cama de impresión.....	22
Temperatura de la cámara de impresión.....	22
Mecanismos de adherencia y soporte... ..	22
2.2.- Sensores de fuerza.....	22
2.2.1.- Historia y evolución de los sensores.....	22
2.2.2.- Tipos de sensores de fuerza.....	23
2.2.2.1.- Sensores resistivos y piezoresistivos.....	23
2.2.2.2.- Sensores capacitivos.....	24
2.2.2.3.- Sensores piezoeléctricos.....	24
2.2.3.- Ventajas y desventajas de cada tipo de sensor.....	25
2.3.- Estudio morfológico y cinemático del dedo humano.....	26
2.3.1.- Anatomía del dedo humano.....	26
2.3.1.1.- Huesos.....	26
2.3.1.2.- Articulaciones.....	27
2.3.1.3.- Músculos.....	28

2.3.1.4.- Tendones y ligamentos.....	29
2.3.1.4.- Venas, arterias y nervios.....	30
2.3.2.- Movimientos del dedo humano.....	30
2.4.- Estudio de mercado de dedos fabricados en impresión 3D.....	32
2.4.1.- HANDi Hand.....	32
2.4.2.- DLR / HIT Hand .....	32
2.4.3.- Brunel Hand.....	33
2.4.4.- Partial Hand Solutions TITAN .....	33
2.4.5.- Naked Prosthetics PIPDriver.....	34
2.5.- Metodología.....	35
<b>3.- Estudio, calibración y elección de los sensores.....</b>	<b>37</b>
3.1.- Descripción de los sensores.....	37
3.1.1.- Interlink Electronics FSR400.....	37
3.1.2.- SingleTact S8-100N.....	39
3.1.3.- Tekscan FlexiForce A101.....	41
3.2.- Desarrollo de un método de calibración .....	41
3.2.1.- Descripción del método.....	41
3.2.1.1.- Interlink Electronics FSR400.....	42
3.2.1.2 SingleTact S8-100N.....	42
3.2.2.- Descripción de los útiles de calibración.....	43
3.2.2.1.- Máquina de ensayos Mark-10 ES30.....	43
3.2.2.2.- Transductor de fuerza HBM U93.....	44
3.2.2.3.- Útiles y acoples para el ensayo.....	45
3.2.2.4.- Electrónica para la adquisición de datos.....	45
3.2.2.5.- Fuente de alimentación.....	47
3.2.3.- Programas para la adquisición de datos.....	48
3.3.- Calibración.....	49
3.3.1.- Sensor resistivo FSR400 Short.....	49
3.3.2.- Sensor capacitivo SingleTact S8-100N.....	54
3.4.- Selección.....	57
<b>4.- Diseño y fabricación.....</b>	<b>58</b>

4.1.- Diseño de los componentes.....	58
4.1.1.- Falange proximal.....	59
4.1.2.- Falange distal.....	61
4.1.3.- Ligamentos.....	64
4.2.- Fabricación.....	64
4.2.1.- Descripción de la impresora.....	64
4.2.2.- Descripción de los materiales.....	65
4.2.2.1.- BasicFil Filament PLA 175PLA1000.....	65
4.2.2.2.- Smart Materials 3D SmartFil Flex TPU.....	66
4.2.3.- Parámetros de fabricación.....	67
4.2.4.- Postprocesado.....	74
4.2.5.- Montaje.....	74
<b>5.- Ensayos y comprobaciones.....</b>	<b>81</b>
5.1.- Descripción del ensayo.....	81
5.2.- Resultados del ensayo.....	82
<b>6.- Costes.....</b>	<b>84</b>
6.1.- Costes directos.....	84
6.1.1.- Costes de materiales y sensor.....	84
6.1.2.- Costes auxiliares.....	84
6.1.3.- Costes de equipos.....	84
6.1.4.- Costes de mano de obra.....	87
6.1.5.- Costes directos totales.....	87
6.2.- Costes indirectos.....	88
6.2.1.- Costes derivados del consumo eléctrico.....	88
6.3.- Costes totales.....	88
<b>7- Conclusiones y líneas futuras.....</b>	<b>89</b>
7.1.- Conclusiones generales.....	89
7.2.- Conclusiones sobre materiales.....	89
7.3.- Conclusiones sobre sensores.....	90
7.4.- Líneas futuras.....	90
<b>8- Bibliografía.....</b>	<b>93</b>



# 1.- Introducción

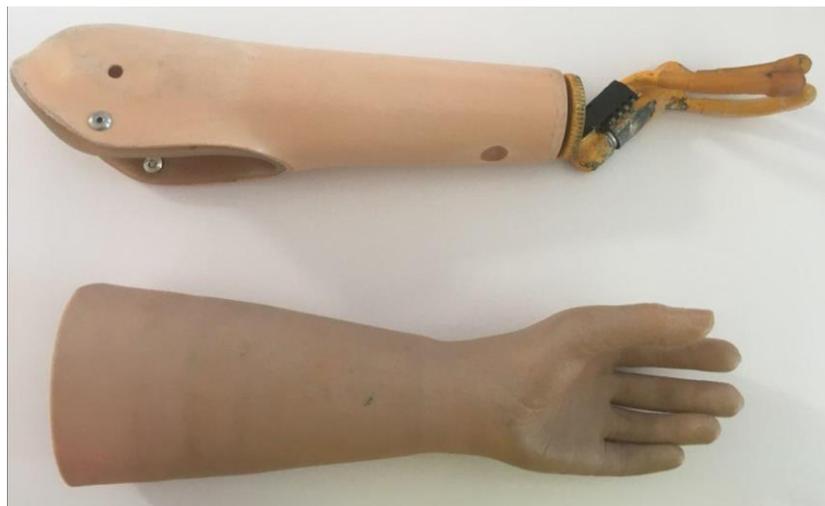
Una de las misiones más importantes de la tecnología es la de hacer la vida más fácil a la gente, como hemos podido comprobar en los últimos años con la aparición de infinidad de aparatos electrónicos que hacen que nuestra vida sea más sencilla. Sin embargo, hay parte de la población que depende de la tecnología para realizar las operaciones más básicas del día a día. Acciones como moverse o coger objetos requieren de soluciones tecnológicas para ser llevadas a cabo.

Dentro del grupo de personas que requieren de este tipo de soluciones son las que han perdido alguno de sus miembros por cualquier circunstancia o las que nacieron sin ellos. Estos necesitan de prótesis adecuadas a sus necesidades y al estado en el que se encuentre la zona donde irá colocada la prótesis.

En este campo destaca la tecnología de impresión 3D y el escaneado de objetos, ya que permiten fabricar con un coste relativamente bajo y adecuado al destinatario, una prótesis personalizada.

Dado este caso, podemos optar por diseñar una prótesis pasiva, cuya labor principal es la de cumplir funciones estéticas, pudiendo además realizar operaciones sencillas, tales como sujetar objetos con ayuda del otro miembro, ya que sería necesario colocarlos en una posición adecuada. Sin embargo, se va a optar por una prótesis activa funcional que permita hacer la operación de pinza, básica para la manipulación de objetos, que cumpliría los requisitos técnicos, y añadiendo a mayores unos requisitos estéticos. Dentro de dicha mano protésica, este proyecto se centrará en el diseño y fabricación de uno de los dedos.

Estos casos son los tipos más comunes de prótesis<sup>[1]</sup>.



*Figura 1.- Prótesis activa (superior) y prótesis estética (inferior).*

En nuestro caso vamos a optar por una prótesis funcional. Estas prótesis, como se ha comentado con anterioridad, recurren a varios electrodos colocados en zonas específicas del brazo, en contacto con la piel, registrando los movimientos

musculares voluntarios y transformándolos en movimiento mediante diversos tipos de accionadores, como, por ejemplo, un motor eléctrico alimentado por una batería. Este tipo de prótesis se denominan mioeléctricas<sup>[2]</sup>.

Dado que la prótesis de mano debe de ser funcional, se requieren de un conjunto de dedos, al menos dos, que puedan hacer la función de pinza, que tengan un movimiento capaz de sujetar o manipular objetos. Es en este punto donde se precisa de un método de regulación de dicho movimiento, ya que una fuerza excesiva puede hacer que se dañe el objeto que se está manipulando en ese instante.

## **1.1.- Justificación**

El presente proyecto consiste en la fabricación, montaje y prueba de un prototipo de dedo protésico sensorizado que irá posteriormente colocado en una prótesis de mano, que a su vez irá colocada en una prótesis de brazo, basándonos en tecnología de impresión 3D.

En los últimos años se han producido numerosos avances en la tecnología de impresión en 3D, sobre todo aplicados al mundo de las prótesis y dispositivos médicos, pues permiten, por un coste muy pequeño y con cierta rapidez, sustituir total o parcialmente distintas piezas, así como personalizarlas, si estamos hablando de prótesis, o fabricar distintos elementos necesarios para el funcionamiento de aparatos médicos indispensables para la atención de pacientes en un corto espacio de tiempo, un tiempo crucial para según que enfermedad o patología clínica.

Anteriormente se ha mencionado la necesidad de regular la fuerza con la que actúa el dedo, lo que implica que será necesario acoplar un sistema que pueda medir la fuerza de agarre para posteriormente tratar la señal de salida y poder operar con ella.

## **1.2.- Objetivos**

El objetivo es fabricar un dedo usando tecnología de impresión 3D, utilizando varios materiales e incluyendo un sensor de fuerza que actúe cuando se manipulen objetos.

Para tal efecto se va a diseñar el dedo dividido en distintas partes, adecuando los procedimientos y parámetros para conseguir una fabricación lo mejor posible.

Como objetivos se plantean los siguientes:

1.- Diseñar la prótesis de forma que sea posible su fabricación con las máquinas disponibles.

2.- Estudiar los diferentes sensores de fuerza disponibles y escoger el que mejor se adecúe a nuestras necesidades.

3.- Evaluar los errores de medición de los sensores cuando están equipados en el dedo, comparando el valor obtenido en el ensayo con el teórico obtenido durante la calibración del sensor.

## 2.- Estado del Arte

### 2.1.- Impresión 3D

Cuando se hace alusión a la Impresión 3D actualmente se hace de una forma muy poco concreta, ya que, en su estado actual, esta tecnología abarca muy diversos tipos de métodos de fabricación, muy diferentes entre si.

En el presente proyecto trabajaremos con el método FDM (*Fused Deposition Modeling*, Modelado por Deposición Fundida) con diversos materiales para la fabricación de un dedo destinado a colocarse en una prótesis de mano funcional. No obstante, es de interés para su desarrollo exponer la historia y evolución de esta tecnología, así como la variedad de materiales empleados, no solo para el caso que nos atañe, sino de un punto de vista general, y los parámetros que tenemos que tener en cuenta a la hora de imprimir cualquier objeto.

#### 2.1.1.- Historia y evolución de la impresión 3D

Los primeros conceptos sobre impresión 3D surgieron en la década de 1970. El químico británico David E. H. Jones, bajo el sobrenombre de *Daedalus*, planteó la posibilidad de la existencia de monómeros líquidos que pudiesen ser polimerizados y solidificados mediante el uso de luz ultravioleta. Su concepto consistía en un tanque relleno de dicho monómero líquido y rodeado de espejos. Mediante un haz de luz, haciéndolo incidir sobre los espejos, crearía un entramado de fibras que, más tarde, se convertiría en el sólido final<sup>[3]</sup>.

Sin embargo, no fue hasta diez años después cuando, bajo el nombre de Rapid Prototyping, RP por sus siglas en inglés, cuando apareció la primera patente de esta tecnología basada en el endurecimiento de fotopolímeros mediante luz ultravioleta, de la mano del Dr. Hideo Kodama, perteneciente al Instituto de Investigación Municipal de Nagoya, Japón. Sin embargo la patente completa no fue registrada antes de periodo exigido de un año desde la presentación, quedando sin efecto<sup>[4]</sup>.

Varios años después el testigo fue recogido por varios ingenieros que disputaron su particular carrera para patentar la tecnología conocida como estereolitografía. Por una parte estaba el grupo de ingenieros franceses formado por Jean Claude André, Alain Le Méhauté y Olivier de Witte, por entonces trabajando para *Compagnie industrielle des lasers*, que presentaron una patente en julio de 1984<sup>[5]</sup>, pero los directivos de la empresa no vieron potencial comercial en la idea y la descartaron. Paralelamente a esto, Charles Hull, que anteriormente había desarrollado un método para endurecer el recubrimiento de tableros con luz ultravioleta<sup>[6]</sup>, inscribió su patente en el Oficina de Patentes de Estados Unidos<sup>[7]</sup> tres semanas después de que lo hiciesen los franceses, pese a tener listo un prototipo de la máquina construido con anterioridad. A raíz de esta patente, fundó la empresa

3D Systems Corporation que desarrollará la primera máquina de impresión aditiva comercial bajo el nombre de SLA-1<sup>[8]</sup>.



Figura 2.- Máquina SLA-1, primera impresora 3D comercializada por 3D Systems<sup>[8]</sup>

La tecnología SLA estuvo reservada a la pequeña escala hasta que Hans J. Langer, en 1989, vio el potencial industrial que podía tener. Así fundó EOS GmbH, con el objetivo de implantarla a una escala mucho más grande. Su primer cliente fue BMW, cuyas expectativas quedaron sobrepasadas de tal manera con la máquina presentada que el pedido inicial de una máquina se amplió a cinco, asegurándose también pedidos de multitud de empresas del sector automovilístico<sup>[9]</sup>.

El campo de la impresión 3D siguió avanzando durante esos años, con la invención de la tecnología del Sinterizado Selectivo por Láser (*Selective Laser Sintering*, SLS) a manos de Carl R. Deckard durante su trabajo en la Universidad de Texas en Austin, Estados Unidos. La patente<sup>[10]</sup>, completada en 1989, exponía el método para la impresión por adición a partir de polvo.

Fue también en 1989 cuando Scott Crump sentó las bases de otra forma de impresión 3D<sup>[11]</sup>, quizás la más popular en la actualidad: el Modelado por Deposición Fundida (*Fused Deposition Modeling*, FDM), para fundar Stratasys Ltd, que hoy en día es una de las empresas más importantes del mundo relacionadas con impresión 3D.

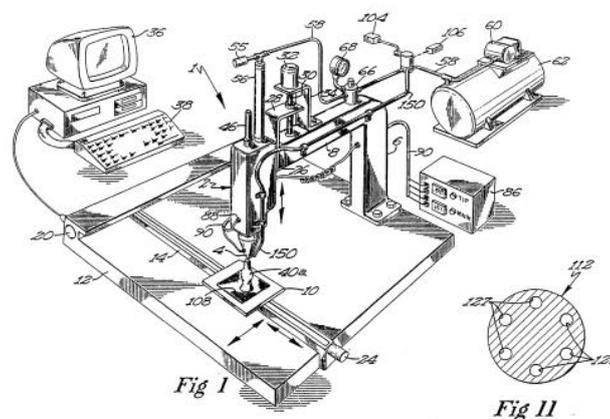


Figura 3.- Esquema de la máquina de impresión en 3D por FDM presentada por Scott Crump<sup>[11]</sup>.

Todo lo relacionado con la tecnología de impresión 3D siguió evolucionando los siguientes años con la invención de distintos métodos, como el Método de Fusión Selectiva (*Selective Laser Melting*, SLM) particularizado para materiales metálicos, o la Fabricación Mediante Laminado de Objetos (*Laminated Object Manufacturing*, LOM), entre otras<sup>[4]</sup>.

No fue hasta 1999 cuando la impresión 3D se mostró realmente útil en el campo de la medicina. Un equipo de médicos del Instituto de Medicina Regenerativa de la Universidad de Wake Forest, en Winston-Salem, Estados Unidos, liderados por el Dr. Anthony Atala, especializado en el campo de la urología, consiguió reproducir vejigas mediante esta tecnología, siendo estas implantadas en pacientes del Hospital Infantil de Boston con espina bífida que candidatos a un aumento de la capacidad de la vejiga mediante cistoplastia. El método consistió en la creación de una vejiga fabricada con un composite formado por colágeno y ácido poliglicólico, biodegradable, en la cual se colocaron células de los pacientes hasta reproducir la forma del órgano. El estudio no fue publicado hasta terminar el seguimiento de los pacientes y comprobar que no había complicaciones, en 2006<sup>[12]</sup>.

Fue también el Dr. Atala el líder del equipo encargado, en la misma universidad, de desarrollar e imprimir un riñón en miniatura capaz de producir una sustancia similar a la orina en el año 2003<sup>[13]</sup>.

En el campo de la medicina los avances siguieron ocurriendo hasta la creación, en 2008, de la primera prótesis útil impresa. Esto significó el comienzo de la difusión de esta tecnología en los medios, ya que reemplazaba completamente una pierna, incluyendo todas sus partes, sin necesidad de montaje posterior. También en 2008 la empresa Stratasys presentó un material revolucionario, bajo el nombre comercial de ABS-M30i, el primer material biocompatible para impresión 3D por Modelado por Deposición Fundida<sup>[14]</sup>. Los progresos continuaron, ya que en 2012 LayerWise, en Bélgica, creó a partir de polvo de titanio, la primera mandíbula impresa, que fue implantada en una mujer de 83 años aquejada de una infección crónica en los huesos<sup>[15]</sup>.



Figura 4.- Mandíbula impresa a partir de polvo de titanio<sup>[15]</sup>.

Sin embargo, aunque en 2004 se pusieron los cimientos para su generalización, con el proyecto RepRap de código abierto, consistente en que una impresora pudiese “clonarse” y acabar creando un modelo igual, fue al año siguiente,

en 2009, cuando la impresión 3D empezó a generalizarse debido a que las patentes de la tecnología FDM se convirtieron en dominio público, abriéndose así a la aparición de las primeras impresoras para el público general [14].

Desde entonces el mundo de la impresión 3D ha alcanzado una fase de madurez, ampliando su implementación en el mundo industrial, llegando incluso a fabricarse coches con esta tecnología, en el mundo de la hostelería, con impresoras capaces de confeccionar alimentos con diversas formas a partir de chocolate, entre otras materias, o en el mundo de la investigación espacial, con el lanzamiento por parte de la NASA en 2014 de la primera impresora capaz de imprimir objetos fuera de la gravedad terrestre, conocida como Zero-G, con la intención de fabricar repuestos para la Estación Espacial Internacional, eliminando la necesidad de esperar la llegada de una misión de carga para poder sustituir las piezas necesarias[16].

### 2.1.2.- Métodos de impresión 3D.

Como se ha comentado con anterioridad, durante la evolución de la impresión 3D se han desarrollado diversos métodos para la fabricación de objetos mediante esta técnica. Los más importantes aparecen clasificados en el siguiente esquema según el estado del material de partida.

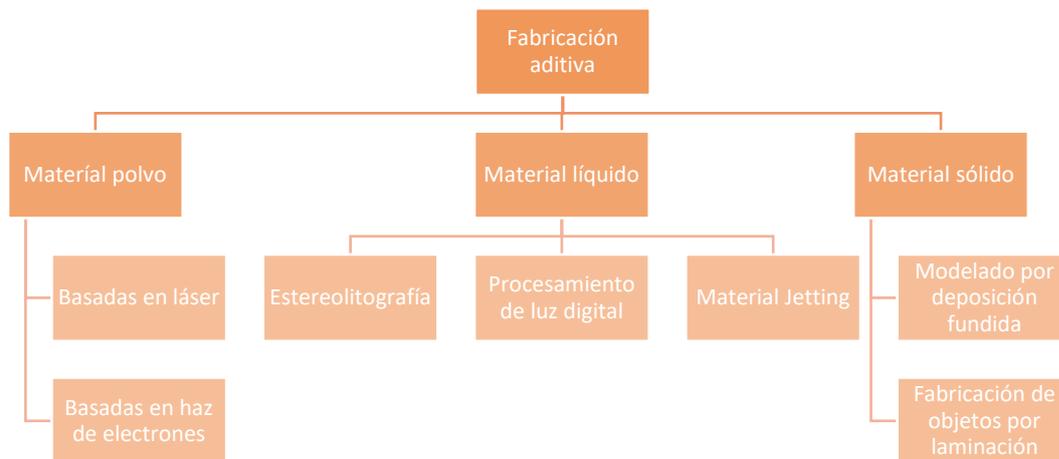


Figura 5.- Procesos de fabricación aditiva clasificados según el material base.

Primero de todo, para poder imprimir un objeto a partir de cualquiera de estos procesos necesitamos partir de un archivo CAD, adecuado al lenguaje que use la máquina en la cual queremos fabricar nuestro objeto.

#### 2.1.2.1.- Modelado por Deposición Fundida

Este proceso, más conocido por sus siglas en inglés como FDM, o FFF (Fused Filament Fabrication, Fabricación por Filamento Fundido) por temas de propiedad intelectual, es el más popular y común dentro de la Impresión 3D.

La fabricación con este método se basa en la alimentación de un extrusor que se encuentra a una temperatura que supere la de transición vítrea del material con el que se trabaje, a partir de una bobina de filamento. Este extrusor se mueve en un plano x-y depositando el material con la forma adecuada que viene dada en el archivo generado a partir del CAD. A su vez, la plataforma donde se va depositando varía la altura para generar distintas capas hasta obtener la pieza completa.

Su principio de funcionamiento se basa en las propiedades de los termoplásticos. Esto es, la capacidad de un material de que, al ser calentado este se funde, volviéndose flexible y deformable, y al volver a temperatura ambiente se endurece, recuperando parte de las propiedades de partida.

En el mercado existen impresoras que disponen de varios extrusores. Esto nos permite imprimir en diferentes materiales, con la posibilidad de crear piezas rellenas o soportes que se necesiten en caso de que la geometría a imprimir sea muy compleja<sup>[17]</sup>.

El postprocesado de los objetos en la mayoría de los casos se reduce a eliminar los soportes, cosa que se puede hacer manualmente o tratando la pieza con sustancias que disuelvan el material soporte. No obstante, dado que el material se coloca en forma de hilo, en las superficies quedarían surcos, que, aunque de pequeño tamaño, si se requiere un buen acabado sería necesario lijar o rellenar estos surcos, aunque esto no añadiría un tiempo excesivo al proceso de fabricación.

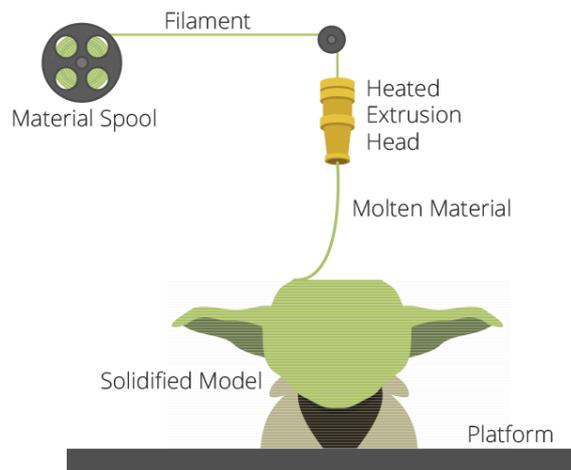


Figura 6.- Esquema de fabricación por FDM/FFF<sup>[17]</sup>.

### 2.1.2.2.- Fabricación de objetos por laminación.

En este caso la fabricación se realiza partiendo de láminas de material, generalmente papel, cartón o madera, aunque también se ha comenzado a usar plásticos.

Según su principio de funcionamiento primero se parte de rollos de material. Unos rodillos alimentan, partiendo de estos rollos, a la máquina, que está equipada con un dispositivo de corte destinado a cortar láminas de material con la forma correspondiente a la capa que se ha de colocar. A su vez, un cabezal coloca un

adhesivo estratégicamente según las directrices del modelo CAD que se pretende fabricar. Una vez colocada una capa, la máquina aplica presión y calor con el objetivo de fijar bien la nueva parte de la pieza<sup>[17]</sup>.

### 2.1.2.3.- Estereolitografía.

También conocido como SLA, fue el primer sistema desarrollado y comercializado de impresión 3D. El material de partida es un fotopolímero en forma de resina líquida.

Para poder fabricar la pieza deseada colocamos la resina líquida en un depósito en cuyo interior hay una plataforma móvil que puede subir y bajar. Una luz láser incide sobre esta resina para crear una capa por el endurecimiento del fotopolímero. Una vez completada, la plataforma se desplaza en el eje vertical, para crear así la siguiente capa.

Muchas de las piezas impresas por este método necesitan un postprocesado, bien porque se ha necesitado imprimir soportes para permitir geometrías complejas o porque, como ocurre en la inmensa mayoría de las piezas impresas por este método, se necesita que el material adquiera más dureza, por lo que se introducen en una especie de horno que la somete a una exposición a luz ultravioleta durante un tiempo predefinido hasta alcanzar la consistencia deseada.

Esta técnica nos produce objetos con buen acabado superficial, pero la necesidad de postprocesado y la tendencia de los materiales a aumentar su fragilidad con el paso del tiempo limitan su uso<sup>[17]</sup>.

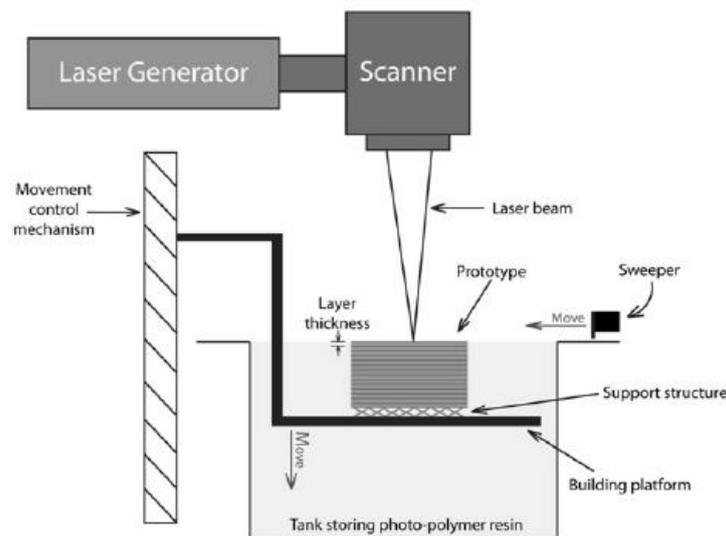


Figura 7.- Esquema de funcionamiento de una impresora 3D de tecnología SLA<sup>[18]</sup>.

### 2.1.2.4.- Procesamiento de luz digital

Este sistema, conocido también como DLP por sus siglas en inglés, es muy similar a la estereolitografía, salvo por la fuente usada para generar la luz, pues se sustituye el láser por una fuente emisora de luz más convencional, como sería por ejemplo la emitida por un arco eléctrico.

La luz incide sobre un espejo deformable o una pantalla de cristal líquido, aplicándose sobre toda la superficie del depósito de resina líquida a la vez, causando que la impresión sea más rápida que en el caso de la estereolitografía.

Pese a que el postprocesado con respecto a los soportes necesarios y la necesidad de curado, también presenta más ventajas respecto a la estereolitografía, es que el depósito de resina debe ser pequeño, lo que se traduce en menos residuos y un mejor coste de funcionamiento<sup>[17]</sup>.

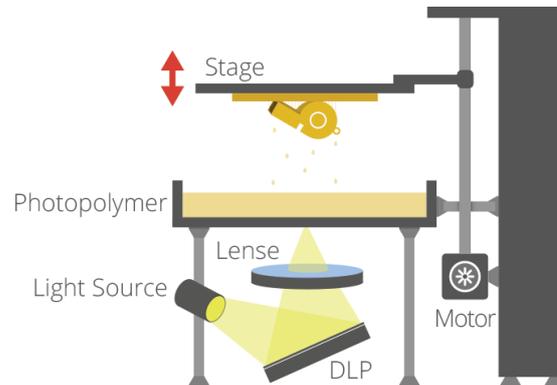


Figura 8.- Esquema de impresión por procesamiento de luz digital<sup>[17]</sup>.

#### 2.1.2.5.- Material Jetting

Este método de impresión parte del principio usado en las impresoras de inyección de tinta convencionales. Partiendo de un cabezal se deposita la resina líquida, aunque se pueden usar otros materiales como cera de fundición, capa por capa para construir nuestro objeto deseado.

Gracias a esta tecnología, debido a que las alturas de capa pueden ser muy pequeñas, se logra una precisión capaz de competir con la estereolitografía, ya que también nos proporciona una superficie lisa. En caso de necesitar soporte existe la posibilidad de usar materiales solubles, lo que reduciría el postprocesado y garantizaría su total eliminación sin necesidad de operaciones manuales, aunque seguiría siendo necesario un curado posterior a la fabricación de la pieza<sup>[19]</sup>.

#### 2.1.2.6.- Tecnologías láser a partir de polvo.

En este apartado tenemos que diferenciar varias tecnologías; las que sinterizan el polvo, como la sinterización selectiva por láser (*Selective laser sintering*, SLS) o la sinterización directa por láser de metal (*Direct Metal Laser Sintering*, DMLS) y las que lo funden para obtener la pieza deseada, como la fusión selectiva por láser (*Selective Laser Melting*, SLM).

Los procesos de sinterización se caracterizan porque no funden el material, sino que lo calientan hasta un punto en el que las partículas de polvo se fusionan creando la pieza. En este caso un láser calienta el polvo para formar capas, que no quedarían de forma homogénea pues no se llega a fundir el material. Esta particularidad nos permite controlar la porosidad que se obtendrá. Las dos tecnologías que proliferan en este campo son la SLS y DMLS, cuya diferencia radica en la naturaleza del polvo de partida, siendo para SLS materiales plásticos, cerámicos o vidrios, mientras que el polvo usado en DMLS es una aleación metálica.

Los procesos de fusión, como el SLM, como su propio nombre indica, funden el material completamente, por lo que se consigue una capa homogénea.

El funcionamiento consiste en un láser que incide sobre el polvo, calentando la zona donde incide y sinterizando o fusionándolo. Puesto que se llega a temperaturas muy altas, es necesario controlar el ambiente donde se realiza, por lo que es primordial el uso de una cámara que aisle el proceso del exterior.

También, al ser el material origen un polvo, este actúa de soporte, eliminando la necesidad de añadirlos a la pieza y el polvo sobrante es reutilizable. Por el contrario, y debido a las altas temperaturas, es necesario el reposo de la pieza fabricada para su enfriamiento<sup>[17]</sup>.

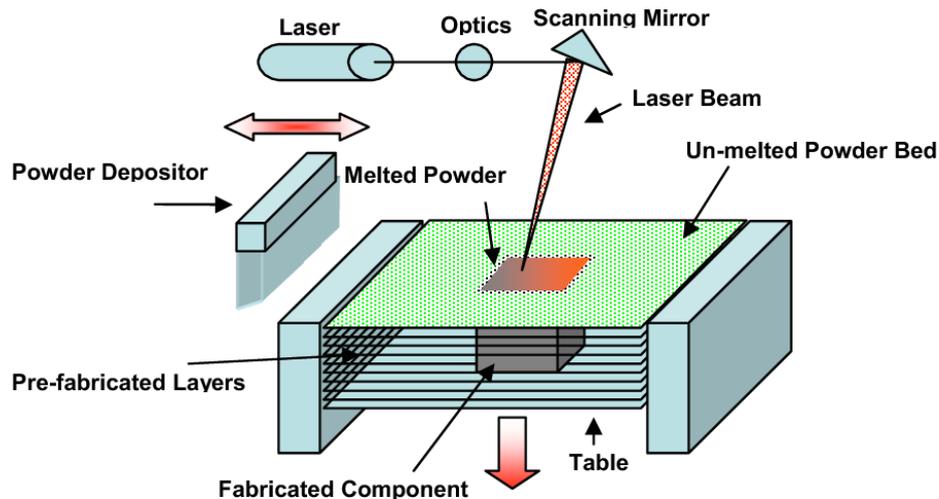


Figura 9.- Funcionamiento del método de impresión SLM<sup>[20]</sup>

### 2.1.2.7.- Tecnologías de electrones a partir de polvo.

La principal diferencia con respecto a las basadas en láser es la fuente de calor, que en este caso se trata de un haz de electrones que nos obliga a trabajar en condiciones de vacío.

Esta tecnología, también conocida como EBM, nos permite crear piezas precisas de alta densidad en multitud de aleaciones metálicas, lo que la ha hecho popular en el campo de las aplicaciones médicas como implantes, o en la industria aeroespacial<sup>[17]</sup>.



- 1.- Alimentación de alto voltaje
- 2.- Cátodo incandescente
- 3.- Lente
- 4.- Ánodo primario
- 5.- Haz de electrones
- 6.- Lente de enfoque
- 7.- Bobina de desviación
- 8.- Punto de soldadura
- 9.- Pieza a fabricar
- 10.- Cámara de vacío

Figura 10.- Esquema de la tecnología por haz de electrones<sup>[17]</sup>.

### 2.1.3.- Materiales para impresión 3D.

Como ya se ha visto, los diferentes procesos de impresión dependen del estado del material de partida, por lo tanto la composición, características y naturaleza de estos será distinta dependiendo de la tecnología a usar.

#### 2.1.3.1.- Materiales usados en el método FDM/FFF

Ya que este método consiste en extruir un material calentándolo que después será enfriado hace posible que cualquier material que fluya al aumentar su temperatura y se solidifique al disminuirla sea susceptible de ser usado, yendo más allá de los materiales plásticos, siendo posible imprimir objetos usando alimentos como el chocolate o ceras para moldeado<sup>[21]</sup>.

No obstante, los materiales más usados en la impresión por Modelado por Deposición Fundida son polímeros, que están formados por monómeros, y dentro de este grupo concreto los que se clasifican como termoplásticos, ya que estos, al contrario que el grupo de los termoestables que se degradan al subir su temperatura, funden y, al ser enfriados, solidifican.

Dentro de los termoplásticos tenemos que tener en cuenta la microestructura que presentan, pudiendo distinguirse entre amorfa y cristalina. La estructura amorfa se caracteriza por tener las cadenas de polímeros sin un orden preestablecido,

mientras que en la estructura cristalina dichas cadenas se encuentran ordenadas y alineadas. En la realidad, es muy difícil encontrar un polímero que sea completamente cristalino, por lo que presentarán zonas cristalinas combinadas con zonas amorfas.

El resultado final de la impresión dependerá en gran parte de las características del polímero que estamos imprimiendo, entre las que destacan la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), que es el punto en el que el material pasa de ser sólido a tener un estado gomoso, la temperatura de fusión ( $T_m$ ), en donde pasa a estado líquido, y el coeficiente de expansión térmica (CTE), que nos indica la variación de las medidas de la pieza con el cambio de temperatura. El coeficiente de expansión térmica y la temperatura de transición vítrea, combinados, nos arrojan información sobre el estrés térmico al que se somete a la pieza durante la fabricación, pudiendo afectar a la adhesión del material.

A nivel atómico, otra propiedad importante es la cantidad de enlaces polares que están presentes. Un enlace polar es el que se forma entre átomos que poseen diferentes electronegatividades, siendo su presencia, cuanto mayor sea, crucial en cuanto a la capacidad de absorción de humedad del material que causaría problemas durante la impresión o piezas defectuosas. Aún así, esta característica puede jugar a nuestro favor a la hora de crear soportes, puesto que, como tienden a disolverse en ciertos disolventes, puesto que se puede crear una estructura de apoyo en uno de estos polímeros que sea fácilmente quitada simplemente sumergiendo la pieza en un disolvente que no dañe el material principal<sup>[21]</sup>. No obstante, es importante mantener en una localización de ambiente controlado, todos los materiales, puesto que independientemente de sus propiedades, pueden acumular humedad que al calentar, se traduciría en vapor de agua que puede dañar la máquina de impresión.

#### - PLA

Denominado ácido poliláctico, es un polímero biodegradable bajo ciertas circunstancias ambientales, que se obtiene por fermentación de fuentes naturales como el maíz o la caña de azúcar.

Su estructura principal está formada por carbono y oxígeno, formando enlaces polares y una estructura semicristalina. De esta estructura “cuelga” un grupo metilo ( $-CH_3$ ), que aumenta su resistencia mientras lo hace más frágil. El hecho de tener enlaces polares, como se ha comentado, lo hace propenso a la absorción de humedad que podría aumentar su fragilidad.

La temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) se sitúa en torno a los  $65^\circ\text{C}$ , lo que hace que las piezas impresas con PLA no sean adecuadas para trabajar en ambientes calientes, pues a partir de ese punto perderían su rigidez. No obstante, y puesto que la temperatura de extrusión se sitúa en torno a los  $200^\circ\text{C}$ , esto le permite tener más tiempo para relajar tensiones internas según se enfría, reduciendo las deformaciones. Así no será necesario un ambiente controlado con una temperatura alta, ni tiene por qué ser extruido sobre una base caliente o con un adhesivo especial.

Otro de los puntos fuertes del PLA es que durante su fusión no emite ningún tipo de gas tóxico, por lo que se elimina la necesidad de tener un sistema de ventilación<sup>[21]</sup>.

#### - **PET-G**

El PET-G, nombre abreviado del polietileno tereftalato glicol, es el material más ampliamente usado en el campo de la impresión 3D por FDM/FFF. Se trata de un material con buena resistencia a los productos químicos y a rotura, que resiste de forma adecuada los impactos y al fuego.

Su obtención es a partir del PET, tereftalato de polietileno, que es un polímero muy presente en la fabricación de envases y fibras textiles, el cual se modifica químicamente mediante la agregación de ciclohexano dimetanol (CHDM) en lugar de etilenglicol. Esto nos dará una molécula más larga, lo que tiene efectos sobre la cristalinidad, ya que las moléculas no encajan con sus vecinas, causando una estructura amorfa. A consecuencia de esto, la temperatura de transición vítrea del PET-G es mejor que la del PET, manteniendo a la vez muchas de las propiedades que tiene el polímero de origen<sup>[22]</sup>.

En lo que respecta a su uso, es un material que apenas absorbe humedad, cosa que lo hace propenso a su uso en objetos destinados a contener líquidos o alimentos, siendo biocompatible. Además, al contrario que otros materiales, no desprende olores al usarse, con lo que no es necesario una ventilación. También, al ser un material muy común, se han desarrollado sistemas de reciclaje de PET-G, habiendo empresas especializadas en la fabricación de filamento procedente de residuos.

#### - **PVA**

Conocido como alcohol de polivinilo, el PVA es un material que se obtiene por hidrólisis del acetato de polivinilo, obteniendo como resultado un material completamente biodegradable, de un color blanquecino y soluble en agua.

El principal uso de este material en impresión 3D se da en piezas de geometrías complejas, que necesiten de soportes para su impresión, ya sea por la presencia de voladizos con un ángulo mayor de 45° o necesiten de cavidades interiores, debido a su solubilidad en agua, puesto que con la inmersión de la pieza en una cubeta con agua el soporte de PVA se disuelve con facilidad. Además, es posible usarlo con una amplia variedad de materiales, como PLA, PET-G o Nylon.

Es un material que destaca por ser resistente y flexible. Por el contrario, como se puede deducir de su solubilidad en agua, es un material que tiende a retener la humedad, lo que complica su almacenamiento, debiendo estar en ambientes con humedades relativas bajas<sup>[22]</sup>.

#### - **Nylon**

El nylon es un polímero que se obtiene a partir de la policondensación de las amidas, proceso del cual se obtiene un polímero termoplástico lineal con una estructura con un alto grado de cristalinidad.

Este polímero se caracteriza por tener una gran dureza, manteniendo una flexibilidad a flexión y rigidez a tensión. Además, su comportamiento frente al calor y al desgaste es muy bueno, con una adhesión entre sus capas muy fuerte.

Como inconvenientes, su uso en impresión 3D está limitado a máquinas capaces de aguantar la temperatura de impresión, superior a otros materiales y que hace que retenga tensiones térmicas de contracción durante las primeras capas de la impresión. También es necesario almacenarlo en un ambiente con humedad controlada, pues es propenso a retener humedad y el filamento debe ser deshumidificado previamente a su uso<sup>[21]</sup>.

#### - TPU

El poliuretano termoplástico, conocido como TPU, es un material elastómero formado por monómeros con amplias zonas apolares, lo que le confieren flexibilidad, y zonas polares que cristalizan. Como resultado tenemos un material que, a temperatura ambiente, es flexible y deformable, puesto que las zonas apolares deslizan entre ellas, pero que, al dejar de estar sometido a un esfuerzo, regresa a su posición inicial gracias a las zonas cristalinas.

Al ser un material elástico y que resiste abrasión y el ataque de ciertos disolventes, es ampliamente usado en impresión 3D, especialmente en piezas que requieran de estas propiedades<sup>[21]</sup>.

#### - ABS

El Acrilonitrilo Butadieno Estireno, como su propio nombre indica, es un polímero formado por tres componentes, acrilonitrilo, butadieno y estireno. Cada uno de estos aporta al material sus beneficios en diferentes propiedades, de forma que el acrilonitrilo le da resistencia a la degradación y al calor, el butadieno aporta dureza y el estireno le da rigidez.

Es un material principalmente usado en piezas que estén destinadas a aguantar en ambientes de temperatura extremos, debido a su tenacidad, dureza y rigidez, que lo hacen óptimo a temperaturas de varios grados bajo cero, donde otros materiales se volverían quebradizos y frágiles.

Sin embargo, el trabajo con este material es muy complicado y debe realizarse con sumo cuidado y tomando precauciones, puesto que, cuando se calienta, desprende vapores tóxicos de un fuerte olor que podrían afectar a la persona que lo manipule. Por esto es necesario que la impresión se lleve a cabo en un lugar bien ventilado. Otro de los problemas asociados a la impresión con ABS es la alta temperatura de transición vítrea que presenta, por lo que se retendrán tensiones térmicas durante el enfriado, pudiendo causar la contracción que se desprende de la cama de impresión o que la pieza se deforme, por lo que es necesario adecuar la impresión generando métodos de adhesión supletorios para la pieza, manteniendo la cama a una temperatura adecuada, usando una cámara térmica durante la impresión o aplicando un adhesivo previo al inicio de la impresión<sup>[21]</sup>.

### - **Materiales compuestos y avanzados.**

La constante evolución de la impresión 3D ha hecho posible que puedan surgir materiales compuestos capaces de ser usados en impresión por FDM/FFF, tanto destinados a mejorar las cualidades de una pieza como con una simple función estética.

Actualmente en el mercado es posible encontrar filamentos que combinan nylon con fibras de carbono, kevlar o vidrio, que superan considerablemente las propiedades de cualquier otro material convencional usado.

En cuando a materiales cuya función es meramente estética, se comercializan filamentos que combinan, por ejemplo, PLA con polvo de madera, e incluso se pueden encontrar impresoras a gran escala que usan hormigón para construir pequeños edificios.

#### **2.1.3.2.- Materiales usados en el método de laminación LOM.**

Con anterioridad se ha comentado que este proceso utiliza materiales como papel, cartón o madera. El más utilizado es el papel normal y corriente, folios como los que se pueden encontrar en cualquier oficina. Esto hace que, puesto que el papel se comercializa en una amplia gama de colores, se puedan obtener impresiones a color de una forma económica, que a su vez serán reciclables, pero que no serán duraderas y no tendrán el nivel de detalle que con otros materiales.

#### **2.1.3.3.- Materiales usados en estereolitografía o SLA.**

El método de estereolitografía se basa en usar resinas acrílicas que, cuando reciben un tipo de luz, endurecen. Estas resinas son una amalgama de componentes, cada uno destinado a cumplir una función a la hora de ser empleado.

##### **- Precursores**

Los precursores son moléculas en estado líquido que son las encargadas de formar la estructura final, ya que después de ser expuestas a la luz se endurecen y se juntan las unas con las otras. Dependiendo de la aplicación que vaya a tener la pieza fabricada se pueden elegir entre una variedad de prepolímeros, monómeros u oligómeros<sup>[23]</sup>.

Las propiedades mecánicas, como la resistencia térmica o la elasticidad se pueden controlar en función de la composición de estos precursores. La mayoría de resinas comerciales están compuestas por monómeros con base acrilato, que aporta reactividad, y monómeros con base epoxi, que tienen una contracción menor que las resinas con base acrilato, reduciendo así las deformaciones de la pieza<sup>[24]</sup>.

Otro de los parámetros que dependen de la composición de los precursores es el tiempo y el mecanismo de curado. Mientras que las resinas acrílicas se fotopolimerizan por radicales libres, que son los electrones que quedan desapareados, las resinas con base epoxi lo hacen fotopolimerización catiónica, esto es, mediante una molécula catiónica iniciadora que transfiere la carga a un monómero, a partir del cual se forman enlaces y volviéndose reactivo. En este aspecto, las resinas curadas por fotopolimerización catiónica necesitan periodos de

curado más largos, siendo también afectadas por la humedad. Debido a esto se ha optado por la combinación de ambas en la mayoría de resinas comerciales, obteniendo un periodo de curado relativamente corto, a causa de las resinas acrílicas, con una contracción baja a causa de las resinas con base epoxi<sup>[23]</sup>.

#### **- Fotoiniciadores**

Como se puede deducir, es el componente encargado de reaccionar a la luz para endurecer la pieza. Al recibir luz, con una determinada longitud de onda, este se excita y da comienzo el curado de la pieza.

El tipo de fotoiniciador se selecciona en función al precursor que se usará, de forma que la cantidad de fotoiniciador puede influir en la velocidad de la reacción, cantidad de luz necesaria o propiedades mecánicas de la pieza final<sup>[23]</sup>.

Entre los fotoiniciadores más usados se encuentran la canforquinona, hidroquinona o trifenilfosfina.

#### **- Absorbentes**

Estos componentes son los encargados de absorber la luz, lo que reduce la penetración de esta a la hora del curado limitando la penetración hasta que el curado se haya completado.

Dependiendo de la geometría de la pieza es necesario limitar la profundidad a donde puede llegar la luz, ya que, si sobrepasa cierta distancia podríamos tener un curado excesivo que causaría defectos en la pieza a fabricar<sup>[23]</sup>.

Entre los absorbentes más ampliamente usados encontramos, sobre todo, derivados del benzotriazol.

#### **- Aditivos**

Otro de los problemas de la estereolitografía es la viscosidad de las piezas durante su impresión. Esta viscosidad puede causar muchos problemas durante el proceso, afectando a la creación de las capas o a la adhesión a la cama de impresión, por lo que es necesario actuar para evitar o reducir estos inconvenientes.

Para actuar en este aspecto se recurren a aditivos y estabilizadores, que reducen la viscosidad, en combinación con otros parámetros como la temperatura de impresión, sobre todo en procesos de impresión largos.

Los aditivos que se pueden usar son tensioactivos oligoméricos o ácidos grasos como el ácido oleico<sup>[23]</sup>.

#### **- Resinas rellenas.**

Con el fin de poder fabricar piezas mediante el uso de la estereolitografía, pero con materiales de naturaleza metálica o cerámica se recurre a resinas combinadas con polvos de distintos materiales.

Este polvo es añadido a la mezcla, siempre de tamaños menores a la altura de capa establecida, y procurando a la vez que no sean excesivamente pequeños. El proceso de impresión no cambia en exceso, pero una vez obtenida la pieza impresa

se deben eliminar los componentes de la resina, generalmente por pirólisis, para después ser sinterizado y tratado térmicamente.

Se deben tener en cuenta las propiedades y tamaños del polvo añadido, así como el contenido añadido. Si la cantidad añadida no es suficiente, durante el procesamiento pueden ocurrir grietas y otros defectos, mientras que si las partículas son demasiado pequeñas podrían afectar a la longitud de onda de la luz usada, causando problemas de resolución y afectando al curado posterior<sup>[23]</sup>.

#### **2.1.3.4.- Materiales usados en procesamiento digital de luz o DLP.**

Debido a las similitudes que se dan entre la estereolitografía y este método, la composición de los materiales usados es básicamente la misma, pudiendo variar ligeramente debido a que la luz usada para fotopolimerizar la resina no es de la misma naturaleza.

#### **2.1.3.5.- Materiales usados en Material Jetting.**

También en este caso se usan resinas capaces de endurecerse al recibir luz, muy similares a las que se usan en los métodos de estereolitografía y procesamiento digital de luz.

Sin embargo, como este proceso tiene similitudes con el método de impresión de tinta común, es necesario que dichas resinas tengan una viscosidad menor, lo que las encarece considerablemente respecto a otras tecnologías de impresión.

Existen multitud de posibilidades a la hora de elegir un material para este método dependiendo de la aplicación que vaya a cumplir la pieza que estemos fabricando. Así es posible encontrar en el mercado resinas rígidas de propósito general, que pueden estar coloreadas de magenta, cian o amarillo para dar lugar a numerosas combinaciones de colores, resinas transparentes, con las que es necesario tener especial cuidado para no generar defectos, resinas flexibles, que darían un resultado final deformable, resinas con una resistencia mejorada, usadas para fabricar componentes que requieran aguantar mayores sollicitaciones, y resinas biocompatibles, para aplicaciones médicas.

Este método también permite la creación de materiales compuestos a partir de las resinas existentes. Por ejemplo, mezclar resinas flexibles y rígidas puede ayudar a controlar la dureza, o mezclar resinas rígidas coloreadas y claras puede dar lugar a la creación de modelos anatómicos.

También esta tecnología nos permite la creación de soportes para las piezas que lo necesiten. Para ello hay resinas que se disuelven en ciertos químicos o que pueden retirarse con facilidad tras la impresión<sup>[25]</sup>.

### **2.1.3.6.- Materiales usados en sinterizado y fusión láser a partir de polvo.**

En teoría, cualquier material que pueda ser fundido y solidificado es candidato a ser usado en uno de estos procesos, pero generalmente se usan, polímeros, metales, materiales cerámicos y los composites formados a partir de estos.

#### **- Polímeros.**

Los materiales termoplásticos son los más adecuados para este procedimiento, debido a su baja temperatura de fusión y baja conductividad térmica.

Dentro de estos termoplásticos, el material más usado es el nylon. Al ser un polímero semicristalino, por lo que tendrá una cierta temperatura de fusión, y, por tanto, una determinada cantidad de energía aportada por el láser afectará a una determinada cantidad de polvo que se enfriará relativamente rápido, mientras que los polímeros amorfos esto no pasa, sino que tienen a reblandecerse antes de llegar a ese punto, pudiendo causar defectos de forma. También, los polímeros amorfos tienden a crear superficies porosas, al contrario que los que tienen un mayor grado de cristalinidad.

Otros materiales son susceptibles de ser usados, como polímeros elastómeros, para crear piezas con flexibilidad, resistentes a la degradación o al ataque con productos químicos. A su vez, también hay disponibles comercialmente polímeros retardantes del fuego.

En cuando a su uso combinado para formar materiales compuestos, se han desarrollado mezclas, existiendo comerciales, como de nylon con partículas de cristal, con el objetivo de mejorar la rigidez, o específicas para aplicaciones determinadas, como de policaprolactona, conocido también como PCL, con partículas cerámicas de hidroxapatita y silicato de calcio, para desarrollar recambios de huesos<sup>[26]</sup>.

#### **- Metales.**

Un amplio rango de metales es factible de ser usado mediante esta tecnología, principalmente casi cualquier metal que pueda ser soldado es un candidato para esta tecnología, pudiéndose encontrar en el mercado, aceros, generalmente inoxidables y para herramientas, titanio y aleaciones o aluminios, incluso metales preciosos como oro o plata.

Sin embargo, si no se controlan aspectos como la temperatura o la atmósfera en la que se está operando es fácil que se produzcan defectos. También hay que asegurarse de cómo es la estructura cristalina obtenida para después realizar el tratamiento térmico de la pieza<sup>[26]</sup>.

#### **- Cerámicos.**

Generalmente se tratan de materiales formados por óxidos metálicos, como pueden ser óxido de aluminio o de titanio, carburos y las combinaciones de estos.

Durante este proceso pueden ocurrir precipitados que afecten a la pieza final, por lo que es muy importante controlar la atmosfera.

A partir de este tipo de materiales se pueden obtener compuestos biocompatibles<sup>[26]</sup>.

### **2.1.3.7.- Materiales usados en el método de haz de electrones a partir de polvo.**

Al estar usando un haz de electrones tenemos una condición indispensable para el tipo de material usado en este proceso; debe ser conductor. Esto nos limita mucho, puesto que debemos descartar tanto materiales plásticos como cerámicos, quedándonos solamente con materiales metálicos.

Los metales más usados son aleaciones de titanio y aleaciones de cromo y cobalto, siendo el campo de la aeronáutica y de la medicina, y más particularmente en el mundo de los implantes, los que más aplican esta tecnología<sup>[27]</sup>.

### **2.1.4.- Parámetros fundamentales en la impresión FDM/FFF.**

Dado que el presente proyecto se va a desarrollar principalmente con este tipo de tecnología, es menester nombrar los parámetros fundamentales a tener en cuenta cuando se trabaja con este método.

#### **2.1.4.1.- Altura de capa.**

Esta variable es de las más importantes, ya que repercute en el acabado superficial de la pieza, así como en sus cualidades físicas y el tiempo necesario para su impresión.

La altura de capa depende directamente del tamaño que tenga el extrusor, por lo que habrá que buscar una relación entre este y la altura de capa que sea óptima, con visos a mejorar la adhesión entre las diferentes capas y mejorar la resistencia. Así, si tenemos una altura de capa menor que el diámetro del extrusor, al salir el material el propio extrusor tenderá a empujarlo hacia abajo, mejorando la adherencia con la capa anterior, mientras que si la altura de capa es mayor que el diámetro del extrusor, el material saldrá sin apoyarse en la capa anterior, con lo que no habría adhesión.

Para seleccionar la altura de capa también debemos considerar otros aspectos. La geometría de la pieza es un parámetro importante, puesto que una pieza con muchos ángulos o muchas superficies curvas, a la hora de imprimir las capas se solaparían dejando un escalón entre ellas, por lo que es necesario ajustar la altura de capa a un valor bajo para mejorar la precisión durante la impresión.

También se debe considerar a la hora de elegir la altura de capa la aplicación que vaya a tener la pieza fabricada. Si es un objeto funcional, sin requisitos estéticos, lo ideal es una altura de capa alta, pues se disminuirán los costes de fabricación manteniendo casi en su totalidad las propiedades mecánicas, mientras que si es una pieza estética lo mejor es reducir la altura de capa para tener mejor acabado. No obstante, si la pieza se va a procesar después de la impresión, ya sea lijándola, pintándola u otra acción, es deseable una mayor altura de capa<sup>[28]</sup>.

#### **2.1.4.2.- Velocidad de impresión.**

Este parámetro indica a la velocidad que se mueve el extrusor durante el proceso de impresión. De esta forma se determina el tiempo que tiene el material depositado para enfriarse antes de que se deposite la siguiente capa, así una velocidad baja permite que el material tenga más tiempo para bajar su temperatura.

La velocidad de impresión también puede afectar de forma negativa al extrusor. Durante la impresión, y en el momento en el que se tiene que trazar una curva o un ángulo, el extrusor sufre fuerzas de inercia a causa del cambio de dirección, que aumentarán cuanto mayor sea la velocidad de impresión. Durante estos cambios de dirección el extrusor también debe reducir su velocidad, por lo que a mayor velocidad de extrusión, la acumulación de material será mayor y podría dañar tanto el extrusor como la pieza impresa.

#### **2.1.4.3.- Temperatura de impresión.**

En este caso se debe elegir la temperatura de impresión según el material con el que se esté trabajando, ya que cada uno tiene un rango de temperaturas adecuado para realizar la impresión.

Si la temperatura es baja, el material no fundirá y no habrá un flujo hacia la cama de impresión. Esto puede causar que el extrusor se atasque, que se dañen los motores encargados de alimentarlo de filamento o que tengamos problemas de adhesión en la pieza. Por el contrario, si la temperatura es muy alta se corre el riesgo de que el material se degrade y pierda propiedades o se dañe el cabezal de extrusión.

#### **2.1.4.4.- Relleno**

El relleno, tanto en cantidad como en geometría, afectará a la rigidez de la pieza a fabricar, así pues, será necesario estimar los esfuerzos a los que vaya a estar sometida dicha pieza cuando cumpla su función.

La cantidad de relleno se puede ajustar a modo de porcentaje, afectando a su resistencia, pudiendo elegir entre un rango del 0 al 100%. Las piezas que no precisen de un cumplimiento de requisitos mecánicos tendrán rellenos bajos, mientras que si van a tener solicitaciones, el valor del relleno será más alto.

También podemos actuar sobre la geometría que vaya a tener este relleno, pudiendo elegir entre una serie de patrones. El patrón elegido debe ser acorde a la aplicación de la pieza, puesto que su forma, orientación y su distribución afectará directamente a la resistencia mecánica.

#### **2.1.4.5.- Espesor de pared.**

Durante la impresión por FDM/FFF las paredes son, por norma general, la primera zona de la capa que se imprime, luego será importante configurar este valor.

El espesor de pared influye en las propiedades mecánicas de la pieza, de forma que, al aumentar este valor tendremos una pieza más robusta independientemente del relleno que hayamos escogido. Aumentar el espesor de pared también es adecuado si después se pretende tratar la pieza mediante lijado,

ya que con esta operación se eliminaría material y un espesor de pared insuficiente podría causar desperfectos.

También hay que tener en cuenta que aumentar el espesor de pared implica un mayor uso de material, y por consiguiente se aumentan los costes y el tiempo de impresión.

#### **2.1.4.6.- Otros parámetros de interés.**

Existen parámetros que no siempre son importantes, sino que adquieren relevancia en función del tamaño de la pieza o del material del que va a imprimir.

- **Temperatura de la cama de impresión.**

Diversos materiales, como, por ejemplo, el ABS, precisan de una superficie caliente donde imprimir para evitar que ocurran problemas de adherencia de las primeras capas.

- **Temperatura de la cámara de impresión.**

De nuevo existen materiales que hacen necesario un control de la temperatura a la que se realiza la impresión. Para esto se dispone de una cámara térmica que aumenta la temperatura mediante una resistencia eléctrica.

- **Mecanismos de adherencia y soporte.**

Si la pieza que pretendemos imprimir es demasiado esbelta, se corre el riesgo de que, durante las impresiones de las últimas capas, la pieza vuelque debido al arrastre del extrusor. Para ello se pueden crear mecanismos de adhesión a la cama, como faldas o estructuras auxiliares que mantengan estable la pieza. Estos añadidos serían eliminados una vez finalizada la impresión.

Para el caso de piezas huecas o con voladizo, es necesario recurrir a un soporte del material que impida que el material depositado se desplome cuando está siendo impreso.

Algunas impresoras, si disponen de doble extrusor, permiten que estos mecanismos de adherencia y soporte puedan ser impresos en otros materiales.

## **2.2.- Sensores de fuerza**

Los sensores son dispositivos que reciben una determinada forma de energía como entrada y la transforman en una señal medible por un sistema electrónico. A partir de esta premisa existen innumerables tipos de sensores, desde fuerza a desplazamiento, pasando por temperatura, aceleración, par o velocidad.

### **2.2.1.- Historia y evolución de los sensores.**

Los sensores como tal han existido desde siempre, puesto que los pequeños microorganismos son capaces de detectar interacciones como cambios de temperatura y procesar esa señal para actuar en consecuencia.

Aunque el origen de los sensores es incierto en el tiempo, cabe destacar algunos hitos históricos en este campo. El primero de todos es el primer sensor de temperatura reglado, que se atribuye a Daniel Gabriel Fahrenheit, que, en 1714, y tras varias pruebas, creó el un termómetro introduciendo mercurio en un tubo de vidrio.

Hubo que esperar casi dos siglos, hasta 1874, para ver el primer sensor conectado con un terminal para recibir datos. Aunque no está claro que resultase un éxito, este “sensor” era una estación meteorológica situada en la cima del Mont Blanc, con el objetivo de medir la velocidad del viento y la precipitación de nieve y enviar esos datos a París mediante ondas de radio, una tecnología que por ese tiempo todavía era muy reciente<sup>[29]</sup>.

En el ámbito industrial, el avance más significativo fue la creación, por parte de la empresa alemana Pepperl+Fuchs, del primer sensor de proximidad inductivo, en 1958. A esto le siguió la creación de los sensores inteligentes, que integraban funciones como calibración o identificación, en 1969, y de mano de la compañía Honeywell, que se encontraba ante un problema de compensación de temperatura en una serie de sensores usados en el sistema de aire de los aviones McDonnell Douglas DC-9. Este sensor estaba formado por unos piezoresistores, materiales que cambian su resistencia eléctrica cuando están sometidos a un esfuerzo, destinados a medir la presión, y varios capacitores que creaban un desplazamiento de fase. Todos estos elementos estaban retroalimentados y conectados de forma que se crease un oscilador, de forma que la frecuencia de salida se relacionaría con una constante de tiempo, y esta a su vez con la presión<sup>[30]</sup>.

La evolución desde ese momento ha sido contante, tanto en tecnologías como en materiales o construcción, consiguiéndose sensores muy precisos y muy pequeños, utilizables en infinitas aplicaciones.

### **2.2.2.- Tipos de sensores de fuerza.**

Los sensores de fuerza, que son los que más importancia van a adquirir en el desarrollo del presente proyecto, actúan de forma que, al aplicarles determinada fuerza, reaccionan y transforman su respuesta en una señal eléctrica por diversos fenómenos dependientes del tipo de sensor que se esté usando.

El tipo de sensor también influye en otros aspectos, como la sensibilidad, precisión o método de calibración, que diferirán de unos a otros. Principalmente podemos distinguir entre tres tipos de sensores, piezoresistivos, capacitivos y piezoeléctricos.

#### **2.2.2.1.- Sensores resistivos y piezoresistivos**

Este tipo de sensores son los más comunes y sencillos, ya que se basan en el cambio de la resistencia eléctrica que sufre un material cuando está sometido a un esfuerzo.

El principio de funcionamiento se basa en el uso de una galga extensiométrica construida de un material conductor por el que se hace pasar una corriente eléctrica.

Al presionar el material, este cambia su resistencia eléctrica al ser deformado, siendo este cambio el que puede ser medido.

Los sensores resistivos y piezoresistivos pueden estar contruidos de metal o un material semiconductor. El material afectará, como es lógico, a la sensibilidad del sensor. En el caso de los resistivos, que están contruidos de metal, el cambio en la resistencia ocurre debido a que la sección transversal del conductor se reduce y el flujo eléctrico tiene menos superficie para circular. Los piezoresistivos, por otra parte, están contruidos con materiales semiconductores, y el cambio de la resistencia está causado por la concentración de portadores, partículas encargadas de transportar la corriente eléctrica.

La forma más común de medir el cambio en la resistencia es a través de lo que se conoce como un puente de Wheatstone, que permite que pequeños cambios en la resistencia puedan convertirse en una salida de voltaje. Este circuito eléctrico necesitará de un voltaje de alimentación para poder medir el de salida, de forma que, cuando no se está aplicando ningún esfuerzo y el puente está equilibrado, la salida será de cero voltios, y una vez que se aplique una fuerza se causará un cambio en las resistencias del puente, con su correspondiente variación del voltaje de salida<sup>[31]</sup>.

#### **2.2.2.2.- Sensores capacitivos**

La variable importante en este tipo de sensores es la capacitancia, ya que para conocer la fuerza aplicada se recurre a la variación de esta.

Un sensor capacitivo consta de dos placas conductoras enfrentadas, entre las cuales hay un pequeño hueco en el que se encuentra un dieléctrico, de forma que, si incorporamos este sensor a un circuito junto con un inductor podremos calcular la frecuencia de un oscilador y relacionarla con el cambio en la capacitancia, por lo que es necesario, además, un circuito electrónico que lea esa frecuencia y la transforme en un voltaje.

El material dieléctrico es importante en este tipo de sensores, ya que puede sufrir alteraciones cuando se aplique una fuerza o esté sometido a cierta temperatura e inducir a errores. Una forma de eliminar este tipo de errores es mediante el uso de sensores que tienen un vacío entre las placas<sup>[31]</sup>.

#### **2.2.2.3.- Sensores piezoeléctricos**

Estos sensores trabajan basándose en el efecto piezoeléctrico de ciertos materiales, esto es, su capacidad para que, cuando se aplica una carga, aparezca una diferencia de potencial entre sus superficies.

Para lograr este efecto se requieren materiales con asimetría en su estructura cristalina. A esto responden varios cristales naturales o cerámicas formuladas específicamente para que sean piezoeléctricas.

La diferencia de potencial se generará directamente de la carga, por lo que, en principio, no sería necesario una fuente de alimentación externa. Sin embargo, si se quiere amplificar la señal sí que se debe alimentar el sensor<sup>[31]</sup>.

### 2.2.3.- Ventajas y desventajas de cada tipo de sensor.

Los sensores resistivos y piezoresistivos tienen la ventaja de ser simples y robustos. Su desempeño a lo largo del tiempo no sufre grandes variaciones, por lo que no sería necesario rehacer la calibración muchas veces.

En cambio, al necesitar ser alimentados, estos consumen más potencia que otros tipos de sensores, por lo que en un sistema alimentado con una batería afectaría a la duración de esta<sup>[31]</sup>. Otro problema es la histéresis, ya que al ser deformado el material del que está compuesto, este no recupera inmediatamente su forma original, quedando una deformación residual que afectará a las mediciones consecutivas.

Son sensores asequibles y en el mercado existe una amplia gama de fabricantes que disponen de varias medidas y tamaños, incluyendo la posibilidad de confeccionarlo con formas adecuadas a la aplicación para la que serán usados.

Por otro lado, en el caso de los sensores capacitivos tenemos la ventaja de que el consumo eléctrico es muy bajo, ya que la corriente solo fluirá cuando se esté midiendo la capacitancia. Esto lo hace adecuado para sistemas alimentados por una batería. También tienen muy baja histéresis y buena repetibilidad, por lo que serán bastante fiables en toma de datos continua, así como muy baja sensibilidad a los cambios de temperatura<sup>[31]</sup>.

Sin embargo, su precio es alto, y no existen muchos fabricantes que comercialicen este tipo de sensores, aunque algunos de ellos disponen de la opción de personalización. Otro problema viene a la hora de la instalación en el dispositivo donde se pretenden colocar. Como se ha comentado con anterioridad, estos sensores necesitan de un circuito electrónico que nos de el voltaje de salida, por lo tanto se necesita un alojamiento para este, cosa que puede causar serios problemas, tanto en el diseño, ya que puede no ser posible colocar ese alojamiento, como en las mediciones, ya que si pretendemos colocar ese circuito en una zona alejada del sensor, donde no haya problemas con su posicionamiento, tendríamos que recurrir a un extensor, que afectaría a la capacidad original del sensor.

Los sensores piezoeléctricos también son dispositivos simples y capaces de medir un rango de fuerza más amplio que los dos tipos anteriores, con una precisión buena. También son robustos, haciéndolos adecuados para medios hostiles como, por ejemplo, a altas temperaturas.

En cambio, son sensores muy sensibles al choque térmico, pues si está construido con materiales cerámicos un cambio brusco de temperatura puede dañar el sensor. Otro problema es su construcción, ya que son más gruesos que los capacitivos y resistivos, por lo que no son adecuados para medir fuerzas entre dos piezas<sup>[31]</sup>.

## **2.3.- Estudio morfológico y cinemático del dedo humano.**

Los humanos, y los homínidos en general, destacan entre las demás especies por poder manipular objetos con facilidad, usando para tal efecto sus manos y más específicamente sus dedos.

Sin embargo, la función principal de los dedos no es la de manipular objetos, sino que, debido a la gran cantidad de terminaciones nerviosas que poseen sobre todo en la yema, representan la principal fuente de información del tacto que hay en el cuerpo.

### **2.3.1.- Anatomía del dedo humano**

Dentro de la mano humana, podemos distinguir cinco dedos, pulgar, índice, medio, anular y meñique. El dedo pulgar está localizado en el lateral exterior de la mano y, puesto que sus movimientos son distintos a los otros cuatro, alberga particularidades.

A nivel anatómico podemos dividir el dedo en huesos, articulaciones, músculos, tensores y ligamentos, venas, arterias y nervios.

#### **2.3.1.1.- Huesos**

Dentro de la mano podemos distinguir varios tipos de huesos. En la unión con el cúbito y el radio, en lo que es la muñeca, están situados los huesos del carpo. Este conjunto de huesos, un total de ocho, está formado por dos filas de cuatro, denominadas proximal, más cercana al antebrazo, y distal. Estos huesos tienen una forma semejante a un cubo, con seis caras, de las cuales las dos que están en zonas blandas como la palma y el dorso de la mano son rugosas, mientras que las otras cuatro son lisas y están recubiertas de cartílago y unidas al resto por ligamentos.

Los huesos de la fila proximal se denominan escafoides, semilunar, piramidal y pisiforme, mientras que los de la fila distal reciben el nombre de trapecio, trapezoide, grande y ganchoso.

Unidos a este grupo de huesos están articulados los metacarpianos, un total de cinco y numerados del I al V en numeración romana. Todos los metacarpianos están formados por tres partes básicas, una base, una diáfisis o cuerpo y una cabeza. A través de la base los metacarpianos se articulan con los huesos del carpo, mientras que por la cabeza se unen a las falanges, que forman como tal los dedos, constituyendo los nudillos.

El I metacarpiano forma parte del pulgar y está articulado con el trapezoide. El II metacarpiano, une el trapezoide con las falanges del dedo índice, mientras que el III metacarpiano hace lo propio con el hueso grande y el dedo medio. Los metacarpianos IV y V unen el ganchoso con los dedos corazón y meñique respectivamente, este último a través de una protuberancia conocida como gancho del ganchoso.

Los huesos que forman los dedos como tal son conocidas como falanges. Estas están formadas por tres huesos, denominados falange proximal, media y distal, con la excepción del pulgar, que solo dispone de falange proximal y falange distal. Estos huesos están formados también por una base, una diáfisis o cuerpo y una cabeza, en donde la base se articula con el metacarpiano correspondiente o con la cabeza de la falange anterior. En el caso de la falange distal su cabeza está aplanada y se ubica debajo de la yema del dedo<sup>[32]</sup>.

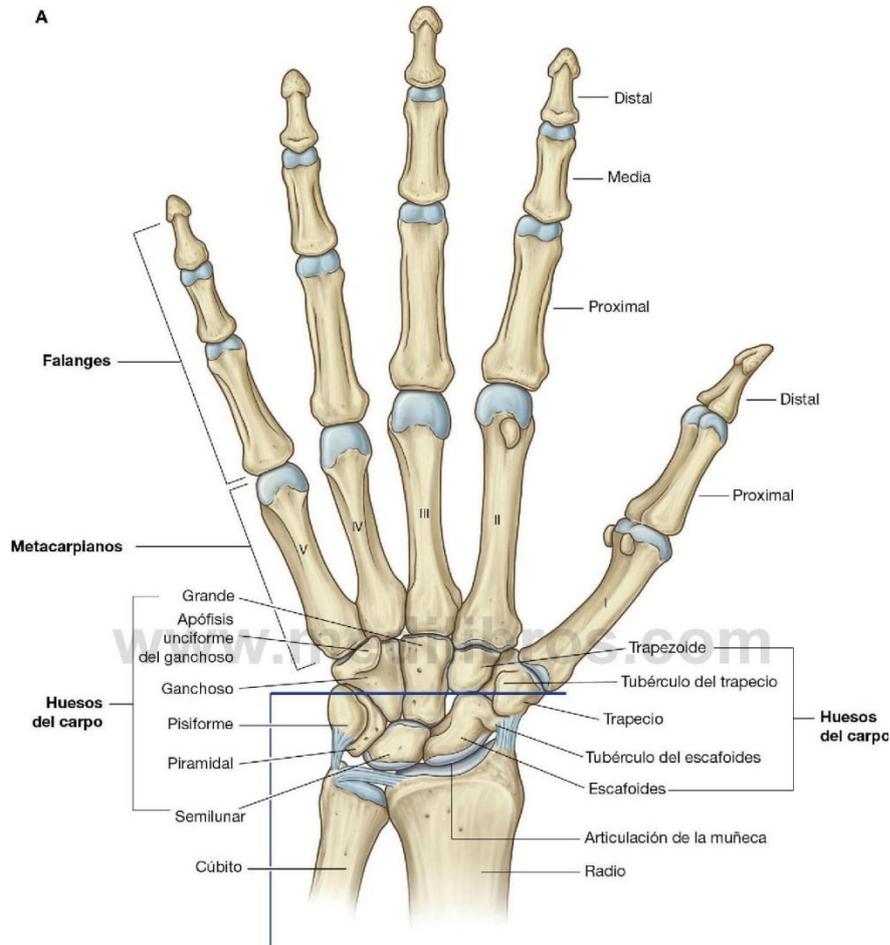


Figura 11.- Esquema de los huesos de la mano<sup>[32]</sup>

### 2.3.1.2.- Articulaciones

Se conoce como articulación a la unión entre dos o más huesos que permite el movimiento relativo de uno respecto de otro. Dentro de la mano hay varios conjuntos de articulaciones, cada una con una función definida. Estas son la articulación de la muñeca, articulaciones del carpo, articulaciones carpometacarpianas, articulaciones metacarpofalángicas y articulaciones interfalángicas.

La articulación de la muñeca es la que permite el movimiento de la mano en dos ejes, permitiendo aducir, abducir, extender y flexionar la mano. Esta articulación une el radio y el cúbito con los huesos escafoides, piramidal y semilunar.

Las articulaciones del carpo son las encargadas de unir los huesos del carpo con los metacarpianos. Aunque movimiento es limitado, estas articulaciones

contribuyen a los diferentes movimientos de la mano, sobre todo durante la extensión.

Las articulaciones carpometacarpianas marcan propiamente el inicio del dedo. Estas unen la falange distal de cada dedo con el metacarpiano correspondiente. La unión entre el I metacarpiano y el trapecio permite mayor movilidad para el pulgar, lo que la diferencia del resto que tienen un movimiento más limitado.

Las articulaciones metacarpofalángicas son las encargadas de unir la falange distal de cada dedo con el metacarpiano correspondiente.

Las articulaciones interfalángicas unen las distintas falanges a modo de bisagra<sup>[32]</sup>.

### 2.3.1.3.- Músculos

Para generar el movimiento en la mano se disponen de una serie de músculos con el objetivo de realizar movimientos de precisión entre los dedos y el pulgar.

Estos músculos, conocidos como músculos intrínsecos de la mano, están localizados en la propia mano, sin originarse en el antebrazo, y de este grupo forman parte el palmar corto, los músculos interóseos, aductor del pulgar, músculos de la eminencia tenar, la eminencia hipotenar y los lumbricales.

El palmar corto es un pequeño músculo, con forma cuadrangular, originándose en el lateral de la mano cumpliendo la función de plegar la piel cuando se cierra la mano.

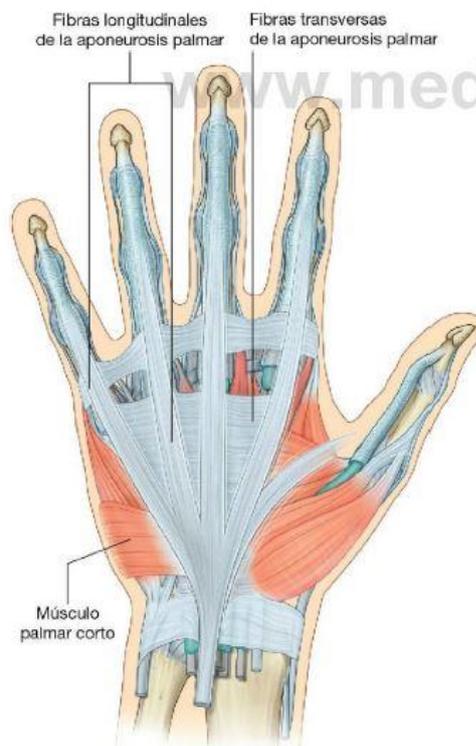


Figura 12.- Localización del músculo palmar corto<sup>[32]</sup>

Los músculos interóseos están situados entre los metacarpianos insertándose en ellos. Se pueden dividir en dos grupos, interóseos dorsales e interóseos palmares. Los interóseos dorsales están situados en la cara dorsal de la mano y son los encargados de realizar los movimientos de flexión y de extensión de los dedos. Por otra parte, los palmares se originan en los metacarpianos de los dedos correspondientes y son los encargados de los movimientos de aducción.

El músculo aductor del pulgar tiene forma triangular y cruza la palma de la mano. Tiene dos cabezas donde se origina, la cabeza transversa, localizada en la diáfisis del III metacarpiano, y la cabeza oblicua, situada en el hueso grande.

Los músculos de la eminencia tenar son unos de los encargados de realizar la función pinza de los dedos con el pulgar. Este grupo está formado por tres músculos, oponente del pulgar, flexor corto del pulgar y abductor del pulgar. El músculo oponente del pulgar es el mayor de los tres, se origina en el trapecio y termina en el lateral del I metacarpiano, causando la rotación y flexión de este. El músculo flexor corto del pulgar se origina en el trapecio para terminar en el lateral de la falange proximal, para flexionar la articulación metacarpofalángica del primer dedo. El músculo abductor del pulgar se origina en el escafoides y termina en la base de la falange proximal del pulgar y es el causante del movimiento de abducción de este.

El conjunto de músculos de la eminencia hipotenar se divide también en tres, oponente del meñique, abductor del meñique y flexor corto del meñique. El oponente del meñique se origina en el ganchoso y termina en el V metacarpiano, siendo el encargado de rotar el meñique hacia la palma. El abductor del meñique se origina en el hueso pisiforme y tiene su final en la falange proximal del meñique. Por su parte, el flexor corto del meñique tiene su inicio en el ganchoso y se inserta en la falange medial del meñique, actuando sobre la articulación metacarpofalángica de este.

Para terminar, los músculos lumbricales actúan sobre las articulaciones metacarpofalángicas e interfalángicas de los dedos [32].

#### **2.3.1.4.- Tendones y ligamentos**

Los tendones son tiras de tejido muy resistente encargadas de unir el músculo al hueso para que este pueda transmitir la fuerza correspondiente. Dentro de los dedos adquieren especial relevancia los tendones flexor y extensor del dedo.

Los tendones flexores son los encargados de la flexión del dedo. Salvo en el pulgar, que hay flexor corto y un flexor largo, el resto de dedos presentan un flexor superficial y un flexor profundo.

En cambio, los ligamentos también son bandas de tejido resistente, pero cumplen la función de unir los huesos en la articulación. En el dedo cobran relevancia los ligamentos metacarpianos transversos profundos, que unen los metacarpianos entre sí, salvo el del pulgar, y los ligamentos palmares, que unen los huesos en las articulaciones metacarpofalángicas e interfalángicas[32].

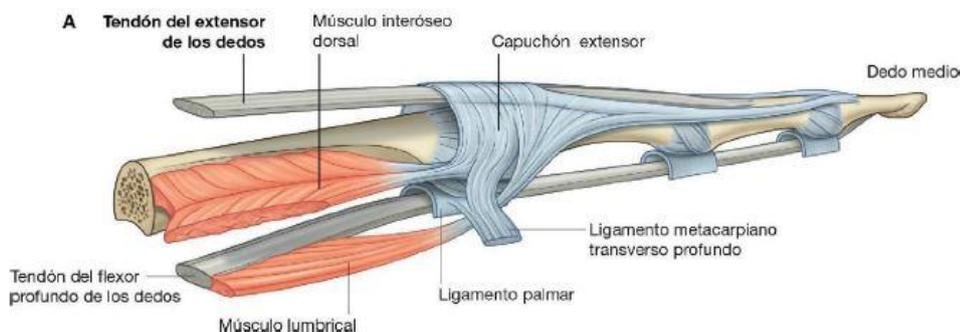


Figura 13.-Tendones, músculos y ligamentos que intervienen en el movimiento del dedo [32].

### 2.3.1.5.- Venas, arterias y nervios

La alimentación sanguínea de la mano viene principalmente a partir de dos arterias, la arteria cubital y la arteria radial. La arteria cubital se divide en diferentes arterias palmares, y estas a su vez en arterias digitales que alimentan los dedos índice, medio, corazón y meñique, mientras que la arteria radial es la encargada de alimentar el pulgar.

La sangre que ha llevado a la mano estas arterias vuelve al cuerpo por las venas cefálica y basílica.

En cuanto a los nervios, la mano está inervada por tres principales nervios, radial, cubital y mediano. El nervio cubital, que va en paralelo a la arteria del mismo nombre, se divide en dos ramas, una profunda, con función principalmente motora, y una superficial que cumple funciones sensitivas. El nervio mediano es el nervio sensitivo principal de la mano, ya que es el encargado de recoger los impulsos nerviosos de los dedos pulgar, índice y medio a través de su división en nervios digitales palmares, por lo que interviene de forma muy importante en el tacto y en la manipulación de objetos. Del nervio radial solo llega a la mano una pequeña parte, que inerva parte de la palma y los laterales del meñique, corazón y medio hasta la articulación interfalángica distal[32].

### 2.3.2.- Movimientos del dedo humano

Los movimientos de los dedos y de la mano se pueden agrupar por la articulación donde se produce.

De la articulación metacarpofalángica obtendremos los movimientos de flexión y extensión de los dedos, con una amplitud de unos 90°, y los movimientos de aducción y abducción, de 30° en cada dirección.

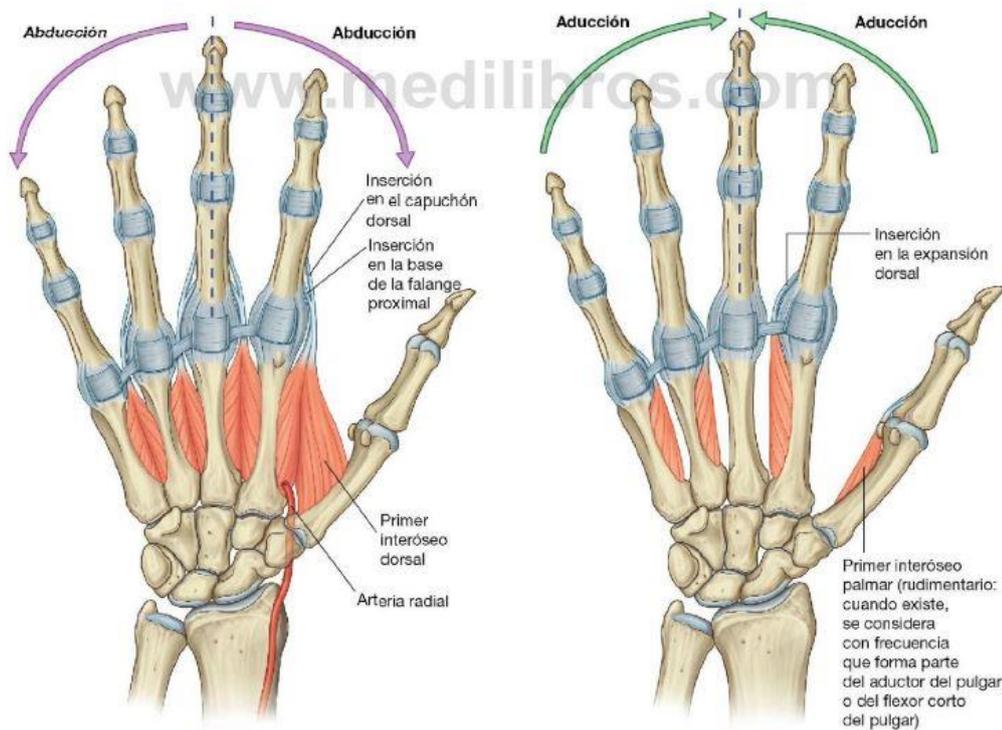


Figura 14.- Movimientos de abducción y aducción [32].

El movimiento de los dedos vendrá dado por las articulaciones interfalángicas, donde se producen los movimientos de flexión y extensión de los dedos, con una amplitud aproximada de 90°.



Figura 15.- Movimiento de flexión y extensión [32].

En el caso particular del pulgar, los movimientos son distintos al resto de dedos de la mano. En este caso, la articulación del carpo, llamada también trapeciometacarpiana es la responsable de los movimientos de flexión y extensión del pulgar, de amplitud entre 40 y 50°. También interviene en los movimientos de abducción y aducción, cuya amplitud es aproximadamente 80°, y en el movimiento de oposición del pulgar sobre la palma.

## 2.4.- Estudio de mercado de dedos fabricados con impresión 3D.

La mayoría de prótesis comerciales se basan en la existencia previa de un muñón que permita la colocación de sensores mioeléctricos, por lo tanto, para aplicaciones específicas, como es este caso, se tiene que recurrir a estudios y desarrollos llevados a cabo por entidades como pueden ser universidades, en lugar de al campo comercial. Aun así, en la mayoría de casos se trata de desarrollos de manos enteras, sin particularizar en dedos.

### 2.4.1.- HANDi Hand.

El prototipo HANDi Hand es un modelo de mano articulada desarrollado por investigadores de la Universidad de Alberta, en Canadá, con el objetivo de conseguir una prótesis barata capaz de transmitir datos en tiempo real a un controlador, fabricada mediante impresión 3D y que sea usada sobre todo para machine learning y desarrollo de futuras prótesis.

La mano consta de varios servomotores encargados de realizar los movimientos de los dedos mediante un hilo resistente. Cuando el motor gira, recoge el hilo y el dedo se flexiona, mientras que si el motor no tiene movimiento, los dedos permanecen extendidos gracias a la acción de unos resortes de torsión. A su vez dispone de sensores de posición que informan del estado del dedo y de una cámara en la palma de la mano que da información visual.

El peso final de este prototipo es de 256g, y es capaz de aguantar medio kilo de carga, con un coste de 800 dólares<sup>[33]</sup>.

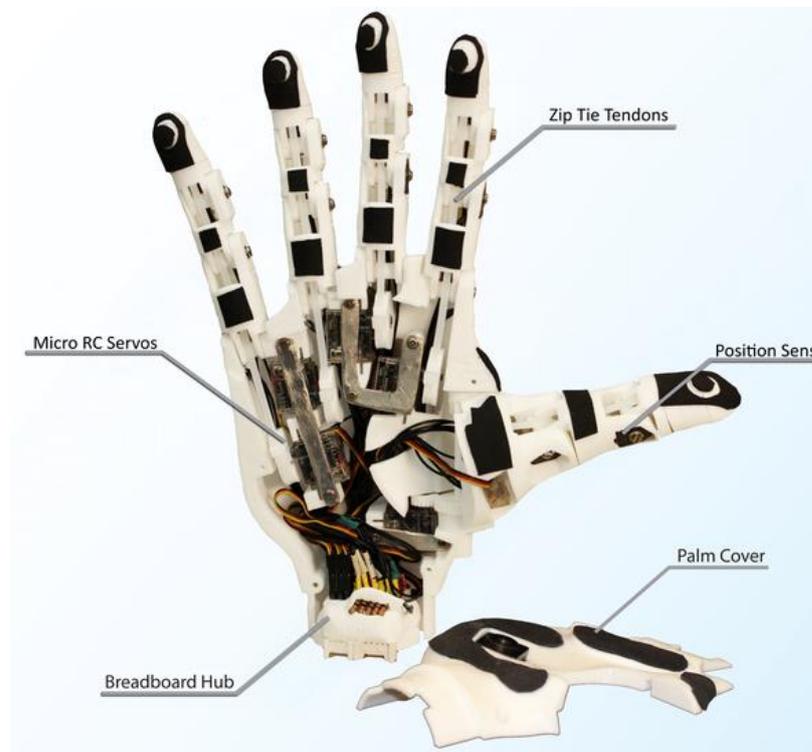


Figura 16.- Prototipo HANDi Hand<sup>[33]</sup>.

### 2.4.2.- DLR / HIT Hand

Aunque no está fabricado en impresión 3D ni su cometido es el de funcionar como una prótesis humana, se trata de un sistema que incluye en los dedos sensores tanto de fuerza como de posición.<sup>[34]</sup>

Está formada por cuatro dedos iguales, en el que uno actúa como pulgar oponiéndose a los otros tres, siendo capaces de realizar una fuerza de agarre de hasta 10N, teniendo cada dedo tres falanges y tres grados de libertad.

### 2.4.3.- Brunel Hand.

Aunque no es propiamente una prótesis de mano, ya que está destinada a la investigación y solo puede ser acoplada a un robot, este prototipo de mano fabricada con impresión 3D es uno de los pocos disponibles a nivel comercial.

En este caso el funcionamiento es igual que las anteriores, un motor acciona el cable encargado de flexionar el dedo. Sin embargo, el retorno se hace por un muelle de tracción y las falanges, en lugar de estar unidas con un par de rotación se han dividido en dos partes, y estas se atornillan haciendo presión sobre un material elástico que actúa como ligamento<sup>[35]</sup>.



Figura 17.- Brunel Hand ya ensamblada <sup>[35]</sup>.

Esta mano se encuentra disponible además bajo licencia de Creative Commons, que permite el acceso público a todo el mundo.

### 2.4.4.- Partial Hand Solutions TITAN.

Se trata de una prótesis de dedo fabricada en acero inoxidable y titanio, cuya función es la de sustituir un dedo que ha sido total o parcialmente amputado.

Esta prótesis va anclada a una funda diseñada para el paciente en cuestión, y su accionamiento es manual, es decir, el usuario tiene que colocar en posición manualmente el dedo a la hora de manipular un objeto y, una vez terminada la operación, regresar a la posición original también de forma manual, sin ayuda de ningún tipo de actuador<sup>[50]</sup>.



*Figura 18.- Partial Hand Solutions TITAN Full<sup>[50]</sup>.*

#### **2.4.5.- Naked Prosthetics PIPDriver**

Diseñado para personas cuya amputación del dedo no es total, sino que conservan parte de este. La empresa fabricante lo diseña de acuerdo a las especificaciones del destinatario y en función de las actividades que este pretende realizar.

Está fabricado con nylon de uso médico, aunque no mediante impresión 3D, conjuntamente con silicona en la huella y uniones con tornillos de titanio con el objetivo de tener una prótesis ligera<sup>[51]</sup>.

El movimiento se realiza mediante el accionamiento con la parte restante del dedo que se conserva.



*Figura 19.- Naked Prosthetics PIPDriver<sup>[50]</sup>.*

## 2.5.- Metodología

Para la fabricación de un dedo mediante impresión 3D se debe pasar por diferentes fases que permiten pasar de un concepto base a una pieza tangible. En este caso, como se debe trabajar además con un sensor de fuerza, habrá que trabajar sobre él a la vez que se fabrique el dedo, para cumplir los diferentes requisitos impuestos.

En primer lugar, trabajaremos con el sensor. Este sensor puede adquirirse calibrado o sin calibrar, por lo que para este último caso es necesario definir un procedimiento de calibración. Primero de todo se ha de seleccionar un sensor adecuado para esta aplicación. Una vez elegido, para poder realizar las mediciones con el sensor, y por consiguiente, poder medir con él, se precisa de una aplicación en el ordenador o un aparato que mida la diferencia de potencial, así como un transductor de fuerza o un sensor previamente calibrado y una máquina de ensayos. Así, al aplicar una fuerza con esta máquina sobre el sensor, colocado estratégicamente en el transductor de fuerza o en el sensor calibrado, se tendrá una lectura de la fuerza obtenida en estos que se tiene que corresponder con la salida de voltaje del sensor sin calibrar, por lo tanto, y para diferentes valores de fuerza se obtendrán diferentes de voltaje que se relacionarán mediante una ecuación o una gráfica. Si trabajamos con un programa en el ordenador va a ser necesario también conectar el sensor a una tarjeta de adquisición de datos que, a su vez, transfiera estos al ordenador, de donde se pueden obtener en formato Excel.

La fabricación del dedo se puede dividir en varias etapas. En la primera se debe estudiar la morfología del dedo que se pretenda fabricar, tomando las medidas pertinentes, para después crear un archivo CAD con el diseño. En este proceso puede intervenir también el escaneado, puesto que nos generará un diseño fiel al dedo escaneado, y que podrá ser modificado para trabajar con él.

Una vez creado el diseño, se debe crear un archivo legible para el programa encargado de la gestión de la impresora pueda leerlo. Estos archivos, de formato .stl por norma general, transforman el objeto a una malla de triángulos ajustada a la geometría de la pieza. Este archivo se debe revisar para que no incluya errores en la pieza que puedan causar problemas en posteriores pasos.

Cuando se tiene el archivo de extensión .stl se debe generar un archivo donde se encuentre toda la información necesaria para la impresión. Estos archivos, en formato g-code, se obtienen del software de gestión de la impresora, e incluye información como temperaturas, alturas de capa, rellenos o velocidades de impresión, vitales para el proceso. El programa que genera este archivo transforma el diseño en el formato previo .stl, dividiéndolo en diferentes capas, por lo que habrá una mínima parte de la información relativa a la geometría que se perderá.

El siguiente paso es la impresión como tal. Teniendo el archivo g-code, la impresora puede interpretar el lenguaje que contiene y puede imprimirlo, con una secuencia capa por capa y, en caso de ser necesario, colocando material de soporte.

Cuando ya se tiene todos los componentes impresos es necesario realizar un postprocesado, limpiando el exceso de material de soporte y realizando un lijado de

la pieza que elimine cualquier resto. Con las piezas ya acabadas hay que evaluar si es necesario realizar modificaciones, pues es posible que, aunque no presenten defectos derivados de la impresión, el diseño no sea adecuado para el montaje o no cumpla los requisitos.

Una vez corregidos estos problemas, se realizará el montaje. El sensor será colocado en el hueco dispuesto para tal efecto, asegurándonos de que no va a desplazarse mediante el uso de algún adhesivo.

Con el dedo ya montado se debe comprobar que la lectura del sensor es correcta. Para esto se deben realizar varios ensayos, aplicando una fuerza sobre el dedo que a la vez actúe sobre otro sensor calibrado o una transductor de fuerza que den un valor para la fuerza. El valor de esta fuerza leída y el que da el sensor acoplado al dedo idealmente tienen que ser iguales, no obstante, este ensayo se va a realizar con diferentes objetos y geometrías comunes, por lo que habrá un error entre la lectura del sensor del dedo y la de referencia, que debemos cuantificar para poder evaluar la idoneidad del proyecto.

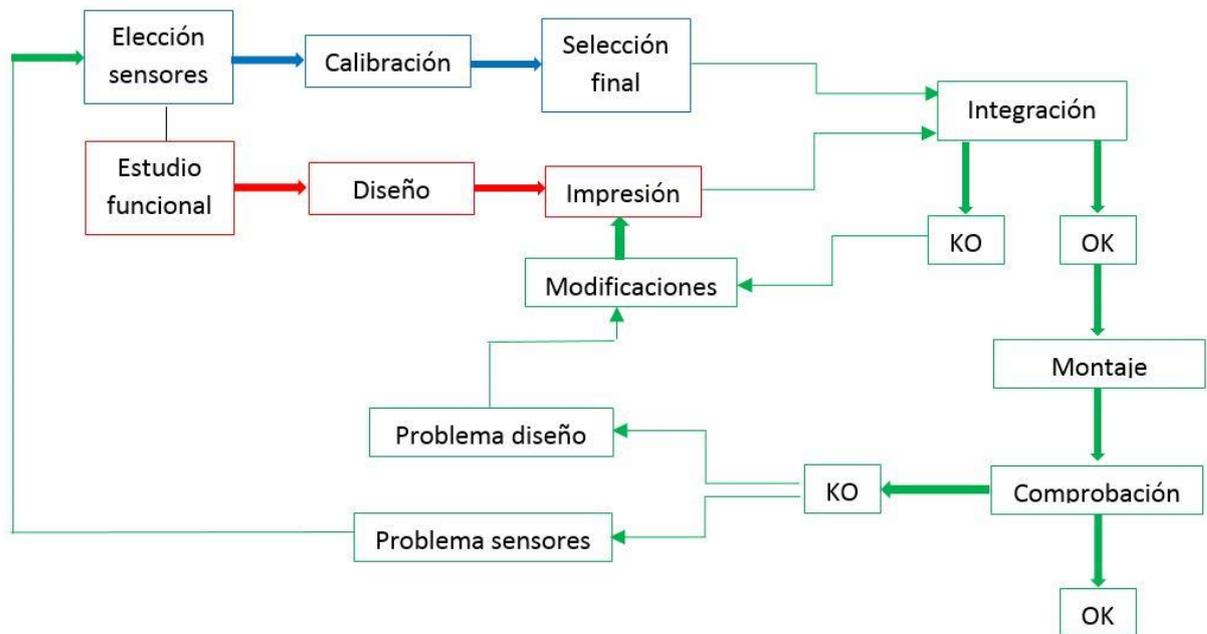


Figura 20.- Esquema de desarrollo del proyecto. En azul el proceso relativo a los sensores, en rojo a impresión 3D y en verde ambos combinados.

## 3.- Estudio, calibración y elección de los sensores.

### 3.1.- Descripción de los sensores

Para este proyecto se tiene que evaluar qué sensores se acoplan mejor a la aplicación a la que están destinados. Dentro de este grupo entran varios modelos comerciales de sensores resistivos, piezoresistivos y capacitivos. Los sensores piezoeléctricos se descartan por razones de tamaño.

Los modelos que se van a usar son el sensor resistivo FSR 400, comercializado por Interlink Electronics, y el sensor capacitivo S8-100N, desarrollado por Singletact. Originariamente se tenía pensado evaluar el sensor piezorresistivo A101, de Tekscan, pero por problemas de logística no se ha podido contar con uno.

#### 3.1.1.- Interlink Electronics FSR400

Dentro de la gama de sensores que nos presenta Interlink el que más se adecúa a esta aplicación es el denominado FSR400, más concretamente el FSR400 Short, que presenta unos conectores más cortos.

Se trata de un sensor resistivo compuesto por varias capas. La superior y la inferior están formadas por un material plástico recubierto, en la parte inferior de la primera capa por un material semiconductor. Este material actuará con la capa compuesta por un material conductor al ser presionado el sensor. Entre la película de material semiconductor y el conductor se encuentran unos espaciadores que las mantienen alejadas cuando no se está efectuando ninguna fuerza.

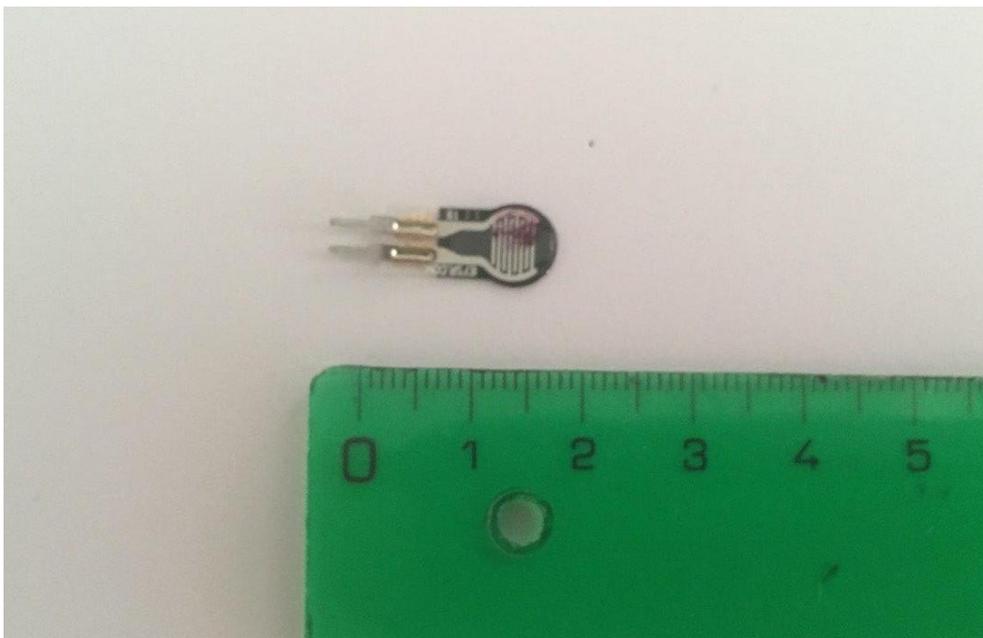


Figura 21.- Sensor FSR 400 Short evaluado.

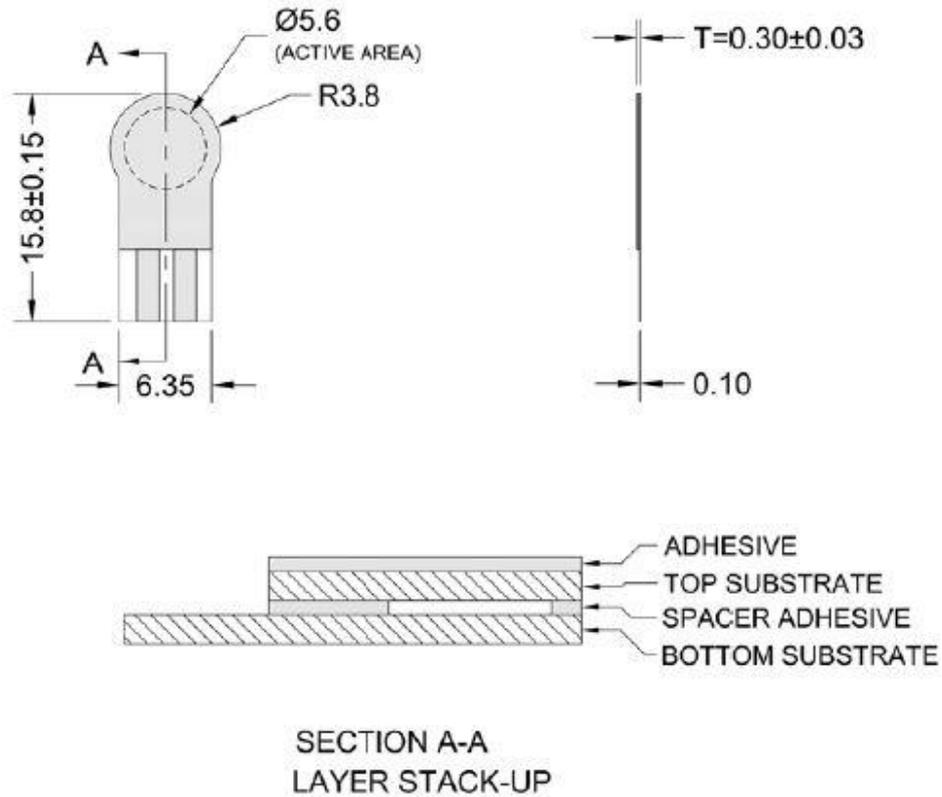


Figura 22.- Dimensiones del sensor FSR400 Short<sup>[35]</sup>.

Este sensor nos permite un rango de actuación de 0.2 a 20N, con un error por repetibilidad del 2% y una histéresis del 10%. El tiempo de respuesta de este dispositivo es menor de 3 microsegundos y ha sido testado en operaciones a 85°C y -40°C, donde la resistencia interna se reducía entre el 5 y el 15%. También ha sido probado durante diez millones de ciclos, aplicando una fuerza de 10N cada 0.25 segundos, donde la resistencia interna disminuía un 10%.

El montaje seguirá el siguiente esquema.

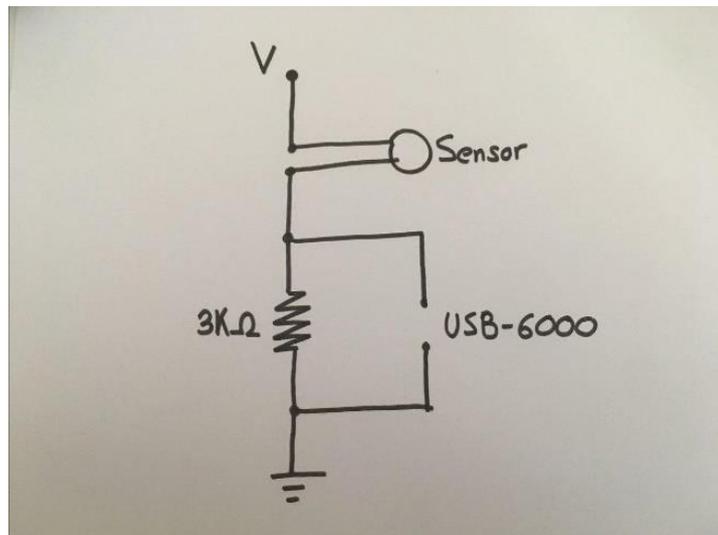
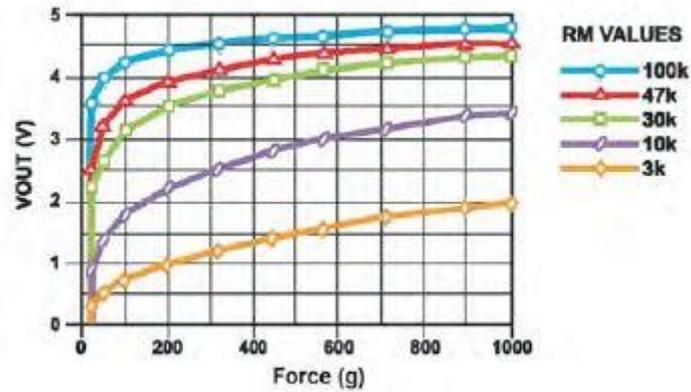


Figura 23.- Esquema de montaje del sensor con una resistencia de  $3K\Omega$ .

El fabricante nos da la posibilidad de, durante el montaje, usar diferentes tipos de resistencias. Variando el valor de esta se puede cambiar la sensibilidad del sensor para adecuarnos al rango de fuerzas que queremos medir. Estos valores dados por el fabricante son  $3000\Omega$ ,  $10000\Omega$ ,  $30000\Omega$ ,  $47000\Omega$  y  $100000\Omega$ <sup>[35]</sup>.



Gráfica 1.- Respuesta del sensor a diferentes resistencias asociadas<sup>[35]</sup>.

### 3.1.2.- SingleTact S8-100N

SingleTact ofrece varios tipos de sensores capacitivos estándar, aunque permite el diseño personalizado de sensores adaptados a las necesidades del comprador. Dentro de esta gama se opta por el sensor comercial denominado S8-100N.

Este sensor capacitivo está compuesto por dos capas, superior e inferior, que actúan como electrodos, entre las cuales se encuentra una capa compuesta por un material dieléctrico.

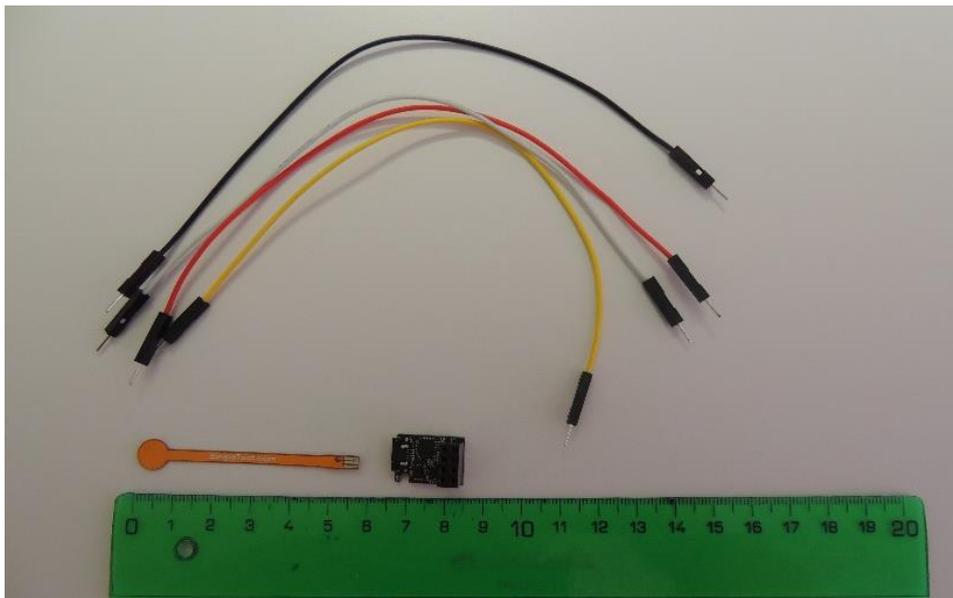


Figura 24.- Sensor SingleTact S8-100N evaluado.

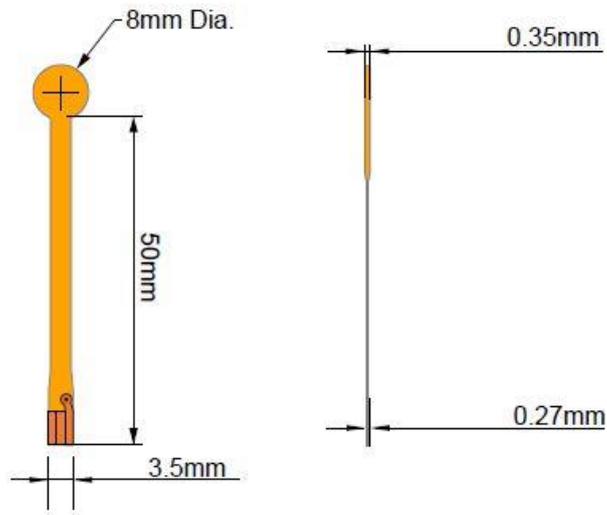


Figura 25.- Dimensiones del sensor SingleTact S8-100N<sup>[36]</sup>.

El rango de actuación de este sensor irá desde los 0.2N hasta los 100N, su error por repetibilidad será menor del 1%, el error de linealidad será menor del 2% y una histéresis por debajo del 4%. El tiempo de respuesta es de 1 microsegundo y el rango de temperaturas de operación está entre -40°C y 200°C. En cuanto a su vida útil, el fabricante asegura que ha sido probado durante un millón de ciclos sin sufrir cambios significativos<sup>[36]</sup>.

Para poder leer los datos adquiridos por el sensor, este viene junto a un chip electrónico que permite la alimentación y la salida de datos. El voltaje con el que debe ser alimentado esta electrónica estará entre 3.7 y 12V, mientras que la salida estará entre 0.5V y 1.5V, lo que significará que por debajo de estos valores tendremos presión negativa, que puede dañar el sensor, mientras que por encima habrá una sobrepresión, que no debe superar tres veces el valor máximo de la escala<sup>[37]</sup>.

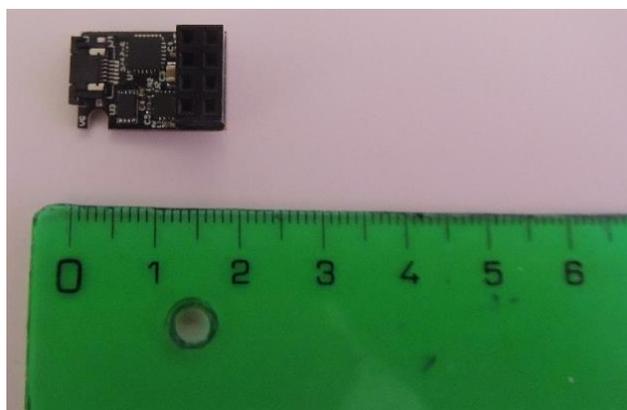


Figura 26.- Chip electrónico sensor SingleTact S8-100N.

### 3.1.2.- Tekscan FlexiForce A101

Dentro de la oferta de Tekscan, y fuera de la opción personalizable que ofrece, se elige el sensor piezorresistivo FlexiForce A101.

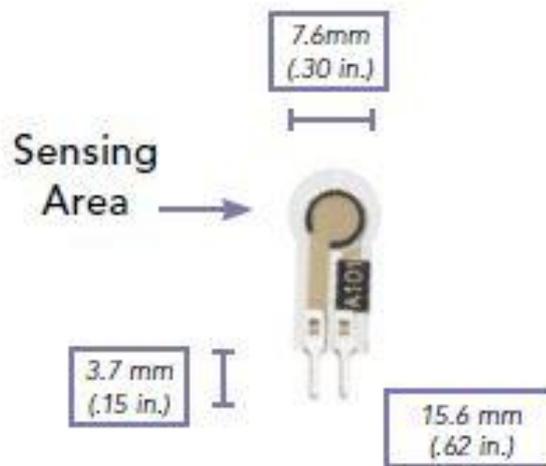


Figura 27.- Dimensiones del sensor Tekscan A101<sup>[38]</sup>.

Este sensor está compuesto por dos capas, superior e inferior, fabricadas en poliéster. Después las sigue una capa conductora de plata, y otra capa de un material sensible a la presión. Estas capas se unen mediante una película de adhesivo.

En cuanto al intervalo de medición, este va hasta los 44N. Los errores serán, por repetibilidad, del 2.5%, y de linealidad de entorno al 3%, mientras que la histeresis se sitúa en el 4.5%. La respuesta del sensor se dará en menos de 5 microsegundos y puede operar entre -40°C y 60°C, con una vida útil de tres millones de actuaciones<sup>[38]</sup>.

## 3.2.- Desarrollo de un método de calibración.

Puesto que los sensores vienen sin calibrar es necesario desarrollar un método para poder relacionar su voltaje de salida con la fuerza que se aplica en ese instante.

Para desarrollar este método servirá de apoyo las técnicas de impresión 3D para la creación de útiles que sirvan de adaptación para colocar el sensor sobre un transductor de fuerza previamente calibrado, y se aplicará una fuerza vertical y normal al sensor mediante una máquina de ensayos.

La señal de salida será recogida por una tarjeta de adquisición de datos que será interpretada por el software correspondiente. Esta salida será relacionada, teniendo en cuenta el tiempo de cada medición, con la fuerza medida por el transductor de fuerza, también asociada a una tarjeta de adquisición de datos y a un software.

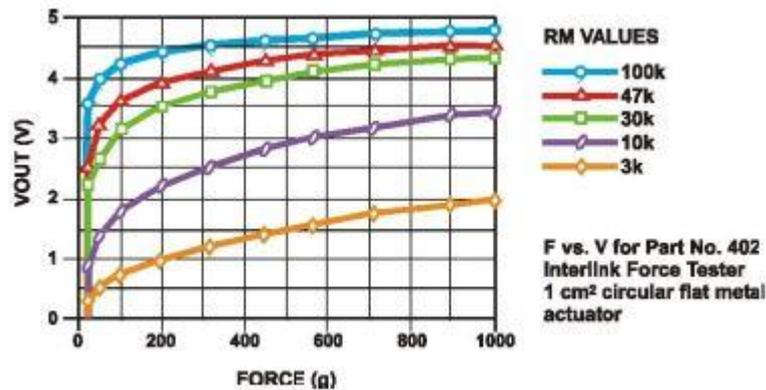
### 3.2.1.- Descripción del método.

Como cabe esperar, el funcionamiento de los diferentes sensores no es el mismo y se debe desarrollar un método de calibración específico para cada uno.

#### 3.2.1.1.- Interlink Electronics FSR400

Según las especificaciones del fabricante<sup>[35]</sup>, la gráfica que relaciona la fuerza con el voltaje de salida se obtiene mediante la aplicación de la fuerza usando un actuador metálico circular de 1cm<sup>2</sup> de superficie, aproximadamente el 80% de la superficie activa del sensor.

Siguiendo esta premisa, se adapta este método a la aplicación que se desea para este sensor, de forma que el actuador será una pieza impresa en 3D, con una superficie circular también de 1cm<sup>2</sup>, pero con un recubrimiento de un material elástico.



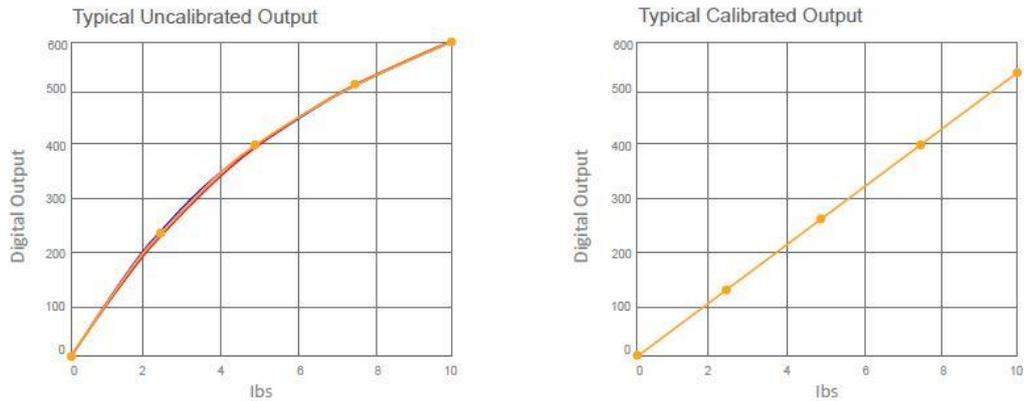
Gráfica 2.- Respuesta del sensor FSR 400 en función de la resistencia. Se detalla el método de aplicación de la carga<sup>[35]</sup>.

Para acoplar el sensor al transductor de fuerza se desarrolla un acople con un cajeteado en el cual irá alojado el sensor. Este cajeteado actuará a la vez de guía, para asegurar el contacto con la superficie del actuador, que irá solidario a la máquina de ensayos.

#### 3.2.1.2.- SingleTact S8-100N

Para el caso del sensor capacitivo con el que se va a trabajar, en el caso de un sensor sin calibrar la salida será gráfica curva. Esta gráfica se obtiene para diferentes valores de fuerza aplicada relacionándolos con el voltaje de salida<sup>[37]</sup>.

Este proceso se realizará dos veces, una en sentido ascendente y otra en sentido descendente, para obtener así una serie de puntos. Estos puntos, una vez pasado los datos a un formato Excel, se pueden aproximar a una recta por regresión, de la cual obtendremos una ecuación que relacione la fuerza aplicada con el voltaje de salida.



Grafica 3.- Respuesta ante una carga, calibrado y sin calibrar, del sensor SingleTact S8-100N<sup>[37]</sup>.

En cuanto a los útiles de calibración, se usarán los mismos que para el sensor resistivo, ya que las dimensiones de ambos son casi idénticas.

### 3.2.2.- Descripción de los útiles para calibración.

Para poder realizar la calibración debemos disponer de varios elementos que nos permitan aplicar una fuerza y poder leerla. También se necesitan una serie de útiles que permitan el acople de los sensores a dichos elementos para ser calibrados.

#### 3.2.2.1.- Máquina de ensayos Mark-10 ES30

El primer elemento necesario es una máquina capaz de ejercer una fuerza. Para tal efecto se dispone de una máquina de ensayos marca Mark-10, más concretamente el modelo ES30.

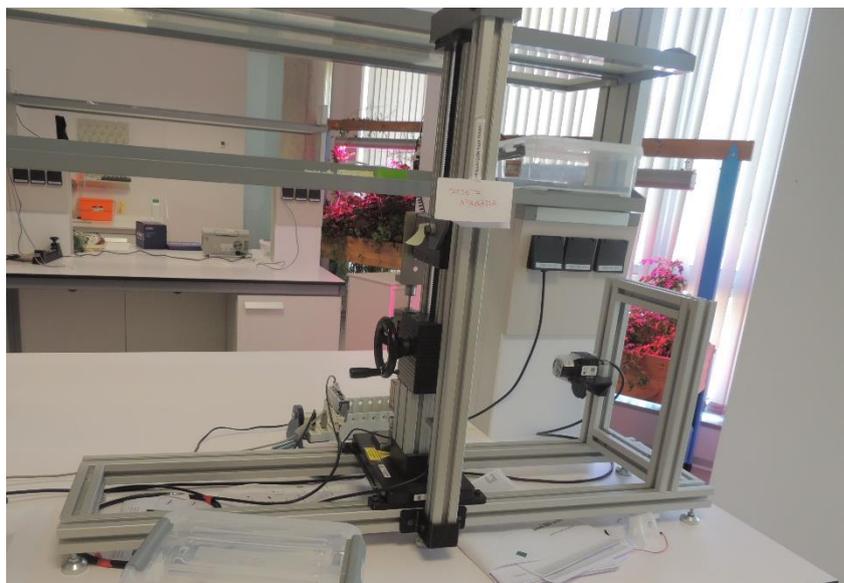


Figura 28.- Máquina de ensayos Mark-10 ES300.

Se trata de una máquina de ensayos capaz de actuar tanto a tracción como a compresión, por lo que puede usarse para otras aplicaciones como ensayos de probetas a tracción, y, con los útiles adecuados, a flexión<sup>[39]</sup>.

La máquina está compuesta por un carro móvil, que se desplaza gracias a la acción de un tornillo sinfín accionado manualmente mediante una ruleta. Accionando dicha ruleta se desplazará el carro verticalmente a razón de 1.27mm por revolución. El recorrido del carro móvil es de 330mm y todo este conjunto tiene capacidad para ejercer una fuerza de 1000N<sup>[40]</sup>.

### 3.2.2.2.- Transductor de fuerza HBM U93

Para medir la fuerza necesitamos un transductor de fuerza acorde a la máquina de ensayos que estamos empleando, esto es, con una capacidad para registrar hasta 1000N.

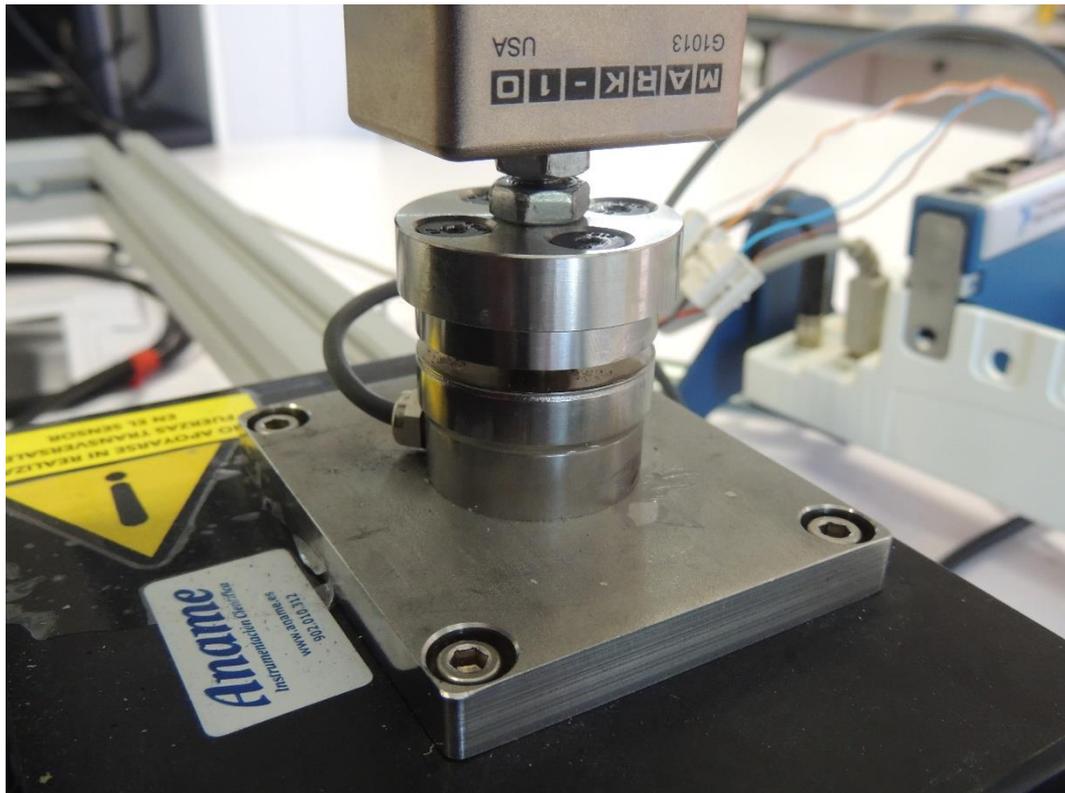
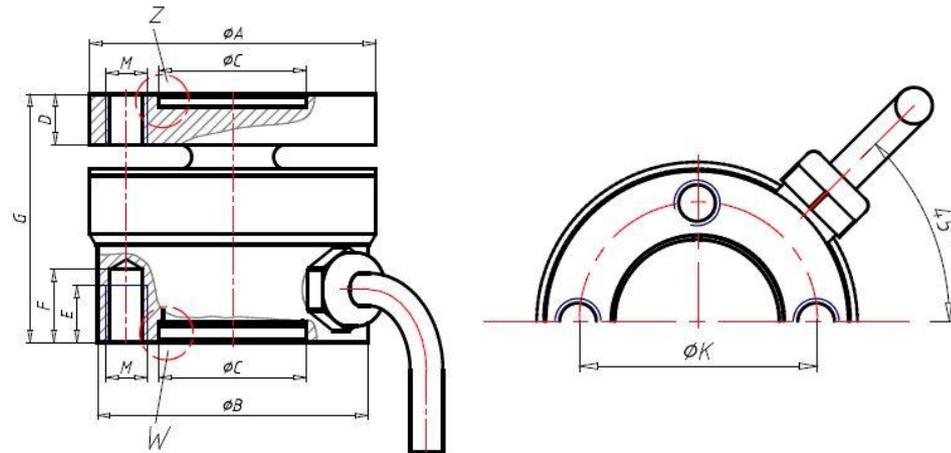


Figura 29.- Transductor de fuerza HBM U93.

El elegido es el transductor de fuerza U93 del fabricante HBM. Se trata de un aparato cuya máxima fuerza admisible es de 1000N, tanto a tracción como a compresión<sup>[41]</sup>.

Cabe destacar que esta máxima fuerza se produce cuando se aplica aproximadamente en el eje del transductor, admitiendo una mínima desviación de 1.5mm, puesto que, al desviarse más de este valor de este se produciría un par de fuerza que, de ser excesivo, podría causar daños en dicho transductor. Además la lectura se corresponde únicamente con fuerzas normales, ya que no dispone de capacidad para leer esfuerzos cortantes.



ORDERNO (Order No.)	1-U93/1KN
TYP (Type)	U93
CAPACITY (Nominal force)	1kN
DRAWNO (Drawing No.)	254101-1001.4B
A (/ mm)	35
B (/ mm)	33
C (/ mm)	18
D (/ mm)	6.2
E (/ mm)	7
F (/ mm)	9
G (/ mm)	30.5
K (/ mm)	26
M (Gewinde)	M5

Figura 30.- Dimensiones del transductor de fuerza HBM U93<sup>[41]</sup>.

### 3.2.2.3.- Útiles y acoples para el ensayo

Puesto que no se disponen de útiles específicos para el fin que se necesita se ha de recurrir a su diseño y fabricación aprovechando las facilidades de la impresión 3D.

En primer lugar, se necesita un acople que permita colocar el sensor sobre el transductor de fuerza. Para tal efecto se diseña una pieza cilíndrica, cuyo diámetro coincide con el del transductor, en cuya parte superior tiene un cajeteado acorde a la forma del sensor. No obstante, la forma de unir este acople al transductor de fuerza se hará mediante unos tornillos, concretamente cuatro de rosca métrica M5. Para tal efecto se divide el cilindro que va a ser impreso en dos partes, una inferior que dispone de agujeros concordantes con los existentes en el transductor, y otra superior donde se situará el sensor. Ambas partes se unirán mediante una unión que restrinja el máximo posible el movimiento relativo entre ambas. Esta división también será de utilidad en caso de necesitar calibrar futuros sensores, ya que bastará con sustituir una de las partes eliminando la necesidad de desatornillar completamente el montaje.

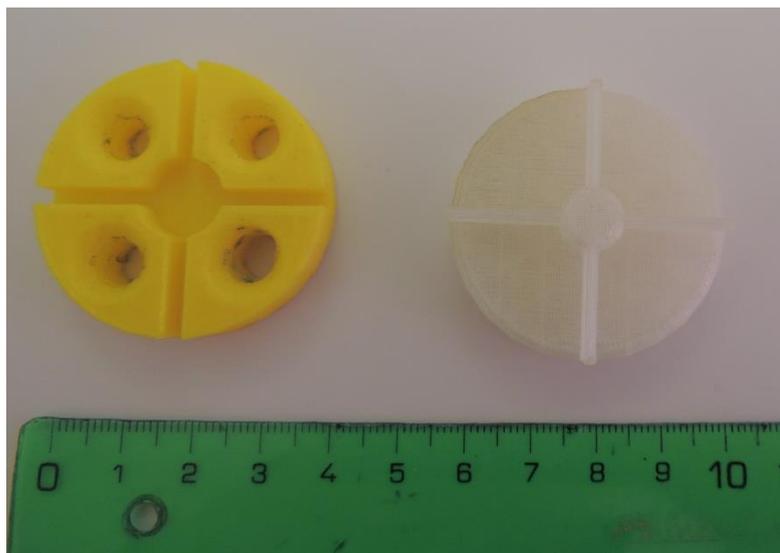


Figura 31.- Acoples para colocar el sensor en el transductor de fuerza.

Para poder ejercer una fuerza se ha de diseñar un elemento que vaya solidario al carro móvil de la máquina de ensayos, debido al movimiento limitado de este. Al igual que antes se va a dividir en dos partes, una previamente diseñada [39], y otra que irá unida a esta y que hará de pulsador, en este caso teniendo una forma cilíndrica en un extremo cuya base tendrá una superficie igual al 80% de la del sensor que se va a calibrar y con un material elástico en el extremo donde se producirá el contacto para simular las condiciones de trabajo. De ser necesario calibrar sensores de distintas dimensiones bastaría con sustituir este pulsador por uno acorde.



Figura 32. - Acople y pulsador solidarios a la máquina de ensayos.

#### 3.2.2.4.- Electrónica para la adquisición de datos

Para la lectura de los datos obtenidos, tanto por el sensor como por la el transductor de fuerza, se dispone de dos tarjetas acopladas a sus dos chasis con conexión USB, todos del fabricante National Instruments.

En el caso del sensor, la tarjeta en cuestión es el modelo NI USB-6000. Se trata de un módulo de entrada de voltaje de 8 canales analógicos, capaz de leer voltajes entre  $\pm 10V$  a razón de 10.000 muestras cada segundo por canal<sup>[42]</sup>. Esta tarjeta se conecta mediante un puerto USB 2.0 al ordenador.



Figura 33.- Tarjeta lectora NI USB-6000

En el caso del transductor de fuerza la toma de datos se realiza mediante un módulo de entrada NI-9237. Este se basa en un puente de Wheatstone para medir la diferencia de potencial entre dos extremos de una resistencia variable, que en este caso es el transductor de fuerza<sup>[43]</sup>. Este módulo dispone de 4 canales de lectura que pueden funcionar de forma simultánea y con capacidad de leer hasta 50.000 muestras por segundo cada uno<sup>[44]</sup>. Para conectarla al ordenador se utiliza el chasis CDAQ-9172, que dispone de ocho espacios para conectar las correspondientes tarjetas lectoras<sup>[45]</sup>.

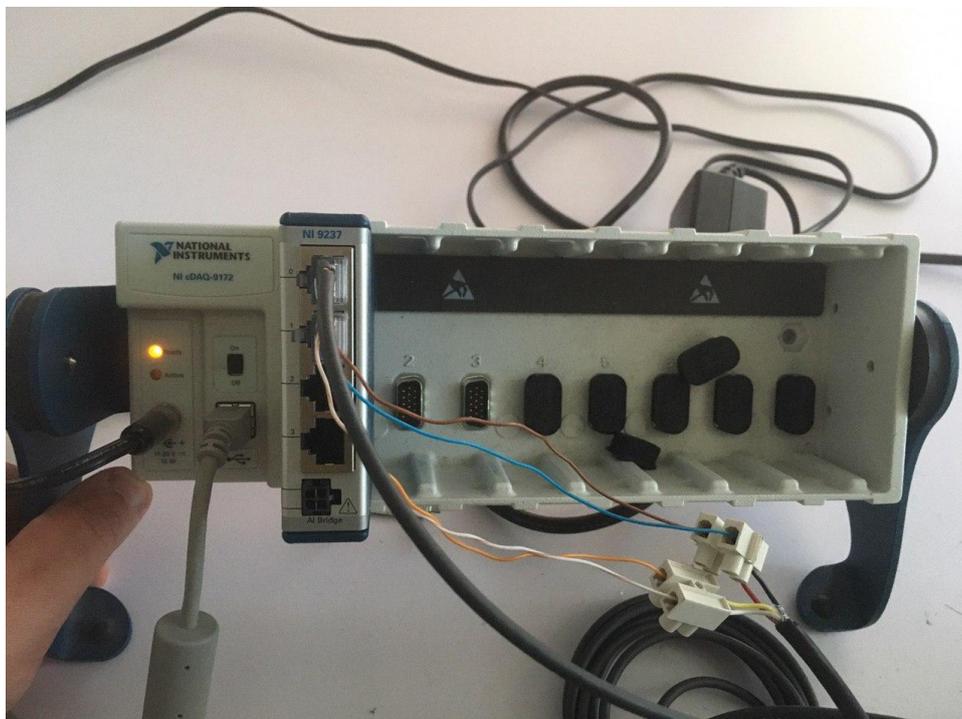


Figura 34.- Tarjeta lectora NI-9237 y chasis NI cDAQ-9172.

### 3.2.2.5.- Fuente de alimentación

Para alimentar al conjunto se precisa de una fuente de corriente. En este caso se opta por el modelo LABPS23023 del fabricante Velleman. Es una fuente de alimentación capaz de suministrar una tensión de salida regulable en un rango de 0 a 30 voltios en continua, con una intensidad, también regulable, de 0 a 3 amperios, mientras está conectada a una red que la suministra 230V de corriente alterna a 50Hz<sup>[45]</sup>.



Figura 35.- Fuente de alimentación Velleman LABPS23023.

### 3.2.3.- Programa para la adquisición de datos.

Para poder leer los datos obtenidos por las tarjetas de adquisición se necesita un software capaz de hacerlo. Para ello el propio fabricante de las tarjetas, National Instruments, dispone de un programa específico denominado LabView.

Este software se basa en un lenguaje de programación visual, a partir del cual se puede desarrollar un diagrama de bloques que formaría el programa encargado de la lectura. Este diagrama de bloques se traduce a la vez en un interfaz con el que interactúa el usuario cuando el programa se está ejecutando, actualizándose los datos en tiempo real.

En este caso tendremos dos programas diferentes, uno para leer los datos del transductor de fuerza y otro correspondiente a la lectura de la salida de voltaje del sensor.

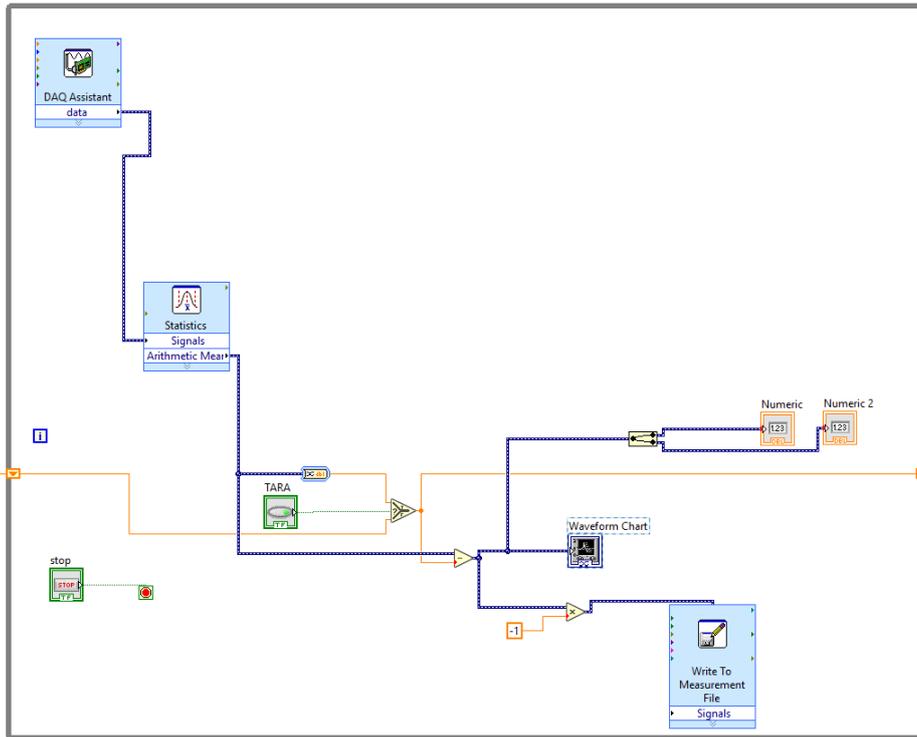


Figura 36.- Programa para lectura de los datos provenientes del transductor de fuerza.

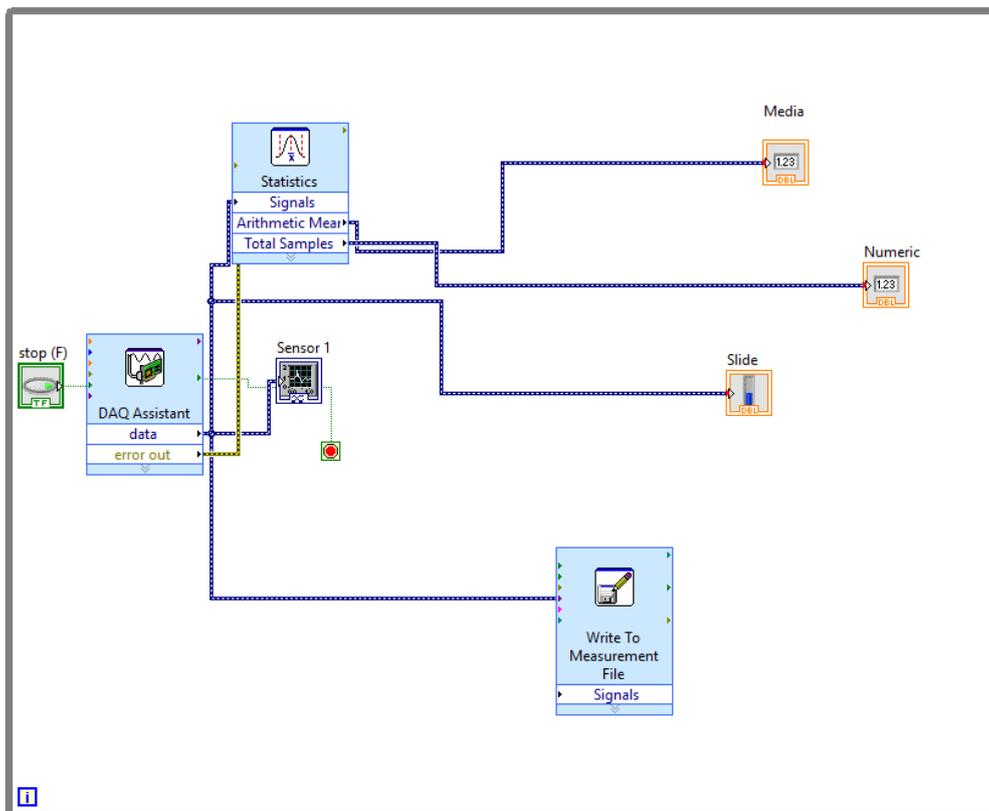


Figura 37.- Programa para lectura de los datos provenientes del sensor.

### 3.3.- Calibración

Puesto que se va a elegir entre dos posibles sensores de distinta naturaleza, se deberá calibrar cada uno por un método acorde a ellos.

#### 3.3.1.- Sensor resistivo FSR400

Puesto que se van a medir fuerzas relativamente pequeñas, dentro de las resistencias asociadas que ofrece el fabricante como posibilidad para montar el circuito se elige la de  $3000\Omega$ .

Para este caso se tomarán una serie de medidas siguiendo el siguiente patrón:

- De 0N a 2N mediciones cada 0.25N aproximadamente
- De 2N a 5N mediciones cada 0.50N aproximadamente
- De 5N a 15N mediciones cada 1N aproximadamente
- De 15N a 20N mediciones cada 2N aproximadamente

Con los valores obtenidos nos quedará una gráfica en la que, entrando según el voltaje leído se puede obtener un valor para la fuerza.

Para empezar, se alimenta el circuito con una tensión de 5 voltios y se procede a medir la diferencia de potencial entre los extremos del sensor con el ordenador. Una vez comprobada que la lectura es correcta y no hay interferencias o errores, se comienza a aplicar paulatinamente la fuerza mediante la máquina de ensayos.

Puesto que estamos funcionando dos programas a la vez, el correspondiente al sensor y al transductor de fuerza, los valores arrojados por estos se tienen que correlacionar mediante el tiempo en el que se toma la medida, puesto que el programa registra horas, minutos, segundos y milésimas de segundo en el que se toma cada muestra.

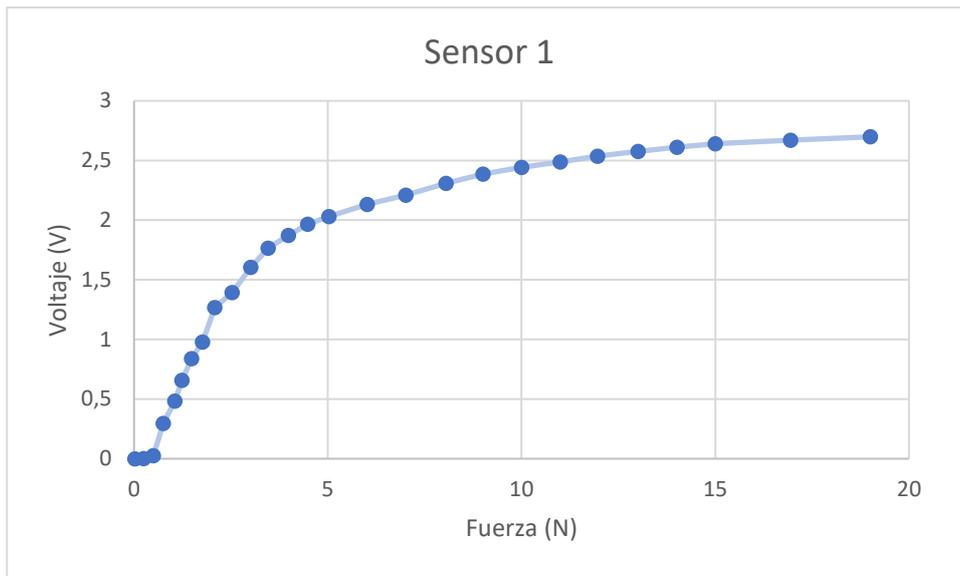
Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tiempo	Fuerza	Voltaje	Fuerza ABS
18/02/2020 01:59:45,503 PM	0,02563144	0	0,03
18/02/2020 01:59:47,203 PM	-0,25191533	0,001	0,25
18/02/2020 01:59:49,603 PM	-0,494925224	0,02686898	0,49
18/02/2020 01:59:53,753 PM	-0,758344898	0,29609283	0,76
18/02/2020 01:59:57,203 PM	-1,054715874	0,48419823	1,05
18/02/2020 02:00:01,253 PM	-1,24014444	0,65633542	1,24
18/02/2020 02:00:03,953 PM	-1,490486118	0,839331	1,49
18/02/2020 02:00:06,803 PM	-1,767222219	0,97889306	1,77
18/02/2020 02:00:09,303 PM	-2,085779293	1,26727876	2,09
18/02/2020 02:00:23,253 PM	-2,535009024	1,39470499	2,54
18/02/2020 02:00:28,503 PM	-3,013959304	1,6048465	3,01
18/02/2020 02:00:32,303 PM	-3,460733186	1,7645285	3,46
18/02/2020 02:00:36,653 PM	-3,990052226	1,8727929	3,99
18/02/2020 02:00:42,253 PM	-4,484095251	1,96572782	4,48
18/02/2020 02:00:46,053 PM	-5,034336699	2,03183617	5,03
18/02/2020 02:00:52,353 PM	-6,021218669	2,1317971	6,02
18/02/2020 02:01:02,003 PM	-7,017614075	2,21036065	7,02
18/02/2020 02:01:09,153 PM	-8,050549186	2,30808603	8,05
18/02/2020 02:01:14,203 PM	-9,006601898	2,3872883	9,01
18/02/2020 02:01:18,003 PM	-10,00716986	2,44349637	10,01
18/02/2020 02:01:20,803 PM	-11,00463821	2,48788796	11,00
18/02/2020 02:01:23,003 PM	-11,96671133	2,53579256	11,97
18/02/2020 02:01:25,803 PM	-13,00764584	2,57667116	13,01
18/02/2020 02:01:32,053 PM	-14,01735767	2,61212056	14,02
18/02/2020 02:01:35,453 PM	-15,00532451	2,63990523	15,01
18/02/2020 02:01:41,003 PM	-16,94481385	2,67152226	16,94
18/02/2020 02:01:45,603 PM	-19,00649959	2,6986682	19,01

Tabla 1.- Datos para la calibración del sensor resistivo FSR400 Short.

Nótese que el valor de fuerza que lee el programa correspondiente al transductor es negativo y es necesario tener su valor absoluto, que en la tabla aparece como Fuerza ABS. Esto es debido a que la máquina de ensayos y el transductor de fuerza tienen como labor, la mayor parte del tiempo, el ensayo de probetas a tracción, por lo que, puesto que en este caso se trabaja a compresión, la lectura será negativa.

Si se grafican los datos obtenidos se obtendrá la siguiente gráfica.



Gráfica 4.- Gráfica de calibración del sensor FSR400 Short.

Con estos valores, cuando se tenga una lectura del voltaje del sensor en funcionamiento podrá obtenerse un valor de la fuerza correspondiente buscando el valor en la tabla o entrando con este en la gráfica.

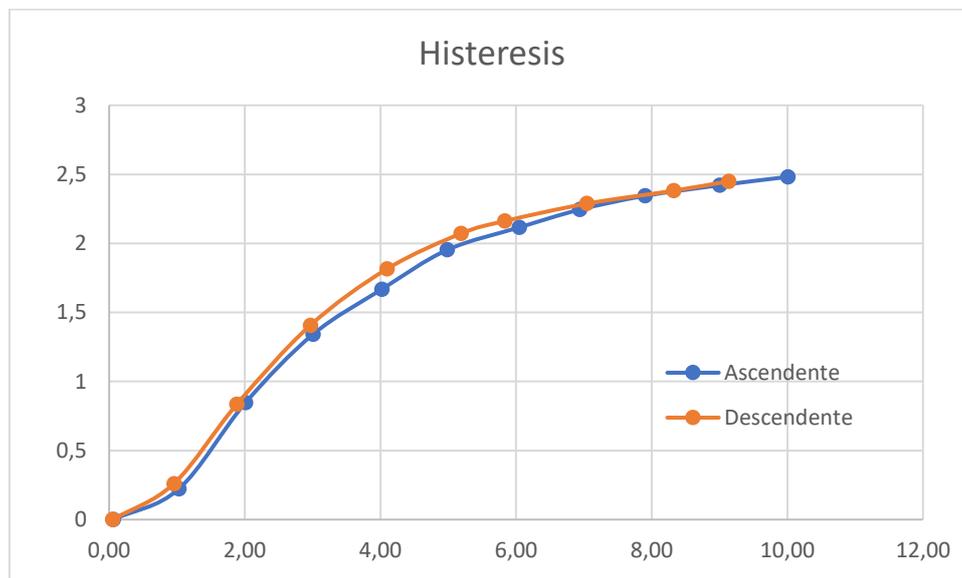
Adicionalmente se realiza un test para comprobar la histéresis del sensor, con el objetivo de ver el error que puede tener el sensor a la hora de medir durante un ciclo. Para esto se hará un ciclo de carga y descarga desde 0 a 10N, manteniendo unos instantes esta fuerza.

Como resultado se tienen los siguientes valores, destacando en color azul el ciclo ascendente y en color marrón el ciclo descendente.

Tiempo	Fuerza (N)	Voltaje (V)	Fuerza ABS (N)
18/02/2020 02:19:22,029 PM	-0,05725944	0	0,06
18/02/2020 02:19:25,929 PM	-1,02577023	0,22104229	1,03
18/02/2020 02:19:26,829 PM	-2,00726364	0,84476018	2,01
18/02/2020 02:19:27,329 PM	-3,00383787	1,34041311	3,00
18/02/2020 02:19:27,979 PM	-4,01804414	1,66712248	4,02
18/02/2020 02:19:28,479 PM	-4,98449249	1,9526339	4,98
18/02/2020 02:19:28,929 PM	-6,04453732	2,11519018	6,04
18/02/2020 02:19:29,529 PM	-6,9383712	2,24421323	6,94
18/02/2020 02:19:30,379 PM	-7,90090926	2,34417416	7,90
18/02/2020 02:19:31,079 PM	-9,00180941	2,42082152	9,00
18/02/2020 02:19:31,879 PM	-10,0067288	2,48150068	10,01
18/02/2020 02:19:39,629 PM	-9,13348349	2,44924492	9,13
18/02/2020 02:19:39,429 PM	-8,32224245	2,38153975	8,32
18/02/2020 02:19:39,329 PM	-7,04127845	2,28764674	7,04
18/02/2020 02:19:39,229 PM	-5,83004389	2,16117859	5,83
18/02/2020 02:19:39,179 PM	-5,18674243	2,07079858	5,19
18/02/2020 02:19:39,079 PM	-4,09589219	1,81466865	4,10
18/02/2020 02:19:38,979 PM	-2,96485423	1,40588273	2,96
18/02/2020 02:19:38,829 PM	-1,88295711	0,83549863	1,88
18/02/2020 02:19:38,679 PM	-0,95341804	0,25968534	0,95
18/02/2020 02:19:38,079 PM	-0,05189472	0	0,05

Tabla 2.- Datos de histéresis del sensor resistivo FSR400 Short.

Gráficamente el resultado es el siguiente:



Gráfica 5.- Gráfica de histéresis del sensor FSR400 Short

Con estos datos podemos comprobar que el error por histéresis ronda el 10% como afirma el fabricante <sup>[35]</sup>. Concretamente, para un valor de entorno a los 4N de

fuerza, en el que se ve a simple vista que la distancia entre las curvas ascendente y descendente es mayor, el error debido a la histéresis es de aproximadamente el 8.29%.

### 3.3.2.- Sensor capacitivo SingleTact S8-100N

Este sensor viene con un chip añadido en el que viene toda la electrónica necesaria para su funcionamiento, por lo que no es necesario añadirles ningún elemento a mayores.

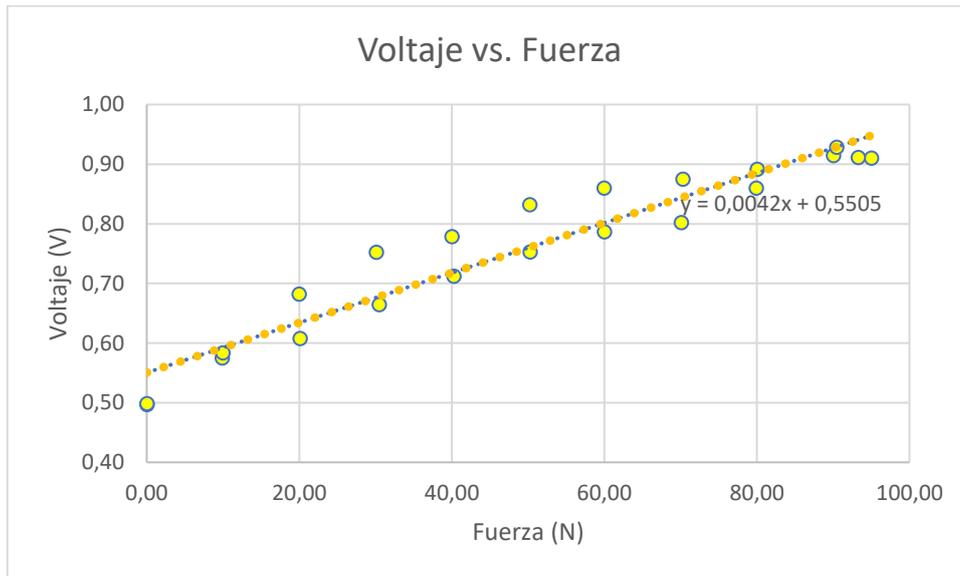
La respuesta de este tipo de sensores es lineal de 0,5V a 1,5V como especifica el fabricante. Para ello se tomarán una serie de medidas cada 10N en sentido ascendente y descendente. Estos valores de voltaje obtenidos se correlacionarán, al igual que en el caso anterior, con la fuerza leída por el transductor según el tiempo en el que se recoge la lectura. Teniendo esta serie de valores se pueden graficar y obtener la recta de regresión, y su correspondiente ecuación que relaciona fuerza y voltaje.

Los datos obtenidos son los siguientes:

Tiempo	Fuerza (N)	Voltaje (V)	Fuerza ABS (N)
10/01/2020 11:54:13,261 AM	0,00692645	0,4970	0,01
10/01/2020 11:54:28,161 AM	-9,89672816	0,5749	9,90
10/01/2020 11:54:30,661 AM	-20,1027145	0,6078	20,10
10/01/2020 11:54:33,161 AM	-30,4806462	0,6643	30,48
10/01/2020 11:54:36,411 AM	-40,2476435	0,7122	40,25
10/01/2020 11:54:39,661 AM	-50,2574123	0,7525	50,26
10/01/2020 11:54:43,561 AM	-60,0126191	0,7863	60,01
10/01/2020 11:54:51,911 AM	-70,0912709	0,8020	70,09
10/01/2020 11:54:55,761 AM	-79,9001011	0,8598	79,90
10/01/2020 11:54:59,811 AM	-90,0491141	0,9144	90,05
10/01/2020 11:55:02,061 AM	-95,0235567	0,9102	95,02
10/01/2020 11:55:05,111 AM	-93,2592434	0,9112	93,26
10/01/2020 11:55:09,361 AM	-90,454532	0,9281	90,45
10/01/2020 11:55:16,411 AM	-80,0235135	0,8914	80,02
10/01/2020 11:55:21,111 AM	-70,2730872	0,8745	70,27
10/01/2020 11:55:24,411 AM	-59,9533211	0,8595	59,95
10/01/2020 11:55:29,111 AM	-50,2014403	0,8320	50,20
10/01/2020 11:55:33,261 AM	-40,0146954	0,7783	40,01
10/01/2020 11:55:40,361 AM	-30,0758721	0,7521	30,08
10/01/2020 11:55:47,361 AM	-19,9741997	0,6822	19,97
10/01/2020 11:55:51,811 AM	-9,98063238	0,5835	9,98
10/01/2020 11:55:57,061 AM	-0,02265104	0,4986	0,02

Tabla 3.- Datos para la calibración del sensor capacitivo SingleTact S8-100N.

Si se representan gráficamente estos datos se tiene:



Gráfica 6.- Gráfica de calibración del sensor SingleTact S8-100N.

Esto es, la ecuación que relaciona voltaje y será:

$$V = 0.0042F + 0.5505$$

En donde:

- V es el voltaje leído, en Voltios.
- F es la fuerza ejercida, en Newtons.

Como se observa en la ecuación, si no se ejerce fuerza alguna el valor del voltaje leído es de 0.5505V, lo que se aproxima a la cifra de 0.5V dada por el fabricante para este caso.

No obstante, como lo que se pretende es obtener un valor de la fuerza con la lectura del voltaje, es conveniente despejar dicha fuerza F para que quede en función de este, por lo tanto:

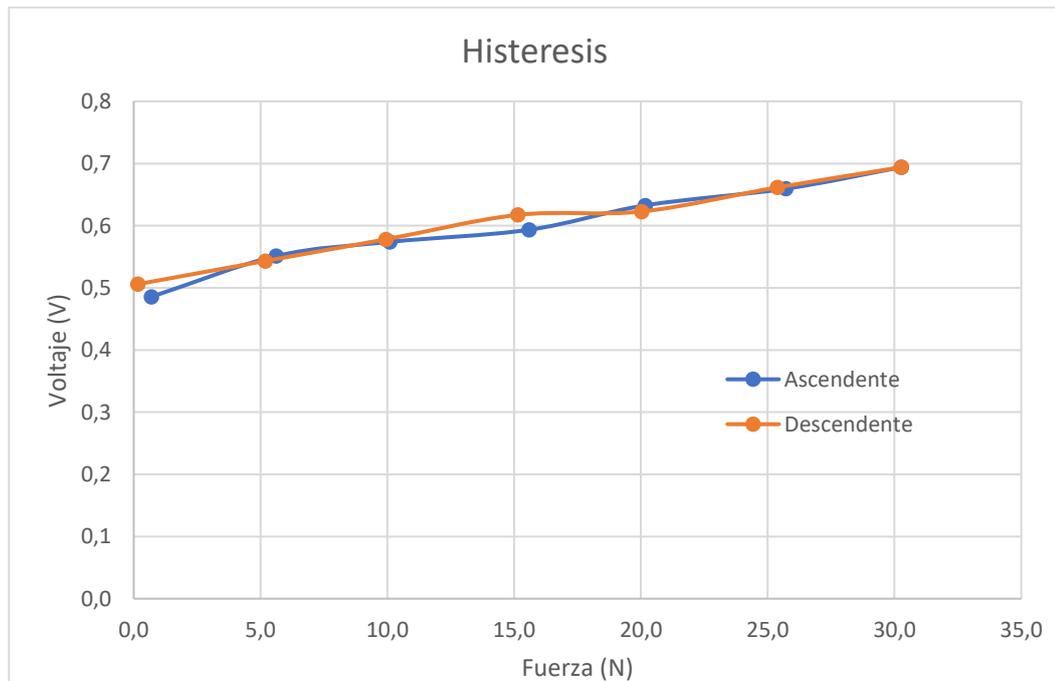
$$F = 238.0952V - 131.0714$$

Como para el caso del sensor resistivo, se procede a realizar un test de histéresis de la misma manera. Sin embargo, puesto que este sensor tiene una capacidad de medida mayor, hasta 100N, los valores de fuerza usados para este test difieren de los del sensor resistivo. Así pues se realizarán dos medidas, ascendente y descendente, desde 0N a 30N en intervalos de 5N y manteniendo los 30N un breve espacio de tiempo antes de volver a bajar hasta 0N. Los datos obtenidos son los siguientes:

Tiempo	Fuerza (N)	Voltaje (V)	Fuerza ABS (N)
10/01/2020 12:42:48,300 PM	-0,70653362	0,4858	0,7065
10/01/2020 12:42:48,800 PM	-5,62582688	0,5513	5,6258
10/01/2020 12:42:48,950 PM	-10,100063	0,5739	10,1001
10/01/2020 12:42:49,150 PM	-15,5889941	0,5934	15,5890
10/01/2020 12:42:49,500 PM	-20,1705008	0,6327	20,1705
10/01/2020 12:42:50,250 PM	-25,7166318	0,6595	25,7166
10/01/2020 12:42:50,850 PM	-30,2699557	0,6940	30,2700
10/01/2020 12:42:55,500 PM	-25,3938544	0,6618	25,3939
10/01/2020 12:42:55,450 PM	-20,0296113	0,6228	20,0296
10/01/2020 12:42:55,400 PM	-15,1454748	0,6174	15,1455
10/01/2020 12:42:55,300 PM	-9,9485752	0,5781	9,9486
10/01/2020 12:42:55,150 PM	-5,1855622	0,5433	5,1856
10/01/2020 12:42:54,750 PM	-0,16414851	0,5059	0,1641

Tabla 4.- Datos de histéresis del sensor SingleTact S8-100N.

Esto es, de forma gráfica:



Gráfica 7.- Gráfica de histéresis del sensor SingleTact S8-100N.

Por lo tanto, el error debido a la histéresis se puede cuantificar, en el caso de una fuerza de aproximadamente 15N, en el 3.88%, por debajo del 4% especificado en el manual del fabricante [36].

### 3.4.- Selección

Como se puede deducir de las especificaciones dadas por el fabricante, el sensor capacitivo trabajará en un rango de fuerzas más amplio, tendrá una respuesta más rápida y el error será menor que el sensor resistivo analizado.

No obstante, es en este punto donde se tienen que atender a otros criterios más allá del simple rendimiento del sensor. Aspectos como la facilidad de montaje, el coste de cada uno y la necesidad de terceros elementos como chips electrónicos juegan un papel crucial en este punto. En la siguiente tabla se exponen todas las variables a considerar para la elección del sensor.

	SingleTact S8-100N	Interlink FSR400
<b>Tiempo de respuesta</b>	1 milisegundo <sup>[36]</sup>	3 milisegundos <sup>[35]</sup>
<b>Rango de uso</b>	0-100N <sup>[36]</sup>	0.2-20N <sup>[35]</sup>
<b>Error linealidad</b>	2% <sup>[36]</sup>	6% <sup>[35]</sup>
<b>Error histéresis</b>	4% <sup>[36]</sup>	10% <sup>[35]</sup>
<b>Error repetibilidad</b>	1% <sup>[36]</sup>	2% <sup>[35]</sup>
<b>Temperatura de uso</b>	-40°C – 200°C <sup>[36]</sup>	-40°C – 60°C <sup>[35]</sup>
<b>Coste unitario</b>	44.85€ (+ 17.93€ extensor)	5.11€

Tabla 5.- Comparativa entre el sensor FSR400 y SingleTact S8-100N

Aunque el sensor capacitivo supere al resistivo en varios de estos aspectos hay dos problemas principales para su uso. El primero es el coste, casi diez veces superior, lo que encarecería el precio considerablemente. Además, por temas de diseño, tendría que usarse un extensor que permitiese que el chip que contiene la electrónica pudiese colocarse más alejado, ya que la longitud del sensor es insuficiente para evitar que dicho chip moleste. También surge el problema de que la capacidad del sensor sufriría variaciones durante la flexión del dedo e induciría errores en la lectura, así como problemas como la desconexión del chip.

En cambio, el sensor resistivo es barato, permite que mediante unos simples cables se pueda llevar sus conexiones a un lugar donde no afecte al diseño y como electrónica solo precisa de unas resistencias eléctricas, las cuales tienen un coste ínfimo. Por este motivo el sensor elegido es el resistivo FSR400 de Interlink Electronics.

## 4.- Diseño y fabricación.

Puesto que se va a fabricar un sustituto de un dedo humano, es crucial diseñarlo acorde a su anatomía, respetando las proporciones y con los materiales adecuados, siempre atendiendo a que sea factible su fabricación mediante impresión 3D por el método FDM/FFF.

Como se ha visto anteriormente, los dedos, salvo el pulgar, están formados por tres falanges. Sin embargo, en este caso se van a diseñar dos, una que hará las funciones de falange proximal y otra que actuará como el conjunto de falange media y distal. El diseño está inspirado en el modelo Brunel Hand 2.0<sup>[35]</sup>, así como el accionamiento de las falanges, aunque bien es cierto que el uso de cables para flexionar los dedos es bastante común dentro del mundo de las prótesis. Para favorecer el retroceso del dedo, cuando deja de estar accionado, se dispone de un muelle que se contraerá devolviendo el dedo a su posición original.

### 4.1.- Diseño de los componentes

Para el diseño de estas partes se usará el software de CAD CATIA, de Dassault Systèmes, atendiendo a las dimensiones aproximadas de un dedo humano común.

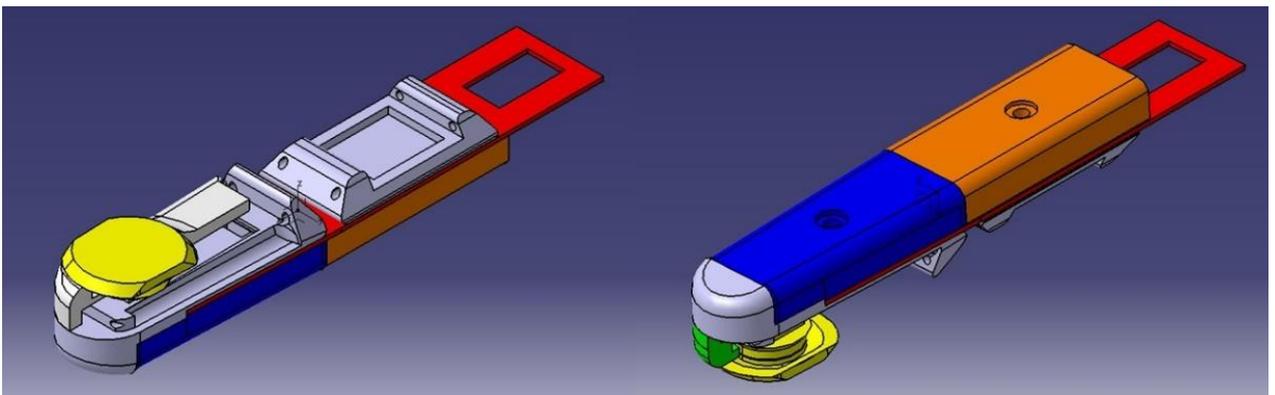


Figura 38.- Diseño CAD completo del dedo.

#### 4.1.1.- Falange proximal.

La falange proximal en este caso se ha dividido en 3 partes que, unidas, conformarán la pieza que realice esta función. Estas tres piezas son una parte central, una cubierta superior y una almohadilla en la parte inferior.

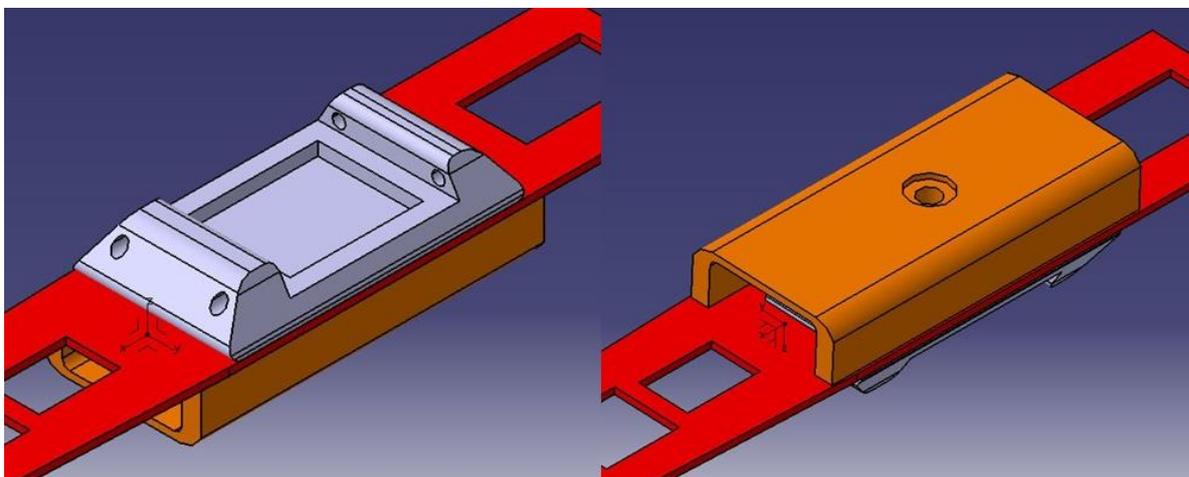


Figura 39.- Diseño ensamblado de la falange proximal.

##### - Pieza central

Esta pieza cumpliría la función de hueso, siendo la parte principal de la falange. Sus extremos tienen forma angular para mejorar la amplitud del movimiento y actuar de tope. En la parte inferior dispone de dos agujeros pasantes por los cuales atravesará el hilo usado para accionar el dedo y una cavidad central donde irá alojada la almohadilla, mientras que en la parte superior tiene dos salientes donde se acoplará el muelle encargado del retroceso y un alojamiento para colocar una tuerca de rosca métrica M3 destinada a sujetar la cubierta.

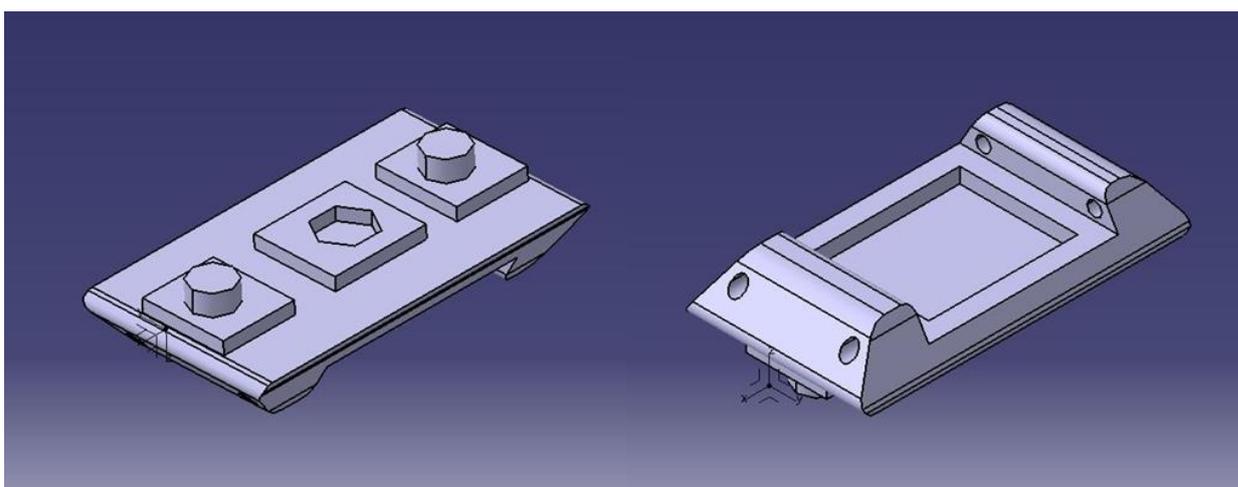


Figura 40.- Pieza central de la falange proximal.

### - Almohadilla

Esta parte de la falange tiene como función el proteger el hilo de accionamiento, tapándolo y aislándolo de posibles daños. A su vez puede servir también para mejorar el agarre del dedo, ya que puede fabricarse con patrones o materiales que lo hagan posible. Además se ha intentado imitar en lo posible la morfología de un dedo humano.

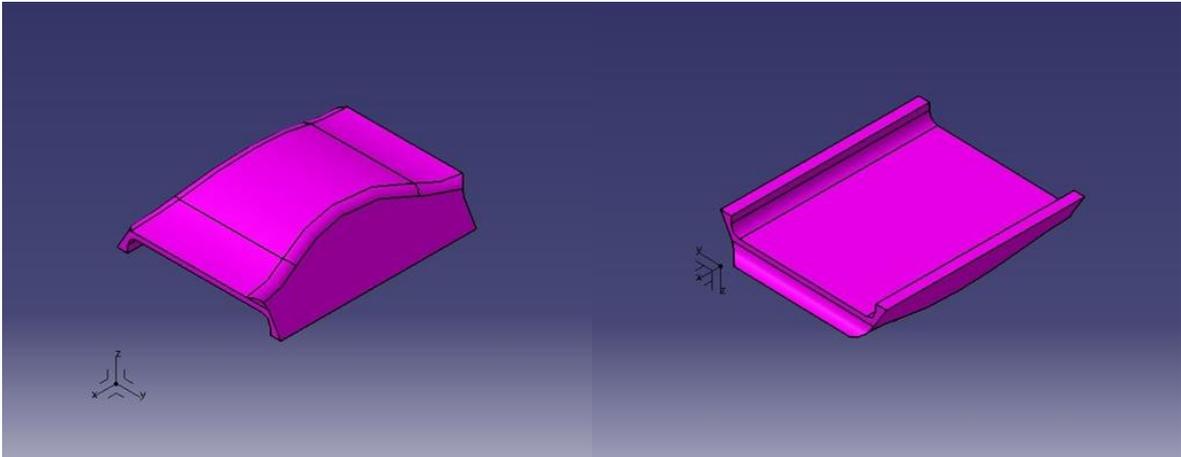


Figura 41.- Almohadilla de la falange proximal.

### - Cubierta

El cometido de esta parte es el de proteger los cables que vienen del sensor de fuerza y se dirigen hacia la palma de la mano. Esta va unida a la parte central mediante un tornillo de rosca métrica M3. También actuará a modo de tope durante el retroceso.

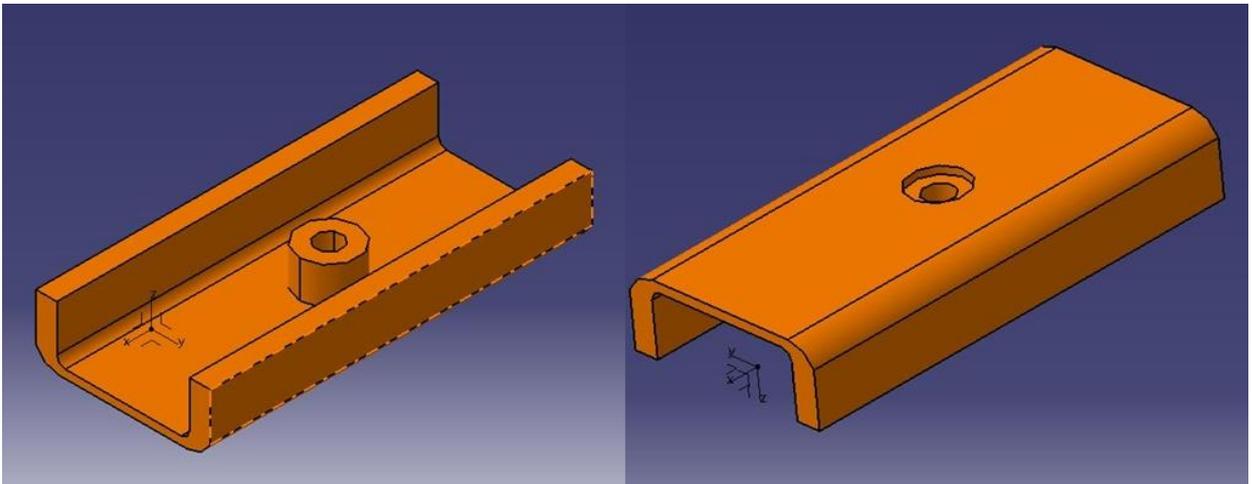


Figura 42.- Cubierta de la falange proximal.

#### 4.1.2.- Falange distal.

Al igual que ha ocurrido con la falange proximal, esta pieza también se divide en varias partes, una parte central, una cubierta, dos partes inferiores y una almohadilla o pulsador.

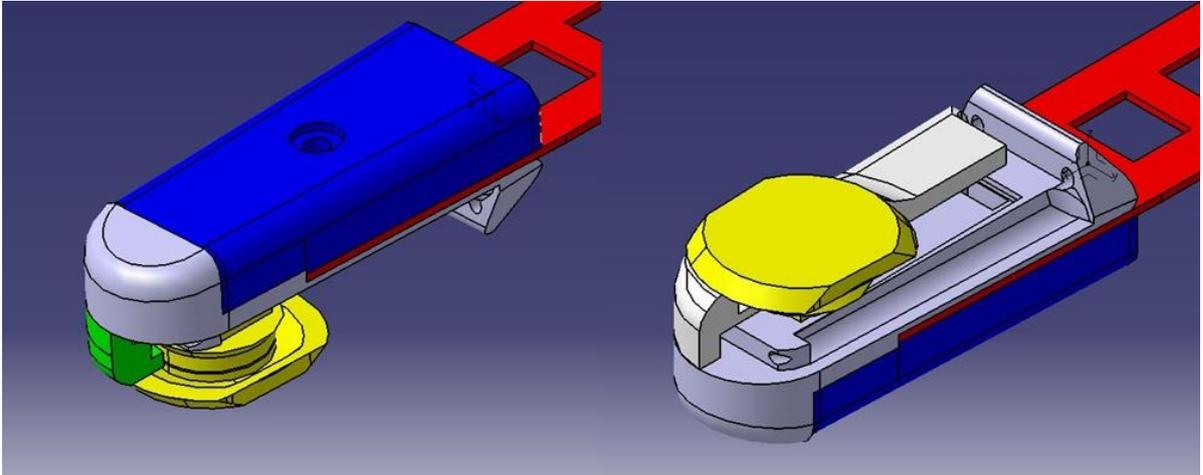


Figura 43.- Diseño ensamblado de la falange distal.

##### - Pieza central

En esta pieza es donde irá alojado, en la parte inferior, el sensor, para lo cual lleva un cajeteado con la forma de este. Dentro de este cajeteado se encuentra un agujero pasante por el cual atravesarán los cables del sensor. También dispone de dos agujeros pasantes por donde atravesará el hilo encargado de realizar el movimiento. En la parte superior dispone de un saliente, en donde se encajará el muelle de retroceso, y un alojamiento para la tuerca que unirá la cubierta.

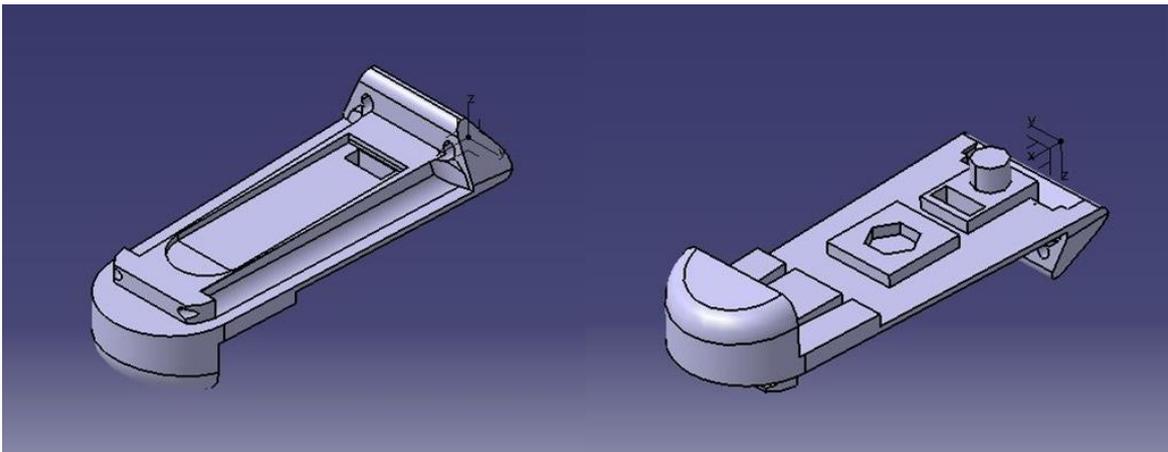


Figura 44.- Pieza central de la falange distal.

#### - Cubierta

Al igual que en el caso de la falange proximal, la función de esta cubierta es proteger los cables del sensor y actuar de tope cuando el dedo está extendido. Para unirse a la pieza central dispone de un agujero pasante para albergar el tornillo.

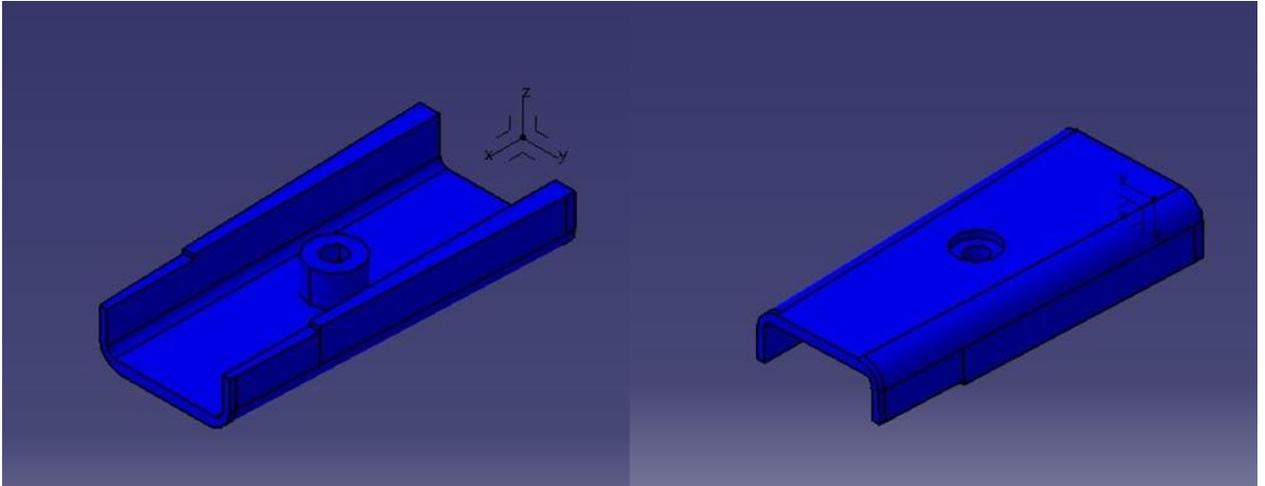


Figura 45.- Cubierta de la falange distal.

#### - Parte inferior

Su cometido es el de proteger el sensor de acciones exteriores y de servir de guía al pulsador que lo accionará. Para la guía se diseña de tal forma que quede un hueco en el cual se pueda encajar el pulsador y este pueda desplazarse libremente en su eje vertical limitando el resto de desplazamientos y garantizando en la medida de lo posible el correcto contacto con el sensor de fuerza.

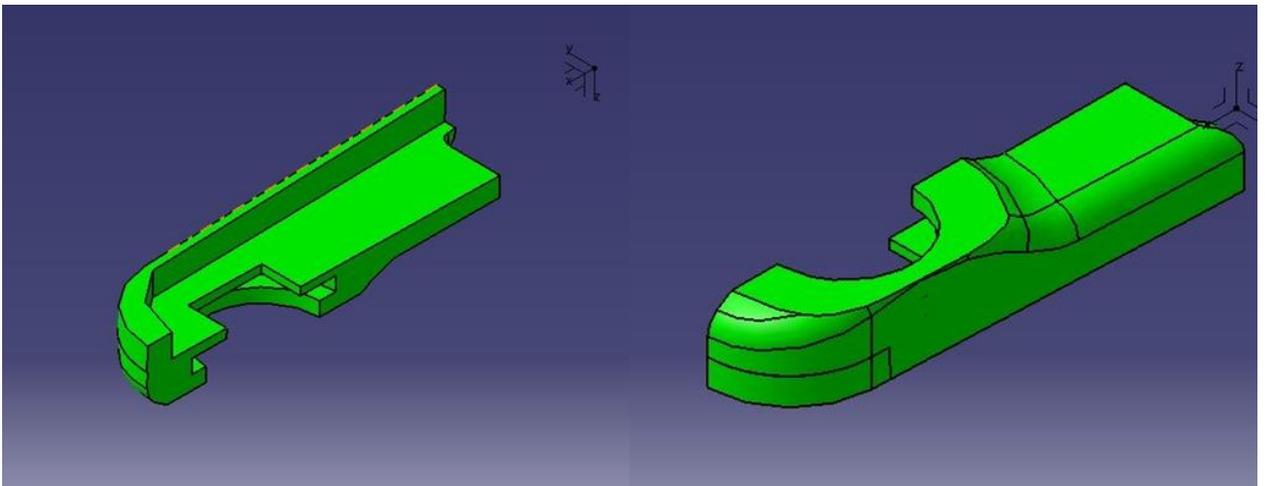
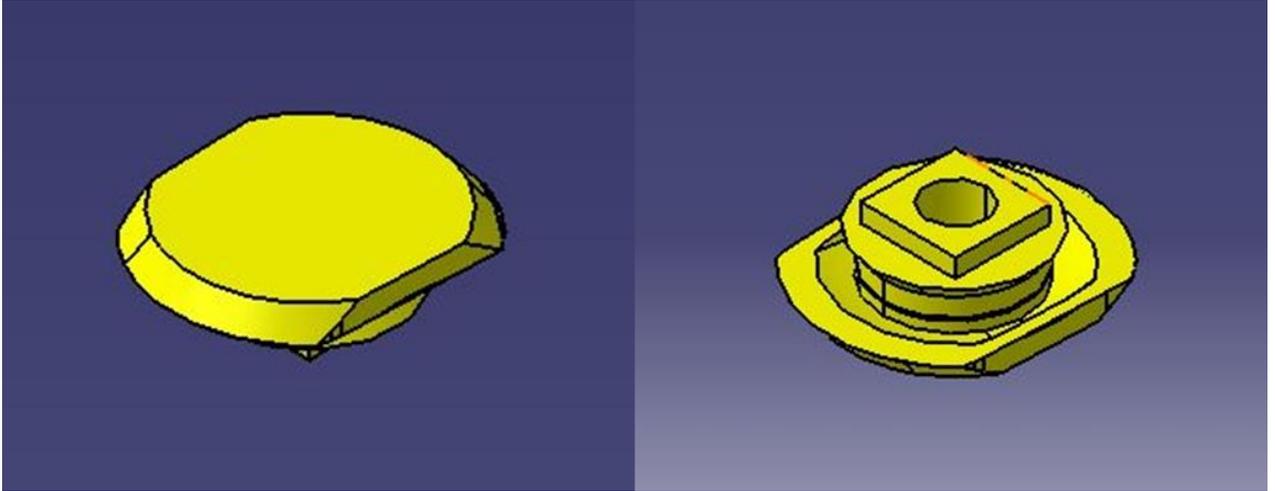


Figura 46.- Parte inferior de la falange distal.

El hecho de dividirlo en dos partes se debe a la necesidad de fabricar de forma independiente el pulsador que actúa sobre el sensor.

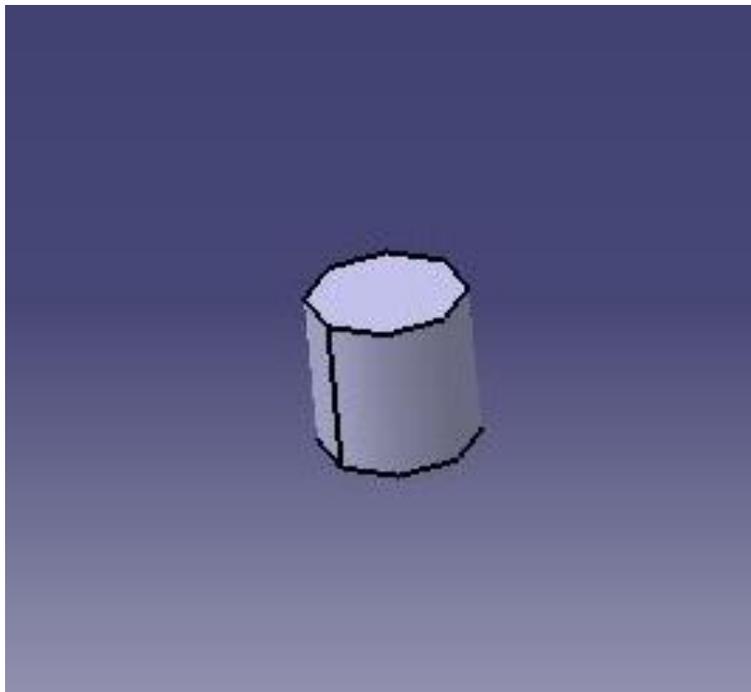
- **Almohadilla y pulsador**

Esta parte sería el equivalente a la yema del dedo, donde se produce el contacto con los objetos y en donde se medirá la fuerza ejercida. Su forma es acorde a los huecos que se encuentran en la parte inferior y que restringen su movimiento.



*Figura 47.- Almohadilla de la falange distal.*

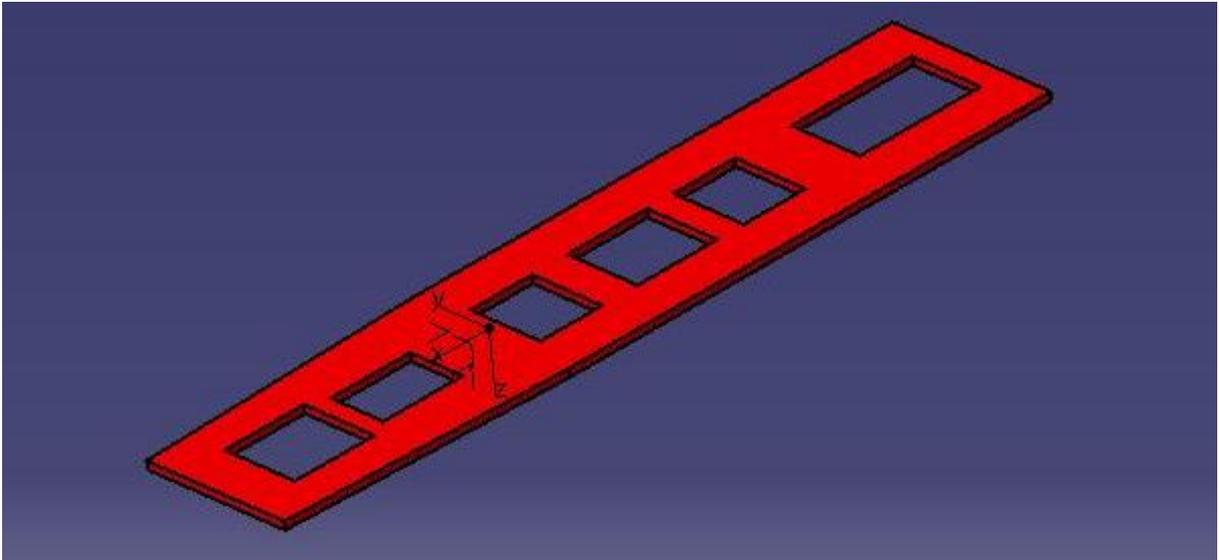
Se divide en dos partes, una primera que actúa como guía y forma la parte que estará en contacto con los objetos que se manipulan que dispone de un hueco donde irá alojado un pequeño cilindro que será el encargado de actuar sobre el sensor.



*Figura 48.- Pulsador que actuará sobre el sensor.*

### 4.1.3.- Ligamentos.

Se trata de una lámina de material elástico, que se acopla entre las cubiertas y la pieza central y está sujeta por la presión realizada entre ambas al apretar el tornillo que las une.



*Figura 49.- Ligamentos.*

Su función es la de unir ambas falanges y permitir el movimiento de una respecto de la otra sin necesidad de pasadores, simplificando la fabricación.

## 4.2.- Fabricación

Una vez finalizado el diseño y sus correspondientes correcciones se procederá a su fabricación. Para este efecto se usa el programa Ultimaker Cura en su versión 3.2.1, el cual laminará el objeto para proceder a su impresión usando la impresora i3 Mega-S, del fabricante Anycubic.

### 4.2.1.- Descripción de la impresora

Para la fabricación de este proyecto se ha utilizado la impresora Anycubic i3-Mega S. Se trata de una máquina que se basa en la tecnología FDM/FFF y cuenta con un solo extrusor<sup>[47]</sup>, lo que impide el uso de dos materiales simultáneamente.



Figura 50.- Impresora Anycubic i3 Mega-S.

Las características de esta impresora se detallan en la siguiente tabla:

Diámetro extrusor	0.4mm
Diámetro filamento	1.75mm
Resolución capas	0.05-0.3mm
Precisión	X/Y: 0.0125mm Z: 0.002mm
Velocidad impresión	20~100mm/s
Temperatura extrusor	260°C máx.
Temperatura base	110°C máx.
Velocidad desplazamiento	100mm/s
Dimensiones zona impresión	210x210x205 (mm)
Peso	11kg
Alimentación	220-110V AC - 60-50Hz
Temperatura ambiente funcionamiento	8°C - 40°C
Materiales admitidos	PLA, ABS, TPU, HIPS

Tabla 6.- Datos técnicos de la impresora Anycubic i3 Mega-S<sup>[47]</sup>.

#### 4.2.2.- Descripción de los materiales

Para la fabricación se usarán dos materiales distintos. Por una parte se usará PLA, con colores blanco y negro, y TPU flexible de color negro.

##### 4.2.2.1.- BasicFil Filament PLA 175PLA1000

Este material será usado para la fabricación de las partes rígidas del dedo como son las cubiertas, las piezas centrales de las falanges y partes de la yema.

No es un material tóxico y no requiere de especial cuidado durante su uso en impresión 3D, además de ser biodegradable y estar disponible en una amplia gama de colores.

Se ha elegido el color blanco y el negro para dar un aspecto más tecnológico una vez terminado el montaje, aunque es posible combinar distintos colores.



Figura 51.- PLA Blanco y negro BasicFil 175PLA1000.

Por causas ajenas se ha tenido que recurrir a este fabricante en lugar de a otros de fabricantes más especializados, y no se dispone de una hoja de características mecánicas para este material.

#### 4.2.2.2.- Smart Materials 3D SmartFil FLEX TPU

Para las partes flexibles se tiene que recurrir a un material adecuado a estas características.



Figura 52.- TPU Smart Materials 3D SmartFil FLEX.

Este material requerirá mayores precauciones que el PLA a la hora de imprimir, tales como ralentizar la velocidad de impresión o mejorar la adhesión por distintos métodos<sup>[48]</sup>.

Las características proporcionadas por el fabricante son las siguientes:

<b>Densidad</b>	1.21g/cm <sup>3</sup>
<b>Dureza</b>	93 (Shore A)
<b>Resistencia a tensión</b>	40MPa

*Tabla 7.- Características técnicas del TPU utilizado <sup>[46]</sup>.*

#### 4.2.3.- Parámetros de fabricación.

El software Cura nos permite seleccionar varios perfiles predeterminados para imprimir dependiendo de la calidad que vaya a tener la pieza a fabricar, pudiendo elegir entre un perfil para mejor calidad, denominado High, un perfil intermedio o Normal, o un perfil destinado a un acabado más basto, denominado Draft.

Sin embargo, atendiendo a criterios de rapidez de fabricación, diferentes materiales y a la necesidad de soportes, estos perfiles no se adecuan completamente a lo que se desea, por lo que se debe modificar distintos parámetros partiendo del perfil Normal.

Así, para el PLA y TPu, los materiales usados, se tienen los siguientes parámetros.

	<b>PLA</b>	<b>TPU</b>
<b>Altura de capa</b>	0.2mm	0.2mm
<b>Velocidad de impresión</b>	50mm/s	35mm/s
<b>Temperatura extrusor</b>	205°C	225°C
<b>Relleno</b>	Concéntrico 15%	Zigzag 25%
<b>Espesor de pared</b>	1.2mm	1.2mm
<b>Temperatura cama</b>	55°C	50°C
<b>Soporte</b>	Triangular 15%	No

*Tabla 8.- Diferentes parámetros utilizados en la impresión con ambos materiales.*

A la hora de la impresión de las piezas hay que atender a criterios de funcionamiento y uso de material, así como al posterior postprocesado, por lo que, según la parte del dedo que se esté fabricando se colocará de distinta forma para la impresión.

### - Cubiertas

De las posibles posiciones para la impresión se opta por colocarlas boca abajo con el objetivo de eliminar la necesidad de soporte y reducir el tiempo de impresión.

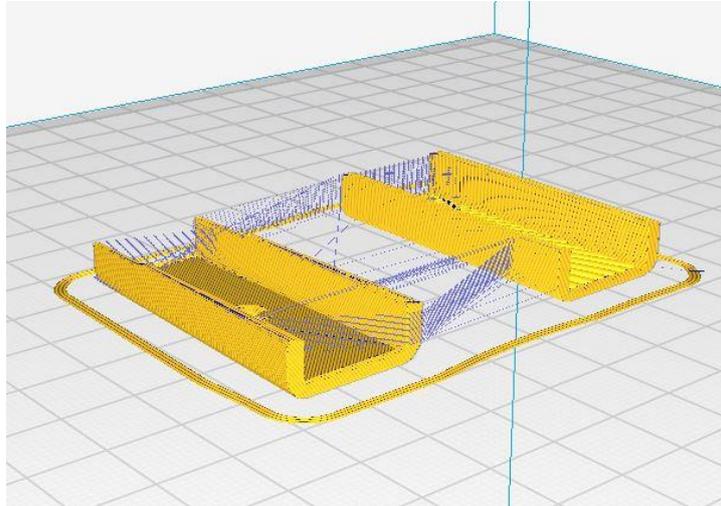


Figura 53.- Colocación de las cubiertas en la bandeja de impresión.

<b>Consumo de material</b>	<b>1.97m</b>
<b>Tiempo de impresión</b>	<b>37 min</b>

Tabla 9.- Cantidad de material utilizado y tiempo empleado para la impresión de las cubiertas

### - Pieza central falange proximal

Para imprimir esta parte se ha de tener en cuenta que en la parte superior dispone tanto de un cajeteado para albergar la tuerca que la unirá a la cubierta como de dos salientes donde irán acoplados sendos muelles encargados del retorno, mientras que en la parte inferior no hay ningún elemento fundamental para el funcionamiento. Así pues se opta por imprimirla de forma que tanto el cajeteado como los salientes estén en la parte superior, pues no les afectará el soporte y no se verán afectados si hay algún problema con su retirada.

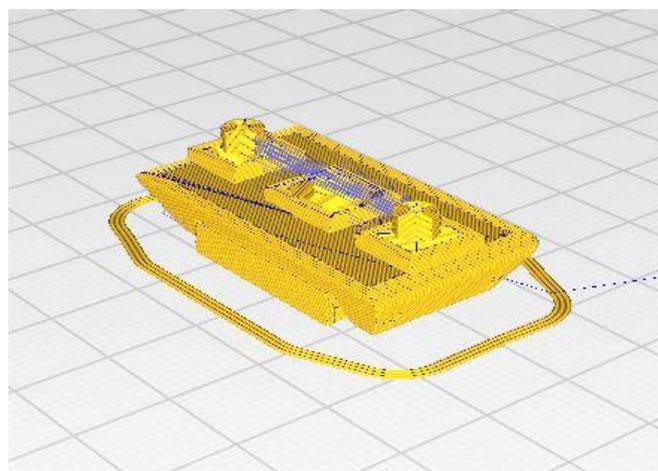


Figura 54.- Colocación de la falange proximal en la bandeja de impresión.

<b>Consumo de material</b>	1.38m
<b>Tiempo de impresión</b>	28 min

Tabla 10.- Cantidad de material utilizado y tiempo empleado para la impresión de la falange proximal.

- **Pieza central falange distal**

Esta pieza tiene el inconveniente de tener partes vitales para el funcionamiento en ambas caras, pues en la parte superior tiene un saliente donde se enganchará el muelle y un cajeteado para una tuerca, y en la parte inferior otro cajeteado en donde se colocará el sensor.

En este caso se da prioridad al cajeteado del sensor orientándolo hacia arriba, ya que si estuviese hacia abajo el acabado sería peor al estar en contacto con el soporte y podría producirse algún daño al retirarlo que podría afectar al funcionamiento del sensor.

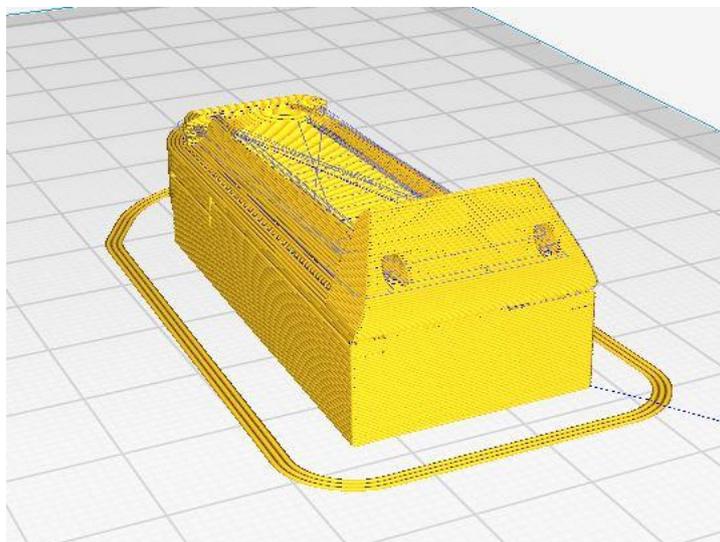


Figura 55.- Colocación de la falange distal en la bandeja de impresión.

<b>Consumo de material</b>	2.41m
<b>Tiempo de impresión</b>	52 min

Tabla 11.- Cantidad de material utilizado y tiempo empleado para la impresión de la falange distal

- **Pieza inferior falange distal**

Pese a estar dividida en dos partes, estas son idénticas, por lo que los criterios de impresión serán los mismos.

Al no ser una pieza estructural, sino que actúa como protección del sensor y como guía para el pulsador que actúa sobre él, no hay especiales requerimientos a la hora de acabado superficial. No obstante, al contar con el hueco que asegura al pulsador en su sitio, va a requerir de un soporte y hay que atender a la facilidad de su retirada, por lo que la mejor posición es con la parte exterior hacia arriba.

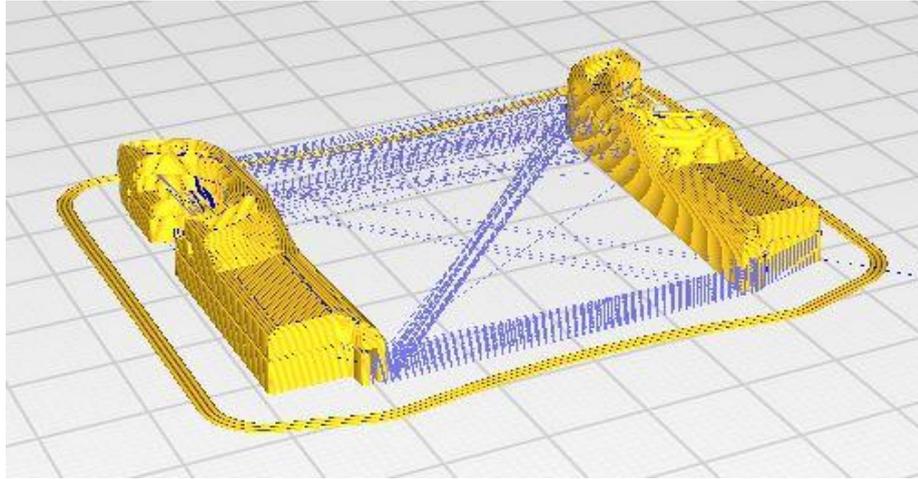


Figura 56.- Colocación de la parte inferior de la falange distal en la bandeja de impresión.

<b>Consumo de material</b>	1.56m
<b>Tiempo de impresión</b>	35 min

Tabla 12.- Cantidad de material utilizado y tiempo empleado para la impresión de parte inferior de la falange distal

- Almohadilla falange distal

Esta pieza no requiere de un acabado específico, pues su labor principal es la de proteger los cables que mueven el dedo, así que se opta por la configuración dentro de la impresora que requiere menor cantidad de material.

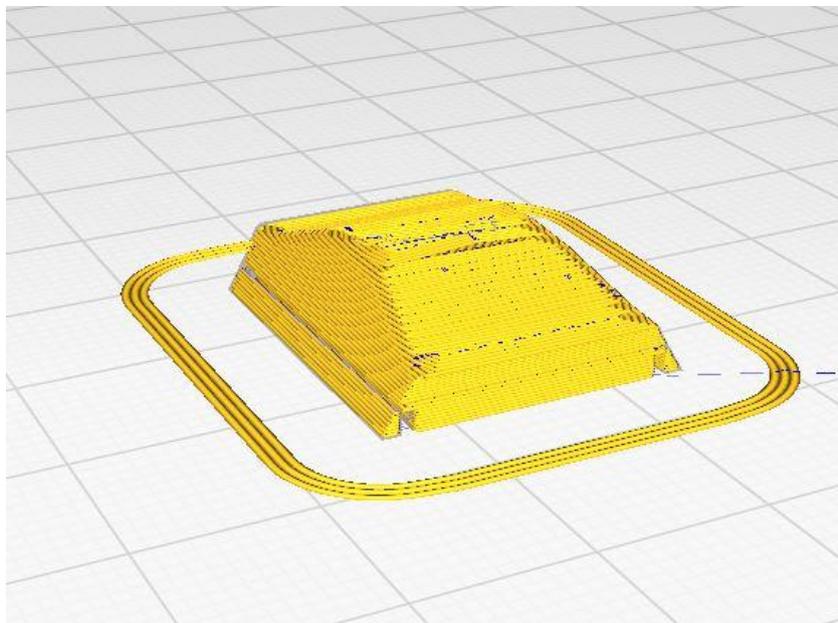


Figura 57.- Colocación de la parte inferior de la almohadilla de la falange proximal en la bandeja de impresión.

<b>Consumo de material</b>	0.63m
<b>Tiempo de impresión</b>	13 min

Tabla 13.- Cantidad de material utilizado y tiempo empleado para la impresión de la almohadilla de la falange proximal

- **Almohadilla falange proximal**

Esta parte es la encargada del contacto con el objeto que se manipule, por lo que se atiende a mejorar la superficie dedicada a ello, orientándola de forma que esté en contacto con la cama.

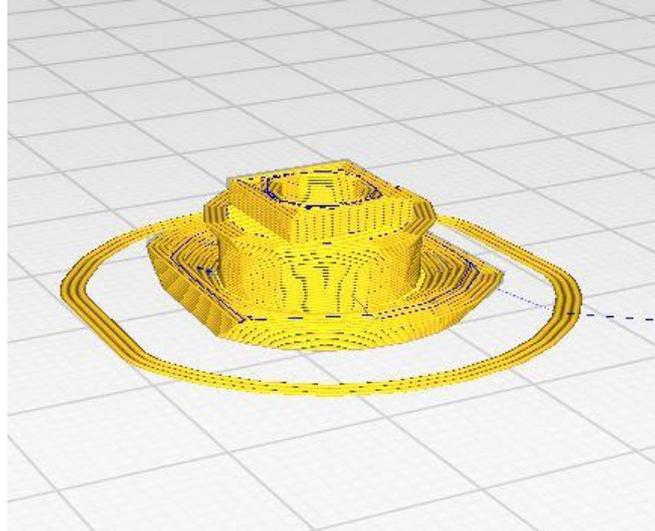


Figura 58.- Colocación de la parte inferior de la almohadilla de la falange distal en la bandeja de impresión.

<b>Consumo de material</b>	0.47m
<b>Tiempo de impresión</b>	8 min

Tabla 14.- Cantidad de material utilizado y tiempo empleado para la impresión de la almohadilla de la falange distal.

- **Ligamentos**

Son la parte encargada de unir el montaje de la falange distal y de la falange proximal, pero no requieren especial cuidado a la hora de su colocación para ser impresos, puesto que sus caras inferior y superior son planas. La única limitación es su colocación apoyada en una de sus caras laterales, pues implicaría el uso de soportes y daría problemas durante su fabricación.

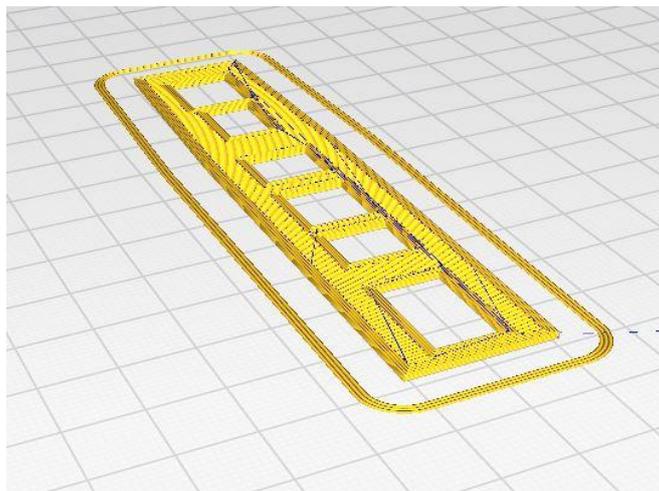


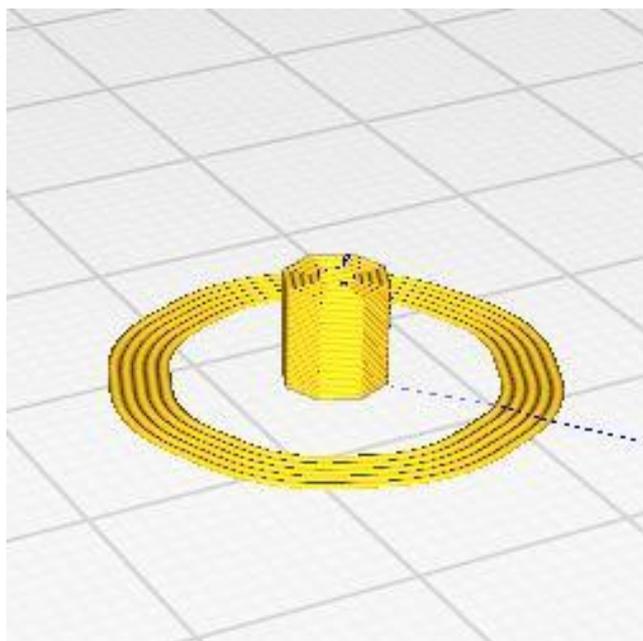
Figura 59.- Colocación de la parte inferior de los ligamentos en la bandeja de impresión.

<b>Consumo de material</b>	0.71m
<b>Tiempo de impresión</b>	14 min

*Tabla 15.- Cantidad de material utilizado y tiempo empleado para la impresión los ligamentos.*

**- Pulsador**

La forma cilíndrica de esta pieza y la necesidad de tener una de sus bases plana y con buen acabado hace que la posición de impresión sea con una de sus bases en la superficie de la cama, que eliminaría totalmente la necesidad de soporte.

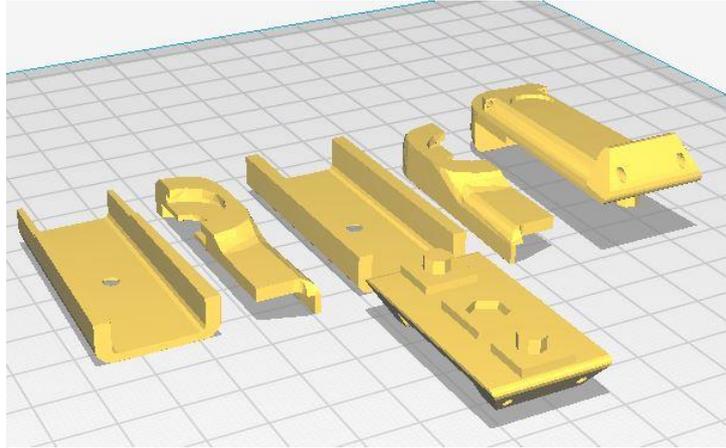


*Figura 60.- Colocación de la parte inferior del pulsador en la bandeja de impresión.*

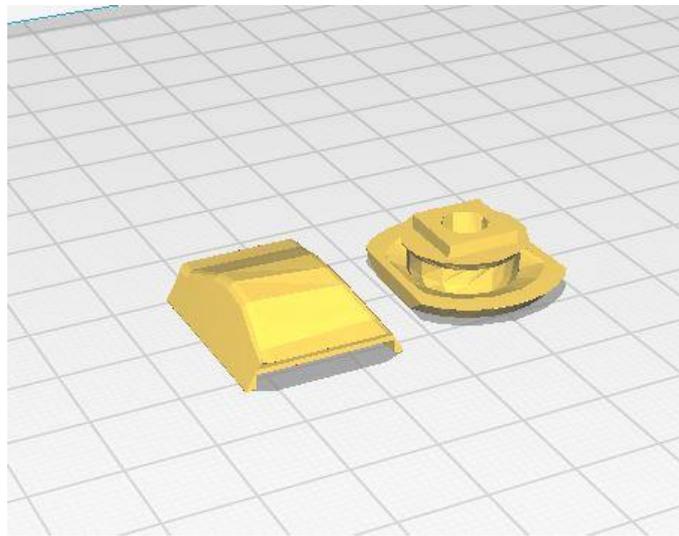
<b>Consumo de material</b>	0.05m
<b>Tiempo de impresión</b>	1 min

*Tabla 16.- Cantidad de material utilizado y tiempo empleado para la impresión del pulsador..*

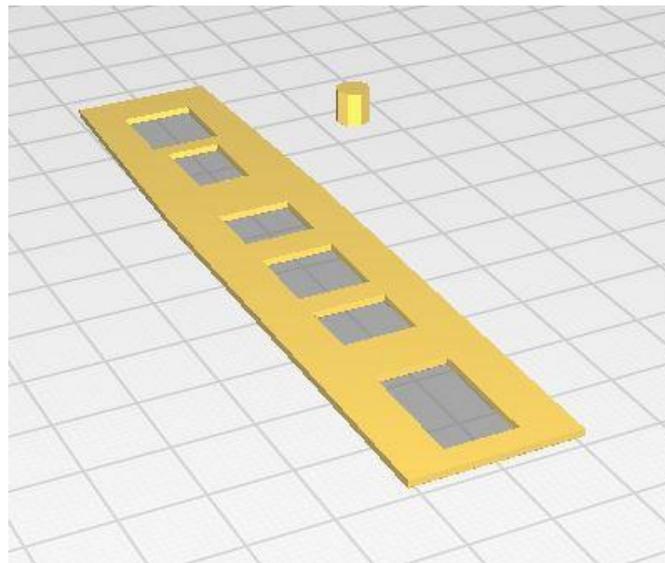
Para facilitar su fabricación y agilizar el proceso se colocarán todas las piezas que requieran el mismo material para su impresión de forma simultanea. Así por una parte se imprimirán las piezas con PLA de color blanco, que serán ambas partes centrales de las falanges, sus cubiertas y la parte inferior de la falange distal, por otra parte las de PLA negro, que serán ambas almohadillas, y para terminar los ligamentos y el pulsador del sensor, hechos con TPU.



*Figura 61.- Piezas colocadas para ser impresas con PLA blanco (no se muestra el material soporte)*



*Figura 62.- Piezas colocadas para ser impresas con PLA negro (no se muestra el material soporte)*



*Figura 63.- Piezas colocadas para ser impresas con TPU.*

El tiempo necesario para la impresión, así como el consumo de material será el siguiente.

	PLA blanco	PLA negro	TPU negro
<b>Consumo de material</b>	7.21m	1.08m	0.74m
<b>Tiempo de impresión</b>	2h 31 min	23 min	15 min

Tabla 17.- Cantidad de material utilizado y tiempo empleado para la impresión completa del dedo..

#### 4.2.4.- Postprocesado.

Una vez impresas todas las piezas se procederá a su montaje. Previo a este es necesario retirar el material de soporte que ha sido necesario para la impresión.

Una vez retirado se observa que el guiado de los cables que cierran el dedo en la parte correspondiente a la falange distal no es adecuado y dicho cable tiende a salirse inutilizando el modelo, por lo que es necesario rediseñar esta pieza. También se corrige ligeramente el tamaño de los salientes destinados al anclaje del muelle, puesto que resulta demasiado pequeño.

Una vez montado se observan pequeñas imperfecciones superficiales que interfieren en el movimiento o pueden resultar incómodos durante la utilización, por lo que se procede al lijado.

#### 4.2.5.- Montaje.

Para el montaje, además de todos los componentes impresos, se necesita también un muelle o resorte que se encargará del retorno del dedo y dos tornillos que sujeten las cubiertas, además de un hilo cuya función es la de contraer el dedo.

Los tornillos usados son de cabeza avellanada y rosca métrica M3 y longitud 30mm con su tuerca correspondiente. Sin embargo, es necesario recortar estos tornillos hasta los 10mm para esta aplicación. Esta operación es necesaria puesto que no ha sido posible disponer de unos tornillos con esa longitud.

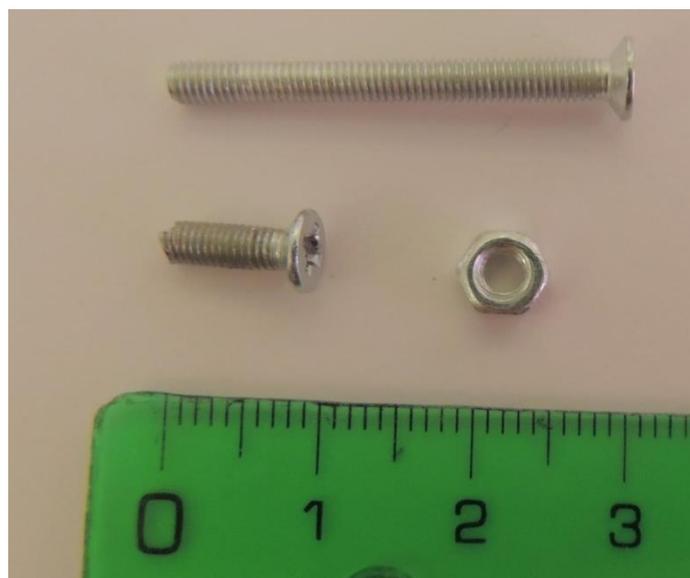


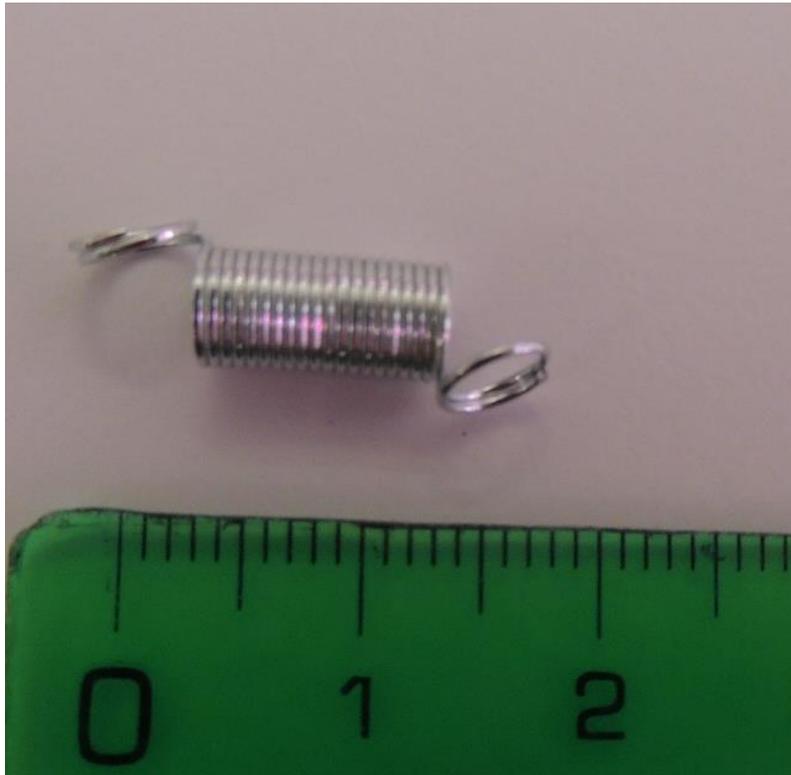
Figura 64.- Tornillo y tuerca usados para el montaje. Medida original (superior) y recortada (inferior).

En el caso del muelle el fabricante no nos proporciona datos suficientes, pero se puede comprobar que, aplicando una fuerza descendente de 4.905N, correspondientes a un peso de 500g, se produce un incremento de la longitud de 10mm, por lo tanto, se puede conocer la constante elástica  $k$  del muelle fácilmente.

$$F = -k \cdot x$$

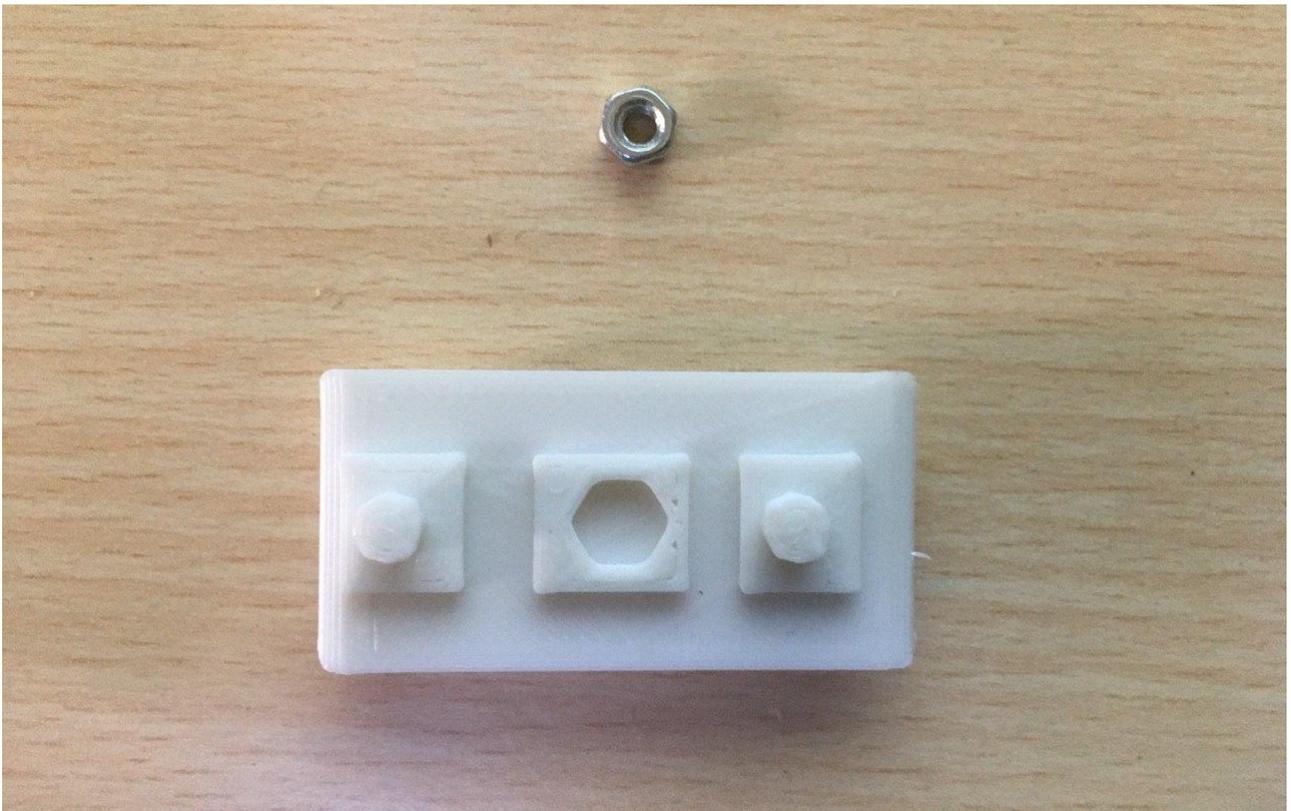
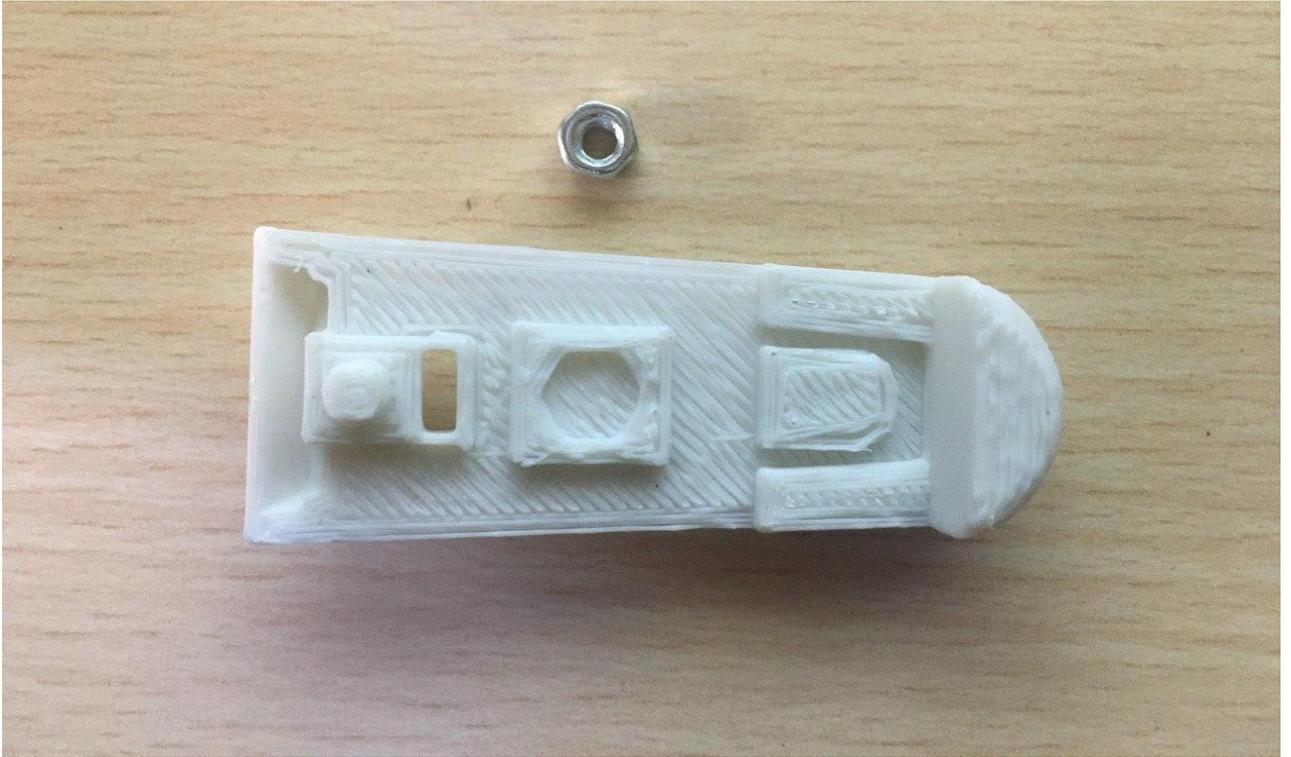
$$-4.905N = -k \cdot 0.01m$$

$$\text{Así } k = 490.5N/m$$



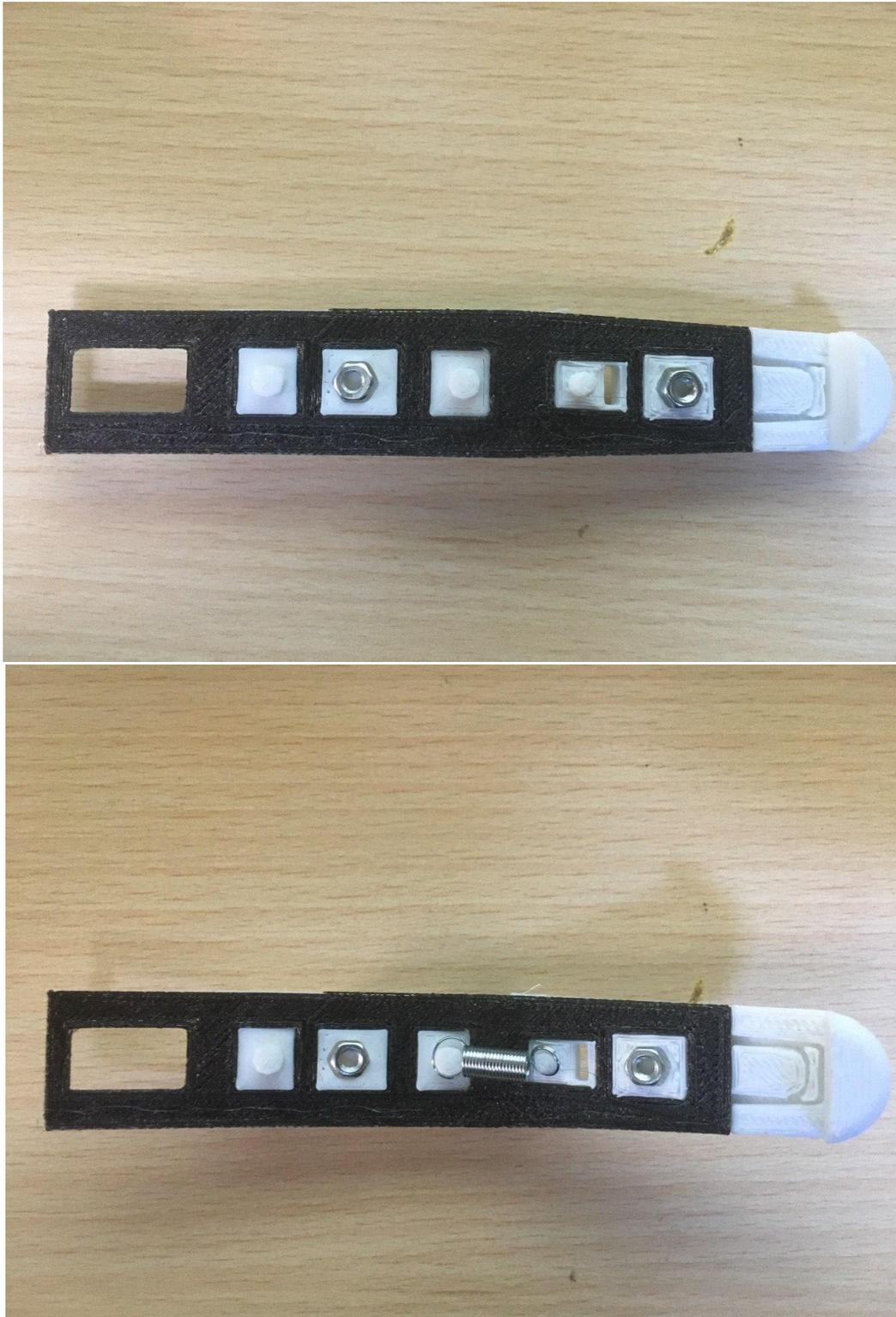
*Figura 65.- Muelle usados para el montaje.*

Primero, y una vez terminado el postprocesado, se empieza colocando las tuercas en sus correspondientes alojamientos de las piezas centrales de cada falange. Esto se hace con ayuda de un adhesivo que evite que en un futuro puedan salirse.



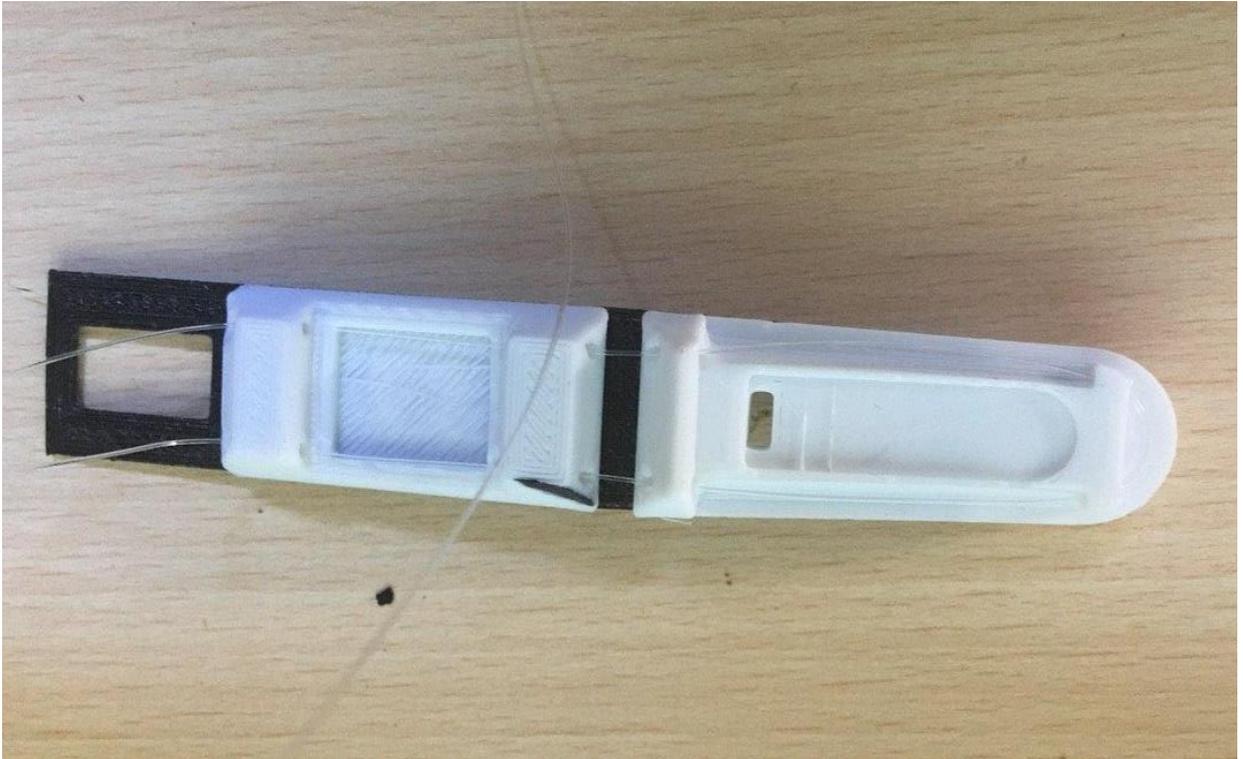
*Figura 66.- Tuercas antes de ser colocadas en sendas falanges.*

Posteriormente se coloca la pieza de TPU que actúa a modo de ligamentos y después de este el muelle encajando sus extremos en los salientes dispuestos.



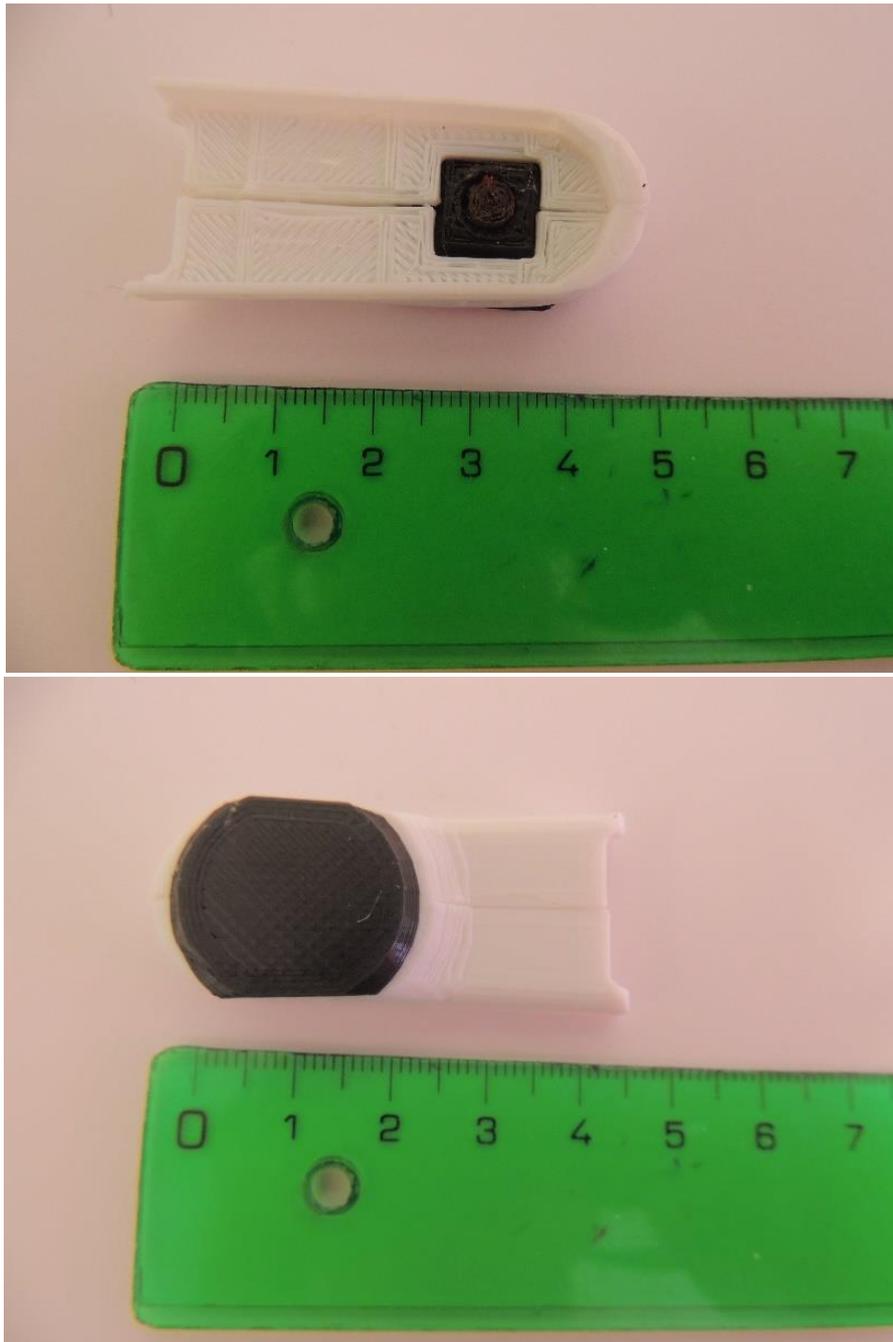
*Figura 67.- Colocación de los ligamentos (arriba) y el muelle de retroceso (abajo).*

El siguiente paso es colocar el hilo actuador siguiendo los agujeros guía de ambas falanges.



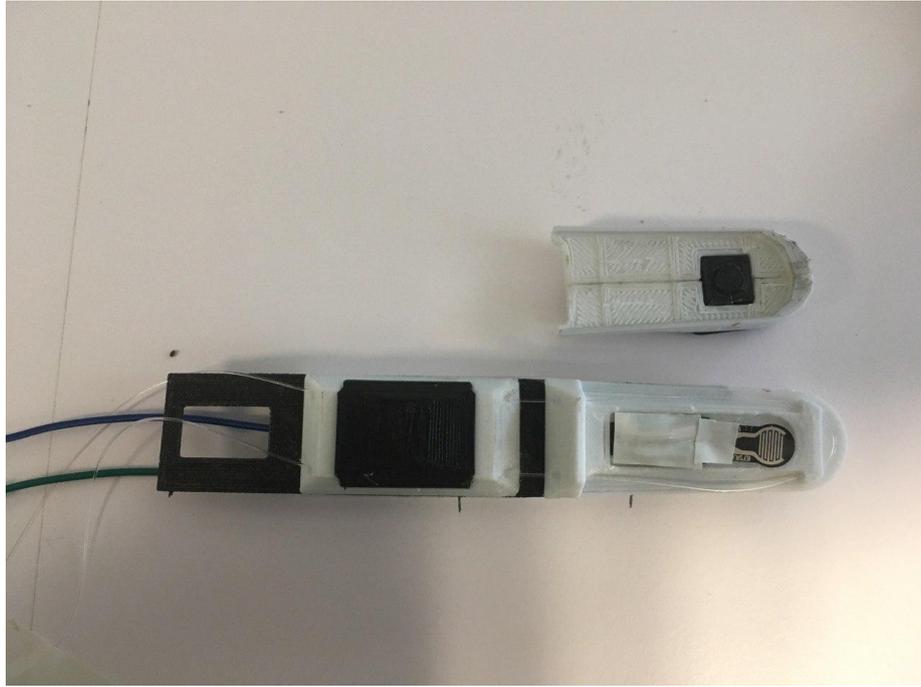
*Figura 68.- Montaje del hilo accionador.*

Ahora se debe montar la parte inferior de la falange distal, que se compone de cuatro partes, almohadilla, pulsador y las dos partes que actúan de guía. En primer lugar, se coloca el pulsador en el hueco de la almohadilla, ayudándose también de pegamento que lo sujete. Una vez completado se coloca este conjunto en las guías de la parte inferior, asegurándose que se produce el movimiento, y se pegan ambas piezas protectoras del sensor.



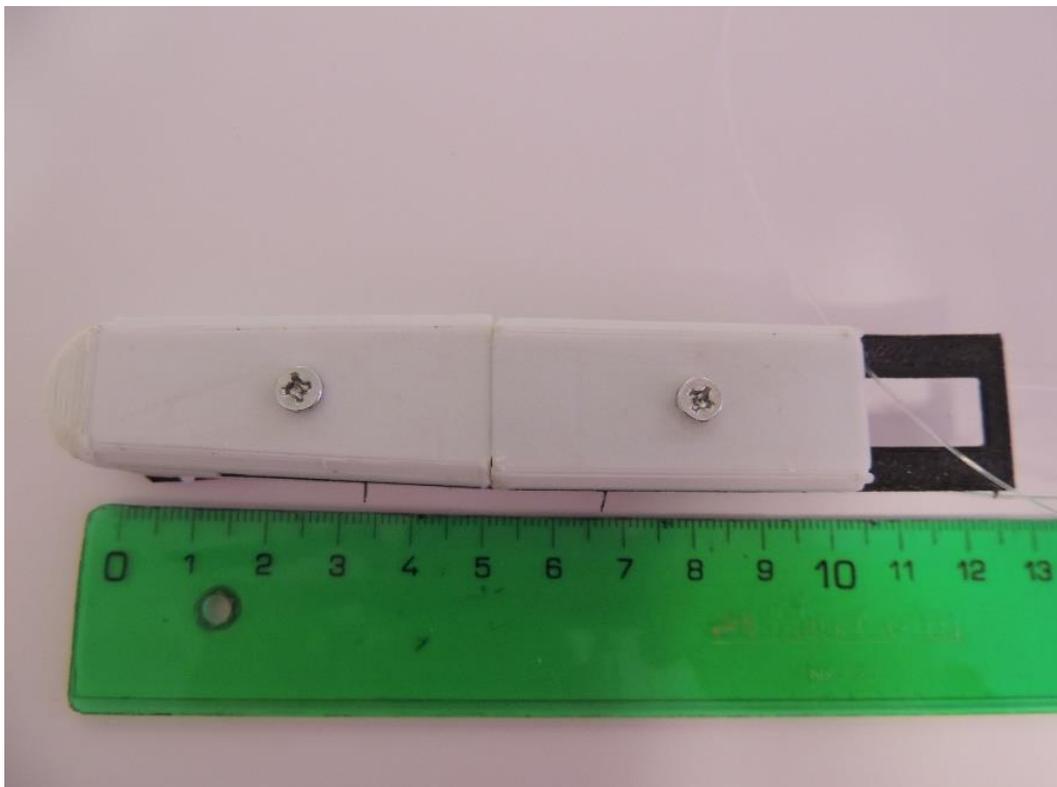
*Figura 69.- Montaje de la parte inferior de la falange distal.*

A su vez se ha soldado los terminales del sensor a sendos cables que permitirán llevar la señal eléctrica fuera del montaje. Cuando esta operación está completada, y con ayuda de pegamento, se coloca en el cajeteado dispuesto en la falange distal, pasando los cables por el agujero que les hace dirigirse a la parte superior del dedo, presentando la parte inferior con el objetivo de comprobar que el pulsador actuará adecuadamente sobre el sensor. Una vez esté colocado en su posición definitiva se asegura la soldadura de los terminales con cinta aislante para prevenir daños.



*Figura 70.- Montaje del sensor.*

Para terminar, se atornillan las cubiertas que protegerán los cables y encapsularán los ligamentos.



*Figura 71.- Montaje de las cubiertas.*

## 5.- Ensayos y comprobaciones.

Es necesario conocer la respuesta del sensor una vez montado, para lo cual habrá que realizar una serie de pruebas para conocer el error que se produce respecto a la situación ideal durante la calibración.

### 5.1.- Descripción del ensayo.

El ensayo consistirá en aplicar, de forma vertical, una serie de pesos sobre la almohadilla del dedo. Este peso se transferirá al sensor y la lectura de este deberá ser próxima a la obtenida durante la calibración.

Los pesos usados son cuatro pesas de 210g cada una y estarán aplicadas de forma que estén lo más centradas posible sobre la almohadilla para asegurarnos que se produzca el contacto de la mejor forma posible. Estas cargas se aplican de una en una, aumentando cada vez 210gr hasta un total de 840g, que equivalen a 8.24N.



*Figura 72.- Pesas y útil utilizados para el ensayo.*

Para la aplicación se diseña un útil en el que encajen las pesas y que en la parte inferior tenga la misma forma que la almohadilla, para asegurar también que el contacto se produce en toda el área.

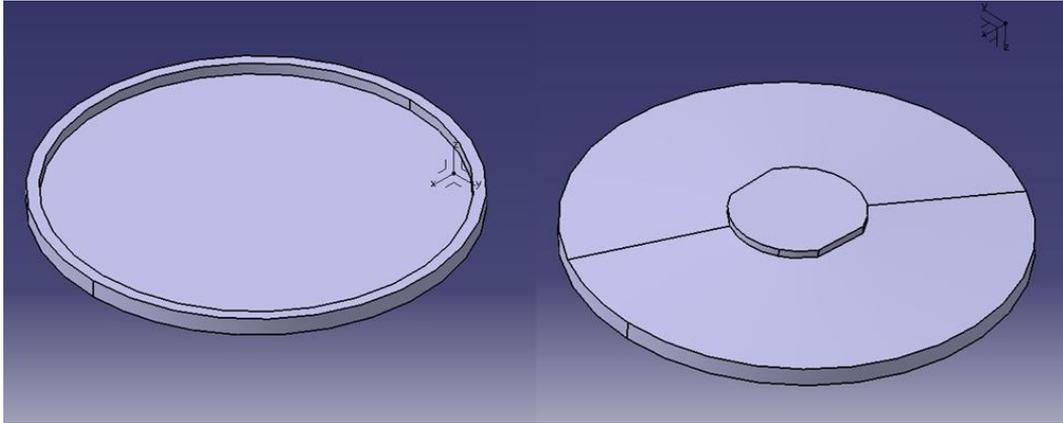
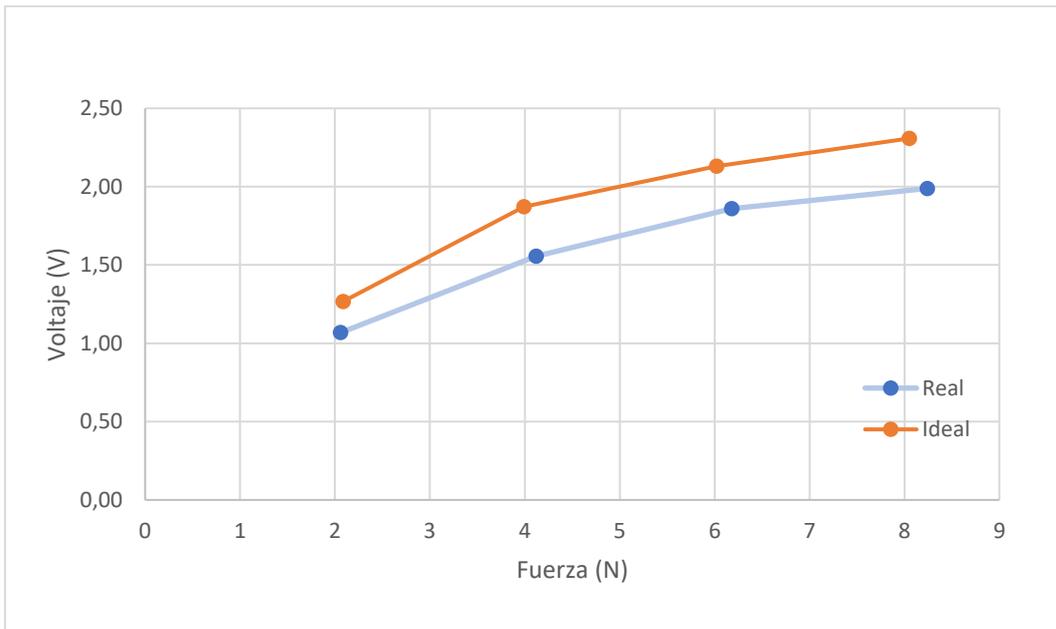


Figura 73.- Modelo CAD del útil para el ensayo.

## 5.2.- Resultados del ensayo

El ensayo nos arroja las lecturas para cuatro puntos correspondientes a cuatro fuerzas distintas. Estos valores se compararán con los obtenidos durante la calibración.



Gráfica 8.- Diferencia entre los valores de voltaje de salida del sensor durante el ensayo y obtenidos durante la calibración.

Voltaje	Fuerza ABS	Voltaje real	Fuerza real	Dif. V %
1,2673	2,09	1,0681	2,06	15,72
1,8728	3,99	1,5559	4,12	16,92
2,1318	6,02	1,8591	6,18	12,79
2,3081	8,05	1,9888	8,24	13,83

Tabla 18.- Valores de salida de voltaje para el caso de calibración (naranja), montado en el dedo (azul) y porcentaje de diferencia entre ambas (verde)

Se puede observar que los resultados difieren de los ideales. Esta diferencia, en porcentaje, se detalla a continuación.

Los resultados muestran una diferencia de entre el 10 y el 20% respecto al resultado ideal. Esto puede ser debido a varios factores.

- **Alineación.** Puede ocurrir que la carga no esté aplicada completamente en vertical, por lo que actuará solamente la componente en este eje, que no se corresponde al valor total calculado.
- **Deformaciones.** El pulsador está construido con un material elástico, por lo que tenderá a deformarse cuando se le aplique una carga. En esta deformación se puede dar el caso de que afecte al contacto con el sensor distorsionando la medida.
- **Contacto deficiente.** Es posible que, durante el montaje, se haya movido ligeramente alguna de las piezas o el sensor y la superficie de contacto sea menor que la proyectada.
- **Daños del sensor.** El sensor ha sido calibrado y se han realizado medidas con él antes del montaje, existe la posibilidad de que se haya producido algún daño durante estas operaciones o durante el almacenamiento y transporte.
- **Contacto con otras piezas.** Puede ser que la almohadilla haya contacto con las guías y a través de este contacto se disipe parte de la fuerza que no iría a través del sensor.

## 6.- Costes

El desarrollo de este proyecto tendrá, como es lógico, unos costes asociados a él, tanto de materiales, como mano de obra o equipos asociados al diseño y fabricación.

Estos costes se pueden dividir en directos, dependientes directamente de la realización, e indirectos, que no dependen de su desarrollo. Se tendrán en cuenta los siguientes costes:

- Costes directos:
  - Costes de materiales y sensor
  - Costes auxiliares
  - Coste de equipos
  - Coste de mano de obra
- Costes indirectos:
  - Costes de uso de equipos

Estos costes están asociados a una sola unidad, el hecho de fabricar más los abarataría, por ejemplo, con un precio unitario más bajo al comprar una mayor cantidad de sensores.

Una vez calculados todos los costes, el coste total de una unidad producida será la suma de todos ellos.

### 6.1.- Costes directos

#### 6.1.1.- Costes de materiales y sensor.

Se van a usar tres tipos de materiales distintos, dos PLA con colores blanco y negro, así como TPU de color negro.

Puesto que la versión del software Cura no permite crear un perfil específico para un tipo concreto de material, pero sí que arroja la cantidad, en metros, de filamento usado para la impresión.

Sin embargo, la cantidad en metros de cada rollo de filamento es desconocida, pero sabiendo que son de 1 kg y el diámetro es 1.75mm, con los valores de la densidad de cada uno se puede obtener un valor bastante aproximado de la longitud total de cada rollo.

Dentro de estos costes se incluirá también el sensor de fuerza.

#### - PLA Blanco

El fabricante no especifica la densidad del producto, pero podemos obtener de otros fabricantes<sup>[49]</sup> un valor que no diferirá mucho del que presentará el filamento usado, en este caso será  $1.24g/cm^3$ .

Si calculamos el área transversal del filamento tendremos que este será:

$$A_f = \pi \frac{D_f^2}{4}$$

El diámetro del filamento es  $D_f = 1.75\text{mm} = 0.00175\text{m}$ , por lo tanto

$$A_f = 2.405 \cdot 10^{-6}\text{m}^2$$

La masa por cada metro será:

$$\begin{aligned}M_{PLA} &= \rho_{PLA} A_f \\M_{PLA} &= 1240\text{Kg/m}^3 \cdot 2.405 \cdot 10^{-6}\text{m}^2 \\M_{PLA} &= 2.983 \cdot 10^{-3}\text{Kg/m}\end{aligned}$$

La longitud del rollo será.

$$L_{PLA} = \frac{1\text{Kg}}{2.983 \cdot 10^{-3}\text{Kg/m}} = 335.289\text{m}$$

El precio del rollo es de 18.95€, luego el coste por unidad de longitud será:

$$C_{PLA_L} = 18.95\text{€} / 335.289\text{m} = 0.057\text{€/m}$$

En el caso del PLA blanco se necesitan 7.21m de filamento para imprimir tanto las piezas correspondientes como su soporte, de ser necesario, por lo que el coste ascenderá a:

$$C_{PLA_B} = 0.057\text{€/m} \cdot 7.21\text{m} = 0.408\text{€}$$

#### - PLA Negro

Al ser del mismo fabricante las especificaciones de este material serán muy parecidas, mientras que el coste de cada rollo es idéntico. Para los cálculos tomamos también un valor de la densidad de  $1.24\text{g/cm}^3$  y un precio de 18.95€ por rollo, por lo que la longitud de cada uno, así como el coste por unidad de longitud permanece inalterado.

Así pues, tendremos que el coste del PLA negro usado es:

$$C_{PLA_N} = 0.057\text{€/m} \cdot 1.08\text{m} = 0.062\text{€}$$

#### - TPU Negro

En este caso la densidad del material es menor, de  $1.21\text{g/cm}^3$  según el fabricante<sup>[48]</sup>, mientras que el área transversal seguirá siendo el mismo al tener el mismo diámetro el filamento. También cambia la cantidad de material del rollo, que en este caso es de 330g.

Se calcula la longitud del filamento enrollado de forma igual al PLA anterior.

$$A_f = 2.405 \cdot 10^{-6}\text{m}^2$$

La masa por cada metro será:

$$\begin{aligned}M_{TPU} &= \rho_{TPU} A_f \\M_{TPU} &= 1210\text{Kg/m}^3 \cdot 2.405 \cdot 10^{-6}\text{m}^2 \\M_{TPU} &= 2.910 \cdot 10^{-3}\text{Kg/m}\end{aligned}$$

La longitud del rollo será.

$$L_{TPU} = \frac{0.33\text{Kg}}{2.910 \cdot 10^{-3}\text{Kg/m}} = 113.402\text{m}$$

El precio del rollo este caso es de 18.43€, luego el coste por unidad de longitud será:

$$C_{TPU_L} = 18.43\text{€} / 113.402\text{m} = 0.163\text{€/m}$$

La cantidad usada de TPU para un solo dedo será de 0.74m, por lo tanto:

$$C_{TPU} = 0.163\text{€/m} \cdot 0.74\text{m} = 0.120\text{€}$$

- **Sensor Interlink Electronics FSR400 Short**

El coste, comprando una unidad, es de 5,11€. Este coste puede variar dependiendo del número de unidades que se encarguen.

### 6.1.2.- Costes auxiliares

Estos costes serán derivados de todo lo necesario para el montaje del dedo, bien tornillería, resortes e hilo.

- **Tornillería**

En este caso se han usado solo dos tornillos, pero ha sido necesario comprar un paquete en el que se comercializaban 14 unidades con sus tuercas correspondiente, a un precio de 0.55€.

El coste unitario de cada tornillo será:

$$C_{Tornillo} = 0.55\text{€}/14ud = 0.04\text{€}/ud$$

Al usarse dos, tendremos que el coste total será:

$$C_{Tornillo\_Total} = 0.04\text{€}/ud \cdot 2ud = 0.08\text{€}$$

- **Resortes**

Al igual que en el caso de la tornillería ha sido necesario comprar un paquete en el que se comercializaban 40 unidades a un precio de 0.70€.

El coste unitario de cada resorte será:

$$C_{Resorte} = 0.70\text{€}/40ud = 0.018\text{€}/ud$$

Al usarse solo uno, tendremos que el coste total será:

$$C_{Resorte\_Total} = 0.018\text{€}/ud \cdot ud = 0.018\text{€}$$

- **Hilo**

Para este propósito se ha adquirido un carrete de 100 metros de hilo a un precio de 2€. De este carrete se ha usado aproximadamente medio metro

El coste por unidad de longitud del hilo será:

$$C_{Hilo} = 2.00\text{€}/100m = 0.02\text{€}/m$$

Solo se usará 0.5m, por lo que tendremos que el coste total será:

$$C_{Hilo\_Total} = 0.02\text{€}/m \cdot 0.5 = 0.01\text{€}$$

- **Otros materiales**

Para el montaje se han usado otros materiales, tales como pegamento, cinta aislante, estaño para soldar o cables extensores de los terminales del sensor.

Sin embargo, la cantidad usada, tanto de pegamento como estaño y cinta aislante es lo suficientemente pequeña como para no poder determinarse con exactitud. En el caso de los cables extensores se desconoce su coste.

### 6.1.3.- Costes de equipos

Se ha trabajado con dos equipos principalmente, la impresora Anycubic i3 Mega-S y un ordenador CSL Sprint X5821. Para calcular estos costes se toma un periodo de amortización de 3 años o 36 meses para ambos equipos contando

únicamente días laborables. Se estima que el periodo de uso de la impresora es de 4h, añadiendo al tiempo de fabricación el necesario para cambiar materiales y retirar las piezas anteriores, mientras que para el diseño se estiman necesarios 21 días.

Se estima que por cada 12 meses hay 253 días laborables, a los que habrá que restar 22 correspondientes a vacaciones. En total, 231 días.

#### - Impresora

El modelo usado es Anycubic i3 Mega-S, adquirida por 272,79€.

Las 4h necesarias para la fabricación se corresponden con un total de 0.167 días.

El número total de días para la amortización es de 693 días.

Con estos datos se tiene que el coste asociado a la impresora es:

$$C_{imp} = \frac{272.79€ \cdot 0.167 \text{ días}}{693 \text{ días}} = 0.066€$$

#### - Ordenador

El modelo usado es CSL Sprint X5821, adquirida por 394.05€.

Se estima un total de 21 días para el diseño completo del presente proyecto..

El número total de días para la amortización es de 693 días.

Con estos datos se tiene que el coste asociado a la impresora es:

$$C_{imp} = \frac{394.05€ \cdot 21 \text{ días}}{693 \text{ días}} = 11.941€$$

### 6.1.4.- Costes de mano de obra

Para calcular estos costes se estima que el salario mínimo de un ingeniero es aproximadamente de 1000€ al mes. Tomando 160h laborables, correspondientes a 8h diarias durante 20 días al mes se tiene que el salario por hora es de 6.25€/hora.

En total se estima que en el proyecto se han empleado, en etapas de investigación, calibración de sensores, diseño, fabricación, postprocesado, montaje y comprobación de funcionamiento correcto un total de 350 horas que se traduce en un coste de mano de obra de:

$$C_{mano \ obra} = 350h \cdot 6.25€/h = 2187.5€$$

### 6.1.5.- Costes directos totales

El conjunto de costes directos se resume en la siguiente tabla:

Costes materiales	5.700€
Costes auxiliares	0.108€
Costes de equipos	12.007€
Coste de mano de obra	2187.500€
	2205.3150€

Tabla 19.- Costes directos totales.

## 6.2.- Costes indirectos

### 6.2.1.- Costes derivados del consumo eléctrico

Para calcular estos costes se tiene que el precio máximo de la electricidad 0.1527 €/kWh para una tarifa de precio fijo.

El consumo de la impresora es de 0.150KW y el tiempo de funcionamiento de 4h. Por lo tanto:

$$C_{electrico} = 0.1527\text{€/KWh} \cdot 0.150\text{KW} \cdot 4\text{h} = 0.091\text{€}$$

## 6.3.- Costes totales

Los costes totales se obtienen de sumar los costes directos y los costes indirectos, de forma que se tiene un coste total de

$$C_{total} = 2205.315\text{€} + 0.091\text{€} = 2205.406\text{€}$$

## **7.- Conclusiones y líneas futuras**

### **7.1.- Conclusiones generales**

Se ha empezado el proyecto realizando un estudio de las diferentes tecnologías de impresión 3D, buscando la más adecuada dentro de un coste contenido. Después se han estudiado los diferentes tipos de sensores de fuerza disponibles para poder equiparlos al diseño.

Se ha diseñado un dedo acorde a la fisonomía de un dedo humano real, respetando las dimensiones y sus principios de funcionamiento en la medida de lo posible.

Se han diseñado métodos de calibración para los distintos sensores disponibles en función al funcionamiento esperado y en consonancia con otros métodos desarrollados por terceras personas.

Se ha ensamblado el dedo y una vez fabricadas todas las piezas y después del postprocesado correspondiente, comprobando el correcto funcionamiento del montaje.

Se ha comprobado que el sensor funciona correctamente y que posee un pequeño error asociado al montaje y funcionamiento.

En general se ha conseguido una base de bajo coste para seguir desarrollando prototipos sensorizados de dedos impresos en 3D.

### **7.2.- Conclusiones sobre materiales**

El PLA con el que se ha fabricado el prototipo es de uso general para impresión 3D y, aunque es de fácil uso y no ha requerido de especiales conocimientos y capacidades para ello, no dispone de ningún certificado de biocompatibilidad ni el fabricante ha facilitado una hoja con las características técnicas. Otros materiales, como el nylon, son más adecuados para este proyecto.

El TPU usado para las partes elásticas desempeña bien su función sin dar problema alguno. No obstante, durante su impresión han surgido problemas, por lo que hay que estudiar alternativas tanto de materiales que pudiesen sustituirlo o máquinas que se adapten mejor a la impresión con TPU.

La tornillería ha necesitado modificaciones para adaptarla al diseño del prototipo, habría sido mejor para el desarrollo del proyecto unos tornillos de la medida adecuada, pues se reduciría el tiempo de post-procesamiento. Podría también mejorarse el apriete de tener unos tornillos más acordes

### **7.3.- Conclusiones sobre sensores**

El sensor ha demostrado un correcto funcionamiento, sin embargo, la lectura ideal y la que se produce una vez ensamblado el prototipo difiere en un pequeño porcentaje. Se debe conocer en profundidad el origen de este error para actuar en consecuencia y reducirlo lo máximo posible.

El sensor, sin embargo, no tiene sus terminales soldados a los cables de una forma profesional, por lo que se podría mejorar ese aspecto si la labor de soldadura la realizase un técnico especializado o el sensor viniese con los terminales soldados a unos cables de fábrica.

### **7.4.- Líneas futuras**

En el apartado de materiales se puede investigar el uso de diferentes tipos de plásticos para impresión 3D con el objetivo de ver si así mejoran las capacidades y el funcionamiento.

En cuanto al diseño se abre la posibilidad de mejorarlo, ya sea modificando la estructura adecuándola a la geometría de un dedo real escaneado, viendo si es posible reducir el número de piezas a imprimir u optimizando el diseño. También se pueden realizar estudios sobre el color de los materiales en función de la situación del usuario final.

Sobre los sensores esta la opción de investigar más tipos de sensores que puedan adecuarse al diseño o bien comprobando si es posible introducir modelos diferentes que usen la misma tecnología. Algunos fabricantes también ofrecen la posibilidad de fabricar sensores personalizados, por lo que diseñar un sensor ex profeso para esta aplicación es otra de las posibilidades que se presentan.

Se pueden explorar también diferentes métodos de unión entre las diferentes piezas, así como el mecanismo de funcionamiento.

A la hora de la calibración también puede modificarse el procedimiento para mejorar el contacto entre el sensor y el mecanismo que ejerce la fuerza sobre él.

Para la comprobación hay que estudiar donde, cómo y por qué se produce la diferencia entre la lectura real y la ideal. Una vez conocida la causa se puede actuar sobre el diseño base para eliminar el problema o reducirlo.

En cuanto a la tecnología de impresión 3D se puede investigar otro tipo de fabricación para ver si es posible reducir el tiempo de impresión manteniendo el coste de los materiales lo suficientemente bajo. También se puede optar por el uso de otro tipo de máquinas que permitan usar diferentes materiales simultáneamente, por lo que podría reducirse el número de piezas a imprimir, ya que algunas se podrían

unir en una sola, o seleccionar un material específico que actúe como soporte y sea más sencillo de retirar, reduciendo así el post-procesamiento.



## 8.- Bibliografía

- [1] CONSEJO INTERTERRITORIAL DEL SISTEMA NACIONAL DE SALUD. *Guía Descriptiva de Ortoprótesis. Tomo III*. [s.l.]: Ministerio de Sanidad y Consumo, ca. 2003, pp. 95-108. ISBN: 84-7670-652-9
- [2] Dra. GARCÍA, Daniela. y Dra. ESPINOZA, María José. Avances en prótesis: Una mirada al presente y al futuro. *Revista Médica Clínica Las Condes* [en línea]. Vol. 25, no. 2. [fecha de consulta: 13 Marzo 2020]  
Disponible en:  
<https://www.elsevier.es/es-revista-revista-medica-clinica-las-condes-202-sumario-vol-25-num-2-S0716864014X70021>  
ISSN: 0716-8640
- [3] JONES, David E.H. Ariadne. *New Scientist* [en línea], Volumen 64, no. 917. [fecha de consulta: 14 de Marzo 2020]  
Disponible en:  
<https://books.google.es/books?id=nvabM3KXNsUC&lpg=PA80&hl=es&pg=PP1#v=onepage&q&f=false>  
ISSN: 0262-4079
- [4] 3D Printing Industries. *The Free Beginner´s Guide - History*. ©2017 [fecha de consulta 14 de Marzo 2020]  
Disponible en:  
<https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#02-history>
- [5] COMPAGNIE INDUSTRIELLE DES LASERS CILAS ALCATEL, société anonyme, *Dispositif pour réaliser un modèle de pièce industrielle*. Institut national de la propriété industrielle, No 2567668. 1984-18-07.
- [6] JORQUERA ORTEGA, Adam. *Fabricación digital: Introducción al modelado e impresión 3D* [en línea]. Secretaría General Técnica. Subdirección General de Documentación y Publicaciones. Ministerio de Educación, Cultura y Deportes, 2016. ISBN: 9788436957457
- [7] ULTRAVIOLET PRODUCTS, Inc. *Apparatus for production of Three-dimensional objects by stereolithography*. United States Patent, No. 4575330. 1984-08-08.
- [8] 3D SYSTEMS, Inc. *Our Story*. ©2020 [fecha de consulta: 14 de Marzo 2020]  
Disponible en:  
<https://es.3dsystems.com/our-story>
- [9] World Technology Evaluation Center, Inc. *Company Profile: EOS GmbH*. ©Septiembre 1996 [Fecha de consulta: 14 de Marzo 2020]  
Disponible en:  
[http://www.wtec.org/loyola/rp/p1\\_eos.htm](http://www.wtec.org/loyola/rp/p1_eos.htm)
- [10] BOARD OF REGENTS, The University of Texas. *Method an apparatus for producing parts by selective sintering*. United States Patent, No. 4863538. 1989-05-09
- [11] STRATASYS, Inc. *Apparatus and method for creating three-dimensional objects*. United States Patent, No. 5121329. 1989-30-10
- [12] ATALA, Anthony, MD. *Tissue-engineered autologous bladders for patients needing cystoplasty*. En: *The Lancet*. Volumen 367, No. 9518. Pp. 1241-1246
- [13] GINGRICH, Newt. *Pioneers of the Future, Prison Guards of the Past, and the Epic Battle That Will Decide America's Fate*. 1a. ed. Washington DC: Regnery Publishing, 2014. pp. 62-64.  
ISBN: 9781621572817

- [14] 3D SOURCED. *The Complete History of 3D Printing: From 1980 to 2020*. ©2020 [Fecha de consulta: 14 de Marzo 2020]  
 Disponible en:  
<https://3dsourced.com/guides/history-of-3d-printing/>
- [15] JAMES, Kyle. *Woman receives 3D-printed transplant jaw*. ©2020 [Fecha de consulta: 14 de Marzo 2020]  
 Disponible en:  
<https://www.dw.com/en/woman-receives-3d-printed-transplant-jaw/a-15723956>
- [16] JOHNSTON, Mallory M. et al. *3D Printing In Zero-G ISS Technology Demonstration*. NASA Marshall Space Flight Center, Huntsville. [Fecha de consulta: 14 de Marzo 2020]  
 Disponible en:  
<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20140012888.pdf>
- [17] 3D Printing Industries. *The Free Beginner´s Guide - Processes*. ©2017 [fecha de consulta 14 de Marzo 2020]  
 Disponible en:  
<https://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide#04-processes>
- [18] CHANTARAPANICH, Nattapon, SITTHISERIPRATIP, Kriskrai. *Study of the mechanical properties of photo-cured epoxy resin fabricated by stereolithography process*. [Fotografía]. Hat Kai, 2013.
- [19] 3D SYSTEMS, Inc. *¿Qué es MJP?*. ©2020 [fecha de consulta: 14 de Marzo 2020]  
 Disponible en:  
<https://es.3dsystems.com/resources/information-guides/multi-jet-printing/mjp>
- [20] MUMTAZ, K. A., HOPINSHON, N., ERASENTHIRAN, P. *High Density Selective Laser Melting of Waspaloy*. [fotografía] Loughborough, 2006.
- [21] BATES-GREEN, K., HOWIE, T. *Materials for 3D Printing by Fused Deposition*. Mukilteo, EEUU: 2007.
- [22] VALENTÍN-GAMAZO GARCÍA, Jorge, 2019. *Desarrollo de férulas mediante impresión 3D: comportamiento mecánico del material y prototipado*. Alberto Mansilla Gallo, dir, Trabajo Fin de Grado. Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid, Valladolid.
- [23] SCHMIDLEITHNER, Christina, KALASKAR, Deepak M, 2008. *Stereolithography*. En Dragan CVETKOVIC, *3D Printing*. Dragan Cvetkovik. ISBN: 9781789239669
- [24] SCHUSTER, M., TURECEK, C., KAISER, B. et al. *Evaluation of Biocompatible Photopolymers I: Photoreactivity and Mechanical Properties of Reactive Diluents*. [en línea] Journal of Macromolecular Science Part A Pure and Applied Chemistry - Marzo 2007. [Fecha de consulta: 15 de Marzo 2020]  
 Disponible en:  
[https://www.researchgate.net/publication/229176003\\_Evaluation\\_of\\_Biocompatible\\_Photopolymers\\_I\\_Photoreactivity\\_and\\_Mechanical\\_Properties\\_of\\_Reactive\\_Diluents](https://www.researchgate.net/publication/229176003_Evaluation_of_Biocompatible_Photopolymers_I_Photoreactivity_and_Mechanical_Properties_of_Reactive_Diluents)
- [25] TREATSTOCK. *What is Material Jetting?* © 2020 [Fecha de consulta: 15 de Marzo 2020]  
 Disponible en:  
<https://www.treatstock.com/guide/article/126-what-is-material-jetting#point3>
- [26] GIBSON, Ian, ROSEN, David, STUCKER, Brent. *Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 2ª edición. Nueva York, EEUU. Springer Science+Business Media. 2015.

ISBN 9781493921126

[27] 3DNATIVES. *Guía: Fusión por haz de electrones, te explicamos todo.* © 2020  
[Fecha de consulta: 15 de Marzo 2020]

Disponible en:

<https://www.3dnatives.com/es/fusion-por-haz-de-electrones-les-explicamos-todo/>

[28] FIRST TECH CHALLENGE. *3D Printing for FIRST Teams.* © 2015 [Fecha de consulta: 15 de Marzo 2020]

Disponible en:

<http://firsttechchallenge.blogspot.com/2015/01/3d-printing-for-first-teams-3-of-8.html>

[29] NOBBOT. *¿Sabes cuál fue el primer sensor conectado de la historia?* © 2020  
[Fecha de consulta: 16 de Marzo 2020]

Disponible en:

<https://www.nobbot.com/general/primer-sensor-conectado/>

[30] CUSTODIO RUIZ, Ángel, BRAGÓS BARDÍA, Ramón, PALLÁS ARENY, Ramón. *Sensores Inteligentes: Una historia con futuro.* En: BURAN. No. 14, Noviembre 1999.

[31] AVNET ABACUS. *Pressure sensors: The design engineer's guide.* © 2020  
[Fecha de consulta: 16 de Marzo 2020]

Disponible en:

<https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/>

[32] DRAKE, Richard L, VOGL, A. Wayne, MITCHELL, Adam, W. M. Gray. *Anatomía para estudiantes.* 3ª ed. Barcelona: Elsevier Inc. 2015.  
ISBN: 9788490228432

[33] BRENNEIS, Dylan J. A, DAWSON, Michael R, PILARSKI, Patrick M. *Development of the HANDi Hand: An inexpensive, multi-articulating, sensorized hand for machine learning research in myoelectric control.* University of Alberta. Agosto 2017.

[34] DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT UND RAUMFAHRT. *DLR / HIT Hand.* [Fecha de consulta: 17 de Marzo 2020]

[https://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-9467/16255\\_read-8918/](https://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-9467/16255_read-8918/)

[35] OPEN BIONICS. *Brunel Hand 2.0 Assembly Guide.* 2018.

[35] INTERLINK Electronics. *FSR 400 Series Data Sheet.* [Fecha de consulta: 17 de Marzo 2020]

[36] SINGLETACT Miniature Force Sensor. *SingleTact DataSheet.* [Fecha de consulta: 17 de Marzo 2020]

[37] SINGLETACT Miniature Force Sensor. *SingleTact User Manual.* [Fecha de consulta: 17 de Marzo 2020]

[38] TEKSCAN. *FlexiForce Integration Guide.* [Fecha de consulta: 17 de Marzo 2020]

[39] MULAS GONZALEZ, Daniel, 2019. *Estudio del comportamiento mecánico de piezas realizadas por tecnología FDM mediante la validación de modelos de simulación por Elementos Finitos.* Alberto Mansilla Gallo, dir, Trabajo Fin de Grado. Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Valladolid, Valladolid.

[40] MARK-10 CORPORATION. *DataSheet Manual Force Test Stand ES30.* [fecha de consulta 19 de Marzo 2020]

[41] HBM. *U93 1KN DataSheet.* [fecha de consulta 19 de Marzo 2020]

[42] NATIONAL INSTRUMENTS. *NI USB-6000 DataSheet.* [fecha de consulta 19 de Marzo 2020]

[43] NATIONAL INSTRUMENTS. *Connecting Strain Gauges and Shunt Resistors to the NI-9237.*

Disponible en [fecha de consulta 19 de Marzo 2020]

<https://knowledge.ni.com/KnowledgeArticleDetails?id=kA00Z000000PA73SAG&l=es-ES>

[44] NATIONAL INSTRUMENTS. *NI-9237 DataSheet*. [fecha de consulta 19 de Marzo 2020]

[45] NATIONAL INSTRUMENTS. *cDAQ-9172 User Guide*. [fecha de consulta 19 de Marzo 2020]

[46] VELLEMAN NV. *Manual de usuario LABPS23023*. [fecha de consulta 20 de Marzo 2020]

[47] ANYCUBIC. *I3 Mega-S User Manual*. [fecha de consulta 23 de Marzo 2020]

[48] SMART MATERIALS 3D. *Ficha Técnica Flex* [fecha de consulta 23 de Marzo 2020]

[49] SMART MATERIALS 3D. *Ficha Técnica PLA* [fecha de consulta 23 de Marzo 2020]

[50] PARTIAL HAND SOLUTIONS. *TITAN FULL product description*. [fecha de consulta 23 de Marzo 2020]

Disponible en:

<http://nebula.wsimg.com/Oea34b020f0fde723832c905101f8900?AccessKeyId=62184693F3874EF878A6&disposition=0&alloworigin=1>

[50] NAKED PROTHESICS. *Product Technical Specifications* [fecha de consulta 23 de Marzo 2020]

Disponible en:

<https://www.npdevices.com/wp-content/uploads/2019/02/Technical-Specifications.pdf>