

UNIVERSITAT JAUME I

ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA I CIÈNCIES EXPERIMENTALS

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

**Diseño, programación y control de pinza de dos
dedos para mano artificial, con capacidad para
agarre pinza y lateral, con regulación del nivel de
fuerza y respuesta visual al usuario**

TRABAJO FIN DE GRADO

AUTOR/A

Álvaro Hernández Casamayor

DIRECTOR/A

Antonio Pérez González

José Vicente García Ortiz

Castellón, Octubre de 2022

Agradecimientos

Primeramente, gracias al equipo de investigación en Biomecánica y Ergonomía por aceptar mi propuesta para trabajar en un proyecto de este calibre y permitirme aprender a lo largo del desarrollo del mismo. También me gustaría agradecer a mis coordinadores, Antonio Pérez González y José Vicente García Ortíz, por guiarme y aconsejarme a pesar de mis meteduras de pata. No puedo olvidarme de Pepe Fuentes Ballesteros, técnico del laboratorio, por aguantar la cantidad de preguntas sobre las tolerancias de las impresoras 3D y si las piezas diseñadas iban a ser viables para su fabricación. También debo agradecer a mis compañeros de laboratorio por el apoyo y la amenización del trabajo. Quisiera agradecer, especialmente, a mis padres y a mi pareja por estar siempre apoyándome, aunque no entendieran nada de lo que estaba haciendo, y motivarme a conseguir llevar a cabo este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

I.	Memoria.....	10
1.	Justificación.....	13
2.	Objetivos.....	14
3.	Alcance.....	15
4.	Antecedentes.....	16
4.1.	Mano humana.....	16
4.1.1.	Inicios de las prótesis corporales.....	21
4.1.2.	Tipos de agarres bidigitales.....	23
4.2.	Tipos de prótesis.....	24
a.	Mecánicas.....	25
b.	Eléctricas.....	25
c.	Neumáticas.....	26
d.	Mioeléctricas.....	26
e.	Híbridas.....	28
4.2.2.	Método de comunicación entre dispositivos.....	28
a.	Comunicación Bluetooth.....	28
b.	Comunicación WiFi.....	28
c.	Comunicación CAN-Bus.....	28
4.2.3.	Medición de presión ejercida.....	30
4.2.4.	Método de respuesta al usuario.....	33
4.3.	Proyectos previos.....	34
4.4.	Normativa.....	35
5.	Especificaciones de diseño.....	35
5.1.	Propuestas de diseño.....	37
5.1.1.	Dedo Índice.....	37
5.1.2.	Dedo pulgar.....	39
5.1.3.	Sistema mecatrónico.....	40
6.	Análisis conceptual.....	42
6.1.	Dedo Índice.....	42
6.2.	Dedo pulgar.....	49
6.3.	Mecatrónica.....	52
7.	Descripción del diseño mecánico.....	60
7.1.	Consideraciones iniciales.....	61
7.2.	Diseño del dedo índice.....	64
7.2.1.	Falange proximal.....	64

7.2.2.	Falange distal.....	70
7.2.3.	Sistema de accionamiento.....	74
7.3.	Diseño del dedo pulgar.....	75
7.3.1.	Falange distal.....	76
7.3.2.	Falange proximal.....	77
7.3.3.	Sistema de abducción-aducción.....	79
8.	Descripción del diseño mecatrónico.....	82
8.1.	Hardware.....	82
8.2.	Software.....	83
8.2.1.	Código Sender.....	83
8.2.2.	Código Receiver.....	85
9.	Conclusiones.....	88
10.	Bibliografía.....	90
II.	Anexos.....	93
1.	Cálculos.....	95
1.1.	Dedo índice.....	95
1.1.1.	Sistema de retorno.....	95
1.1.2.	Sistema de accionamiento en carga máxima.....	100
1.1.3.	Sistema de flexión.....	101
1.1.4.	Comprobación del sistema de accionamiento en vacío.....	107
1.2.	Dedo pulgar.....	108
1.2.1.	Sistema de abducción-aducción.....	108
1.2.2.	Sistema de flexión.....	111
1.3.	Eficiencia del sistema.....	114
2.	Código de programación.....	114
2.1.	CAN-Sender.....	114
2.2.	CAN-Receiver.....	120
3.	Comprobación mediante el Método Elementos Finitos.....	128
3.1.	Dedo índice.....	128
3.2.	Dedo pulgar.....	133
III.	Pliego de condiciones.....	138
1.	Condiciones generales.....	140
1.1.	Objeto.....	140
1.2.	Documentos que definen el proyecto.....	140
1.3.	Condiciones facultativas.....	140
1.4.	Accidentes de trabajo.....	140
1.5.	Condiciones generales de explotación.....	141

1.6.	Normativa	141
1.7.	Plazos y condiciones generales del proyecto	141
1.8.	Responsabilidad del proyectista.....	141
2.	Condiciones particulares	141
2.1.	Condiciones del Software empleado.....	141
2.2.	Dossier técnico	142
3.	Condiciones de suministro	142
3.1.	Especificaciones de materiales	142
3.2.	Especificaciones para la adquisición de componentes.....	142
3.3.	Especificaciones de fabricación y montaje.....	143
4.	Recomendaciones de seguridad.....	144
IV.	Presupuesto	145
1.	Coste del personal.....	147
2.	Amortización del Hardware	147
3.	Amortización del Software.....	147
4.	Coste de los componentes y del material	148
5.	Resumen del coste.....	149
6.	Coste de ejecución por contrato.....	149
V.	Planos.....	150

Índice de Figuras

Figura 1. Sección palmar de una mano humana extendida [3]	16
Figura 2. Zonas de utilización de la mano [3]	17
Figura 3. Mano humana en extensión [3].....	18
Figura 4. Mano humana en flexión [3].....	18
Figura 5. Mano humana en extensión relajada [3].....	19
Figura 6. Ángulo de flexión de los dedos [3]	19
Figura 7. Abducción-aducción del dedo índice [3]	20
Figura 8. Trayectoria por combinación de Flexión y Abducción aducción del dedo índice [3] ...	20
Figura 9. Esquema óseo de un dedo pulgar [3]	21
Figura 10. Prótesis egipcia de dedo pulgar del pie derecho [5].....	22
Figura 11. Mano de hierro del mercenario alemán Götz von Berlichingen [5]	22
Figura 12. Presa por oposición terminal uña-pulpejo y pulpejo-pulpejo [3]	23
Figura 13. Presa por oposición subterminal o pinza [3].....	24
Figura 14. Presa por oposición subterminolateral o pinza lateral [3].....	24
Figura 15. Prótesis de mano estéticas [6].....	25
Figura 16. Prótesis mecánica con accionamiento por arnés [6]	25
Figura 17. Prótesis neumática del equipo de investigación de Xuanhe Zhao (MIT) [7]	26
Figura 18. Sensor Electromiográfico o EMG [8].....	26
Figura 19. Prótesis límica superior Michelangelo [9]	27
Figura 20. Prótesis límica superior i-Limb Quatum [10].....	27
Figura 21. Esquema de comunicación CAN-Bus [14].....	29
Figura 22. Marco de datos estándar en CAN-Bus [14]	29
Figura 23. Esquema de una galga extensiométrica metálica [16]	30
Figura 24. Célula de carga para Tracción o Compresión [17]	31
Figura 25. Dinamómetro mecánico [18]	32
Figura 26. Dinamómetro digital [19]	32
Figura 27. Buzzer de la marca Arduino [14].....	33
Figura 28. LED monocromático.....	34
Figura 29. LED RGB y esquema de diodos	34
Figura 30. Motor de vibración micro.....	34
Figura 31. Flujograma del sistema mecatrónico	41
Figura 32. Unión mediante material flexible de Filaflex para impresión 3D.....	42
Figura 33. Hilo de plástico para pesca.....	43
Figura 34. Hilo de acero	43
Figura 35. Comparación de cálculo de momentos.....	44

Figura 36. Posición natural en contracción	44
Figura 37. Posición natural en extensión	45
Figura 38. Resorte de torsión [24].....	46
Figura 39. Resorte de fuerza constante [24].....	46
Figura 40. Sistema de reducción mediante engranes planetarios.....	48
Figura 41. Conjunto sinfín-corona [26].....	49
Figura 42. Pareja de engranajes cónicos [26].....	49
Figura 43. Sistemas de 4 barras para accionamiento interno de la flexión de la falange distal [27]	50
Figura 44. Primera opción de soporte para el sistema de Abducción-aducción del pulgar	52
Figura 45. Placa CAN-BUS Shield v2 [14]	53
Figura 46. Placa Arduino MKR CAN Shield [14]	53
Figura 47. Placa Arduino MKR 1010 WiFi [14].....	54
Figura 48. Ejemplo del código del elemento CAN-Sender [14]	55
Figura 49. Ejemplo del código del elemento CAN-Receiver [14].....	56
Figura 50. Galga resistiva FlexiForce A301 [28]	57
Figura 51. Jewel NeoPixel RGB de la empresa Adafruit [29]	58
Figura 52. Esquema de funcionamiento de los rangos de fuerza.....	59
Figura 53. Elemento de accionamiento de tipo Interruptor [29].....	59
Figura 54. Elemento de accionamiento de tipo Pulsador [29]	60
Figura 55. Diseño final en extensión	61
Figura 56. Planteamiento de la posición y orientación de los dedos.....	62
Figura 57. Posición e inclinación de los puntos de anclaje de los dedos en la bancada (vista dorsal en mano derecha)	62
Figura 58. Ángulo horizontal del elemento de abducción-aducción del dedo pulgar	63
Figura 59. Ángulo vertical del elemento de abducción-aducción del dedo pulgar.....	63
Figura 60. Diseño final del dedo índice.....	64
Figura 61. Primer diseño de la falange Proximal y puntos de unión con la bancada y la falange distal	65
Figura 62. Vista de sección lateral de los orificios de unión de la falange proximal del Índice ..	65
Figura 63. Vista de sección lateral del paso generado para el Tendón	66
Figura 64. Vista del alojamiento para el Resorte de Torsión en la falange proximal del Índice..	66
Figura 65. Vista de sección lateral para la identificación del Resorte de Fuerza constante y los puntos de atornillado	67
Figura 66. Vista en isométrico de una mitad de la falange proximal del Índice con los puntos de atornillado	67
Figura 67. Vista de sección lateral coincidente con el eje de paso del cable del Sensor.....	68
Figura 68. Vista isométrica distal del orificio de paso del cable del Sensor por la falange proximal del Índice	68

Figura 69. Vista isométrica proximal del orificio de paso del cable del sensor por la falange proximal del índice	69
Figura 70. Diseño de piezas de aumento de rozamiento para los agarres	69
Figura 71. Alojamiento para las piezas de aumento de rozamiento en la falange proximal del Índice	70
Figura 72. Vista de sección lateral para la visualización de los orificios para las piezas de rozamiento en la falange proximal del Índice	70
Figura 73. Vista isométrica del diseño base de la falange distal del dedo Índice con el alojamiento del Resorte de torsión	71
Figura 74. Vista de sección lateral del diseño base de la falange distal del Índice con el alojamiento del Resorte de torsión.....	71
Figura 75. Dimensiones del Sensor de presión FlexiForxe A301 [28].....	72
Figura 76. Ensamblaje para el fijado del Sensor de presión	72
Figura 77. Vista de sección del alojamiento del ensamble para el Sensor de presión en la falange distal del Índice.....	73
Figura 78. Vista isométrica de la falange distal del Índice	73
Figura 79. Diseño final de la falange distal del dedo Índice.....	74
Figura 80. Pieza de soporte del sistema del dedo Índice	75
Figura 81. Sistema de accionamiento del dedo índice	75
Figura 82. Diseño final del dedo pulgar	76
Figura 83. Diseño inicial de la falange distal del dedo pulgar	76
Figura 84. Diseño final de la falange distal del dedo pulgar	77
Figura 85. Primer diseño de la falange proximal del dedo Pulgar	77
Figura 86. Alzado anterior del primer diseño de falange proximal del Pulgar	78
Figura 87. Alzado posterior del primer diseño de falange proximal del Pulgar.....	78
Figura 88. Vista lateral del primer diseño de falange proximal del dedo Pulgar.....	78
Figura 89. Diseño final de la falange proximal del dedo pulgar	79
Figura 90. Vista isométrica del sistema de engranes empleado para el desplazamiento del pulgar	80
Figura 91. Vista lateral del sistema de engranes empleado para el desplazamiento del pulgar 80	
Figura 92. Vista frontal del sistema de engranes empleado para el desplazamiento del pulgar 80	
Figura 93. Pieza de soporte intermedia, réplica del metacarpiano para el pulgar.....	81
Figura 94. Pieza de soporte del dedo pulgar y el sistema de abducción-aducción.....	81
Figura 95. Conexión entre MKR CAN Shields para transmisión de datos [14]	82
Figura 96. Puertos de un Driver de la marca Pololu [30]	82
Figura 97. Identificadores de mensaje CAN	83
Figura 98. Variables de funcionamiento	84
Figura 99. Inicio o paro del sistema	84
Figura 100. Cambio del motor seleccionado.....	84

Figura 101. Giro del eje motor en sentido antihorario y activación del mismo	84
Figura 102. Giro del eje motor en sentido horario y activación del mismo	85
Figura 103. Desactivación del giro del eje motor para el cambio de funcionamiento o del motor seleccionado.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 104. Función de activación de los motores.....	85
Figura 105. Función de paro de los motores	86
Figura 106. Función de activación del NeoPixel según niveles....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 107. Función de activación del NeoPixel	87
Figura 108. Réplica del agarre de tipo Pinza	89
Figura 109. Réplica del agarre de tipo Pinza lateral	90
Figura 110. Disposición del índice en Hipótesis 1.....	95
Figura 111. Disposición de índice en Hipótesis 2.....	96
Figura 112. Esquema del dedo índice.....	96
Figura 113. Esquema para el cálculo del Resorte B en H1	97
Figura 114. Esquema para el cálculo del Resorte A en H1.....	97
Figura 115. Esquema para el cálculo del Resorte A en H2.....	97
Figura 116. Catálogo de Resortes de Fuerza constante presentado por la empresa Sodemann [24].....	99
Figura 117. Catálogo de Resortes de torsión presentado por la empresa Sodemann [24].....	100
Figura 118. Catálogo Pololu micro metal Gearmotors [30]	102
Figura 119. Catálogo KHK Gears del Tornillo sinfín [26].....	102
Figura 120. Catálogo de KHK Gears de la corona para el sinfín [26].....	103
Figura 121. Esquema de la transmisión del accionamiento del índice	104
Figura 122. Posición del pulgar en Hipótesis 1	109
Figura 123. Esquema del pulgar en Hipótesis 1	109
Figura 124. Esquema de la transmisión de potencia para la abducción del dedo pulgar	110
Figura 125. Posición del pulgar para la realización del agarre de Hipótesis 2	112
Figura 126. Esquema de la flexión del dedo pulgar en Hipótesis 2.....	112
Figura 127. Resultado del análisis MEF para la primera mitad de la falange proximal del índice en Hip.1	¡Error! Marcador no definido.
Figura 128. Resultado del análisis MEF para la segunda mitad de la falange proximal del índice en Hip.1	¡Error! Marcador no definido.
Figura 129. Resultado del análisis MEF para la primera mitad de la falange proximal del índice en Hip.2	132
Figura 130. Resultado del análisis MEF para la segunda mitad de la falange proximal del índice en Hip.2	133
Figura 131. Resultado del análisis MEF para la primera mitad de la falange distal del índice	¡Error! Marcador no definido.

Figura 132. Resultado del análisis MEF para la segunda mitad de la falange distal del índice	¡Error! Marcador no definido.
Figura 133. Resultado del análisis MEF para la primera mitad de la falange proximal del pulgar en Hip.1	134
Figura 134. Resultado del análisis MEF para la primera mitad de la falange proximal del pulgar en Hip.2	134
Figura 135. Resultado del análisis MEF para la segunda mitad de la falange proximal del pulgar en Hip.1	135
Figura 136. Resultado del análisis MEF para la segunda mitad de la falange proximal del pulgar en Hip.2	135
Figura 137. Resultado del análisis MEF para la primera mitad de la falange distal del pulgar	136
Figura 138. Resultado del análisis MEF para la segunda mitad de la falange distal del pulgar	136
Figura 139. Montaje de las placas Arduino para el funcionamiento del circuito eléctrico.....	143

Índice de Tablas

Tabla 1. Especificaciones de diseño general	36
Tabla 2. Especificaciones de diseño mecánico.....	36
Tabla 3. Especificaciones de diseño electrónico.....	36
Tabla 4. Datos empleados para la selección de los resortes.....	96
Tabla 5. Resultados obtenidos para la preselección de los resortes	98
Tabla 6. Datos para el cálculo del Resorte de Torsión con valores de catálogo.....	99
Tabla 7. Resultados para la selección del Resorte de Torsión	100
Tabla 8. Valores de catálogo de los resortes seleccionados	100
Tabla 9. Datos para el cálculo del sistema de accionamiento en carga máxima.....	101
Tabla 10. Resultados del cálculo para el cumplimiento de accionamiento en carga máxima ..	101
Tabla 11. Parámetros para el cálculo de los motores requeridos	102
Tabla 12. Datos de catálogo de los motores Pololu y engranes KHK.....	103
Tabla 13. Resultados de las combinaciones de motor y sinfín-corona	106
Tabla 14. Datos para el cálculo del desplazamiento del dedo índice en vacío.....	107
Tabla 15. Resultados del cálculo del desplazamiento del dedo índice en vacío	108
Tabla 16. Datos para el cálculo del sistema de abducción-aducción del pulgar.....	110
Tabla 17. Resultados del sistema de Abducción-aducción del pulgar	111
Tabla 18. Datos para el cálculo del sistema de flexión del pulgar	113
Tabla 19. Resultados del sistema de flexión del pulgar	113
Tabla 20. Datos para el cálculo de la eficiencia del sistema.....	114
Tabla 21. Resultados de la eficiencia del sistema.....	114
Tabla 22. Referencias comerciales de los componentes del proyecto	143
Tabla 23. Coste de personal para el desarrollo del proyecto.....	147
Tabla 24. Amortización del Hardware.....	147
Tabla 25. Amortización del Software	148
Tabla 26. Coste de los componentes de montaje	148
Tabla 27. Coste de material de impresión 3D	149
Tabla 28. Resumen del coste del proyecto	149
Tabla 29. Presupuesto final para la realización del proyecto.....	149

I. Memoria

1.	Justificación	13
2.	Objetivos	14
3.	Alcance	15
4.	Antecedentes	16
4.1.	Mano humana	16
4.1.1.	Inicios de las prótesis corporales	21
4.1.2.	Tipos de agarres bidigitales	23
4.2.	Tipos de prótesis	24
4.2.2.	Método de comunicación entre dispositivos	28
4.2.3.	Medición de presión ejercida	30
4.2.4.	Método de respuesta al usuario	33
4.3.	Proyectos previos	34
4.4.	Normativa	35
5.	Especificaciones de diseño	35
5.1.	Propuestas de diseño	37
5.1.1.	Dedo Índice	37
5.1.2.	Dedo pulgar	39
5.1.3.	Sistema mecatrónico	40
6.	Análisis conceptual	42
6.1.	Dedo Índice	42
6.2.	Dedo pulgar	49
6.3.	Mecatrónica	52
7.	Descripción del diseño mecánico	60
7.1.	Consideraciones iniciales	61
7.2.	Diseño del dedo índice	64
7.2.1.	Falange proximal	64
7.2.2.	Falange distal	70
7.2.3.	Sistema de accionamiento	74
7.3.	Diseño del dedo pulgar	75
7.3.1.	Falange distal	76
7.3.2.	Falange proximal	77
7.3.3.	Sistema de abducción-aducción	79
8.	Descripción del diseño mecatrónico	82
8.1.	Hardware	82
8.2.	Software	83
8.2.1.	Código Sender	83
8.2.2.	Código Receiver	85

9. Conclusiones.....	88
10. Bibliografía.....	90

1. Justificación

El presente Trabajo Fin de Grado se centra en el campo de la Biomecánica y la Mecatrónica, permitiendo aplicar gran parte de los conocimientos del Grado en Ingeniería Mecánica a un proyecto real de aplicación. En particular, el presente trabajo se enmarca en la línea de investigación sobre diseño de manos artificiales del grupo de investigación en Biomecánica y Ergonomía de la Universitat Jaume I y más concretamente se enmarca en el proyecto UNIQUE-HAND [1]. En dicho proyecto se parte de la hipótesis de que un diseño unificado de una mano artificial asequible, con limitado número de grados de libertad y un diseño antropomorfo puede ser una buena solución para aplicaciones protésicas y de robótica colaborativa. Por tanto, el objetivo del proyecto UNIQUE-HAND es el diseño de dicha mano, que habrá de ser robusta pero flexible, simple y asequible, así como fácilmente acoplable a los brazos robóticos y encajes protésicos [1].

Para abordar el proyecto UNIQUE-HAND, éste se ha seccionado en tareas más concretas para permitir una resolución abordable de cada tema a tratar: pruebas de distintos diseños mecánicos, dispositivos electrónicos de diferentes tamaños y potencias, mejoras en cuanto a sistemas de actuación, etc. En particular este TFG se centra en el diseño mecánico de los dedos índice y pulgar, así como en el sistema mecatrónico que permita su control para poder realizar agarres de tipo pinza y lateral.

Se pretende incluir ciertas innovaciones como son: emplear un sistema de subactuación de tipo tendón; instalación de sensores de presión para la lectura de la fuerza ejercida por los dedos durante el agarre; inclusión de *feedback* visual del nivel de fuerza mediante elementos luminosos; sistema de transmisión de datos mediante CAN que permita una mayor velocidad de respuesta por parte de la electrónica instalada, así como una reducción del número de cables entre la mano y el antebrazo.

2. Objetivos

Mediante el diseño realizado se pretende llegar a un resultado que permita ser integrado en el desarrollo del proyecto UNIQUE-HAND, obteniendo un diseño de los dedos principales, índice y pulgar que pueda ser integrado en la palma y sea compatible con el resto del diseño de la mano completa, lo que requiere un trabajo coordinado con el resto del equipo del proyecto.

Se pretende conseguir un diseño versátil y lo más natural o antropomorfo posible, permitiendo replicar agarres de tipo pinza y lateral, como ya se ha comentado. Gracias a esto, se podrá seguir avanzando en el proyecto principal al comprobar las utilidades planteadas por los diseños aquí presentados.

Adicionalmente, se desean implementar sensores de presión para la lectura del nivel de fuerza ejercida durante el agarre. Dicha lectura se devolverá de manera visual, mediante una serie de elementos luminosos, permitiendo una interpretación de la fuerza ejercida por parte del usuario de la mano artificial otorgándole la posibilidad de variar la cantidad de fuerza que desea realizar. También se presenta un sistema de comunicación complejo mediante tecnología CAN, para una mayor velocidad de respuesta, en lo que corresponde a la electrónica instalada. Este sistema de comunicación permite reducir la cantidad de cableado presente en el mecanismo, lo que abarata costes en cableado, y una mayor velocidad de transmisión de datos.

Se debe estudiar el sistema idóneo de accionamiento y transmisión para ocupar el menor espacio posible dentro de la palma y por otra parte conseguir fuerzas de agarre lo más altas posible. De acuerdo a la planificación realizada para el diseño en el marco del proyecto UNIQUE-HAND, se establece que deberá usarse un solo motor para la flexión del dedo índice y dos motores para el dedo pulgar, de modo que sea posible realizar su flexión y abducción, lo que es necesario para poder orientar el dedo pulgar de forma adecuada para realizar los dos tipos de agarre: pinza y pinza lateral.

3. Alcance

Como ya se ha mencionado el TFG se centra únicamente en una parte del diseño de la mano artificial, que incluye los dedos índice y pulgar, más la parte correspondiente de la palma que permite alojar los actuadores y transmisiones. Además, como ya se ha dicho se aborda también la sensorización de los dedos y el diseño mecatrónico y de control de los mismos.

Dado que se pretende alcanzar una funcionalidad similar a la que otorga una mano humana sana, lo que conlleva un gran número de detalles expuestos a continuación y abordados en este TFG:

- Simular un tamaño de mano de varón estándar
- Orientar las articulaciones para permitir agarres de tipo pinza y pinza lateral
- Conseguir fuerza de agarre lo más elevadas posibles
- Conseguir velocidades aceptables de movimiento en vacío de los dedos
- Medir y monitorizarla fuerza ejercida por el agarre

Para abordar estas tareas se han debido analizar alternativas de diseño conceptual y preliminar y realizar diseños de detalle apropiados, siempre de forma coordinada con el resto del equipo de trabajo del proyecto UNIQUE-HAND.

Así, para conseguir el antropomorfismo, se ha partido de un escaneo 3D, realizado a una mano de varón adulto a la que se ha aplicado un factor de escala para adaptarlo a un tamaño medio acorde a la bibliografía [2]. De esta manera se consigue un boceto real del cual se puede partir para obtener el diseño 3D mediante el software *SolidWorks*.

Asimismo, *SolidWorks* se ha empleado para la simulación de los diferentes agarres, permitiendo modificar los diseños y orientaciones de los ejes de articulación para conseguir un agarre lo más antropomorfo posible, sin obtener un diseño de dimensiones desorbitadas.

En la selección de los accionamientos se han comparado alternativas de motores y transmisiones, así como su disposición, con el fin de seleccionar una solución factible en el espacio disponible y tratando de conseguir un equilibrio óptimo entre la fuerza aceptable de salida y la velocidad de movimiento en vacío. En este punto hay que considerar también aspectos comerciales, tales como coste y tiempo de suministro, considerando los proveedores factibles. .

Finalmente se ha abordado el diseño del sistema de control, considerando los sensores, sistema de comunicación y microcontrolador necesario. Se emplea el método de comunicación de tipo CAN-Bus, mayormente utilizado en automóviles o sistemas industriales compuestos por un gran número de máquinas. Mediante este método de comunicación se libera mucho espacio al reducir la cantidad de cableado presente en el sistema. Esto se debe a que la comunicación CAN-Bus requiere únicamente de dos cables principales, *CAN-HIGH* y *CAN-LOW*. Esto facilita la conexión de la mano con los sistemas de control basados en EMG que suelen emplearse en estas manos artificiales, siendo también interesante esta reducción de cables en el caso de uso como mano robótica. La implementación de los sensores de fuerza también ha requerido diseño de unos elementos blandos intermedios simulando las huellas dactilares en un dedo real, pues son estas las que entran en contacto con el objeto agarrado, además de otorgar rozamiento con el objeto agarrado y deformarse para poder acomodar la superficie dactilar en el agarre. Pero una vez registrado el valor de fuerza se debe hacer llegar al usuario de alguna manera, por lo que se han instalado dispositivos luminosos tipo led..

Finalmente, también se incluye un código de programación propio empleando placas de la empresa *Arduino* y su software libre, empleando lenguaje C++.

4. Antecedentes

Desde hace tiempo se han ido empleando prótesis de extremidades superiores para aquellas personas o animales que sufrieron la pérdida de uno o de ambos miembros, o que nacieron con esa falta. Poco a poco se han ido mejorando estos elementos gracias a las nuevas tecnologías y a la gente implicada en el avance de este campo. Es por ello que, a día de hoy, se pueden encontrar sistemas de ayuda tanto asemejándose a una extremidad natural como más sencillos, si el usuario no tiene reparos en la estética.

4.1. Mano humana

La mano humana es capaz de realizar innumerables acciones debido a la prensión, función que es capaz de realizar gracias a la disposición particular del pulgar, siendo este capaz de oponerse a cada uno de los cuatro dedos restantes.

Por la forma que presenta, la mano es capaz de estar completamente abierta, como se muestra en la Figura 1, o cerrada sobre sí misma alrededor de un objeto. Cuando está abierta, se pueden apreciar todos los detalles que presenta su cara palmar, es decir, la que se encuentra en contacto al coger algún objeto.

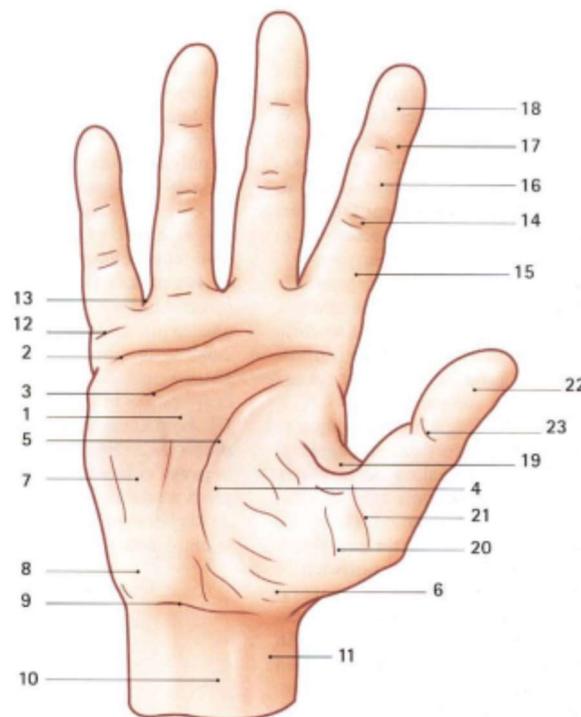


Figura 1. Sección palmar de una mano humana extendida [3]

En el centro de la palma (1) se encuentra un hueco, el cual permite el alojamiento de los objetos y está delimitado de forma lateral por la eminencia tenar (4) y la eminencia hipotenar (7). Transversalmente se disponen tres pliegues: palmar inferior (2), palmar medio (3) y palmar superior (5). Todos los pliegues que presenta la palma tienen su importancia, debido a que son los encargados de que permanezca cóncava en cualquier posición de la mano, y en cirugías debe evitarse a toda costa cortarlos perpendicularmente. La mano cuenta con cinco dedos, clasificados en dos grupos: dedos largos, los cuales tienen longitudes desiguales, y un dedo corto, el pulgar. En los dedos largos aparecen tres pliegues: digital distal (17), digital proximal

(14), digital- palmar (12); estos pliegues coinciden con los puntos de articulación de cada dedo, las cuales permiten que los dedos puedan doblarse sobre sí mismos.

Por otro lado, el pulgar solo presenta dos pliegues, debido a que contiene dos falanges, una menos que los dedos largos. Dichos pliegues son el palmar distal (23) y el de la articulación metacarpofalángica, la cual es doble (20) (21).

No todos los dedos presentan la misma importancia en la funcionalidad de la mano, aunque cabe destacar que si faltase el dedo pulgar se perderían muchas de las posibilidades de la mano. Entre los dedos se alojan tres zonas según la utilización de la mano, tal y como se observa en la Figura 2:

- Zona del pulgar (I). Desarrolla una función predominante debido a la oposición a los demás dedos. Debe evitarse todo riesgo que pueda suponer la pérdida de dicho dedo.
- Zona de las pinzas (II). Se compone del dedo índice y el corazón, permitiendo realizar una pinza bidigital (pulggar + índice) o tridigital (pulggar + índice + corazón).
- Zona de los alcances (III). Comprende los dedos anular y meñique, que aseguran la firmeza del agarre que se realiza con la mano completa.

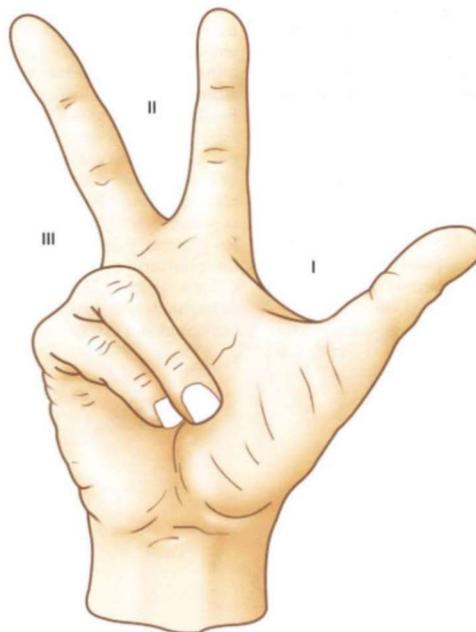


Figura 2. Zonas de utilización de la mano [3]

Obviamente la funcionalidad de la mano no se ve completa solo con la extensión, también requiere de la flexión de los dedos por sus articulaciones para poder realizar sus agarres. Desde un punto de vista geométrico, el punto de convergencia de los ejes geométricos de cada dedo varía según la situación en la que se encuentre. Si se encuentra extendida la mano, la convergencia de dichos ejes coincide con el punto medio del ancho de la muñeca tal y como se muestra en la Figura 3.

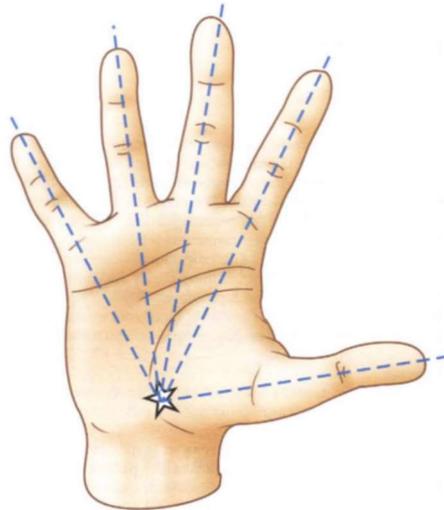


Figura 3. Mano humana en extensión [3]

En cambio, si la mano se encuentra en flexión, los dedos se acoplan unos a otros gracias a los grados de libertad que otorgan sus articulaciones. De esta manera se ve desplazado el punto de convergencia en diagonal, estando ahora más próximo del pulgar y sobre el antebrazo en vez de sobre la muñeca. Este desplazamiento puede apreciarse en la Figura 4.

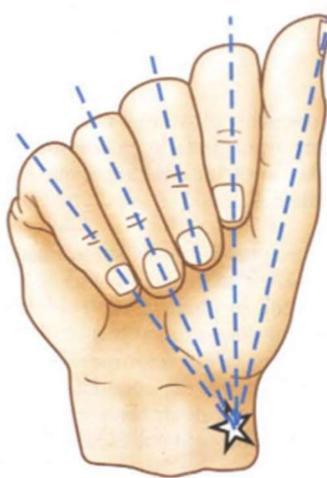


Figura 4. Mano humana en flexión [3]

Asimismo, la mano presenta otra disposición al encontrarse en extensión relajada. Esto conlleva un cambio en la convergencia de los ejes geométricos de los dedos, siendo aún más diferente a las anteriores; al quedar los ejes de los dedos corazón, anular y meñique paralelos se imposibilita obtener un único punto de convergencia. En la Figura 5 se puede observar la disposición de los ejes nombrados anteriormente y los puntos en los que convergen.

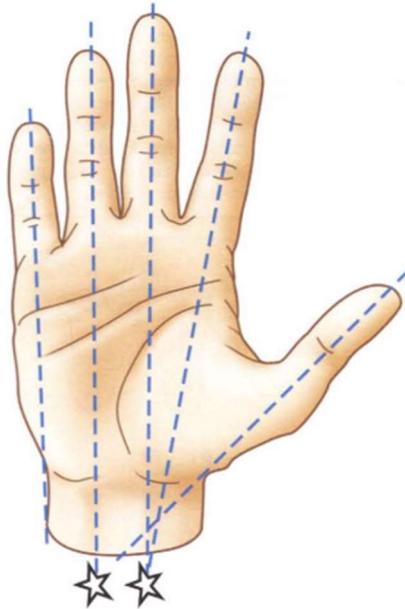


Figura 5. Mano humana en extensión relajada [3]

Estas consideraciones deberán tenerse en cuenta para diseños mecánicos que se vayan a llevar a cabo para la realización de prótesis de mano o utillajes similares a las manos humanas.

Al flexionarse los dedos de la mano puede observarse que no todos alcanzan el mismo ángulo de cierre, partiendo desde 100° en el dedo índice hasta 70° en el dedo meñique, aproximadamente, como se representa en la Figura 6. Tampoco son unos valores fijos para todos y cada uno de los individuos, pues varían según la laxitud ligamentosa de cada persona.

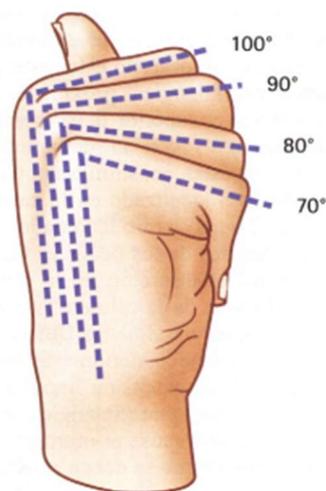


Figura 6. Ángulo de flexión de los dedos [3]

Mecánicamente hablando, la mano presenta una gran cantidad de grados de libertad, los cuales se deben a las posibilidades de movimiento que otorgan las articulaciones al asemejarse a una rótula mecánica. Gracias a estas posibilidades se es capaz de agarrar objetos con una infinidad de variaciones en sus estructuras, lo cual es muy complicado de replicar al diseñar prótesis de este tipo de miembros.

Como se describió anteriormente, los tipos de articulaciones se pueden asignar a los tipos de pliegues que pueden encontrarse en cada dedo. Siguiendo la numeración presente en la Figura 1 pueden diferenciarse en digital-distal (17), digital-proximal (14) y digital-palmar (12). Para simplificar se pueden agrupar en articulaciones metacarpofalángicas e interfalángicas, coincidiendo las primeras con los pliegues de tipo digital-palmar y, con las segundas las de tipo digital-distal y digital-proximal.

Una vez comprendido esto, se puede detallar el nivel de grados de libertad que presenta cada tipo de articulación; haciendo una prueba sencilla con el dedo índice se pueden contabilizar más sencillamente los grados de libertad otorgados por cada articulación. Dicha prueba consiste en realizar todos los desplazamientos permitidos, flexión directa para las articulaciones interfalángicas y abducción-aducción para las metacarpofalángicas, en la Figura 7 puede observarse el desplazamiento que realiza el índice al hacer el gesto habitual de negación. Siendo fácilmente visible que las articulaciones interfalángicas presentan 1 grado de libertad cada una y las metacarpofalángicas 2 grados de libertad, pues son capaces de realizar el movimiento de flexión y el de abducción-aducción llegando a poder combinar dichos desplazamientos y describir trayectorias como la de la Figura 8.



Figura 7. Abducción-aducción del dedo índice [3]



Figura 8. Trayectoria por combinación de Flexión y Abducción aducción del dedo índice [3]

Una idea clara que debe tenerse en cuenta al pensar sobre la realización de la gran mayoría de agarres, si no es la totalidad de los mismos, es la relevancia del dedo pulgar. Como se comentó anteriormente, debe evitarse en todo momento las situaciones que puedan condicionar la pérdida de este miembro. Más adelante se expondrá el porqué de su importancia con la visualización y explicación de los tipos de agarres básicos realizados en la vida cotidiana.

El dedo pulgar comienza su compleja y llamativa importancia al ser el único dedo en la mano que es capaz de oponerse a cada uno de los dedos de la mano. Dicha oposición del dedo pulgar se debe, principalmente, a la acción combinada de la articulación (TM) entre el trapecio (T) y el primer metacarpiano (M), y la torsión pasiva que sufre el dedo pulgar en la articulación (MF) del metacarpiano (M) y la primera falange (F1) al ejecutar una abducción en vacío. La Figura 9 muestra el dibujo radiográfico de un pulgar desde su primera pieza ósea, el escafoides (E), hasta su quinta, la segunda falange (F2).

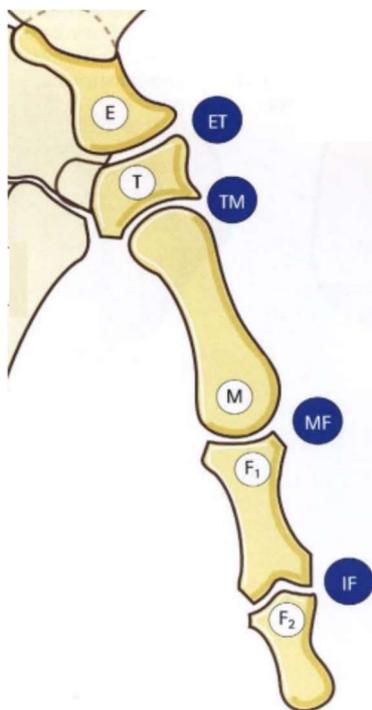


Figura 9. Esquema óseo de un dedo pulgar [3]

Realizando un recuento de los grados de libertad presentes en todos los dedos, considerando la misma cantidad para los dedos corazón, anular y meñique que los presentes en el índice y que el dedo pulgar otorga 5 grados de libertad, se llega a una suma de 21 grados de libertad. A esta cifra habría que sumarle los 6 grados otorgados por la muñeca, lo que hace un total de 27 grados, solamente para una mano.

4.1.1. Inicios de las prótesis corporales

El empleo de las prótesis corporales comenzó en antiguo Egipto, rondando el año 2.500 a.C. Fue descubierta por un grupo de investigadores de la Universidad de Manchester, en el Reino Unido [4]. Dicha prótesis simulaba ser un dedo pulgar del pie derecho, el cual estaba compuesto por materiales como madera y cuero tal y como se observa en la Figura 10, y cumplía una función meramente estética.



Figura 10. Prótesis egipcia de dedo pulgar del pie derecho [5]

Desde entonces, los avances en la tecnología protésica avanzaron de guerra en guerra, pues son los periodos en los que más se requiere invertir en el campo de la Medicina. Por ejemplo, durante la Alta Edad Media (476 d.C. - 1000 d.C.) se llevaron a cabo pocos avances protésicos, siendo, la mayoría, piezas estéticas que ayudasen a esconder deformidades o heridas graves a causa de las batallas realizadas. Durante el Renacimiento (1400 d.C. - 1800 d.C.) se retomaron los avances protésicos, generalmente mejorando los materiales de elaboración de las prótesis de piezas de madera a dispositivos compuestos por hierro, acero o cobre [4].

Otro llamativo avance en la historia de las prótesis se realizó a principios del año 1500 d.C. en Alemania, donde se implantó la mano artificial funcional presentada por piezas en la Figura 11. Esta mano era capaz de realizar ciertas tareas gracias a unas fijaciones que la unían a la mano natural y liberando una serie de mecanismos y resortes [4].



Figura 11. Mano de hierro del mercenario alemán Götz von Berlichingen [5]

A lo largo del siglo XVI se produjo un gran avance gracias a Ambroise Paré. Quien introdujo procedimientos modernos de amputación en medicina y elaboró prótesis tanto superiores como inferiores con diseños en los que aún se basan los dispositivos actuales, pues propuso ideas

revolucionarias como simular la flexión de la rodilla para amputaciones a la altura del muslo o control de bloqueo para esta misma articulación. También cabe destacar que se propusieron cambios en los materiales de elaboración de estos implantes, pues al ser fabricados en hierro o cobre resultaban demasiado pesados para su uso, haciéndose una selección de materiales como cuero, papel y cola [4].

4.1.2. Tipos de agarres bidigitales

En la vida cotidiana se realizan todo tipo de agarres, pudiendo clasificarlos en presas de tipo digitales, palmares y centradas. Asimismo, las de tipo digital se dividen en pinzas bidigitales y pluridigitales.

Aunque es realmente importante la consideración de todas las categorías nombradas para un diseño de mano completo, este documento se enfoca en las presas de tipo bidigital. Pudiendo distinguirlas según el tipo de oposición entre los dedos implicados (dedos índice y pulgar en la mayoría de los casos):

- Presa por oposición terminal o terminopulpejo. Es la más fina y precisa, permitiendo sujetar un objeto de pequeño calibre o coger un objeto muy fino, como una cerilla o una aguja [3]. La Figura 12 muestra el resultado de una presa de este estilo llevada a cabo de dos maneras distintas, pues se puede realizar la presa mediante una oposición pulpejo-pulpejo o uña-pulpejo.

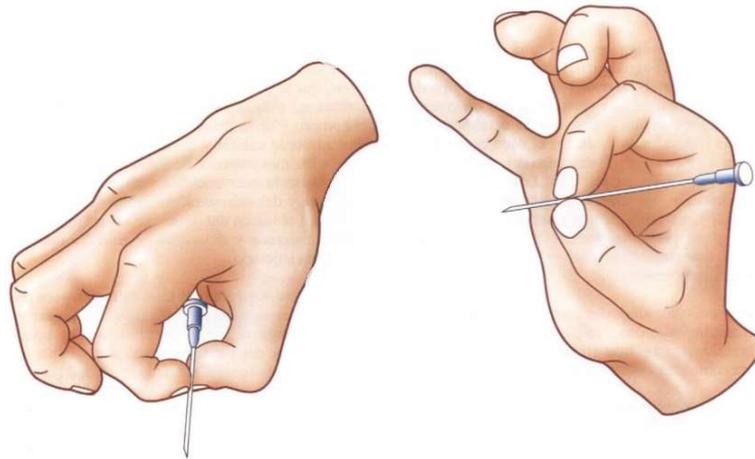


Figura 12. Presa por oposición terminal uña-pulpejo y pulpejo-pulpejo [3]

- Presa por oposición subterminal o del pulpejo. Este tipo es el más común. Permite sujetar objetos relativamente más gruesos, un lápiz o una hoja de papel. En la Figura 13 se observa este tipo de agarre, al cual se refiere como agarre de tipo pinza en este documento. Pues es su denominación más habitual.

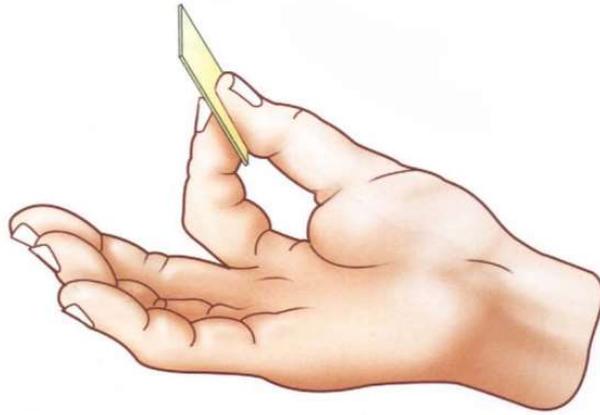


Figura 13. Presa por oposición subterminal o pinza [3]

- Presa por oposición subterminolateral o pulpolateral. Gesto de agarre habitual para sujetar una moneda, tal y como se muestra en la Figura 14. En esta presa se apoya el objeto sobre el pulpo de la primera falange del dedo Índice mientras se genera la fuerza con el dedo pulgar.



Figura 14. Presa por oposición subterminolateral o pinza lateral [3]

4.2. Tipos de prótesis

Dentro del mundo de las prótesis límbricas superiores se debe diferenciar entre las que presentan una capacidad funcional y las que son meramente estéticas. Las primeras, también denominadas activas, ofrecen al individuo posibilidades de movimiento y de utilidades similares a las de una mano humana. En cambio, las estéticas, o pasivas, carecen de movimiento y funcionalidades más allá de aparentar la carencia de un miembro, como las visualizadas en la Figura 15.



Figura 15. Prótesis de mano estéticas [6]

Adicionalmente, las prótesis activas pueden clasificarse según el tipo de sistema empleado para su accionamiento en: mecánicas, eléctricas, neumáticas, mioeléctricas e híbridas.

a. Mecánicas

Este tipo de prótesis requiere de un accionamiento por medio de otro miembro del cuerpo, bien sea por el codo, el hombro o incluso el otro brazo del individuo. No presentan gran precisión, aunque sí una gran fuerza en el agarre, esto dificulta la posibilidad de realizar agarres a objetos de pequeñas dimensiones o de resistencia limitada. El aspecto habitual de esta categoría de prótesis activas se muestra en la Figura 16.

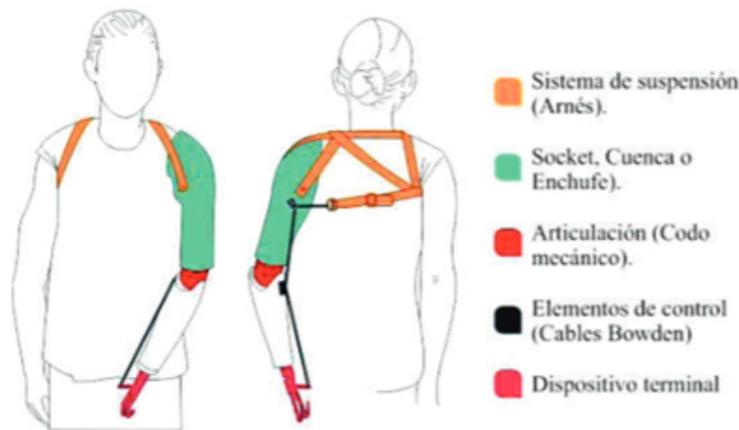


Figura 16. Prótesis mecánica con accionamiento por arnés [6]

b. Eléctricas

Las prótesis de este ámbito se caracterizan por ser accionadas por motores eléctricos, servomotores o dispositivos similares. Gracias a este tipo de accionamiento son capaces de realizar con precisión agarres de todo tipo, si la potencia de los motores es suficiente, siendo controlados por el individuo mediante pulsadores o sensores instalados en el cuerpo de la prótesis.

c. Neumáticas

Este tipo de prótesis se basan en el empleo de aire comprimido para su funcionamiento. Al trabajar mediante aire comprimido están capacitadas para la realización de rápidos movimientos y agarres de gran fuerza, aunque su mayor desventaja es el tamaño de los compresores necesarios para poder llevar a cabo las tareas de la prótesis.

Este tipo de miembros presentan la posibilidad de una reducción de peso considerable, como la presentada por el equipo de Xuanhe Zhao, del Instituto Tecnológico de Massachusetts, llegando a un peso máximo de 0,25kg. La Figura 17 muestra dicha prótesis en funcionamiento.



Figura 17. Prótesis neumática del equipo de investigación de Xuanhe Zhao (MIT) [7]

d. Mioeléctricas

Los dispositivos dentro de esta categoría son similares a las de tipo eléctricas, pero se diferencian en el método de activación de los motores, ya que estas detectan las señales del sistema nervioso del sujeto mediante sensores electromiográficos (EMG), como el mostrado en la Figura 18.



Figura 18. Sensor Electromiográfico o EMG [8]

Habitualmente los sensores EMG son los empleados en hospitales para tomar las lecturas de los pacientes. Dichos sensores se colocan sobre la superficie cutánea del sujeto sobre el nervio o músculo a emplear para las mediciones, conectando los sensores al sistema en cuestión para su posterior activación mediante la contracción o relajación del músculo medido. Estos sensores

toman lecturas de tensiones eléctricas de valores entre 5 y 20 μV , para su posterior amplificación y procesamiento para realizar la tarea concreta mandada por el usuario.

Una de las ventajas más llamativas de este tipo de prótesis es la eliminación del arnés de accionamiento que se emplea en las prótesis mecánicas por un anclaje directo al individuo o mediante succión en el punto de amputación, aunque su mayor desventaja es la dependencia de una batería que debe cargarse y mantenerse cada cierto tiempo. Algunos ejemplos de este tipo de prótesis son la mano Michelangelo presentada por Ottobock (Figura 19) y la mano i-Limb Quantum, de Óssur (Figura 20).



Figura 19. Prótesis límbica superior Michelangelo [9]



Figura 20. Prótesis límbica superior i-Limb Quantum [10]

e. Híbridas

En esta categoría se reúnen las prótesis que combinan el accionamiento mecánico y eléctrico o mioeléctrico, centradas mayormente para individuos con amputaciones por encima del codo. Su funcionamiento se basa, principalmente, en el accionamiento del codo mediante el sistema mecánico al mismo tiempo que la mano es accionada igual que las prótesis mioeléctricas.

4.2.2. Método de comunicación entre dispositivos

Se pretende reducir al máximo el volumen ocupado por el sistema de comunicación entre dispositivos en la prótesis. Esto conlleva la exploración de métodos basados en dispositivos con conexión bluetooth, WiFi o CAN-Bus. A continuación, se expondrán brevemente cada uno de los métodos nombrados para una mejor comprensión de su funcionamiento y de los apartados posteriores de este proyecto.

a. Comunicación Bluetooth

El Bluetooth es un protocolo de comunicaciones que sirve para la transmisión inalámbrica de datos (fotos, música, contactos...) y voz entre diferentes dispositivos que se hallan a corta distancia, dentro de un radio de alcance que, generalmente, es de diez metros. La tecnología Bluetooth transmite inalámbricamente datos y voz a través de ondas de radio que operan en la banda ISM (no comercial) de los 2,4 GHz. Para ello, hace uso de las Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN, por sus siglas en inglés) [11].

Al realizarse la transferencia por radiofrecuencia, los dispositivos no tienen la obligación de hallarse alineados. Por otro lado, sin embargo, los equipos deben encontrarse dentro de un radio de alcance, que suele ser corto, aunque pueda variar en función del aparato [11].

Esto permite que la comunicación no requiera de cableado alguno, por lo que el mando del sistema puede hallarse separado del mecanismo. Otorgando la posibilidad de que el técnico que lo controle se encuentre a cierta distancia, para el caso de la pinza antropomorfa robótica. En el caso de la mano protésica, se puede emplear este método de comunicación para añadir funciones que deben controlarse por la mano contraria a la amputada o, incluso, añadiendo elementos de control en otras partes del cuerpo como se trató en [12].

b. Comunicación WiFi

El WiFi es un mecanismo que permite, de forma inalámbrica, el acceso a Internet de distintos dispositivos al conectarse a una red determinada. Esta tecnología, al tiempo que ofrece la entrada a la gran red de redes, vincula diferentes equipos entre sí sin la necesidad de cables [13].

Dicha conexión inalámbrica es posible gracias al uso de radiofrecuencias e infrarrojos, empleados para la transmisión de información. Este hecho se traduce, irremediablemente, en una limitación, ya que el usuario deberá encontrarse dentro de un alcance específico de cobertura para poder disfrutar de la señal. Generalmente, ese radio varía entre los 5 y los 150 metros de distancia con respecto al aparato emisor de dicha señal [13].

c. Comunicación CAN-Bus

El método de comunicación CAN-Bus se basa en la priorización de mensajes, al contrario que otros métodos en los que se priorizan al componente emisor y receptor. De esta manera se

permite la interconexión de todos los dispositivos electrónicos existentes en un sistema mediante, únicamente, los dos cables nombrados anteriormente *CAN-HIGH* y *CAN-LOW*.

Habitualmente se encuentra esta comunicación en vehículos debido a su sencillez en cuanto a instalación y a su velocidad de transmisión de datos. Para poder llevar a cabo la comunicación mediante este método se requiere de un elemento emisor y uno o varios elementos receptores, todos ellos conectados a las líneas de CAN-Bus como se muestra en la Figura 21. Aunque en la realidad, todos los elementos en el sistema pueden realizar tanto la función de emisor como la de receptor, una razón más por la que se prefiere el uso de este método de comunicación en sistemas de varios dispositivos. En la figura se pueden observar las líneas, tanto de dirección como de sentido, de los datos transmitidos. Las flechas de color verde representan la entrada de información, las de color naranja indican las líneas de comunicación CAN y, en azul se muestran las salidas de información tras realizar la comunicación.

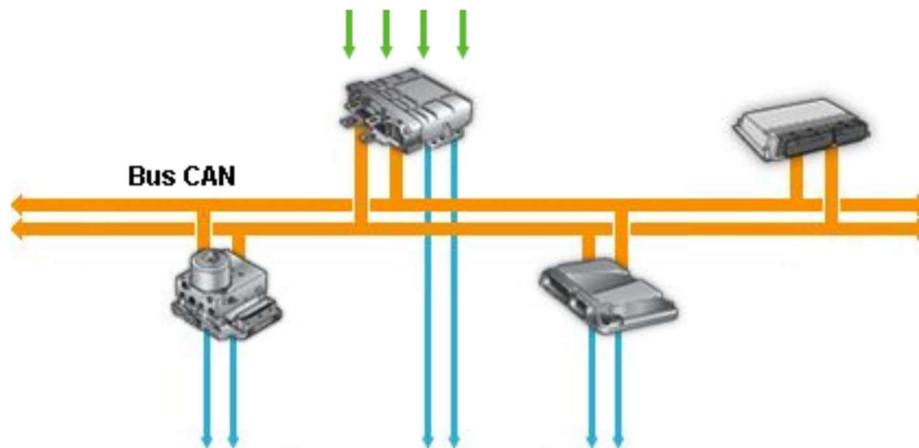


Figura 21. Esquema de comunicación CAN-Bus [14]

Para poder otorgar al CAN-Bus de esa característica de mensajería, los datos que envía se basan en la estructura mostrada en la Figura 22. Como puede observarse, los primeros 12 bits están reservados para la identificación del mensaje, esto le dirá al dispositivo conectado si debe leer el mensaje o no. Los siguientes 6 bits se reservan para el control del mensaje (los dos primeros bits) y la longitud de los datos enviados (los cuatro siguientes). A continuación, vienen los datos del mensaje enviado, ocupando un máximo de 8 bytes y siendo la información a transmitir entre emisor y receptor. Los bits finales son empleados para asegurar el envío y recepción del mensaje.

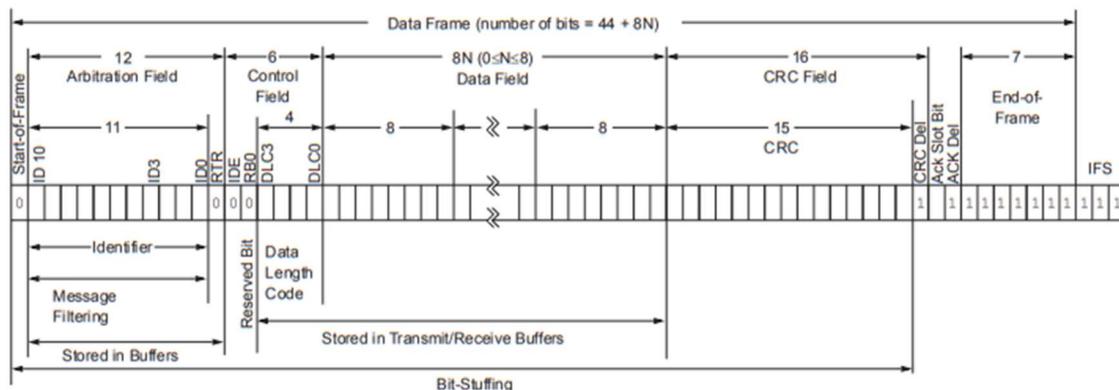


Figura 22. Marco de datos estándar en CAN-Bus [14]

4.2.3. Medición de presión ejercida

Cuando se hace uso de una mano artificial para manipular objetos de todo tipo, se desea conocer cuánta fuerza se está ejerciendo con la mano. Esto se consigue al implementar sensores de presión sobre las superficies en contacto a los elementos agarrados. De esta manera se puede monitorizar si el sistema funciona correctamente y controlar sus actuadores para realizar la fuerza adecuada en cara agarre.

Habitualmente, en la industria, se emplean elementos de medición como las células de carga o los dinamómetros. Este tipo de elementos registran la cantidad de fuerza o presión que se está ejerciendo sobre sus componentes deformables, devolviéndola al usuario mediante un valor numérico y sus unidades correspondientes.

Las células de carga se componen principalmente por galgas extensiométricas, las cuales son sensores cuya resistencia varía con la fuerza aplicada. Esto sucede porque están compuestas por un filamento o película metálicos encapsulado entre dos láminas de plástico, como se muestra en la Figura 23. Estos sensores convierten la fuerza, presión, tensión o peso en un cambio de la resistencia eléctrica el cual puede ser medido [15]. Dicha resistencia varía al estirarse o comprimirse la galga, de tal manera que aumenta al alargarse la galga y viceversa, dando lugar a la señal eléctrica que el dispositivo de lectura interpreta y convierte en un dato numérico para su comprensión.

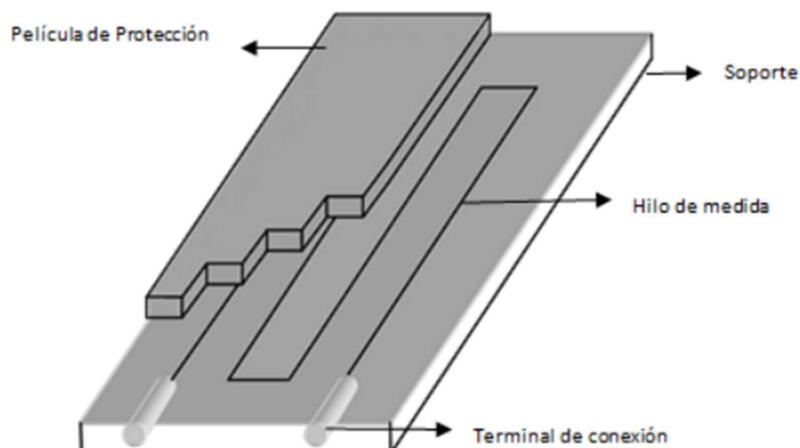


Figura 23. Esquema de una galga extensiométrica metálica [16]

Pueden distinguirse diferentes tipos de galgas según el método de medición que emplean. Estas se enumeran a continuación junto a una breve explicación.

- **Galgas por resistencia.** Es un conductor eléctrico deformable, el cual aumenta su resistencia al sufrir elongaciones. Mediante el circuito conformado por el filamento se convierte esta resistencia en voltaje absoluto. En caso de que la deformación cumpla la Ley de Hooke, existirá una variación lineal entre la elongación y el voltaje.
- **Galgas por capacitancia.** Están asociadas a características geométricas y son usadas para medir esfuerzos y deformación. Las propiedades eléctricas de los materiales deformables son despreciables, por lo cual los materiales de las galgas de capacitancia pueden ser calibrados según los requerimientos mecánicos.
- **Galgas fotoeléctricas.** Mediante el uso de un extensómetro se puede amplificar el movimiento del espécimen, mientras un rayo de luz es pasado a través de una abertura variable, actuando con el extensómetro y directamente con una célula fotoeléctrica. A medida que la galga cambia su abertura también lo hace la cantidad de luz que alcanza

a la célula, lo que conlleva que la intensidad de la energía generada por la celda presente una variación, la cual podemos medir, y de ésta obtener la deformación [16].

- **Galgas semiconductoras.** En las galgas semiconductoras hay un elemento semiconductor en vez del hilo metálico. La gran diferencia respecto a las demás galgas es su tamaño, ya que es más reducido. La potencia máxima disipable en galgas semiconductoras es de unos 250 mW. Las galgas semiconductoras son capaces de soportar una alta resistencia, su fatiga de vida es más larga y tiene menor histéresis, que es la capacidad de que el material conserve sus propiedades bajo diferentes estímulos [16].

La Figura 24 muestra una célula de carga empleada para mediciones a tracción o compresión. Este tipo de células encierran una o varias galgas extensiométricas ancladas al cuerpo rígido de la célula, lo que permite que la deformación se transmita de los puntos de unión a las galgas. Así, se completa la medición siguiendo el mismo procedimiento explicado para las galgas [17].



Figura 24. Célula de carga para Tracción o Compresión [17]

Los dinamómetros pueden diferenciarse en dos tipos característicos, los mecánicos y los digitales. Los primeros son más rudimentarios y presentan una precisión limitada, pues se componen de un resorte al que se han unido uno o dos ganchos, según aquello que vaya a medirse, y el valor devuelto se encuentra directamente relacionado con la deformación elástica sufrida por el resorte. En la Figura 25 se puede observar la composición de un dinamómetro mecánico.



Figura 25. Dinamómetro mecánico [18]

Los dinamómetros digitales se diferencian de los mecánicos por la presencia de un sensor electrónico similar a una galga extensiométrica acoplándose al sistema mecánico presente en los anteriores dinamómetros, lo que le permite aumentar el valor límite en las mediciones y reducir el tamaño del aparato empleado para tomar dichas mediciones. Adicionalmente, presentan mayor precisión y complejidad que los mecánicos, por lo que son más habituales hoy en día. En la Figura 26 se muestra un dinamómetro digital.



Figura 26. Dinamómetro digital [19]

Otros dispositivos de toma de mediciones son los sensores de fuerza resistivos, tecnología inventada y patentada en 1977 por Franklin Eventoff.

Estos elementos están formados por un polímero conductor que varía su valor de resistencia según la presión ejercida sobre su superficie de contacto. Habitualmente se suministran como una lámina de polímero o tinta que puede aplicarse mediante serigrafía. La lámina sensora está formada por partículas tanto conductoras como no conductoras de la electricidad suspendidas en una matriz. Estas partículas presentan un tamaño submicrométrico y están formuladas para reducir la dependencia de la temperatura, aumentar la calidad de las propiedades mecánicas y mejorar la durabilidad de su superficie. Al aplicar la fuerza sobre la superficie de la película sensora provoca que las partículas entren en contacto con los electrodos conductores, cambiando la resistencia de dicha película. Como todos los sensores que se basan en la resistividad, se emplean interfaces sencillas en las resistencias de detección de fuerza y pueden funcionar satisfactoriamente en entornos moderadamente hostiles.

Comparando otros sensores de fuerza con las FSR (Force Sensor Resistor) cabe destacar la ventaja de estas últimas en cuanto a tamaño, coste y resistencia frente a golpes. Como desventaja destaca su baja precisión, al poder diferir un 10% los valores medidos. Para evitar la pérdida de precisión se pueden emplear condensadores de detección de fuerza y, adicionalmente, se gana en estabilidad a largo plazo. El inconveniente de estos condensadores es la necesidad de una electrónica de accionamiento más compleja.

4.2.4. Método de respuesta al usuario

A lo largo de los años se han ido perfeccionando las prótesis para acomodarlas a los usuarios de las mismas, de tal manera que se comenzaron a incorporar métodos para hacer saber a los portadores de cuándo se activaban o desactivaban ciertas opciones de la propia prótesis. Esto conlleva la instalación de elementos que generen sonidos, luces o vibraciones para hacer saber al usuario una gran variedad de información necesaria, como el nivel de batería, el tipo de agarre a ejecutar o el nivel de fuerza generado.

Las prótesis más complejas presentan tipos de respuestas tanto visuales como auditivas como táctil. Aunque las más sencillas incorporan de uno o dos de estos tres tipos.

Para las respuestas auditivas se emplean reproductores de ruido o buzzers como el que se muestra en la Figura 27, habitualmente usados para los periodos de carga o descarga de la prótesis o para casos de alta excepcionalidad como errores graves.



Figura 27. Buzzer de la marca Arduino [14]

Las respuestas visuales se llevan a cabo mediante LEDs monocromáticos como el de la Figura 28 o de tipo RGB visualizado en la Figura 29 junto a su esquema electrónico, permitiendo una gran gama de colores e intensidades con estos últimos para poder cubrir todo tipo de funciones, como el tipo de agarre, el nivel de batería, la fuerza generada o un fallo en la electrónica.



Figura 28. LED monocromático

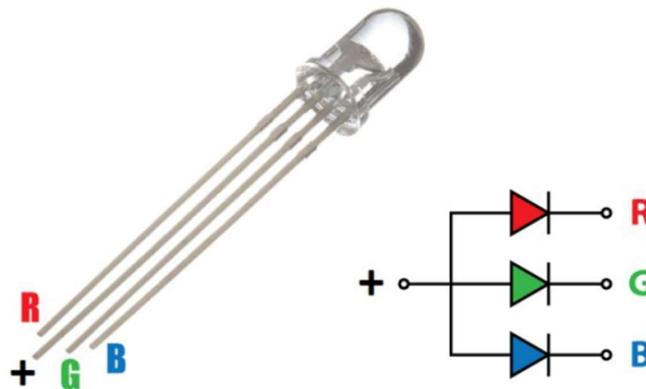


Figura 29. LED RGB y esquema de diodos

Para las respuestas táctiles se emplean motores diminutos de carga excéntrica que provocan vibraciones al girar, como el que se muestra en la Figura 30. Gracias a esto y a la instalación de dichos motores en zonas de la prótesis que vayan a estar en contacto con la piel del usuario se es capaz de hacerle saber información como cuánta fuerza está ejerciendo con el agarre, si ha cambiado entre tipos de agarres o si se está agotando la batería.

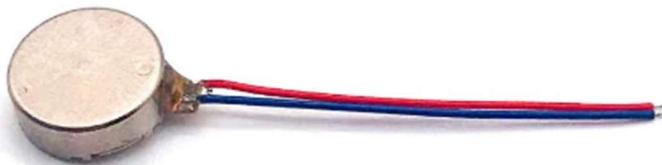


Figura 30. Motor de vibración micro

4.3. Proyectos previos

Este proyecto viene precedido por muchos otros llevados a cabo por el equipo de investigación nombrado anteriormente. Dentro de este grupo se encuentran: el proyecto BENCH-HAND (desarrollo de una mano protésica de alto rendimiento y bajo coste, adicionalmente a una comprobación exhaustiva con las condiciones propuestas en la presentación de ese proyecto [20]), el estudio MOVIMUS (caracterización de los movimientos y esfuerzos musculares de una mano sana para su utilización en la comparativa con una prótesis en desarrollo [21]), el estudio EVREHAND (caracterización biomecánica de la mano y muñeca en las actividades diarias [22])

o DEVALHAND (diseño y evaluación de manos artificiales antropomorfas mediante la simulación del agarre [23]).

Siguiendo la línea de estos proyectos, la parte que se trata en este documento pretende acercarse a UNIQUE-HAND [1] a un resultado que cumpla con todas, o la gran mayoría, de las metas impuestas por sus desarrolladores.

4.4. Normativa

UNE 111909-1:1990: Prótesis y órtesis. Vocabulario. Parte 1: términos generales.

UNE 111909-2:1990: Prótesis y órtesis. Vocabulario. Parte 2: términos relativos a las prótesis y a los portadores de prótesis.

UNE-EN ISO 22523:2007: Prótesis de miembros externos y órtesis externas. Requisitos y métodos de ensayo. (ISO 22523:2006).

UNE-EN 12182:2012: Productos de apoyo para personas con discapacidad. Requisitos generales y métodos de ensayo.

UNE-ISO/IEC TR 29138-1:2012 IN: Tecnologías de la información. Consideraciones de accesibilidad para personas con discapacidad. Parte 1: Resumen de las necesidades de usuario.

UNE-EN ISO 9999:2017: Productos de apoyo para personas con discapacidad. Clasificación y terminología. (ISO 9999:2016).

UNE-EN ISO 10328:2017: Prótesis. Ensayo estructural de las prótesis de miembros inferiores. Requisitos y métodos de ensayo. (ISO 10328:2016).

UNE-EN ISO 22675:2017: Prótesis. Ensayo de las articulaciones de tobillo-pie y de las unidades de pie. Requisitos y métodos de ensayo. (ISO 22675:2016).

5. Especificaciones de diseño

El diseño debe centrarse en las necesidades básicas del usuario y, a partir de ahí, mejorar la base generada para aumentar el confort del prototipo. De esta manera se aseguran las ideas críticas a abarcar para el avance del proyecto completo.

Ya que para la realización de este prototipo se ha recurrido a información de proyectos previos realizados por el equipo de investigación, se siguen las indicaciones marcadas en estos y los rasgos que se supusieron necesarios seguir para que el diseño fuera adecuado y poder llegar a un resultado funcional.

Así pues, en la Tabla 1 se encuentran las especificaciones requeridas para el diseño general, seguida de la Tabla 2 con las especificaciones mecánicas y, por último, la Tabla 3, recogiendo las especificaciones mecatrónicas del sistema.

Especificación	Valor	Unidad de medida	Método de ensayo
----------------	-------	------------------	------------------

Número de dedos	2	-	Conteo
Fuerza de pinzado mínima	10	N	Ensayo con dinamómetro o célula de carga
Fuerza de pinzado lateral mínima	15	N	Ensayo con dinamómetro o célula de carga
Tiempo de ejecución de agarre tipo pinza	1,5	s	Ensayo cronometrado
Peso máximo	150	g	Medición en báscula
Niveles de presión seleccionables	3	-	Conteo
Tamaño similar a una mano humana de varón	-	-	Comparado con una mano de dimensiones estándares
Resistencia de los elementos estructurales del sistema	-	-	Simulación y ensayo en situación de carga máxima

Tabla 1. Especificaciones de diseño general

Ya que las especificaciones del diseño general presentadas en la Tabla 1 no detallan algunos de los requerimientos en cuanto al sistema mecánico o al electrónico igual de críticos a los ya expuestos, se añade una tabla de especificaciones más específica para cada apartado. Siendo la Tabla 2 un resumen de las características más importantes a cumplir por el diseño mecánico y la Tabla 3 una recopilación de las que debe cumplir el diseño electrónico.

Especificación	Valor	Unidad de medida	Método de ensayo
Longitud máxima del motor	30	mm	Medición mediante cinta métrica
Eficiencia general del sistema	70	%	Demostración en Anexos
Resistencia de elementos de unión entre los dedos y la bancada	-	-	Simulación y ensayo en situación de carga máxima
Ángulo de posición en reposo	0	°	Demostración en Anexos

Tabla 2. Especificaciones de diseño mecánico

Especificación	Valor	Unidad de medida	Método de ensayo
Sensores de fuerza	2	-	Conteo
LEDs de respuesta	2	-	Conteo
Colores de distinción de respuesta	4	-	Conteo
Motores	3	-	Conteo
Velocidad de comunicación	500E3	Baudios	Característica de CAN-Bus
Cableado del circuito	Mínimo	-	Comprobación en Planos

Tabla 3. Especificaciones de diseño electrónico

Ha podido observarse que hay ciertas características que se demostrarán en el documento Anexos, esto se debe a que son parte de la selección de los componentes a instalar en el sistema,

como el conjunto de accionamiento de cada mecanismo o los elementos de retorno a posición extendida de los dedos.

5.1. Propuestas de diseño

En este apartado se muestran las diferentes soluciones tenidas en cuenta para llegar al mejor resultado posible tras descartar aquellas propuestas que no muestran unas características válidas para el resultado deseado.

5.1.1. Dedo Índice

El siguiente índice enumera las ideas que se consideran problemas a resolver para llegar al resultado idóneo, partiendo de que el sistema debe accionarse mediante tendón.

1. Forma de los dedos
 - 1.1. Tipo de uniones
 - 1.2. Tipo de tendón
 - 1.2.1. Posición del tendón
 - 1.2.2. Anclaje al sistema
 - 1.3. Retorno a posición extendida
 - 1.3.1. Posición del elemento de retorno
 - 1.4. Tipo de sensores
 - 1.4.1. Posición de los sensores
 - 1.4.2. Activación de los sensores
 - 1.4.3. Disposición del cable de los sensores
2. Accionamiento del tendón
 - 2.1. Elementos de transmisión
 - 2.2. Disposición del sistema de accionamiento del tendón

A continuación, se exponen las diferentes soluciones que se proponen para cada uno de los casos dispuestos en el índice anterior.

1. Forma de los dedos
 - a. Geometría prismática de sección cuadrada
 - b. Geometría cilíndrica de radio fijo
 - c. Geometría cilíndrica de radio variable
- 1.1 Tipo de uniones
 - a. Rígidas
 - i. Pasadores metálicos
 - ii. Elemento impreso en filamento rígido
 - iii. Geometría del dedo haciendo de unión
 - b. Flexibles
 - i. Elemento impreso en filamento flexible (Filaflex)
 - ii. Pieza de goma
- 1.2 Tipo de tendón
 - a. Hilo de pesca
 - b. Hilo de costura
 - c. Hilo de acero
 - d. Hilo trenzado empleado en náutica
- 1.2.1 Posición del tendón
 - a. Próximo a la palma de la mano
 - i. Tangente a la superficie de la unión
 - ii. A distancia del centro geométrico de la unión
 - b. Próximo al dorso de la mano

- i. Tangente a la superficie de la unión
 - ii. A distancia del centro geométrico de la unión
- 1.2.2 Anclaje al sistema
 - a. Adhesivo
 - b. Pasador metálico
 - c. Orificio interno conectado con la superficie externa
 - d. Diseño interno para retener el inicio del tendón
- 1.3 Retorno a posición extendida
 - a. Tendón en posición simétrica respecto al plano horizontal
 - b. Resortes de torsión
 - c. Resortes de fuerza constante
 - d. Gomas elásticas
 - e. Combinación de anteriores
- 1.3.1 Posición del elemento de retorno
 - a. En el pasador
 - b. Anclado al cuerpo del dedo
 - c. Ambas
- 1.4 Tipo de sensores
 - a. Circulares
 - i. Planos
 - ii. Anchos
 - b. Cuadrados
 - i. Planos
 - ii. Anchos
 - c. Flexibles longitudinales
- 1.4.1 Posición de los sensores
 - a. Pegado superficial
 - b. Hueco en el interior de la falange distal
 - c. Hueco en el interior de la falange intermedia
 - d. Hueco en el interior de la falange proximal
- 1.4.2 Activación de los sensores
 - a. Presión directa
 - b. Presión semidirecta mediante cubierta de silicona
 - c. Presión indirecta a través de una pieza independiente
 - i. Pieza tipo botón
 - ii. Pieza rígida con retorno elástico
- 1.4.3 Disposición del cable de los sensores
 - a. Exterior del dedo
 - i. Por el dorso de la mano
 - ii. Por el lateral paralelo al eje geométrico del dedo
 - b. Interior del dedo
 - i. Diseño adecuado para evitar coincidencias con otros elementos
 - ii. Diseño coincidente con el centro geométrico de las uniones para evitar alargamientos en el cable
 - c. Combinación de ambas disposiciones
- 2. Accionamiento del tendón
 - a. Motor DC
 - b. Motor Sin escobillas
 - c. Motor Paso a Paso
- 2.1 Elementos de transmisión
 - a. Reductor planetario
 - b. Sinfín-corona
 - c. Engranajes cónicos
 - d. Engranajes cilíndricos

- i. Dientes rectos
 - ii. Helicoidales
 - e. Combinación de los anteriores
- 2.2 Disposición del sistema de accionamiento del tendón
- a. Próximo a cada dedo
 - b. Alejado de los elementos accionados

5.1.2. Dedo pulgar

Para la toma de decisiones del diseño del dedo Pulgar se plantea un listado de puntos a resolver como se hizo para el dedo índice. De la misma manera, se proponen varias opciones de resolución en el segundo listado, pudiéndose observar que hay coincidencia de propuestas.

- 1. Forma de los dedos
 - 1. Tipo de uniones
- 2. Tipo de flexión
 - 1. Accionamiento de la flexión
 - 2.1.1.Fijado del sistema de accionamiento de la flexión
 - 2. Accionamiento de la abducción
 - 2.2.1.Fijado del sistema de accionamiento de la abducción

El listado mostrado a continuación recoge las propuestas resolutivas planteadas para el diseño del dedo pulgar, tal y como se hace para el dedo índice.

- 1. Forma de los dedos
 - a. Similar a la del dedo Índice
 - b. Geometría prismática
- 1.1. Tipo de uniones
 - a. Similar a las empleadas en el dedo Índice
 - b. Elementos flexibles
- 2. Tipo de flexión
 - a. Flexión parcial
 - b. Flexión completa
- 2.1. Accionamiento de la flexión
 - a. Flexión con un motor directamente conectado
 - b. Flexión de tipo Tendón
 - c. Sistema de transmisión con accionamiento por motor
- 2.1.1 Fijado del sistema de accionamiento de la flexión
 - a. Inserción del motor en la estructura de la falange proximal
 - b. Sistema instalado externamente al dedo
- 2.2. Accionamiento de la abducción
 - a. Flexión con un motor directamente conectado
 - b. Flexión de tipo Tendón
 - c. Sistema de transmisión con accionamiento por motor
- 2.2.1. Fijado del sistema de accionamiento de la abducción
 - a. Instalación en el interior del dedo
 - b. Accionamiento en la placa de la mano

Posteriormente, se mostrarán las soluciones escogidas para el diseño tanto del dedo Índice como para el pulgar, exponiendo las razones por las que se desechan aquellas propuestas no seleccionadas. De manera paralela, se indicarán las soluciones replicadas para el dedo pulgar que se han escogido previamente para el Índice, pues hay varios puntos que se repiten en ambos diseños.

5.1.3. Sistema mecatrónico

Al igual que con el sistema mecánico, también debe analizarse el desarrollo a llevar a cabo para el sistema mecatrónico.

Primeramente, se proponen los puntos a tratar para la resolución del sistema mecatrónico requerido para el correcto funcionamiento del sistema mecánico:

1. Método de comunicación
 - 1.1. Funciones de transmisión de datos
 - 1.2. Toma de datos
 - 1.3. Respuesta de la lectura
 - 1.3.1. Funciones de respuesta
2. Activación del sistema de accionamiento
 - 2.1. Funciones de activado del sistema
 - 2.2. Funciones de parado del sistema

Seguidamente, se procede a la propuesta resolutive de cada uno de los puntos expuestos en el listado anterior:

1. Método de comunicación
 - a. Comunicación Bluetooth
 - b. Comunicación Wifi
 - c. Comunicación CAN-Bus
- 1.1. Funciones de transmisión de datos
 - a. Funciones propias generadas por el redactor
 - b. Funciones dependientes de librerías
 - c. Combinación de ambas
- 1.2. Toma de datos
 - a. Galgas resistivas
 - b. Galgas capacitivas
 - c. Galgas fotoeléctricas
- 1.3. Respuesta de la lectura
 - a. Bocinas
 - b. LEDs de color único
 - c. LEDs RGB
 - d. Motores de vibración
- 1.3.1. Funciones de respuesta
 - a. Funciones propias generadas por el redactor
 - b. Funciones dependientes de librerías
 - c. Combinación de ambas
2. Activación del sistema de accionamiento
 - a. Pulsadores
 - b. Interruptores
 - c. Parches EMG
- 2.4. Funciones de activado del sistema
 - a. Funciones propias generadas por el redactor
 - b. Funciones dependientes de librerías
 - c. Combinación de ambas
- 2.5. Funciones de parado del sistema
 - a. Funciones propias generadas por el redactor
 - b. Funciones dependientes de librerías
 - c. Combinación de ambas

Como resultado de estas propuestas, es posible generar un Flujograma del funcionamiento del código a redactar, dando lugar a la propuesta mostrada en la Figura 31.

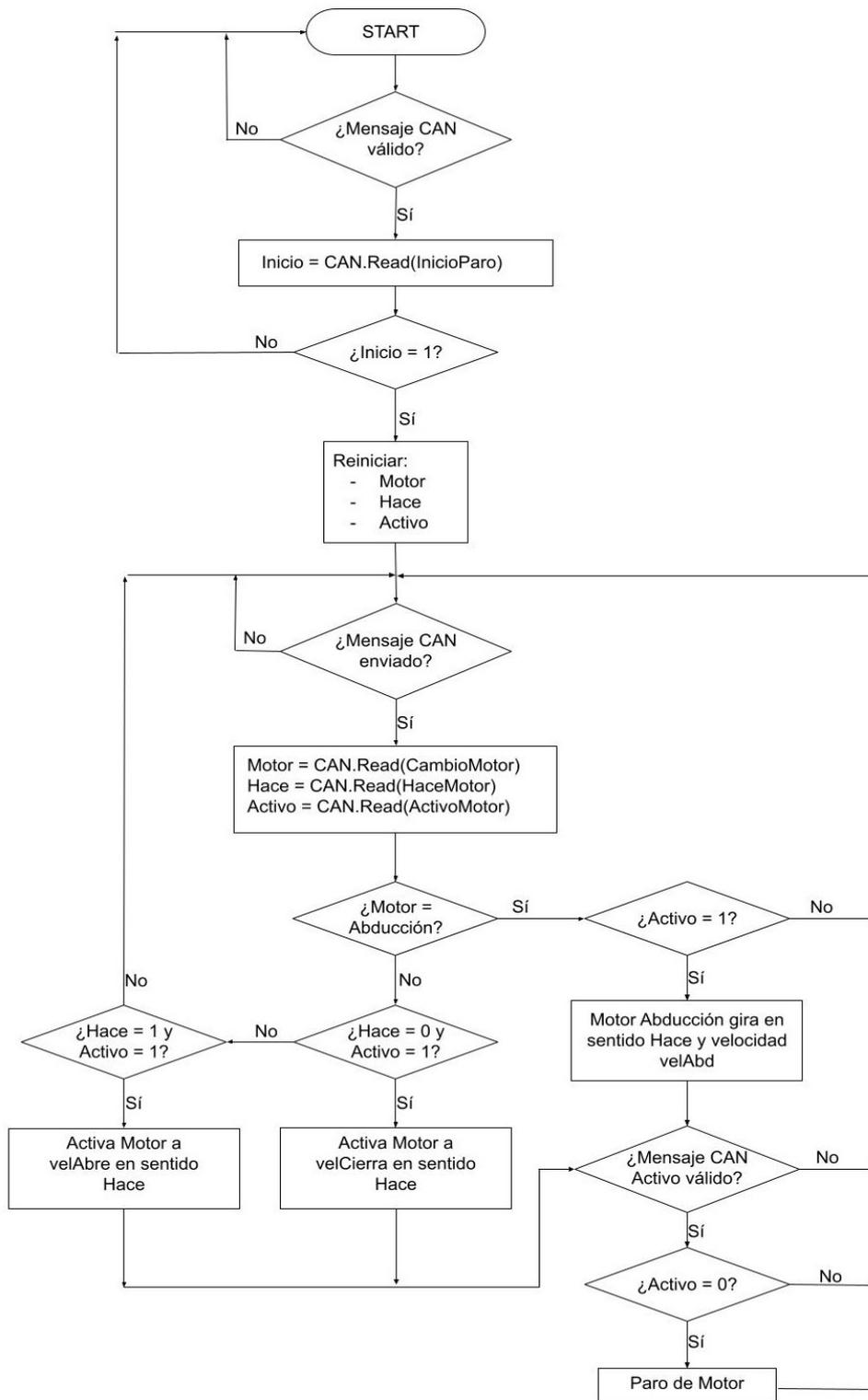


Figura 31. Flujograma del sistema mecatrónico

6. Análisis conceptual

En este apartado se van a exponer las soluciones escogidas y los motivos del descartado de las demás propuestas planteadas. Primero se determinarán las soluciones seleccionadas para el dedo Índice y, posteriormente, se repetirá para el pulgar.

6.1. Dedo Índice

1. Forma de los dedos

Inicialmente se propone realizar un diseño con geometría cilíndrica de radio variable, para simular el estrechamiento de los dedos en una mano real. Pero al comprobar que la variación resultaba ser tan pequeña para que no resultase un diseño poco natural, se opta por una geometría cilíndrica de radio constante. Siguiendo, evidentemente, las dimensiones estándar expuestas en [2].

1.1. Tipo de uniones

Seleccionar las uniones resulta complejo, pues es una decisión de conveniencia según los elementos adicionales que deban emplearse en el sistema.

La opción de emplear uniones rígidas con pasadores metálicos presenta un resultado más que aceptable en cuanto a resistencia y movimiento, pero también se opta por un diseño empleando uniones flexibles para poder diseñarlas y desarrollarlas con Filaflex para Impresión 3D. Además, este tipo de uniones aportaría, o podría aportar, la fuerza elástica necesaria para completar el retorno del dedo a su posición natural tras la flexión del mismo.

De esta manera, se contemplan dos vías de diseño para las uniones, la primera se mostrará en apartados posteriores, pues es la más adecuada, y la segunda en la Figura 32.

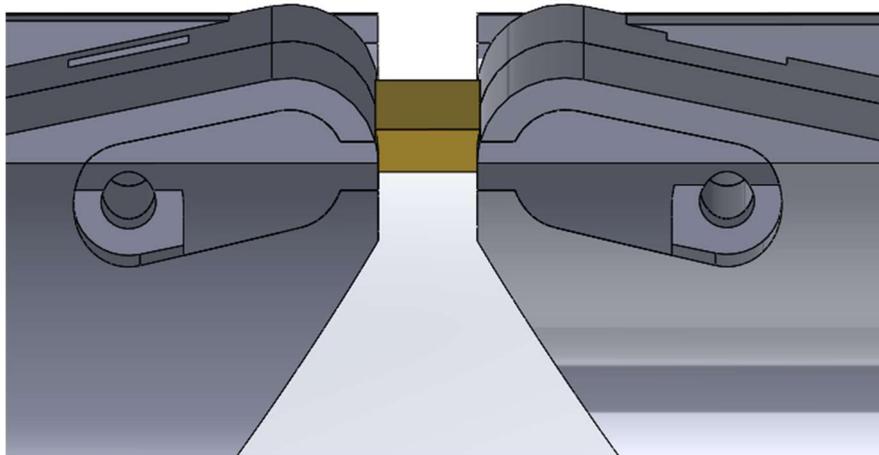


Figura 32. Unión mediante material flexible de Filaflex para impresión 3D

1.2. Tipo de tendón

La elección del tipo de tendón supone un problema mayor que el anterior, pues debe ser capaz de resistir las fuerzas a tracción que se generarán en el sistema sin presentar unas dimensiones excesivas. De ahí que se optara inicialmente por el uso de hilo de pescar como el mostrado en la Figura 33, aunque supuso un gran inconveniente su composición plástica. Al presentar esta

composición, el hilo, es capaz de deformarse elástica y plásticamente, algo que no es aceptable en un sistema que requiere de toda la precisión que sea posible para compensar las pérdidas de potencia por transmisión.



Figura 33. Hilo de plástico para pesca

La suma de estos inconvenientes anula completamente el uso de este tipo de hilo, por lo que se opta por comprobar el hilo de acero mostrado en la Figura 34, pero se descarta rápidamente por su excesiva rigidez.



Figura 34. Hilo de acero

Seguidamente se comprueba la funcionalidad del hilo trenzado empleado en náutica, pues el hilo de costura resulta muy poco resistente para las cargas a las que va a estar sometido. Este hilo trenzado sí presenta una buena resistencia frente a dichas cargas y una maleabilidad similar a la del hilo de costura, lo que permite realizar giros de 90° en caso de necesitar redireccionar el tendón por conveniencias del diseño. Además, presenta un diámetro pequeño, idóneo para reducir al máximo la ocupación del tendón en el interior del dedo.

1.2.1. Posición del tendón

Repasando la ecuación de cálculo de momentos estáticos empleada en el apartado de Cálculos (ecuación 13), se puede comprobar que cuanto mayor sea la distancia de actuación de una carga respecto del punto de giro, mayor será el par que genere.

Por ejemplo, en la Figura 35 encontramos una situación simplificada de lo que se está planteando. A misma fuerza (F) aplicada, el par generado sobre el punto de rotación ($M1$ y $M2$)

será diferente según la distancia a la que se aplique dicha carga (d_1 y d_2). En este caso, el par M_2 será mayor que M_1 debido a que d_2 es mayor que d_1 .

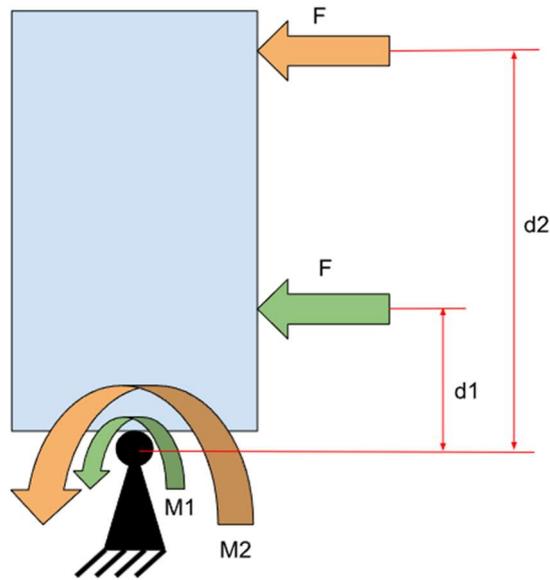


Figura 35. Comparación de cálculo de momentos

Siguiendo esta premisa, lo más conveniente resulta que el paso del tendón por las articulaciones del dedo se realice lo más alejado posible, sin llegar a un diseño que presente el tendón externo al propio dedo.

Ahora bien, el tendón deberá posicionarse más próximo de la cara palmar o de la cara dorsal, en caso de que el dedo se encuentre normalmente extendido y sea este lo que haga al dedo flexionar o, que se encuentre el dedo flexionado de manera habitual y sea el tendón aquello que lo haga extenderse.

La decisión de su posición reside en si se desea que la posición natural de la mano diseñada sea en flexión, como se muestra en la Figura 36, o en extensión, como en la Figura 37.



Figura 36. Posición natural en contracción

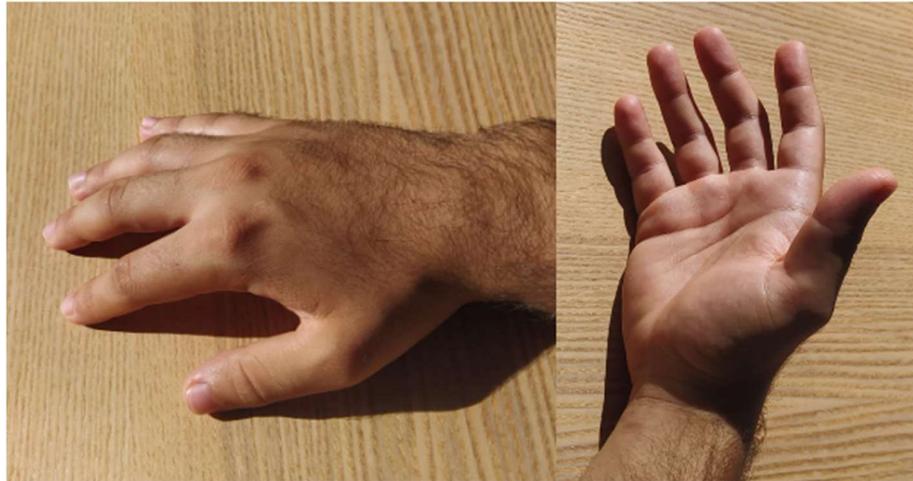


Figura 37. Posición natural en extensión

Para este diseño se decide que la posición de reposo de la mano sea en extensión, pues otorga una visión más natural al portarla. Esto decanta la elección a una posición del tendón a cierta distancia respecto al centro de la unión hacia la palma de la mano, de manera que sea el tendón seleccionado aquello que flexione el dedo.

1.2.2. Anclaje al sistema

Resulta de gran importancia plantearse la fijación del tendón a la estructura del dedo, pues dependiendo de la propuesta escogida se requerirá mayor o menor espacio.

Ya que el volumen libre no es algo muy abundante en un diseño de mano con los elementos adicionales que debe portar, se opta por la solución más segura y que menos volumen ocupa. Para ello, se puede diseñar un hueco de tal manera que aloje un tramo de hilo más ancho. Así pues, atando el propio hilo como un nudo bloqueará su salida del dedo al haber un cambio de sección, quedándose retenido dentro del hueco.

1.3. Retorno a posición extendida

Como se ha comentado, es recomendable evitar al máximo el vaciado de cada bloque del dedo, entendiendo por bloque cada una de las falanges diseñadas. Es por esto que se plantea como primera alternativa factible, el uso de un segundo tendón.

Este tendón provocaría la extensión del sistema accionándolo al estirar de él, de manera que habría un hilo para la flexión del dedo y otro hilo para la extensión del mismo. La única pega es que el elemento de accionamiento debería encontrarse casi siempre activo para evitar la flexión involuntaria del sistema.

Una solución más factible es el uso de resortes de torsión, como los mostrados en la Figura 38. Gracias al uso de estos, se podría obtener un sistema habitualmente extendido sin requerir de un sistema de accionamiento siempre encendido, como el que sería necesario si se emplease la opción de un segundo tendón. El resorte de torsión a instalar debería posicionarse alrededor del elemento de unión entre falanges, de tal manera que una parte quedase fija con la primera falange y la otra parte flectase junto con la segunda falange.



Figura 38. Resorte de torsión [24]

Mediante esta alternativa se ahorra en volumen ocupado, pero su instalación sería compleja para la unión entre la primera falange y la palma de la mano. Por lo que podría quedarse como solución a la articulación interfalángica al mismo tiempo que se emplea otra posibilidad en la articulación proximal, como el empleo de un resorte de fuerza constante similar al visualizado en la Figura 39.

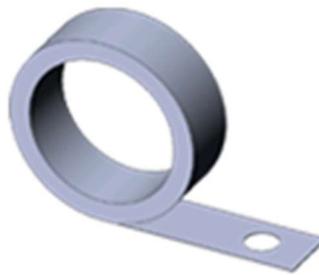


Figura 39. Resorte de fuerza constante [24]

Como bien da a entender su nombre, este tipo de resortes otorgan el mismo valor de fuerza en todo momento, pudiendo ajustar el sistema a las dimensiones de este componente para asegurar un valor fuerza resistiva exacta. El inconveniente de este tipo de resortes es el volumen ocupado, pues presentan dimensiones considerables, dejando varias soluciones para su instalación. La primera es fijar el resorte a la bancada y que su lámina se extienda hasta el dedo, pero interferiría con el resto de componentes y sus funciones; la segunda es una pieza de soporte externa por el dorso de la mano, pero resulta antiestético y demasiado aparatoso; y la tercera y más discreta es generar un orificio en el interior de la falange proximal para el alojamiento del resorte, aunque el inconveniente sería deber dividir el diseño en dos mitades que deberían fijarse entre sí durante el montaje.

1.3.1. Posición del elemento de retorno

Siendo las soluciones al apartado anterior la combinación de un resorte de torsión y otro de fuerza constante, se plantean dos posibles soluciones:

- a. Anclaje de ambos resortes al pasador de cada una de las articulaciones, tal y como se ha descrito previamente.
- b. Anclar el resorte de torsión al pasador empleado para la flexión de la falange distal respecto de la proximal. A su vez, el resorte de fuerza constante se ancla por uno de sus extremos al interior de la falange proximal, mientras el otro extremo se ancla a la pieza que imita la articulación metacarpofalángica.

Esta última propuesta es más factible, pues el resorte de fuerza constante presenta una estructura delicada, pues está constituido por una lámina muy fina. Este hecho promueve el diseño de un orificio junto, para la espiral del resorte, y una guía, para dicha lámina, completamente internos. De esta manera se evita en la medida de lo posible que la lámina del resorte quede expuesta y evitar, así, fracturas no deseadas.

1.4. Tipo de sensores

En lo que concierne a los sensores resulta más lógico el uso de sensores similares a las galgas de tipo resistivas, pues son las más adecuadas para la situación presentada debido a sus características de funcionamiento y a su variedad de dimensiones. De esta manera, se rechaza el uso de variantes como elementos de tamaño superior al dedo a diseñar o que no sean capaces de medir la fuerza normal ejercida sobre el elemento de medición. A pesar de haber expuesto estas ideas, se detalla el sensor a escoger en el apartado dedicado a la mecatrónica del sistema.

1.4.1.Posición de los sensores

Empleando los sensores de presión circulares pueden escogerse diversos puntos de medida, siendo el punto más vital el equivalente a la yema de los dedos en una mano sana. Al igual que se instalaron en el diseño del proyecto [25]. Se debería modificar el diseño de la falange distal de tal manera que alojase el sensor, bien sea en la superficie del dedo o en el interior del mismo.

1.4.2.Activación de los sensores

El tipo de sensores a emplear se activa ejerciendo presión sobre ellos, de manera que se toman lecturas ponderables, tal y como se explicó en el apartado de Antecedentes.

En el proyecto [25], nombrado anteriormente, se pudo comprobar que la instalación de los sensores de presión sobre la superficie del material resulta un error. Esto se debe a que del uso de la prótesis y el roce con las demás superficies acaban desgastando los elementos de medida, por lo que una solución a este gran problema es el uso de una pieza intermedia. Dicha pieza transmitiría la presión ejercida por el objeto agarrado a la superficie del sensor, de manera que se consigue alojar en el interior del dedo mientras es el elemento intermedio lo que sobresale de la distal.

1.4.3.Disposición del cable de los sensores

La solución más evidente es el paso del cableado de los sensores por el interior del dedo, el problema principal es la colisión de esto con el resto de elementos instalados en cada falange. A causa de esto, se debe realizar un diseño que evite este tipo de problemas; añadiendo el aprovechamiento de la geometría, pues el trayecto del cable puede experimentar cambios de longitud, se puede hacer coincidir el paso del cable con el centro geométrico de las uniones.

En resumen, el cable debe permanecer en el interior del dedo el máximo trayecto posible, de manera que, al pasar por las uniones, el cable atraviese el eje geométrico de estas a una distancia adecuada.

2. Accionamiento del tendón

Emplear motores paso a paso o servomotores resultaría adecuado en caso de requerir un nivel de precisión alto o al realizar los agarres de manera automática, programados previamente según tipo de agarre y dimensiones del objeto. Pero resulta una solución poco coherente, debido a sus grandes dimensiones, y de programación compleja para esta parte del proyecto.

Una solución más convincente es el uso de motores DC, además de que son los aconsejados por los desarrolladores principales del proyecto, pues han obtenido buenos resultados con estos productos.

2.1. Elementos de transmisión

Al tratarse de unos elementos de accionamiento con unas dimensiones tan limitadas, es necesario acoplar al motor un sistema de reducción. De esta manera se consigue reducir la velocidad de giro aumentando el par obtenido, como se mostrará a la hora de resolver los cálculos de la transmisión.

Como primera opción se propone el uso de un sistema de engranajes planetarios, como los de la Figura 40. Este tipo de elementos permiten una gran reducción ocupando poco volumen en el diseño, además de mantener la dirección del eje de transmisión.



Figura 40. Sistema de reducción mediante engranes planetarios

A pesar de su tamaño reducido, siguen siendo elementos que acaban sumando una longitud excesiva para las dimensiones de la mano tras acoplarse al motor.

Al tratarse de una situación de dimensiones limitadas, debe ser primordial el uso de componentes que requieran un gran volumen para su funcionamiento. Es por esto que tanto el elemento expuesto en la Figura 40 y la propuesta de emplear engranajes de dientes rectos, pues sería necesario diseñar un tren de engranajes para conseguir la reducción deseada, quedan totalmente descartados.

Por los motivos expuestos, se opta por el uso de engranajes de menor ocupación con la posibilidad de presentar un sistema irreversible, evitando el retorno del dedo a su posición inicial sin activar el motor de accionamiento. La opción más adecuada es el uso de conjuntos de tipo sinfín-corona, pues permiten grandes reducciones, aunque no tan elevadas como los planetarios, en poco espacio y con múltiples configuraciones. Esto es un punto a favor del empleo de los conjuntos sinfín-corona como el visualizado en la Figura 41, pues permite amoldar la posición de la transmisión al diseño deseado.

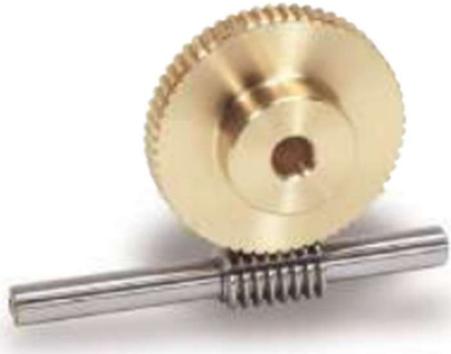


Figura 41. Conjunto sinfín-corona [26]

Adicionalmente, es posible acoplar un conjunto de engranes cónicos, como los de la Figura 42, directamente al motor o tras una transmisión previa si se desea cambiar la orientación del giro. Gracias a estos elementos se podría acomodar más aún la transmisión empleada al diseño final del dedo si fuera necesario.



Figura 42. Pareja de engranajes cónicos [26]

En el caso del dedo Índice, es más que suficiente instalar un conjunto sinfín-corona al motorreductor escogido para el accionamiento de su tendón, como se explicará en la solución final.

2.2. Disposición del sistema de accionamiento del tendón

El sistema de accionamiento del dedo Índice no muestra un gran tamaño, al componerse por el motor y el conjunto sinfín-corona. Por lo que una manera de asegurar el correcto accionamiento del tendón, sin tener que realizar redireccionamientos de este para introducirse en el dedo, es el posicionamiento de todo el sistema lo más cercano posible a la entrada del dedo.

6.2. Dedo pulgar

En cuanto a los motores de accionamiento se decidió unificar la decisión del modelo para ahorrar en tiempo invertido a los cálculos. Para ello se supusieron las condiciones más críticas de trabajo y se aseguró el cumplimiento de las mismas, o el cumplimiento de la gran mayoría.

Gracias a la experiencia en el campo de los responsables de proyecto ya se tenía claro la empresa con la que contactar para la compra del producto. Con este trámite ya avanzado solo quedaba realizar los cálculos pertinentes para la toma de decisiones. Primeramente, se debió calcular la tensión necesaria en el tendón para llevar a cabo los agarres más característicos, algo llevado a cabo por otro miembro del equipo de investigación. En el apartado de Cálculos se presentan los pasos llevados a cabo, tanto para la obtención de los valores de tensión requeridos como de las comprobaciones pertinentes de la potencia a transmitir por el motor seleccionado, para asegurar los agarres de tipo pinza y pinza lateral.

1. Forma de los dedos

Se continúa con un diseño de geometría cilíndrica, aunque se pretende asemejar la falange distal a la del pulgar de una mano sana.

1.1. Tipo de uniones

También se mantendrá la solución escogida para el dedo Índice, en esta ocasión. Esto se debe a que es la solución más cómoda y resistente para el mecanismo a diseñar.

2. Tipo de flexión

Para el dedo pulgar se debe decidir si va a poder flexionar cada falange de manera parcial o completa, más concretamente, si cada falange es capaz de flexionarse independientemente, si la flexión de una depende de la otra o si flexionan las dos al mismo tiempo.

Planteando un dedo con la posibilidad de flexionar una falange respecto de la otra, se debe considerar el hecho de emplear un sistema de accionamiento tipo tendón, al igual que en el Índice. La problemática de esto es la dificultad de redirigir el filamento desde el sistema de accionamiento hasta el punto de funcionamiento, pues el dedo debe poder imitar el movimiento de abducción-aducción, y quedaría entorpecido por el resto de componentes.

Cabe la posibilidad de emplear un sistema de accionamiento para la flexión de la falange proximal, consiguiendo hacer flexionar la falange distal con un mecanismo de 4 barras como los mostrados en la Figura 43. Aunque, para ello, debería dejarse el orificio suficiente en el interior del dedo para alojar los elementos que compusieran el mecanismo, lo que debilitaría la estructura del dedo.

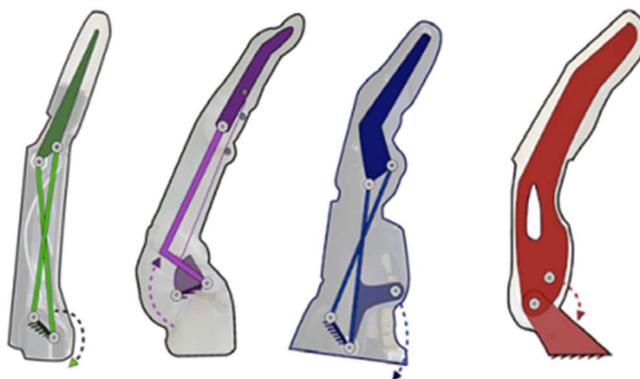


Figura 43. Sistemas de 4 barras para accionamiento interno de la flexión de la falange distal [27]

Por simplificar el mecanismo en este proyecto, se decide fijar la falange distal a la proximal para evitar la flexión entre ellas. Sería necesario determinar el ángulo al que fijarla, de forma que puedan cubrirse el máximo de agarres posibles. Realizando una comprobación mediante la

herramienta de diseño empleada para el proyecto SolidWorks, es posible replicar los agarres más característicos en la vida cotidiana, descritos en apartados previos, para poder medir el ángulo de flexión, de la falange distal respecto a la proximal, que debería obtenerse en cada caso.

2.1. Accionamiento de la flexión

Al haber eliminado la posibilidad de flexionar una falange respecto a la otra, se descarta la necesidad de emplear un accionamiento de tipo tendón. Como no se requiere de un sistema que flexione ambas falanges, se puede centrar dicho sistema en el movimiento de la falange proximal.

Llevando esto a cabo, una manera sencilla de flexionar el pulgar y ahorrar espacio es la instalación del motor de accionamiento en el interior de la falange proximal. Acoplado un conjunto sinfín-corona para transformar el movimiento de rotación del eje del motor en desplazamiento tangente al perímetro de la corona, se puede conseguir la flexión del dedo. Además, se conseguiría una gran fuerza de agarre de manera adicional, según la relación de transmisión del conjunto empleado.

2.1.1. Fijado del sistema de accionamiento de la flexión

Para la inserción del motor en la falange proximal del dedo, es necesario generar un alojamiento de tal manera que permitiera el fijado del mismo al interior del pulgar, además del contacto entre el sinfín y la corona para llevar a cabo el desplazamiento.

2.2. Accionamiento de la abducción

Tal y como se comentó en apartados previos, se debe conseguir un movimiento similar o idéntico al de abducción-aducción del pulgar. Para ello se debe considerar un ángulo de inclinación concreto, el cual está compuesto por una proyección tanto en el plano horizontal y el plano vertical, dando como resultado un eje con ángulo oblicuo.

Al haber incrustado el motor encargado de la flexión en el interior del pulgar, no es posible alojar el motor seleccionado para la abducción dentro del dedo como se había propuesto en las soluciones al diseño. Debido a esto, solamente queda la opción de instalar el sistema de accionamiento de la abducción externamente al dedo.

Quedando como solución el uso de un sistema de transmisión que conecte el motor con el eje de rotación de la abducción del pulgar, puede considerarse el uso directo de un conjunto sinfín-corona o el requerimiento de engranajes cónicos. Esto depende de si la geometría permite el uso del conjunto o si debe redirigirse la transmisión de potencia.

Siguiendo las propuestas planteadas para el sistema de abducción del dedo pulgar, se obtiene un diseño como el mostrado en la Figura 44, pero resulta una estructura demasiado voluminosa para poder realizar el desplazamiento deseado. La altura de la pieza de soporte requerida es excesiva para las dimensiones de la mano, lo cual obliga a encontrar un sistema mucho más optimizado pero igual de versátil y con las mismas condiciones de funcionamiento

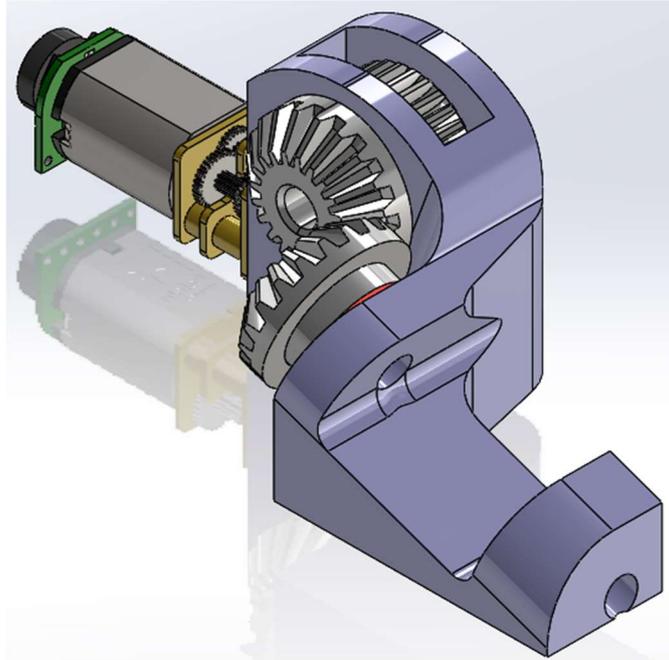


Figura 44. Primera opción de soporte para el sistema de Abducción-aducción del pulgar

2.2.1.Fijado del sistema de accionamiento de la abducción

Para este sistema se debe seleccionar tanto la manera de fijar el sistema de transmisión a la pieza fija de la mano (lo que correspondería a la bancada del mecanismo) y el fijado de la transmisión al elemento de abducción del dedo.

Por ello, se debe fijar el motor con un elemento tipo soporte a la bancada, mientras que para los elementos de transmisión se debe diseñar una pieza que sujete el conjunto para la correcta transmisión de la potencia, adecuándose a la geometría del sistema. Adicionalmente, debe asegurarse la rotación del dedo pulgar junto con el eje de transmisión de potencia.

6.3. Mecatrónica

Tal y como se ha realizado con el diseño mecánico del sistema, se debe plantear el proceso seguido para la obtención de un sistema mecatrónico válido. Se muestran tanto las soluciones de componentes físicos como de las redacciones de código realizadas, si así lo requiere el punto resuelto.

1. Método de comunicación

Los tres métodos propuestos resultarían válidos, pues se busca la reducción del cableado en el sistema a valores mínimos. En cambio, se decide el uso del método de comunicación por CAN-Bus para dar un primer paso dentro del equipo de investigación en este campo.

Dicho esto, se buscan componentes compatibles con el lenguaje CAN-Bus dentro de la empresa Arduino, ya conocida por el equipo por su catálogo de placas compuestas con diferentes chips de procesado. Así pues, se encuentran elementos como los de la Figura 45 y Figura 46 como dispositivos de transmisión CAN, siendo el de la Figura 46 el seleccionado para el sistema de comunicación.

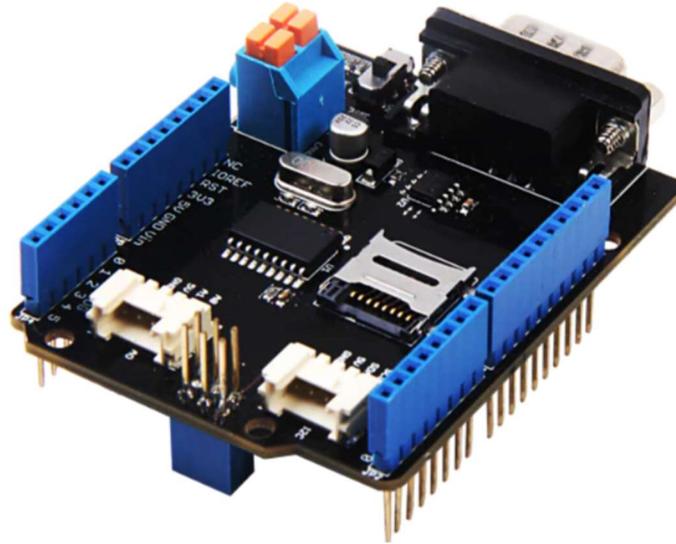


Figura 45. Placa CAN-BUS Shield v2 [14]



Figura 46. Placa Arduino MKR CAN Shield [14]

Adicionalmente, se requiere de una placa de procesamiento para la conexión entre los elementos de accionamiento y el dispositivo de comunicación, al igual que desde el dispositivo de comunicación hasta los elementos a accionar. Siguiendo las recomendaciones de la compañía, según compatibilidades entre dispositivos, se concluye que la placa a emplear es la denominada como Arduino MKR 1010 WiFi mostrada en la Figura 47.



Figura 47. Placa Arduino MKR 1010 WiFi [14]

1.1. Funciones de transmisión de datos

Al haber seleccionado la placa de transmisión de datos Arduino MKR CAN Shield, es posible el uso de una librería otorgada por la empresa. Mediante el uso de la misma se facilita mucho el código a redactar, pues no se debe generar la cantidad de funciones que vienen ya programadas en la librería.

El uso de esta placa obliga a conectar una de ellas como elemento de Comunicador o Sender y otro como Lector o Receiver, de manera que la librería deja un ejemplo de cada estilo como base para futuros códigos. La Figura 48 muestra el tipo de código a redactar para el funcionamiento del elemento CAN-Sender y la Figura 49, para el funcionamiento del elemento CAN-Receiver.

```

#include <CAN.h>

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial);

  Serial.println("CAN Sender");

  // start the CAN bus at 500 kbps
  if (!CAN.begin(500E3)) {
    Serial.println("Starting CAN failed!");
    while (1);
  }
}

void loop() {
  // send packet: id is 11 bits, packet can contain up to 8 bytes of data
  Serial.print("Sending packet ... ");

  CAN.beginPacket(0x12);
  CAN.write('h');
  CAN.write('e');
  CAN.write('l');
  CAN.write('l');
  CAN.write('o');
  CAN.endPacket();

  Serial.println("done");

  delay(1000);

  // send extended packet: id is 29 bits, packet can contain up to 8 bytes of data
  Serial.print("Sending extended packet ... ");

  CAN.beginExtendedPacket(0xabcd);
  CAN.write('w');
  CAN.write('o');
  CAN.write('r');
  CAN.write('l');
  CAN.write('d');
  CAN.endPacket();

  Serial.println("done");

  delay(1000);
}

```

Figura 48. Ejemplo del código del elemento CAN-Sender [14]

```

#include <CAN.h>

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial);

  Serial.println("CAN Receiver");

  // start the CAN bus at 500 kbps
  if (!CAN.begin(500E3)) {
    Serial.println("Starting CAN failed!");
    while (1);
  }
}

void loop() {
  // try to parse packet
  int packetSize = CAN.parsePacket();

  if (packetSize) {
    // received a packet
    Serial.print("Received ");

    if (CAN.packetExtended()) {
      Serial.print("extended ");
    }

    if (CAN.packetRtr()) {
      // Remote transmission request, packet contains no data
      Serial.print("RTR ");
    }

    Serial.print("packet with id 0x");
    Serial.print(CAN.packetId(), HEX);

    if (CAN.packetRtr()) {
      Serial.print(" and requested length ");
      Serial.println(CAN.packetDlc());
    } else {
      Serial.print(" and length ");
      Serial.println(packetSize);

      // only print packet data for non-RTR packets
      while (CAN.available()) {
        Serial.print((char)CAN.read());
      }
      Serial.println();
    }

    Serial.println();
  }
}

```

Figura 49. Ejemplo del código del elemento CAN-Receiver [14]

1.2. Toma de datos

Tal y como se comentó en el apartado de Objetivos se desea realizar una toma de datos de la cantidad de fuerza que se ejerce en cada uno de los agarres, instalando un elemento de medición en cada miembro. Idealmente, estos elementos de medición deben encontrarse a la altura del

pulpejo de las falanges distales de los dedos, debiendo adecuarse a las geometrías de estas falanges.

La solución más adecuada es el uso de galgas resistivas, pues son las más comunes y resulta más sencillo encontrar diversidad de dimensiones. De esta manera, se aseguraría la adaptación de los elementos a los tamaños finales de las falanges diseñadas. Haciendo una búsqueda de este tipo de componente, se encuentran elementos como el mostrado en la Figura 50.



Figura 50. Galga resistiva FlexiForce A301 [28]

1.3. Respuesta de la lectura

Emplear dispositivos generados de sonido sería algo problemático, pues daría pie a situaciones molestas según el entorno en que se diera uso a la prótesis. Como sucede actualmente con los móviles. Si el usuario se encuentra en un recinto donde se debe guardar silencio pero da uso al mecanismo, este emitiría ruido y podría llegar a perturbar el confort del entorno. Por ello se descarta esta solución.

El uso de LEDs resulta una solución más sutil. Ya que dependiendo de su localización podría no molestar ni al usuario ni al entorno. Además de que podrían utilizarse LEDs de tipo RGB para poder acceder a la gama completa de colores y darles varias funcionalidades.

Los motores de vibración son una muy buena solución también, al mucho más sutiles que los casos anteriores. Estos motores deberían encontrarse contactando de manera directa con la superficie sana en la amputación del usuario, para que, así, pudiera determinar el nivel de presión ejercida en el agarre según la velocidad de vibración transmitida. Al igual que los LEDs RGB, estos motores también posibilitan variar la cantidad instalada, pudiendo llegar a proponer un motor por cada dedo o un motor por cada nivel de fuerza, en caso de limitar los valores en distintos niveles.

Llegando a esta encrucijada, se propone resolver el problema mediante los LEDs RGB, al menos para esta porción del proyecto, para obtener una respuesta visual en vez de táctil. En caso de llegar más lejos, el código referente a la respuesta podría modificarse para emplear los motores generadores de vibración en vez de los LEDs. Buscando un componente que cumpla con estas condiciones, se encuentran elementos como el mostrado en la Figura 51, proveniente de la empresa Adafruit.



Figura 51. Jewel NeoPixel RGB de la empresa Adafruit [29]

1.3.1. Funciones de respuesta

En este caso también se recurre a librerías específicas para el uso de los LEDs escogidos, pues resultan indispensables para el correcto funcionamiento de los mismos. Aun así, es necesario generar un código que transforme el valor tomado por los sensores instalados en los colores de identificación seleccionados.

Una buena solución a esta duda es diferenciar entre tres rangos de fuerza, pues habrá situaciones en las que se requiere un agarre preciso y delicado, como sujetar alfileres o cerillas, y otras en las que se necesite una prensa firme, como sostener una botella llena o un destornillador. De tal manera que existiría un primer nivel con fuerzas de agarre leves, un segundo nivel para agarres de fuerza intermedia y un tercer nivel para valores altos de fuerza. Los cuales podrían identificarse al encenderse 1, 2 o 3 LEDs de color azul en el Jewel, mientras que los restantes indican la cantidad de fuerza.

Los valores de fuerza, a su vez, se dividirían en 3 rangos también. Presentando un primer rango próximo al primer tercio del límite máximo del valor total medido por el sensor, un segundo rango para el segundo tercio de dicho valor límite y, un tercero para el tramo final restante. Apoyando esta explicación mediante la Figura 52 para que sea más comprensible, el primer rango de fuerza es la Zona I, el segundo rango es la Zona II y el tercero es la Zona III, repitiéndose este patrón para cada nivel de fuerza.

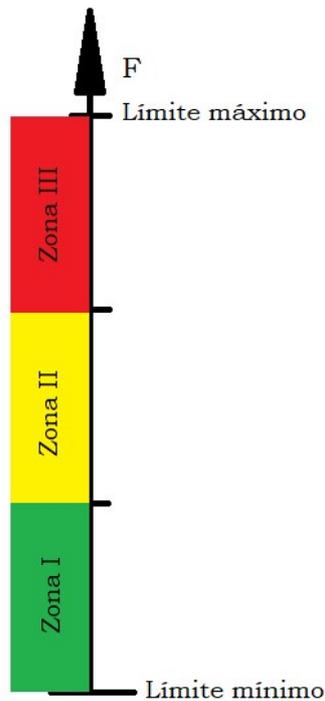


Figura 52. Esquema de funcionamiento de los rangos de fuerza

2. Activación del sistema de accionamiento

Se propuso la idea de emplear parches Electromiográficos (parches empleados en medicina para la medida del pulso cardíaco de un paciente), por su precisión y empleo en este campo. La idea se descartó por la complejidad que suponía junto con todo lo tratado en este documento, además de que era un tema a tratar por otro miembro del equipo de investigación.

Los interruptores como el de la Figura 53 podrían ser buena solución para este primer prototipo, pero se alejaba demasiado de cómo trabajaría la prótesis con el uso de sensores EMG. Por lo que la solución más favorable es el uso de pulsadores, como el de la Figura 54.



Figura 53. Elemento de accionamiento de tipo Interruptor [29]



Figura 54. Elemento de accionamiento de tipo Pulsador [29]

2.3. Funciones de activado del sistema

Tanto la activación como la desactivación del sistema de accionamiento, de cualquiera de los dos dedos, requiere de funciones independientes. Por lo que se deben generar dos pequeñas funciones que puedan distinguir entre los motores existentes y activarlo a cierta velocidad o desactivarlo.

7. Descripción del diseño mecánico

Como todo proyecto de investigación en un campo en constante evolución, se ha llevado un proceso iterativo a nivel de diseño para poder llegar a completar la mayor cantidad de tareas propuestas inicialmente. De tal manera que se parte de un diseño básico, al cual se van incluyendo puntos del apartado de Especificaciones de diseño con sus respectivas soluciones. Lentamente se van generando cambios a medida que el diseño se va completando y complicando con cada punto añadido.

Así pues, el diseño comienza con el paso de mano biológica a un esquema entendible para su posterior paso a al diseño 3D. Esto se ha podido realizar gracias a ilustraciones presentes en [3], las cuales, junto a sus explicaciones, permiten una sencilla comprensión de los movimientos llevados a cabo por cada una de las falanges en cada miembro a diseñar. De esta manera se ha podido estimar el número de grados de libertad que deben existir en el sistema final y cuáles son los movimientos que deben imitarse, limitarse o evitarse.

Como se comentó al inicio del documento, el diseño debe asimilarse a una mano sana de varón, siguiendo las medidas estándar recopiladas en [2]. Tratando de simplificar el punto de partida, se realizó un escaneado 3D de la mano derecha de un miembro del equipo de investigación. Gracias a esto se pudo obtener una geometría más natural, dando como resultado el montaje de la Figura 55.

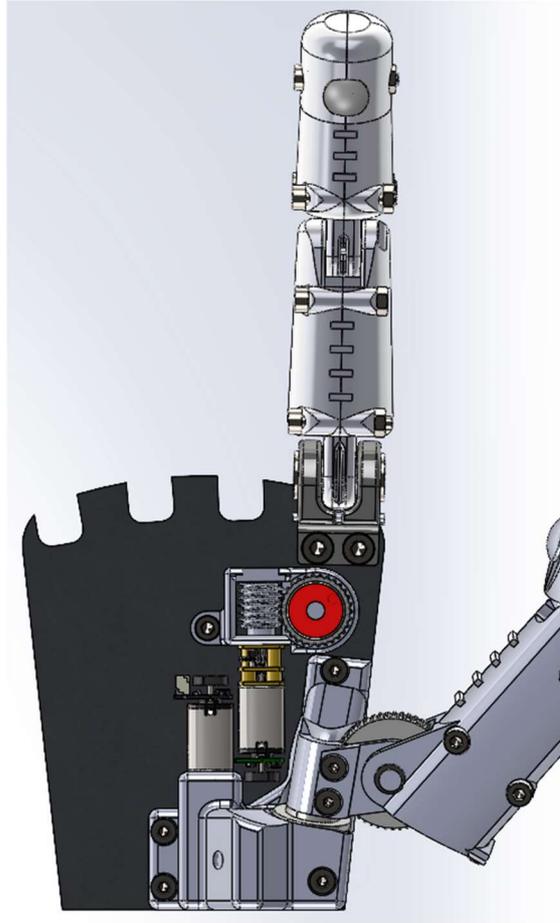


Figura 55. Diseño final en extensión

7.1. Consideraciones iniciales

Antes de comenzar con el diseño de los dedos Índice y pulgar, así como de sus sistemas de accionamiento, se debe realizar el diseño de la bancada sobre la que se van a fijar. Dicha bancada consiste en una placa metálica, mostradas en la Figura 56, con las dimensiones adecuadas para el cumplimiento del tamaño estándar de mano de varón. En esta misma figura se muestran los puntos de anclaje de los elementos de unión entre los dedos y la placa, aunque para esta parte del proyecto se considera, únicamente, la porción de placa necesaria para sustentar los dedos Índice y pulgar en el diseño final.

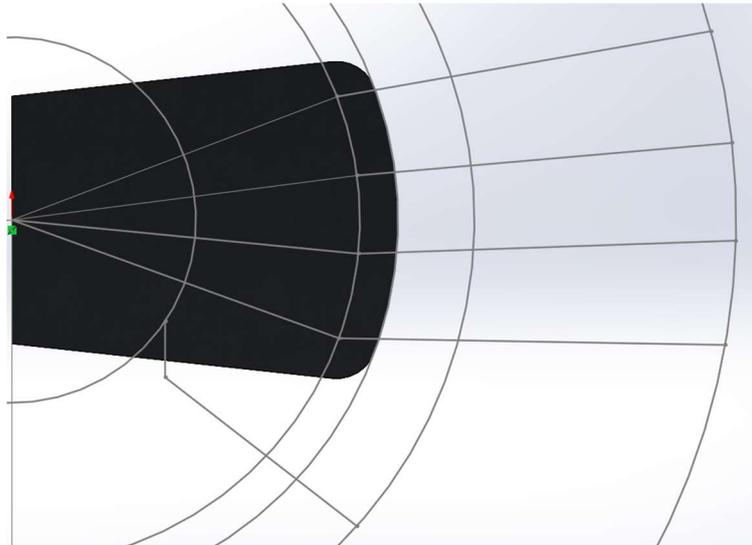


Figura 56. Planteamiento de la posición y orientación de los dedos

Previamente, en el apartado de Antecedentes, se comentó el número de grados de libertad totales otorgados por una mano sana, llegando a la cifra de 27 grados. Considerando, únicamente, los dedos Índice (4 grados) y pulgar (5 grados) se obtiene una suma de 9 grados de libertad a cumplir. Los cuales se reducen a 8 si se obvia el movimiento de abducción-aducción del dedo Índice, desplazamiento que puede simularse posicionando el anclaje del dedo a la placa principal con cierto ángulo horizontal. La Figura 57 detalla el ángulo considerado para este caso, junto con los pertenecientes a los demás dedos.

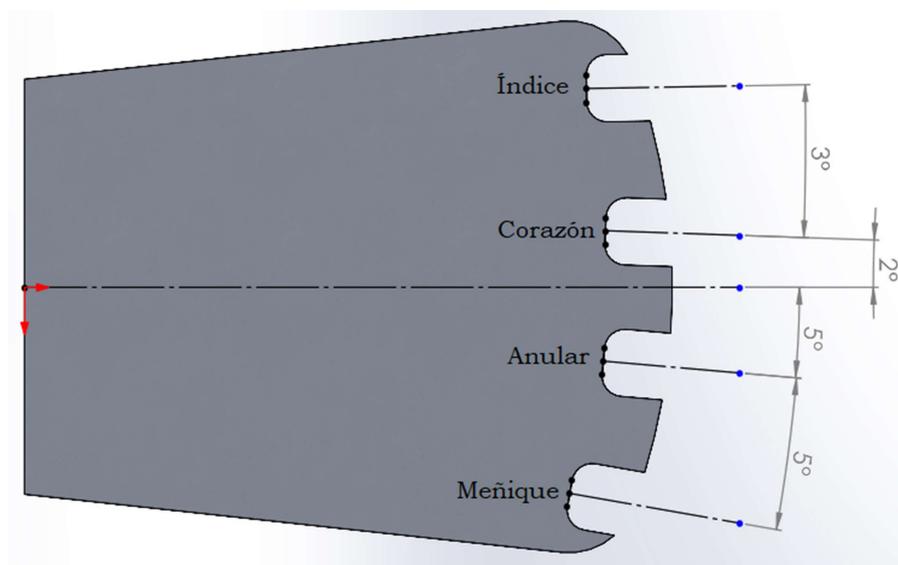


Figura 57. Posición e inclinación de los puntos de anclaje de los dedos en la bancada (vista dorsal en mano derecha)

El diseño de la mano se ha basado en las dimensiones estándar de varón, recopiladas en [2]. Siguiendo esas pautas y conociendo las limitaciones mecánicas en cuanto a las posibilidades de movimiento, se ha tenido que reducir el número de grados de libertad. Esto se debe a que hay movimientos, como la abducción-aducción del dedo índice, que carecen de relevancia frente a la flexión del mismo; sí es posible que la pérdida de este tipo de movimiento dificulte la adaptabilidad del agarre frente a objetos de superficie irregular, pero puede tratarse esa falta con adiciones de material flexible o deformable para poder llegar a ajustar a dichas superficies o,

incluso, encontrar una posición del dedo que permita realizar un agarre firme para todas las situaciones, incluyendo geometrías complejas.

Paralelamente, debe estudiarse la posición del dedo pulgar minuciosamente debido a su vital importancia en la ejecución de los agarres. Ciertamente es que la posibilidad de imitar todos los movimientos realizados por este dedo se reduce al tratarse de un sistema mecánico, pero combinando ángulos de inclinación en los tres planos ortogonales, el diseño de solución puede llegar a desplazarse de manera más acorde a un pulgar real.

Asimismo, en la Figura 58 se muestra la inclinación horizontal tenida en cuenta para la posición del elemento de abducción-aducción del dedo Pulgar. Siendo la Figura 59 aquella que muestra el ángulo de inclinación vertical para la fijación del dedo pulgar.

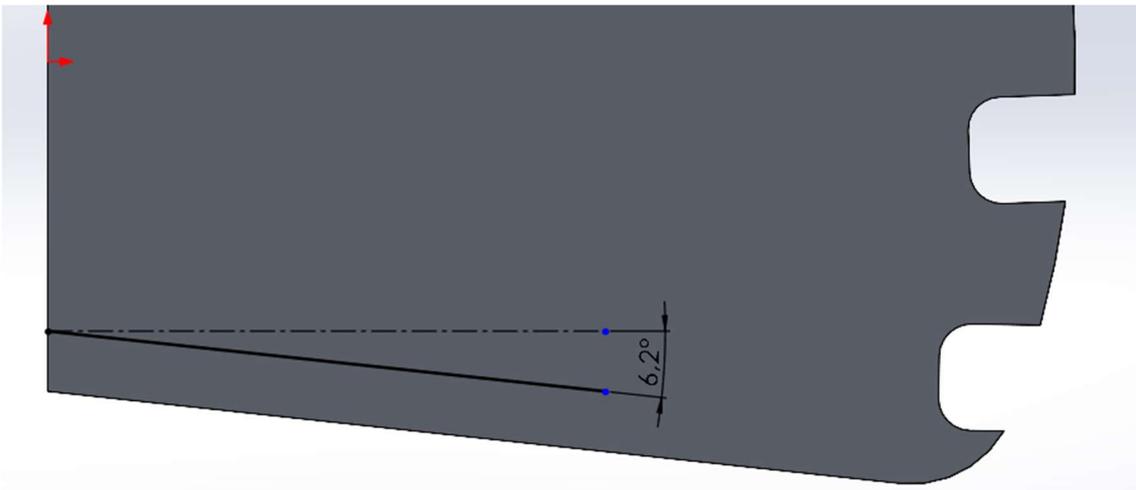


Figura 58. Ángulo horizontal del elemento de abducción-aducción del dedo pulgar



Figura 59. Ángulo vertical del elemento de abducción-aducción del dedo pulgar

Una vez consideradas estas nociones básicas para el diseño previo de la mano, se deben tener en cuenta los elementos adicionales que van a instalarse en esta, y más concretamente en los dedos. Debido a que se requiere de un sistema de respuesta a la cantidad de fuerza ejercida en los agarres, se debe instalar un sensor de fuerza para la medición de la misma, tal y como se concluyó en el apartado de Análisis conceptual. Para su instalación se debe generar un hueco lo suficientemente grande como para acoplar el sensor, su cableado y la pieza intermedia que entrará en contacto con los objetos agarrados y transmitirá la fuerza de agarre ejercida al sensor.

También debe tenerse en cuenta el sistema de accionamiento de cada dedo. En caso del dedo Índice, empleándose accionamiento por tendón, se debe alojar dicho hilo en el interior del miembro para ejecutar una flexión correcta. Lo más simple es que el tendón atraviese el dedo, paralelo a su eje geométrico en el plano que lo divide en dos mitades simétricas. De esta manera puede variarse la altura del tendón, a nivel de diseño, respecto a los puntos de unión entre

falanges para aumentar o disminuir el brazo de momento generado por el mismo al flexionar el dedo. En el caso del dedo pulgar, se debe contemplar cómo conviene realizar el alojamiento del motor de accionamiento de la flexión en el interior del dedo, pues se ha demostrado que no es viable la instalación del mismo en la pieza de abducción-aducción. Para poder instalar el motor en el interior del pulgar, se debe introducir desde el exterior del dedo o se considerar que el dedo se compone de dos piezas, las cuales se fijan entre ellas una vez se ha introducido el motor y sus componentes adicionales.

7.2. Diseño del dedo índice

Comenzando por el diseño del dedo Índice, al resultar más sencillo que el dedo pulgar, se parte de una geometría cilíndrica, tal y como se expuso en el apartado de Análisis conceptual, tanto para la falange proximal como para la falange distal. Esta última, realmente compuesta por las falanges intermedia y distal de una mano real.

El progreso seguido para la obtención del diseño final mostrado en la Figura 60 se detalla a continuación, paso por paso.

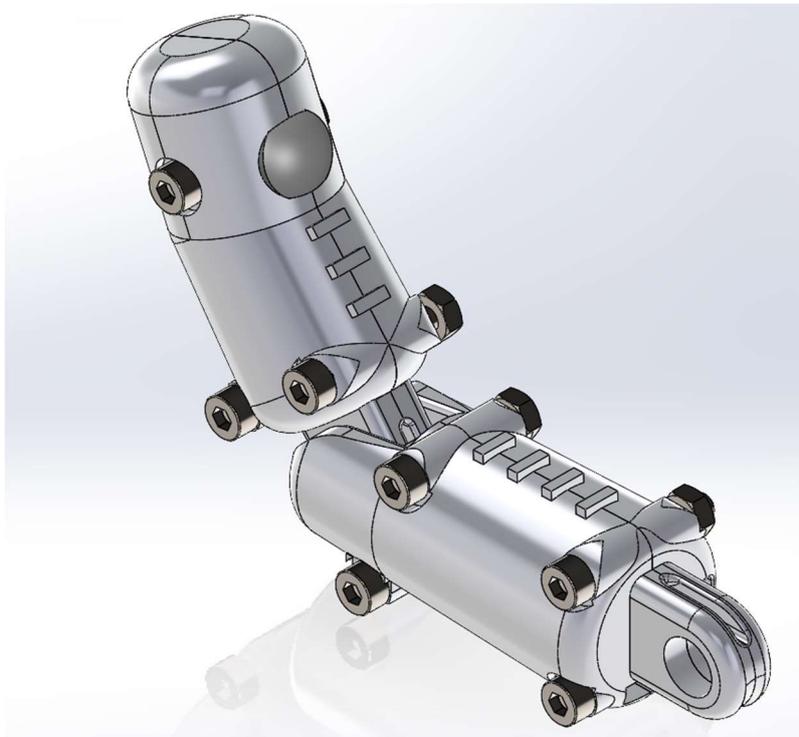


Figura 60. Diseño final del dedo índice

7.2.1. Falange proximal

Partiendo del tipo de geometría comentada, e deben idear los orificios de fijado de los pasadores metálicos para las uniones entre las falanges y de la falange proximal a la mano. De manera que se propone la geometría mostrada en la Figura 61 para la falange proximal, pudiendo comprenderse más fácilmente mediante la vista de sección lateral de la Figura 62, de manera que el Orificio 1 simularía la articulación metacarpofalángica y el Orificio 2, la articulación interfalángica.

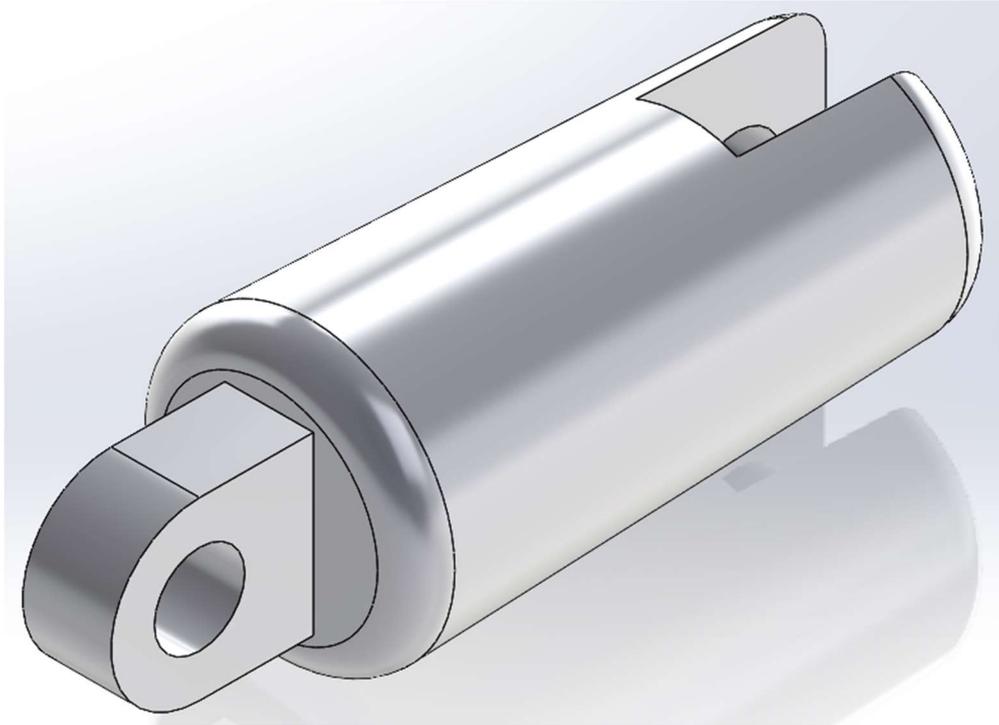


Figura 61. Primer diseño de la falange Proximal y puntos de unión con la bancada y la falange distal

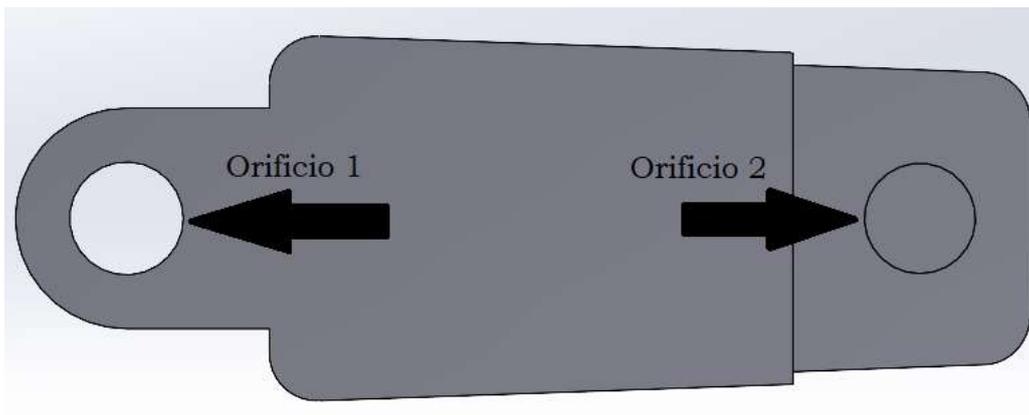


Figura 62. Vista de sección lateral de los orificios de unión de la falange proximal del Índice

Teniendo los puntos de unión entre elementos, se puede decidir la altura de paso del tendón por el dedo, pudiendo variarla para que sea máxima al cruzar por los puntos de unión. El diseño de este orificio es sencillo, pues debe ser un paso en línea recta en vista plantar. Este paso lleva el tendón desde el sistema de accionamiento en la mano hasta el punto de fijado en la falange distal, algo que se detallará más adelante. Si bien es cierto que debe tenerse en cuenta que, al flexionar el dedo, el tendón debe poder recogerse sin entorpecer la flexión. De esta manera se llega a un diseño como el mostrado en la Figura 63, donde puede observarse una modificación a la altura del Orificio 2. Dicha modificación limita la flexión negativa de la falange distal; pues de no existir este tope, la última falange podría flexionar en el sentido contrario al deseado.

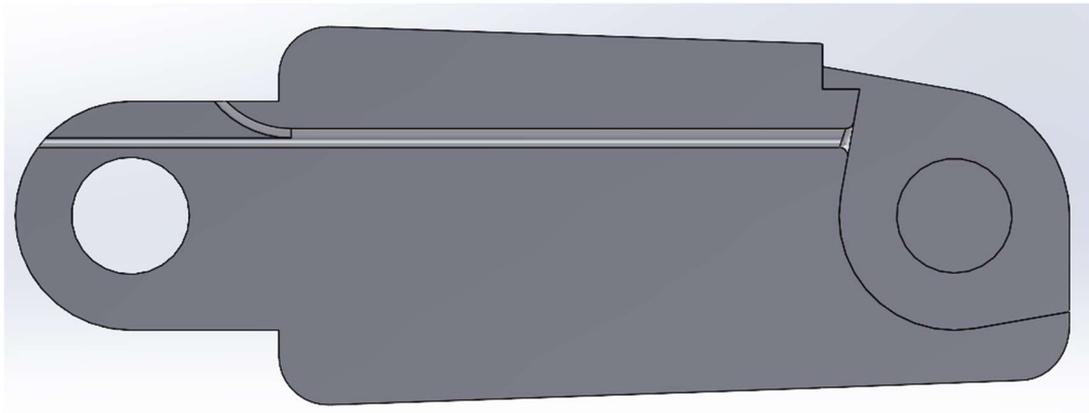


Figura 63. Vista de sección lateral del paso generado para el Tendón

Una vez diseñadas las uniones, se puede proceder a diseñar el alojamiento para los resortes a emplear para el retorno del dedo a su posición natural (la selección de estos componentes se muestra en el apartado de Cálculos, dentro del documento Anexos). Considerando un resorte de torsión para el retorno de la falange distal respecto a la proximal, se decide alojarlo alrededor del pasador de unión. De esta manera, se cumple con los requisitos necesarios para el correcto funcionamiento del resorte y se aprovecha el mismo punto de aplicación que para la rotación relativa entre falanges. La Figura 64 muestra el orificio requerido por la patilla del resorte.

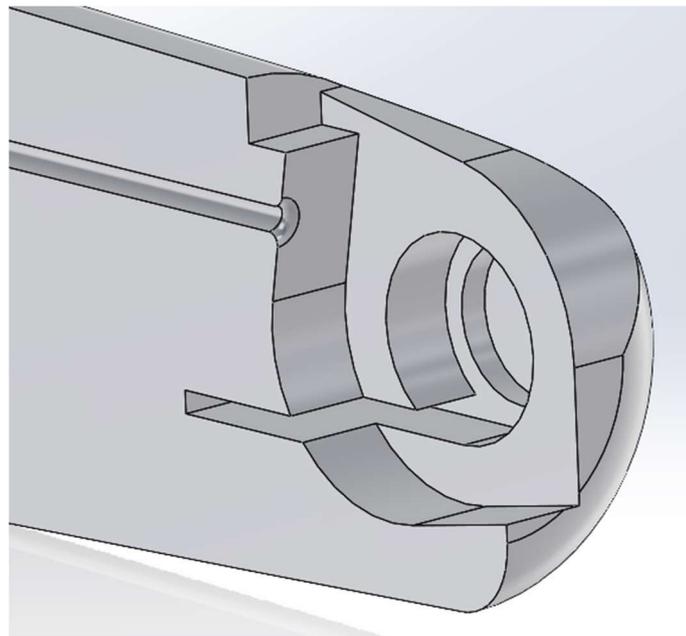


Figura 64. Vista del alojamiento para el Resorte de Torsión en la falange proximal del Índice

Además de este, queda plantear el punto de anclaje del resorte empleado para la vuelta de la falange proximal respecto de la bancada. En esta situación es muy difícil el uso de un resorte de torsión, pues el conjunto compuesto por el elemento de unión entre la mano y el dedo no presenta una buena rigidez para poder diseñar el orificio necesario. Debido a esto se decide emplear un resorte de fuerza constante como se mostró en la Figura 39, el cual ejercerá el mismo valor de fuerza frente a cualquier situación de flexión. Para el alojamiento del mismo, se debe vaciar el hueco necesario para albergar el resorte y permitir que su hoja recorra la guía necesaria para cumplir su función, sin llegar a salir del cuerpo del dedo como se explicó en apartados previos. Así, se obtiene un diseño como el mostrado en la Figura 65, según las dimensiones del elemento

seleccionado en el apartado de Cálculos, presentando aquí un corte de Vista lateral por el eje geométrico del miembro. El uso de este tipo de resorte conlleva tener que considerar cómo instalarlo en el interior del dedo, pues sería imposible hacerlo desde fuera. La solución más sencilla es dividir el dedo en dos mitades, pudiendo fijarlas entre sí a lo largo del montaje. Llevando a cabo esta modificación y realizando los puntos de fijado empleando tornillos de M3 y sus respectivas tuercas, de ahí los orificios pasantes que se visualizan en la Figura 65, se llega a la obtención del diseño de la Figura 66.

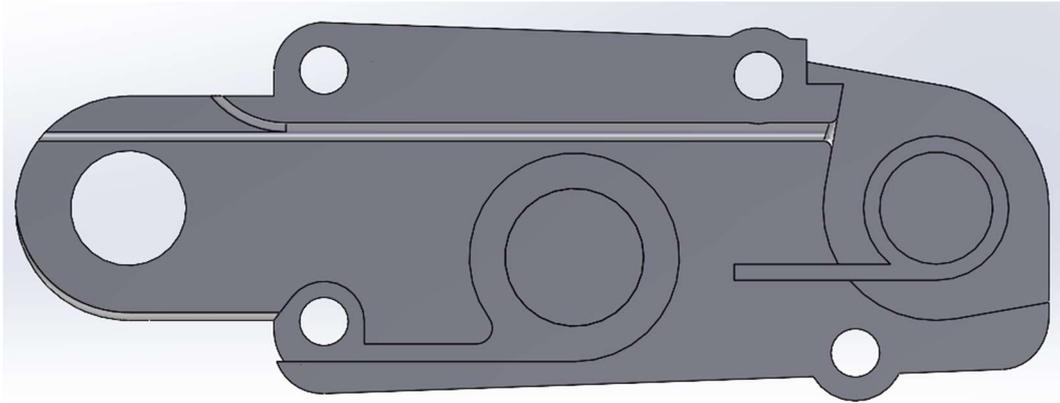


Figura 65. Vista de sección lateral para la identificación del Resorte de Fuerza constante y los puntos de atornillado

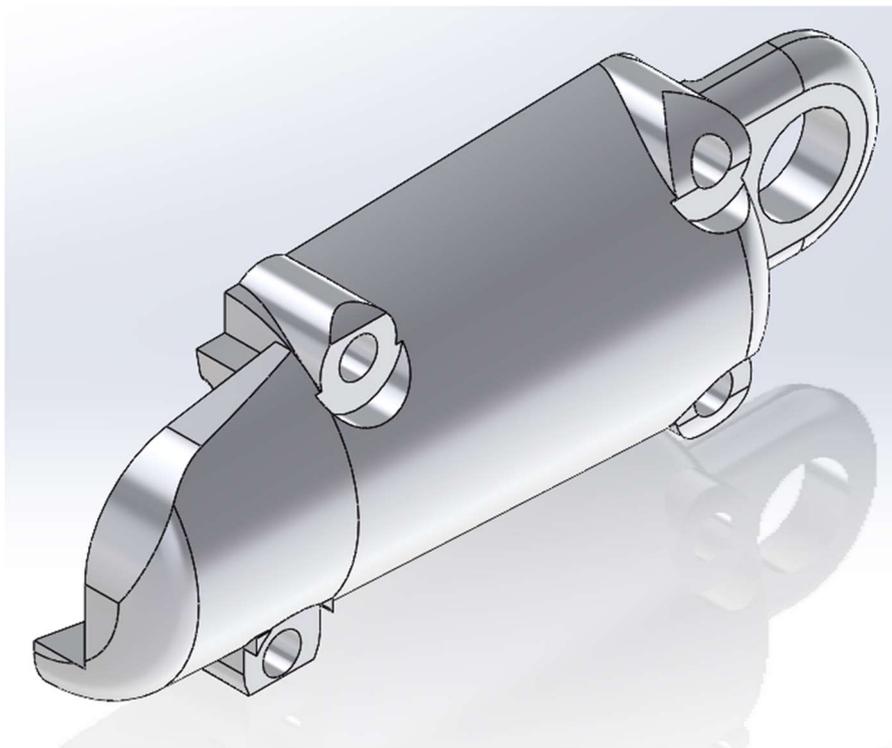


Figura 66. Vista en isométrico de una mitad de la falange proximal del Índice con los puntos de atornillado

Adicionalmente, se debe decidir la posición del trayecto a seguir por el cable de conexión del sensor a instalar. Partiendo de la premisa escogida en el apartado de Análisis conceptual, se debe considerar que dicho trayecto debe cruzar por el centro de las uniones, siendo esto lo más complejo del diseño del orificio. Así pues, queda un orificio como el mostrado en la Figura 67,

mostrando una vista de sección coincidente con el centro del hueco pasante, el cual se encuentra en la mitad aún no visualizada de la falange proximal.

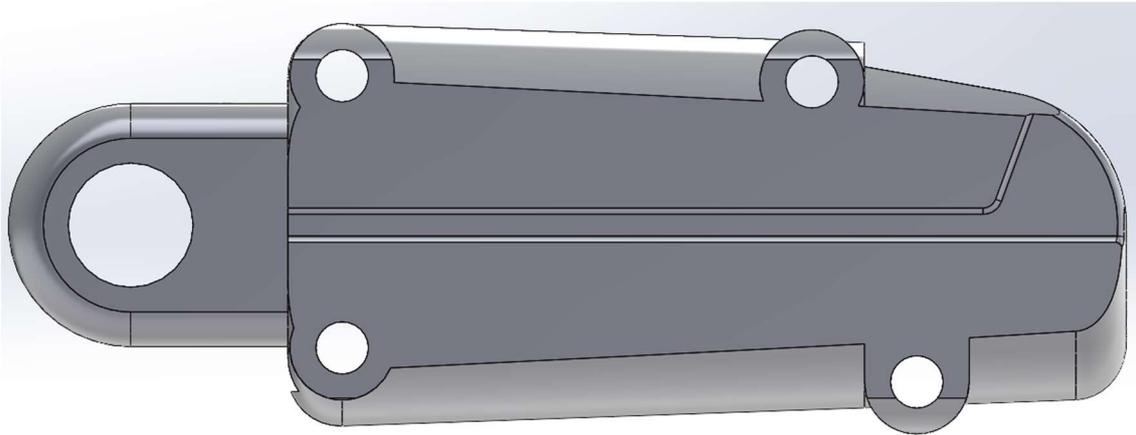


Figura 67. Vista de sección lateral coincidente con el eje de paso del cable del Sensor

La Figura 68 muestra la vista isométrica del cable del Sensor desde la posición distal, mientras que la Figura 69 la muestra desde la posición de la proximal.

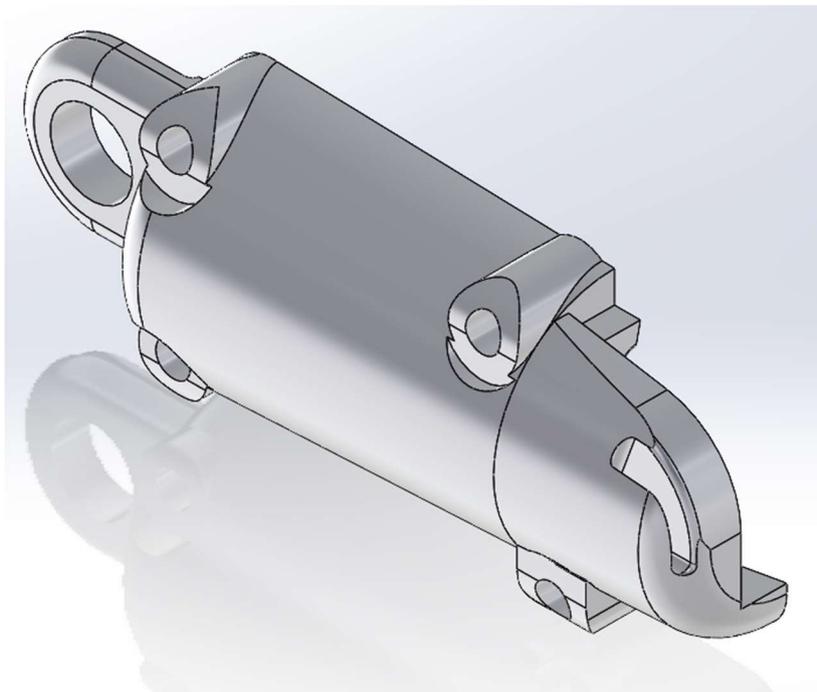


Figura 68. Vista isométrica distal del orificio de paso del cable del Sensor por la falange proximal del Índice

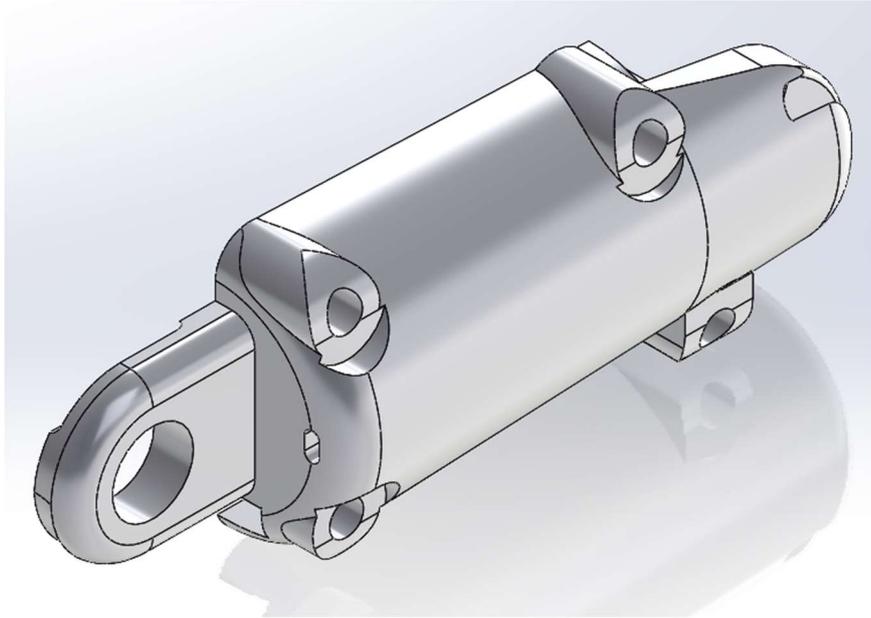


Figura 69. Vista isométrica proximal del orificio de paso del cable del sensor por la falange proximal del índice

Las últimas consideraciones para finalizar el diseño del dedo Índice, es la inclusión de piezas impresas con Filaflex. Esto se decide para poder aumentar el rozamiento en los agarres, además de permitir a la superficie del dedo amoldarse, en cierta medida, a la superficie del objeto agarrado. Dando lugar a unas piezas como la mostrada en la Figura 70, las cuales se alojarán en los huecos señalados en la Figura 71. La Figura 72 permite diferenciar el orificio de estas piezas de manera más detallada.

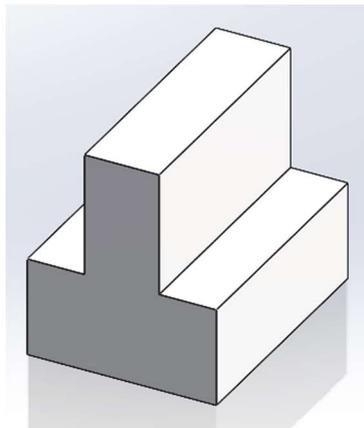


Figura 70. Diseño de piezas de aumento de rozamiento para los agarres

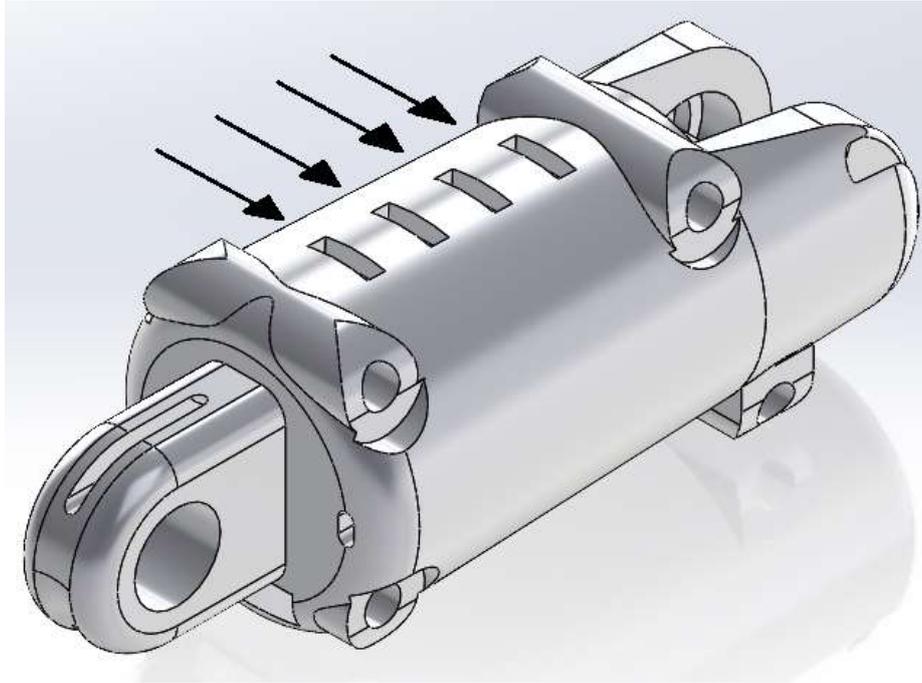


Figura 71. Alojamiento para las piezas de aumento de rozamiento en la falange proximal del Índice

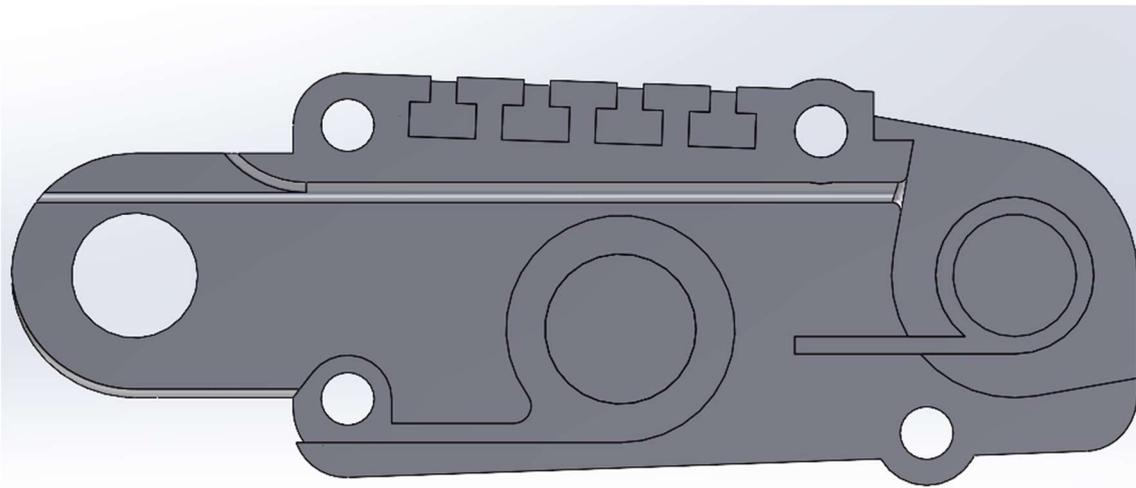


Figura 72. Vista de sección lateral para la visualización de los orificios para las piezas de rozamiento en la falange proximal del Índice

7.2.2. Falange distal

El diseño de esta falange parte de la unión de las falanges intermedia y distal, pues resultaba más sencillo unificarlas que delimitar los ángulos de cierre de cada falange.

Prosiguiendo con la base cilíndrica, se debe diseñar el orificio del pasador para unir esta porción con la falange proximal, teniendo en cuenta el tamaño del resorte además del elemento de unión. La Figura 73 muestra cómo quedaría esta primera parte de la falange desde una vista isométrica, así como el hueco requerido para la patilla del resorte, mientras que en la Figura 74 se puede observar una vista de sección lateral.

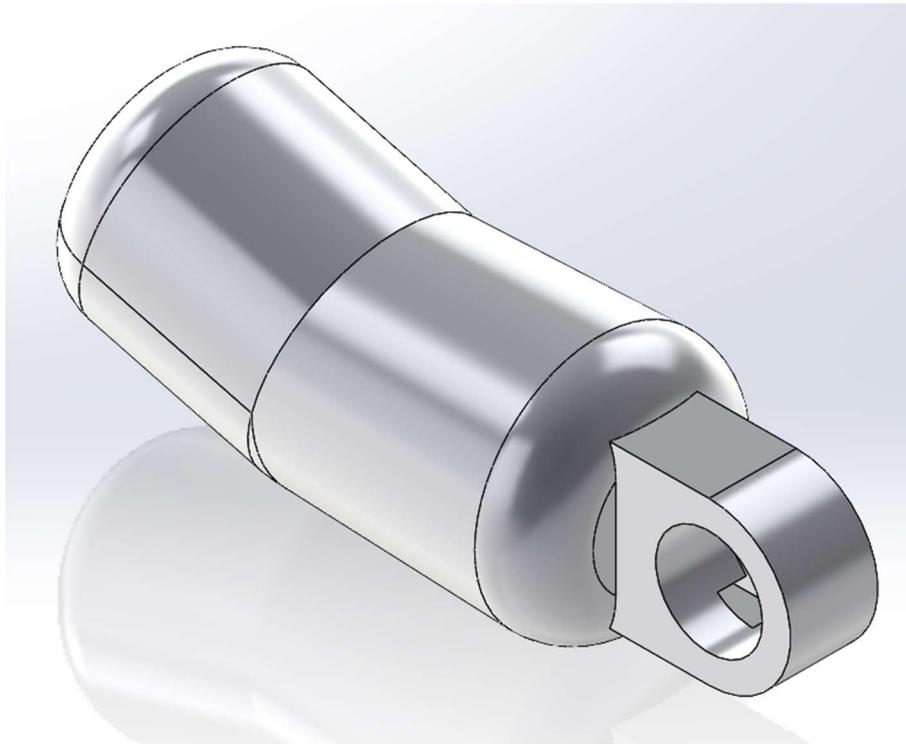


Figura 73. Vista isométrica del diseño base de la falange distal del dedo Índice con el alojamiento del Resorte de torsión

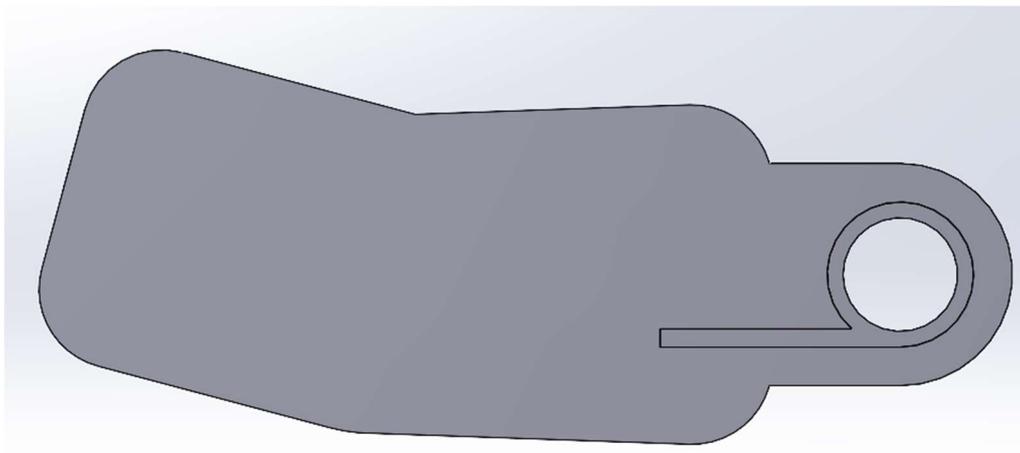


Figura 74. Vista de sección lateral del diseño base de la falange distal del Índice con el alojamiento del Resorte de torsión

El siguiente punto a tratar para el diseño de esta pieza es la posición del sensor para la medición de fuerza, así como el trayecto de paso del cable desde el sensor hasta unirlo con el trayecto ya diseñado en la proximal. Para ello, se deben considerar las dimensiones del propio sensor y de las piezas tanto de soporte como de presión que se le van a incluir. Dichas dimensiones se muestran en la Figura 75, dando lugar al conjunto de la Figura 76 con cada elemento señalado, a falta del propio sensor.

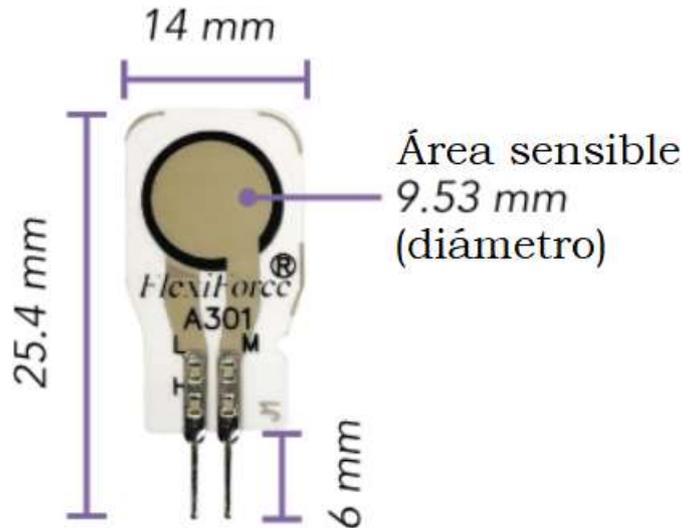


Figura 75. Dimensiones del Sensor de presión FlexiForce A301 [28]

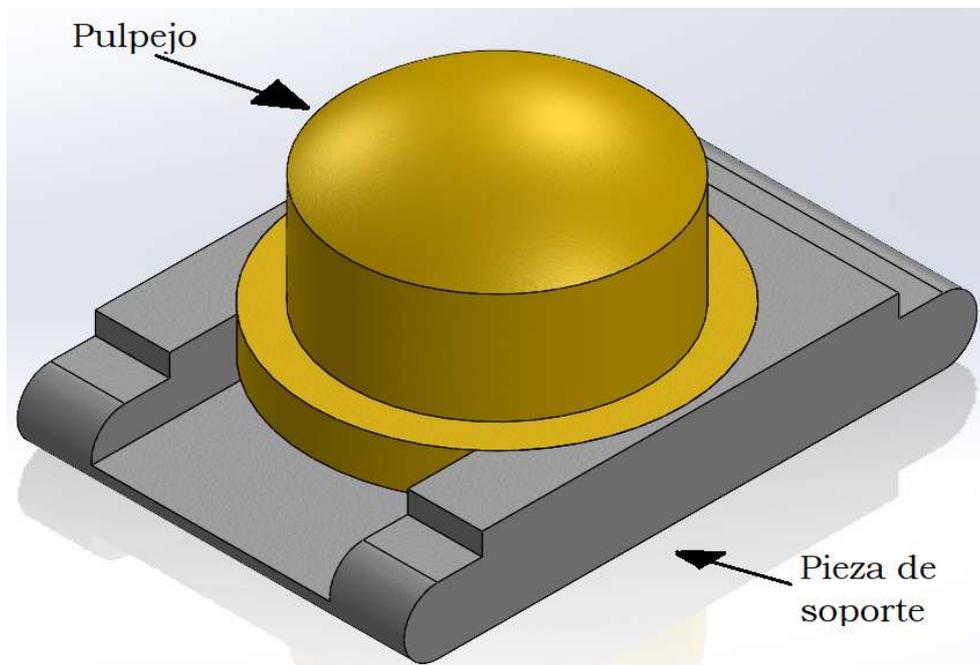


Figura 76. Ensamblaje para el fijado del Sensor de presión

Una vez diseñado el conjunto a instalar, queda determinar su localización en el sistema. Debe quedar de tal manera que el cable del sensor sea capaz de mantenerse en el interior de la falange y unirse con el trayecto de la proximal sin entorpecer el diseño. Además, la posición seleccionada debe conseguir que la única parte visible del conjunto sea el final de la huella, aquella superficie que va a entrar en contacto con los objetos agarrados. Así pues, se llega a un diseño como el mostrado en la Figura 77, apreciándose isométricamente en la Figura 78.

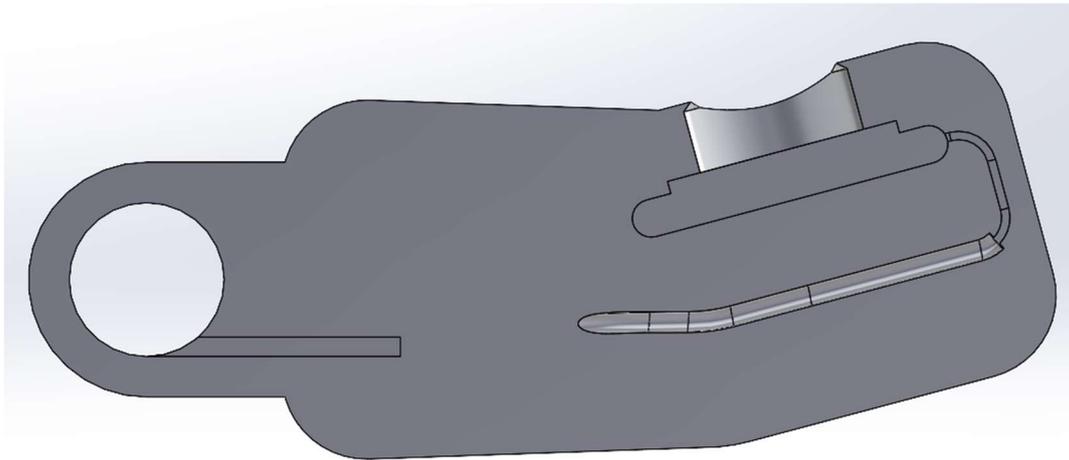


Figura 77. Vista de sección del alojamiento del ensamblaje para el Sensor de presión en la falange distal del Índice

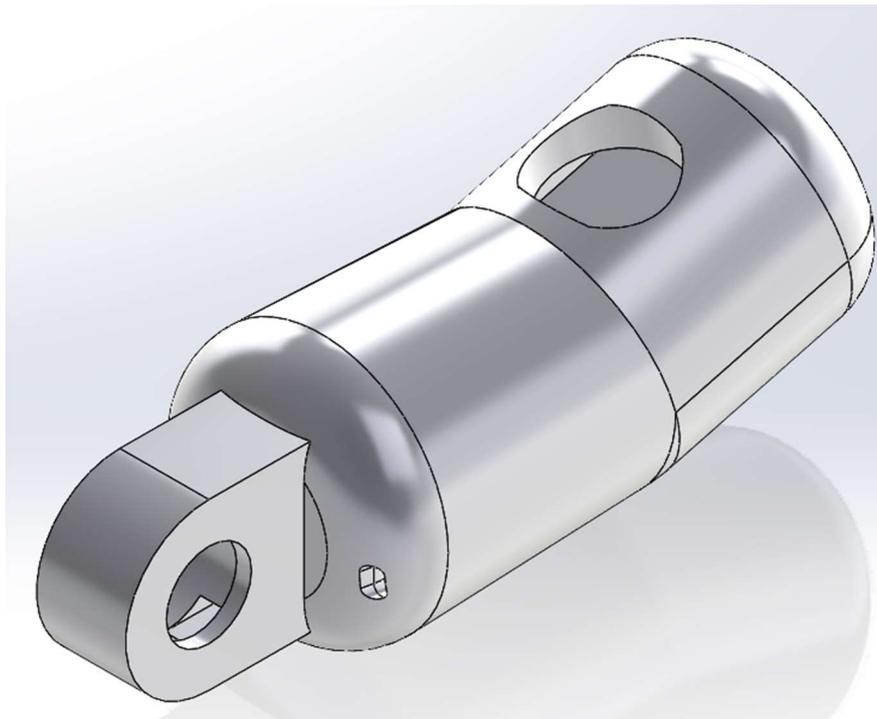


Figura 78. Vista isométrica de la falange distal del Índice

Como cierre del diseño de la falange distal queda comentar el orificio generado para el paso del tendón hasta su punto de anclaje. Siendo un hueco circular que sigue un trayecto colineal al diseñado para la falange proximal, anclado a la distal mediante un cambio de sección mostrado previamente.

Tal y como sucedía con la falange proximal, la distal debe dividirse en dos mitades para la inserción del conjunto del sensor y el paso del cable, además del fijado del tendón en su orificio. Para ello, se plantea el uso de tornillos de la misma métrica que para el caso anterior, dando como resultado el diseño final mostrado en la Figura 79, al que se le añaden los elementos de aumento de fricción tal y como sucedía con la falange proximal.

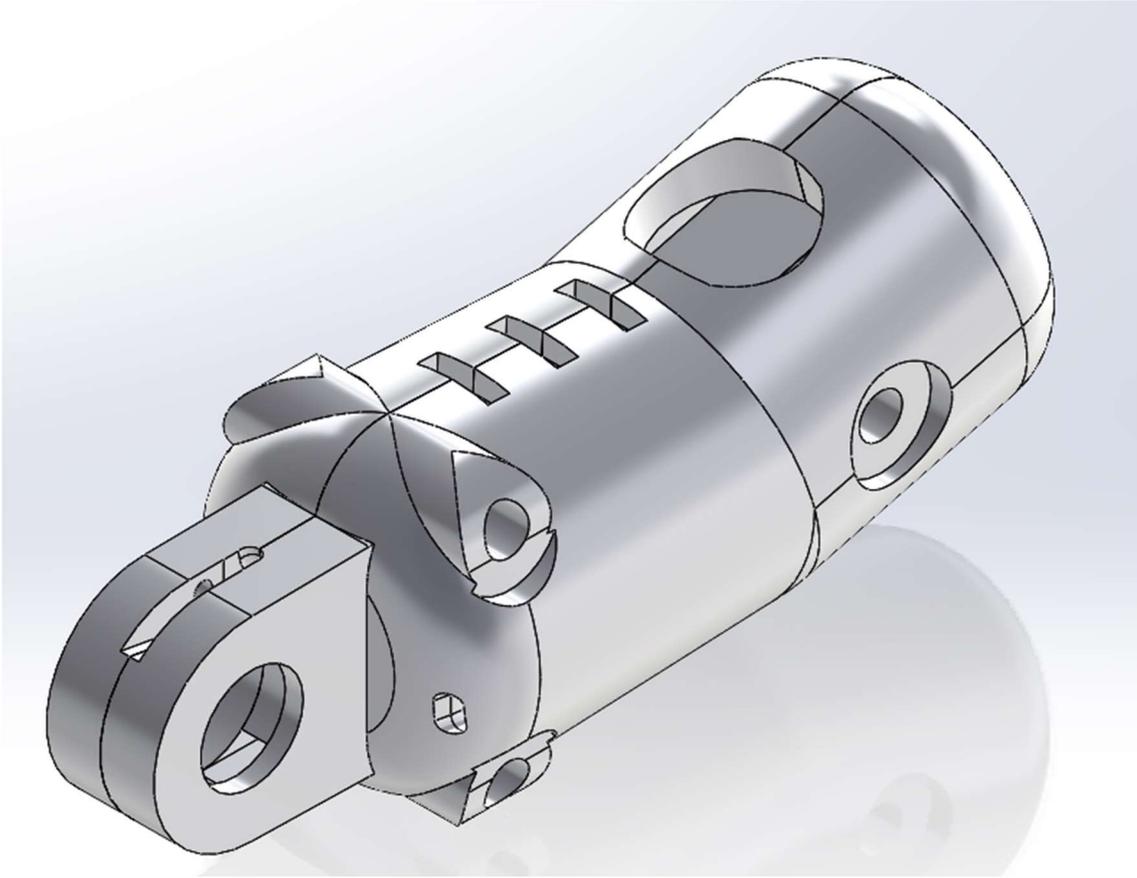


Figura 79. Diseño final de la falange distal del dedo Índice

Más adelante se comprobará la resistencia de los elementos diseñados mediante el Método de elementos finitos empleando el propio programa Solidworks, pues si no fueran lo suficientemente resistentes deberían rediseñarse para poder soportar las cargas aplicadas.

7.2.3. Sistema de accionamiento

El sistema de accionamiento de la flexión en el dedo Índice está compuesto por un motor y un conjunto de engranajes del tipo sinfín-corona, de características concretadas en el apartado de Cálculos. Como puede observarse, su composición no es algo complejo por lo que su diseño se resume en una pieza que soporte los componentes de tal manera que se cumplan los requerimientos geométricos determinados por el conjunto. Dichos requerimientos son:

- Superficies de contacto coincidentes
- Geometrías tangentes desde la vista superior

Siguiendo estas pautas y considerando que a la Corona se le debe anclar el Tendón a la altura requerida por el dedo, se obtiene un diseño para el sistema de flexión mostrado en la Figura 80 adecuándose a las dimensiones de los elementos a unificar mediante esta pieza tras haberlos seleccionado en el apartado Cálculos. Asimismo, en el documento Planos se detallan los valores dimensionales de cada pieza.

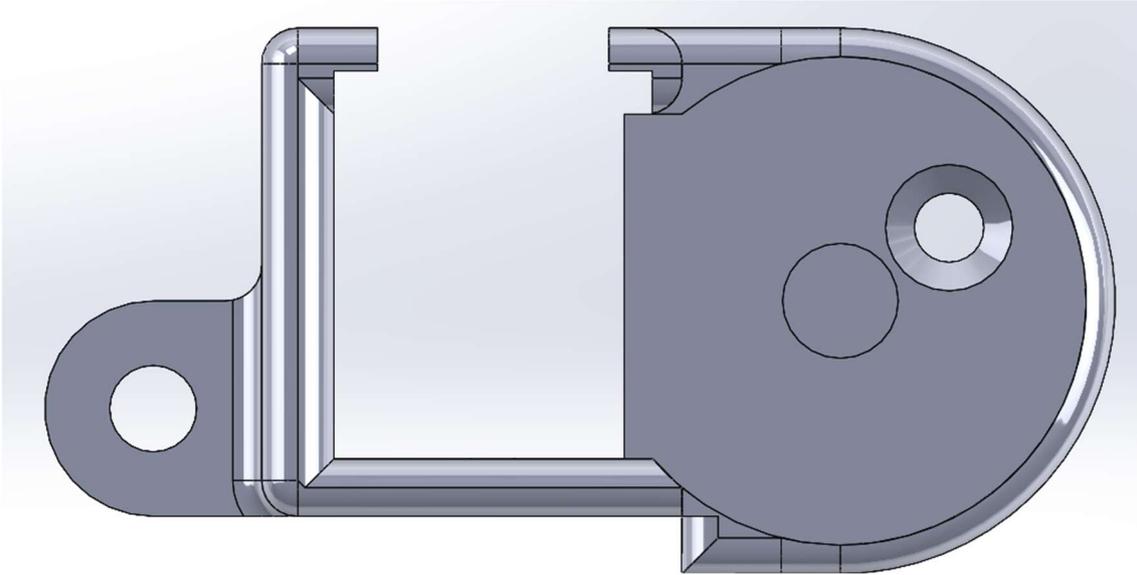


Figura 80. Pieza de soporte del sistema del dedo Índice

Obsérvese que hay puntos de anclaje de esta pieza a la bancada para evitar la separación entre los componentes y la placa, tanto por vibraciones como por cambios de orientación de la mano. Mediante este diseño se obtendría un sistema de accionamiento como el mostrado en la Figura 81.

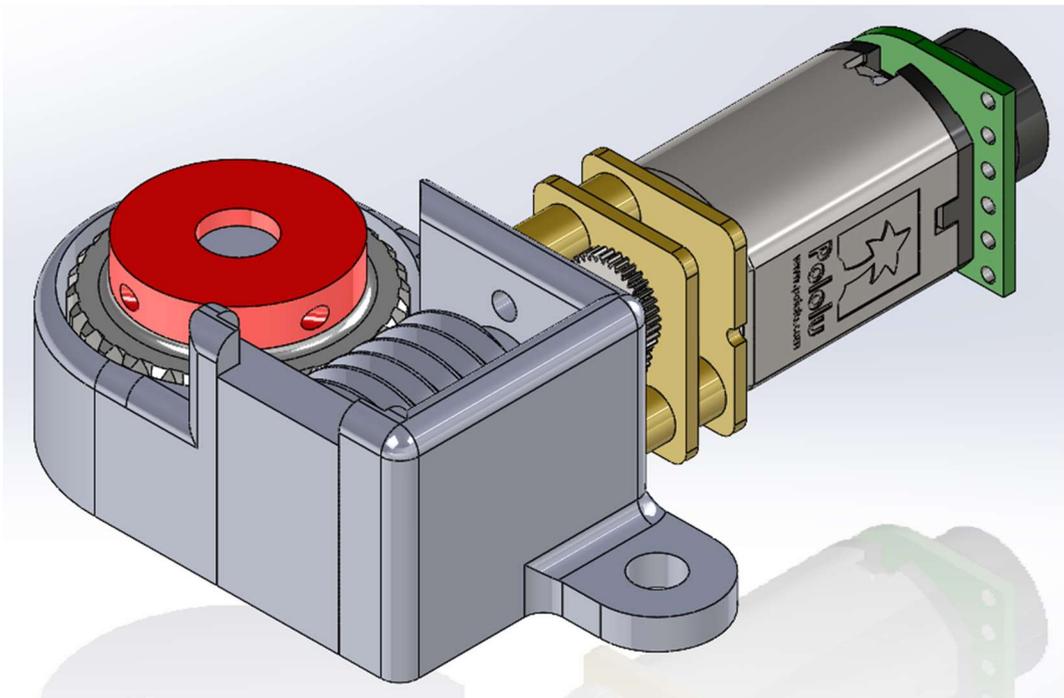


Figura 81. Sistema de accionamiento del dedo índice

7.3. Diseño del dedo pulgar

Para el diseño del dedo pulgar se va a comenzar por la falange distal, pues es más rápida de describir al copiar los pasos seguidos para el diseño que para la misma falange del dedo índice.

Más adelante, en el documento Anexos, se comprueba la resistencia de los elementos diseñados mediante el Método de Elementos Finitos (MEF) empleando el propio programa Solidworks, pues si no fueran lo suficientemente resistentes deberían rediseñarse para poder soportar las cargas aplicadas.

A continuación se exponen los pasos seguidos para la obtención del diseño final del dedo pulgar mostrado en la Figura 82.

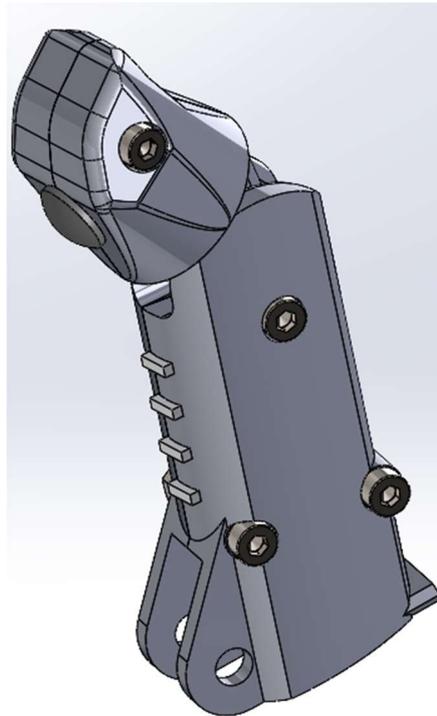


Figura 82. Diseño final del dedo pulgar

7.3.1. Falange distal

En esta ocasión no se parte de un diseño cilíndrico, pues se pretende imitar la estructura de la falange distal de un Pulgar real. Dando pie al diseño mostrado en la Figura 83.

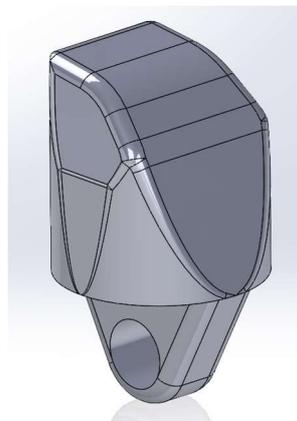


Figura 83. Diseño inicial de la falange distal del dedo pulgar

Realizando las modificaciones llevadas a cabo para el dedo índice eliminando las pertenecientes al Tendón, pues la flexión de este dedo se lleva a cabo de otra manera, se obtendría un diseño como el mostrado en la Figura 84. Dicho diseño presenta, además, un orificio para el pasador empleado en el fijado de la distal al ángulo de inclinación que se comentó en apartados previos.

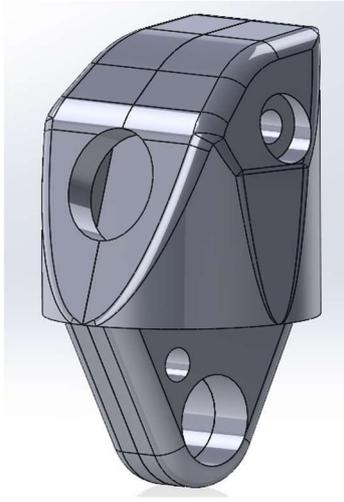


Figura 84. Diseño final de la falange distal del dedo pulgar

7.3.2. Falange proximal

Esta falange muestra un diseño muy distinto al presentado para el dedo índice, pues se emplean accionamientos de la flexión muy distintos. Dicho esto, el sistema de flexión se tiene en cuenta para este apartado en vez de presentar uno independiente, pues debe considerarse la ocupación del sistema para decidir el diseño de la falange.

Partiendo de un diseño cilíndrico con cierta variación de radio para acomodar la superficie de agarre a los objetos a sostener, se obtiene un diseño como el mostrado en la Figura 85.

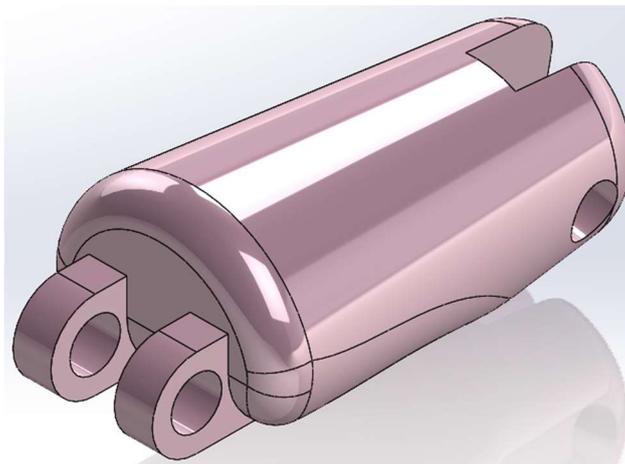


Figura 85. Primer diseño de la falange proximal del dedo Pulgar

Esta primera figura es la vista en isométrico de la pieza, la Figura 86 es la vista del alzado anterior de la misma, la Figura 87 muestra la vista de la pieza desde el alzado posterior y la Figura 88 es la vista lateral con una sección por el plano medio de la pieza.

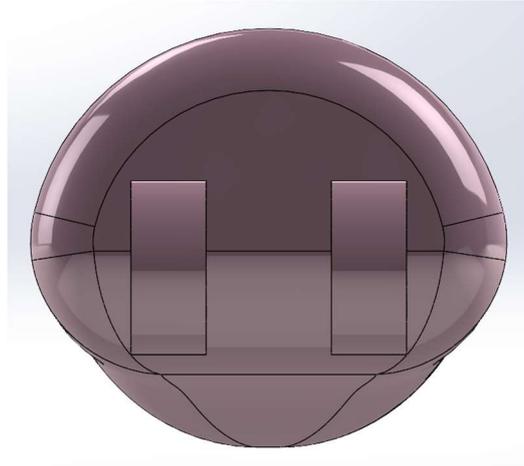


Figura 86. Alzado anterior del primer diseño de falange proximal del Pulgar

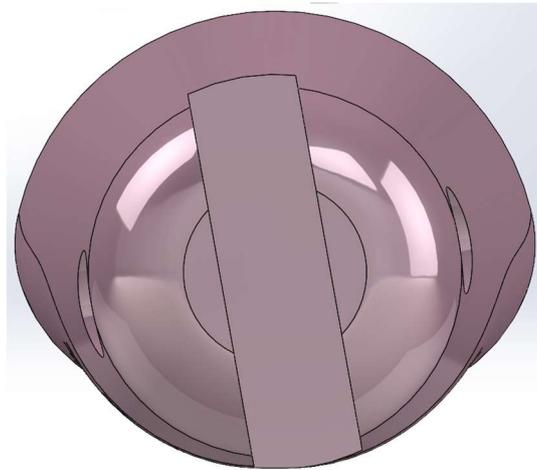


Figura 87. Alzado posterior del primer diseño de falange proximal del Pulgar

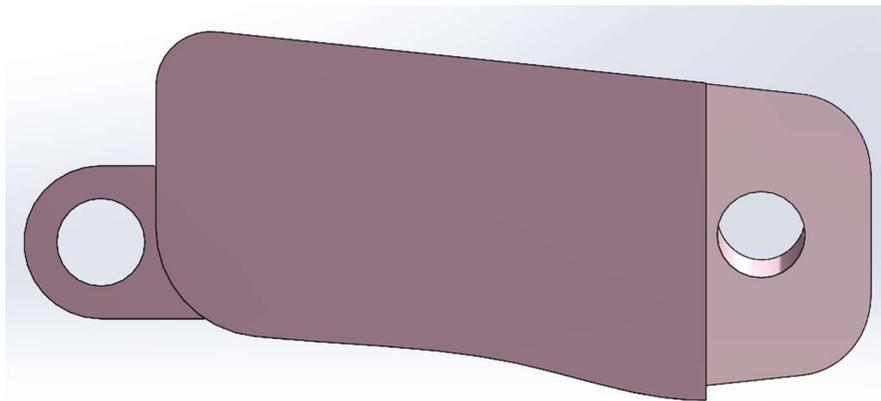


Figura 88. Vista lateral del primer diseño de falange proximal del dedo Pulgar

Al igual que sucedía para el dedo índice, esta falange debe dividirse en dos para poder instalar los componentes necesarios en el interior del dedo. Por esa razón se observan orificios pasantes distribuidos por el diseño.

Siguiendo con la presentación del diseño de esta falange, se debe tener en cuenta la disposición del sistema de flexión del dedo, siendo el centro de giro coincidente con el centro de la corona, sujeta al dedo por las extensiones visualizadas en el lateral derecho de la Figura 88.

El problema con este diseño es el tamaño tan dispar que presenta respecto del dedo índice, añadido a la necesidad de un bloqueo axial para el sinfín, pues, al generarse fuerzas longitudinales a su eje geométrico, este podría salirse a pesar del fijado al eje motor con un prisionero. Otra razón por la que hubo que cambiar el diseño del dedo Pulgar fue la generación de interferencias entre la falange proximal y la pieza de soporte del sistema de abducción del dedo, la cual se presentará más detalladamente en el siguiente apartado.

Planteada esta situación, lo más cómodo resulta el rediseño completo de la falange proximal, dando como resultado el diseño mostrado en la Figura 89 (vista isométrica del diseño). En ella puede observarse la implementación del cierre de ambas mitades de la falange, así como el paso del cable que conecta con el sensor instalado en la falange distal y el soporte axial para el sinfín. Cada uno de estos puntos del diseño se han llevado a cabo atendiendo a que debía ser posible el posterior montaje de todo el sistema según las dimensiones de los componentes mecánicos seleccionados en el apartado Cálculos. Así mismo, en el documento Planos se detallarán las dimensiones exactas tenidas en cuenta.

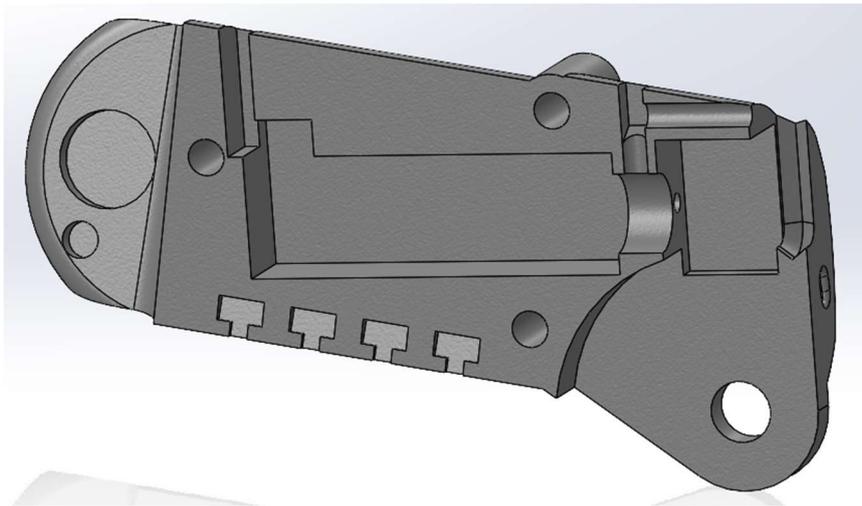


Figura 89. Diseño final de la falange proximal del dedo pulgar

7.3.3. Sistema de abducción-aducción

Este apartado resulta el más complejo a nivel de diseño, pues es el núcleo de funcionamiento del dedo pulgar y el elemento que más limitará el espacio ocupado en la bancada del diseño.

Partiendo de la idea del uso directo del conjunto sinfín-corona, pudo observarse rápidamente la compleja posición en que debía instalarse el motor para la transmisión de potencia entre componentes, lo que llevó a la necesidad de implementar elementos como los engranajes cónicos. Esta idea facilita los cambios de orientación de la transmisión, pudiendo iterar en la posición de todo el conjunto instalado hasta encontrar la localización idónea empleando un sistema de transmisión compuesto por un conjunto sinfín-corona y una pareja de engranes cónicos.

Considerando la necesidad de optimizar al máximo este sistema de transmisión y tras un gran número de iteraciones, que carecen de importancia como para ser mostradas en este documento, pudo obtenerse el sistema mostrado en la Figura 90. Siendo la Figura 91 una vista

lateral del sistema y, la Figura 92 una vista frontal del mismo. Atendiendo a las dimensiones del conjunto sinfin-corona escogidos en el apartado de Cálculos.

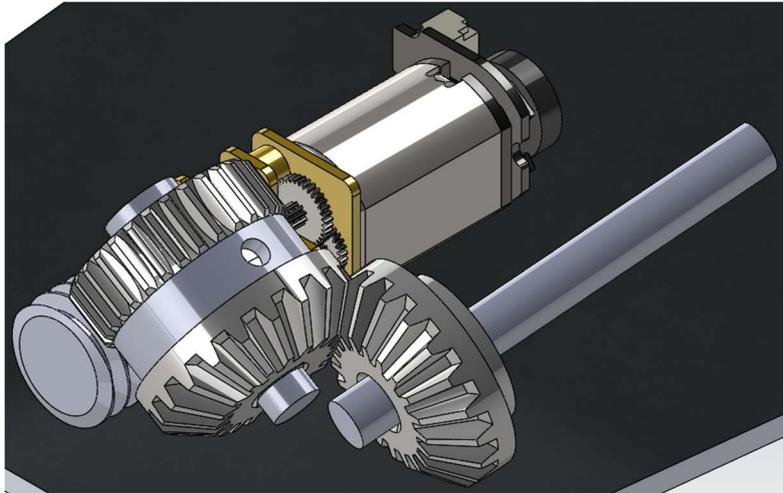


Figura 90. Vista isométrica del sistema de engranes empleado para el desplazamiento del pulgar

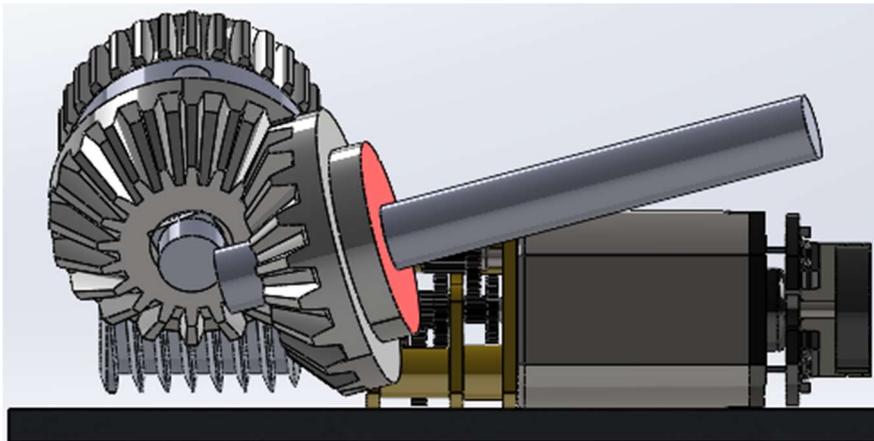


Figura 91. Vista lateral del sistema de engranes empleado para el desplazamiento del pulgar

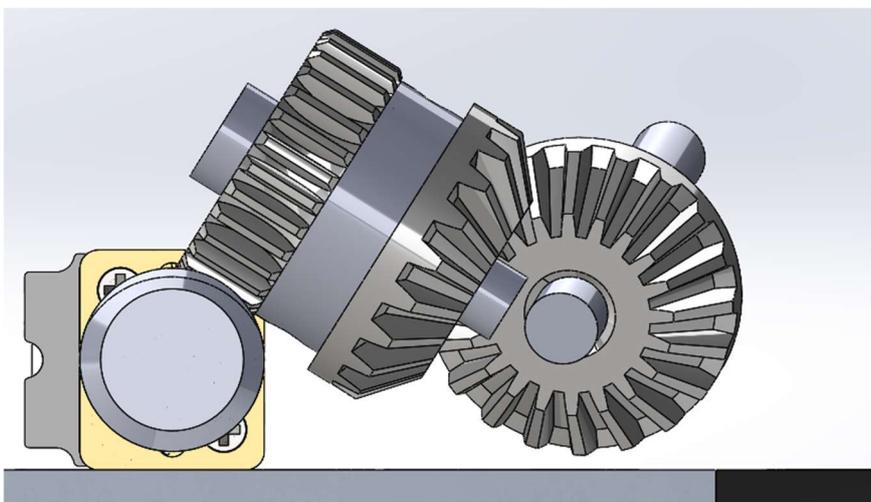


Figura 92. Vista frontal del sistema de engranes empleado para el desplazamiento del pulgar

La posición de cada uno de los componentes se estudió minuciosamente para obtener una adecuada transmisión y un máximo aprovechamiento del espacio, además de una correcta simulación del movimiento de abducción. Únicamente quedaba generar la pieza que debe ser capaz de soportar todos los componentes en su posición exacta, así como la pieza para sostener el dedo así como para transmitir el movimiento de rotación respecto del eje de salida. Tras esto, se obtienen la pieza mostrada en la Figura 93, como simulador del metacarpiano del dedo pulgar (pieza para unir el dedo al eje de abducción-aducción), y la mostrada en la Figura 94, empleada para el sustento de todo el sistema de actuación del movimiento de abducción-aducción.

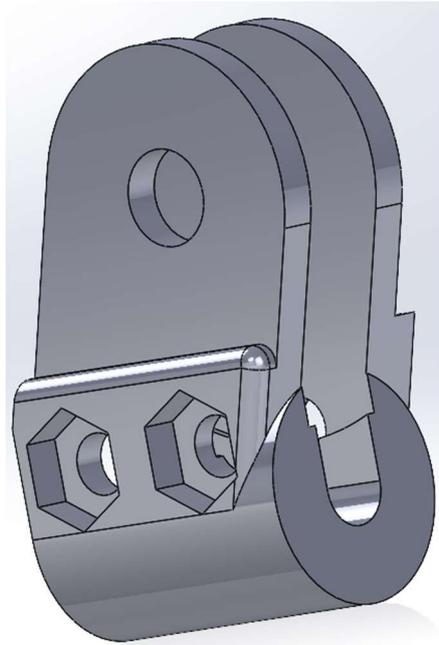


Figura 93. Pieza de soporte intermedia, réplica del metacarpiano para el pulgar

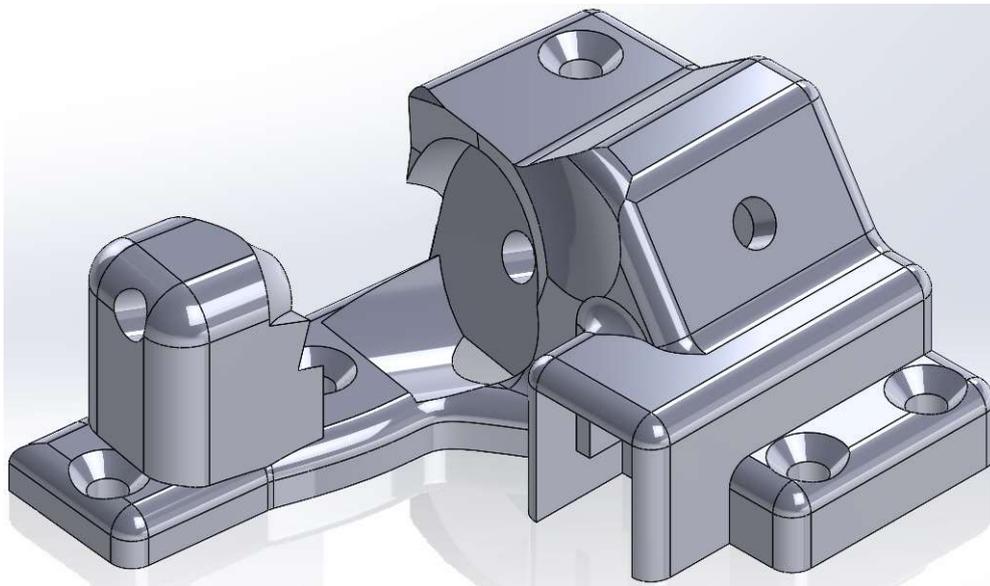


Figura 94. Pieza de soporte del dedo pulgar y el sistema de abducción-aducción

8. Descripción del diseño mecatrónico

8.1. Hardware

Siguiendo las indicaciones pertinentes a la instalación de las placas de transmisión de datos MKR CAN Shield, estas deben encajarse verticalmente a las Arduino MKR 1010 WiFi. Adicionalmente, se conectan los MKR CAN Shield entre ellos de la misma manera que se muestra en la Figura 95.

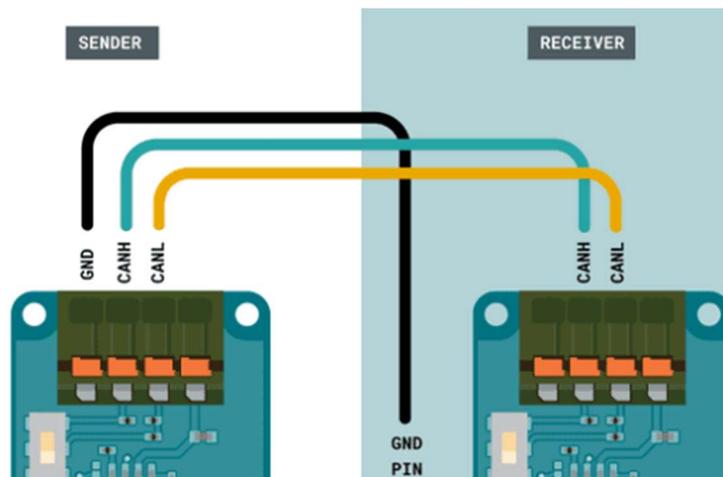


Figura 95. Conexión entre MKR CAN Shields para transmisión de datos [14]

Tal y como se ha comentado, son necesarios tres motores en total para el completo funcionamiento de la mano, dos motores serán utilizados para el movimiento del dedo pulgar y uno para la flexión del índice. Para el control de estos componentes se requiere de un elemento intermedio entre motor y placa denominado Driver.

Ya que los motores a emplear son de la marca Pololu, se buscan unos Drivers de esta misma empresa. Como puede observarse en la Figura 96, cada uno de estos dispositivos presenta dos tipos de puertos de entrada (AIN y BIN) conectados a sus respectivos puertos de salida (AO y BO), así como de sus puertos de activación y determinación de la velocidad de giro (PWMA y PWMB). Debido al número de puertos que presenta, se deben emplear dos Drivers para poder controlar dos motores con el primer Driver y, el tercer con el segundo Driver.



Figura 96. Puertos de un Driver de la marca Pololu [30]

Siguiendo la nomenclatura de este esquema, el Motor A sería accionado por las salidas AO1 y AO2, determinadas por las entradas AIN1 y AIN2, cuando al puerto PWMA llegase el valor de la velocidad de giro. Asimismo, el puerto VMOT debe estar conectado a una línea de tensión igual a la requerida por los motores seleccionados.

Este mismo patrón se debe seguir con el Motor B de este primer Driver, al igual que con el Motor A del segundo Driver usado. Además, el segundo Driver debe tener conectado el puerto PWMB a tensión nominal (+5V) para quedar activo y evitar la rotura del mismo.

Paralelamente, se decide emplear un sensor de fuerza y un LED RGB por cada dedo diseñado. De esta manera es posible determinar la cantidad generada por cada dedo en el agarre, a pesar de que en un diseño de mano protésica entera sea más conveniente el uso de un solo LED para todo el conjunto, así sería suficiente para saber la fuerza generada por agarre en vez de por dedo. Por lo que se debe generar una función que permita la respuesta de cada uno de los LEDs dependientes de su respectivo Sensor.

8.2. Software

El código completo para el funcionamiento de todo el mecanismo se divide para los dos componentes que se han nombrado previamente, de manera que existe un código Sender y otro Receiver.

8.2.1. Código Sender

Esta parte del código se centra en la diferenciación de los motores a emplear, así como en categorizar los mensajes que deben enviarse según el pulsador accionado.

El accionamiento del mecanismo se debe a 3 motores en total, como ya se comentó en apartados anteriores; estos motores se dividen de manera que el primero (Motor A) es el ocupado de la abducción y la aducción del pulgar, el segundo (Motor B) es el encargado de la flexión de ese mismo dedo y, el tercero (Motor C), de la flexión del dedo índice. Los cuales deberán poderse cambiar, activar y desactivar, además de seleccionar el sentido de giro para poder decidir si el dedo abduce, aduce, flexiona o se extiende. Así pues, se obtienen 3 categorías de información a enviar entre dispositivos, más una adicional para iniciar y parar todo el sistema en caso de emergencia, mostradas en la Figura 97.

```
#define InicioParo      0x11
#define CambioMotor    0x12
#define HaceMotor      0x13
#define ActivoMotor    0x14
```

Figura 97. Identificadores de mensaje CAN

Las expresiones mostradas en la figura anterior son los identificadores de cada tipo de mensajes a enviar por el dispositivo Sender, para su posterior interpretación por el dispositivo Receiver, en orden decreciente de relevancia. Mensajes que pueden enviarse gracias a 4 pulsadores distintos:

- Primer pulsador. Empleado tanto en el encendido como el apagado del sistema. Se enviaría un mensaje indicando si se inicia o se detiene el funcionamiento del mecanismo.
- Segundo pulsador. Realiza el cambio entre motores, de manera que, si se inicia con el Motor A y se activa este pulsador se cambia al Motor B.
- Tercer pulsador. Indica que el motor seleccionado gira en sentido de las agujas del reloj y se activa, es decir, este pulsador haría enviar un primer mensaje del sentido de giro y, un segundo mensaje para activar o desactivar el motor.
- Cuarto pulsador. Imitaría el procedimiento del tercer pulsador, pero en sentido de giro contrario para devolver el movimiento recorrido.

Mediante este procedimiento y siguiendo los ejemplos otorgados por la página web de la empresa Arduino y empleando las variables visibles en la Figura 98, se redactan las líneas de envío de datos mostradas en las figuras encontradas a continuación.

```
int cualMotor = 0;
const boolean estadoMotor = 0;
boolean antirretorno = 0;
boolean inicio = 0;
```

Figura 98. Variables de funcionamiento

Asimismo, puede observarse en la Figura 99 el mensaje de inicio o paro del sistema, en la Figura 100 el mensaje de cambio del motor a activar, en la Figura 101 el mensaje de flexión del dedo activado, en la Figura 102 el mensaje de vuelta a posición natural del dedo y, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** el mensaje de desactivación del motor, el cual debe enviarse antes de poder cambiar el sentido de giro del motor.

```
if(digitalRead(pulsGeneral)==1){
  inicio = !inicio;
  while(digitalRead(pulsGeneral)==1){}
  CAN.beginPacket(InicioParo);
  CAN.write(inicio);
  CAN.endPacket();
}
```

Figura 99. Inicio o paro del sistema

```
if(digitalRead(pulsCambio)==1 && antirretorno==LOW){
  while(digitalRead(pulsCambio)==1){}
  cualMotor++;
  CAN.beginPacket(CambioMotor);
  CAN.write(cualMotor);
  CAN.endPacket();
}
```

Figura 100. Cambio del motor seleccionado

```
if(digitalRead(pulsCierra)==1 && antirretorno==LOW){
  CAN.beginPacket(HaceMotor);
  CAN.write(turnCCW);
  CAN.endPacket();
  CAN.beginPacket(ActivoMotor);
  CAN.write(!estadoMotor);
  CAN.endPacket();
  antirretorno = HIGH;
  while(digitalRead(pulsCierra)==1){}
}
```

Figura 101. Giro del eje motor en sentido antihorario y activación del mismo

```

        if(digitalRead(pulsAbre)==1 && antirretorno==LOW){
            CAN.beginPacket (HaceMotor);
            CAN.write (turnCW);
            CAN.endPacket ();
            CAN.beginPacket (ActivoMotor);
            CAN.write (!estadoMotor);
            CAN.endPacket ();
            antirretorno = HIGH;
            while(digitalRead(pulsAbre)==1){}
        }
    }
}

```

Figura 102. Giro del eje motor en sentido horario y activación del mismo

8.2.2. Código Receiver

Para el funcionamiento de los motores se deben redactar las funciones de activación y paro, dando como resultado las mostradas en la Figura 103 y la Figura 104, siendo la primera para accionar cualquiera de los motores y, la segunda, por el contrario, para la parada del motor seleccionado.

```

//Activación del motor
void motorDrive (int motorNumber, boolean motorDirection, int motorSpeed){
    boolean pinIn; // Direction is given by pinXINI and !pinXIN2
    if (motorDirection == turnCW) // pinXINI = HIGH, pinXIN2 = LOW -> Clockwise
        pinIn = HIGH; // pinXINI = LOW, pinXIN2 = HIGH -> CounterClockwise
    else
        pinIn = LOW;
    switch (motorNumber){
        case 0:
            // Motor A
            digitalWrite (pinAIN1, pinIn);
            digitalWrite (pinAIN2, !pinIn);
            analogWrite (pinPWMA, motorSpeed);
            break;

        case 1:
            // Motor B
            digitalWrite (pinBIN1, pinIn);
            digitalWrite (pinBIN2, !pinIn);
            analogWrite (pinPWMA, motorSpeed); //0-255
            break;

        case 2:
            // Motor C
            digitalWrite (pinCIN1, pinIn);
            digitalWrite (pinCIN2, !pinIn);
            analogWrite (pinPWMA, motorSpeed); //0-255
            break;
    }
}
}

```

Figura 103. Función de activación de los motores

```

//Parada del motor
void motorStop (int motorNumber){
  switch (motorNumber){
    case 0:
      // Motor A
      digitalWrite (pinAIN1, LOW);
      digitalWrite (pinAIN2, LOW);
      analogWrite (pinPWMA, 0); //0-255
      break;

    case 1:
      // Motor B
      digitalWrite (pinBIN1, LOW);
      digitalWrite (pinBIN2 , LOW);
      analogWrite (pinPWMA, 0);
      break;

    case 2:
      // Motor C
      digitalWrite (pinCIN1, LOW);
      digitalWrite (pinCIN2 , LOW);
      analogWrite (pinPWMA, 0);
      break;
  }
}

```

Figura 104. Función de paro de los motores

Como se comentó en el apartado de Análisis conceptual, se debe generar una función de lectura de los datos otorgados en cada agarre y que devuelva esos valores tomados mediante respuestas luminosas. Por lo que debe ser una función que relacione la entrada de datos de cada sensor de fuerza con su respectivo NeoPixel de salida. Los límites de cada rango se deben decidir en función de las cargas a soportar por el sistema, permitiendo una sencilla modificación en caso de requerirla. Además, deben ajustarse los valores que provocan una subida o bajada de nivel para evitar situaciones de limbo en la toma de datos. De esta manera, se obtiene un código como el de la Figura 105 para la activación de los LEDs del NeoPixel según el rango de valores en que se encuentre. Nótese que deben distinguirse los dos LEDs empleados, añadido a que se debe diferenciar entre los sensores presionados, obliga a duplicar las funciones mostradas. Obteniendo una primera línea de funciones para el Sensor B y una segunda para el Sensor C, correspondientes al dedo pulgar y al dedo índice, respectivamente.

```

void funcionColorB(int valorSensor, int maxRango1, int maxRango2)
{
    strip.setBrightness(20);
    if (valorSensor==0 && valorSensor<(maxRango1/150))
    {
        strip.setPixelColor(0, strip.Color(0, 0, 0));
        strip.setPixelColor(1, strip.Color(0, 0, 0));
        strip.setPixelColor(2, strip.Color(0, 0, 0));
        strip.setPixelColor(3, strip.Color(0, 0, 0));
        strip.setPixelColor(4, strip.Color(0, 0, 0));
        strip.setPixelColor(6, strip.Color(0, 0, 0));
        strip.setPixelColor(7, strip.Color(0, 0, 0));
    }
    if (valorSensor>(maxRango1/150) && valorSensor<=(maxRango1+(maxRango2-maxRango1)*7/16))
    {
        strip.setPixelColor(0, strip.Color(0, 255, 0));
        strip.setPixelColor(1, strip.Color(0, 70, 255));
        strip.setPixelColor(2, strip.Color(0, 255, 0));
        strip.setPixelColor(3, strip.Color(0, 0, 0));
        strip.setPixelColor(4, strip.Color(0, 255, 0));
        strip.setPixelColor(5, strip.Color(0, 0, 0));
        strip.setPixelColor(6, strip.Color(0, 255, 0));
    }
    if (valorSensor>(maxRango1+(maxRango2-maxRango1)*7/16) && valorSensor<=(maxRango1+(maxRango2-maxRango1)*12/16))
    {
        strip.setPixelColor(0, strip.Color(255, 191, 0));
        strip.setPixelColor(1, strip.Color(0, 70, 255));
        strip.setPixelColor(2, strip.Color(255, 191, 0));
        strip.setPixelColor(3, strip.Color(0, 70, 255));
        strip.setPixelColor(4, strip.Color(255, 191, 0));
        strip.setPixelColor(5, strip.Color(0, 0, 0));
        strip.setPixelColor(6, strip.Color(255, 191, 0));
    }
    if (valorSensor>(maxRango1+(maxRango2-maxRango1)*12/16) && valorSensor<=maxRango2)
    {
        strip.setPixelColor(0, strip.Color(255, 0, 0));
        strip.setPixelColor(1, strip.Color(0, 70, 255));
        strip.setPixelColor(2, strip.Color(255, 0, 0));
        strip.setPixelColor(3, strip.Color(0, 70, 255));
        strip.setPixelColor(4, strip.Color(255, 0, 0));
        strip.setPixelColor(5, strip.Color(0, 70, 255));
        strip.setPixelColor(6, strip.Color(255, 0, 0));
    }
    strip.show();
}

```

Figura 105. Función de activación del NeoPixel

El resto del código redactado es la conjunción de todas estas funciones y la manera de relacionarlas con el método de comunicación CAN, por lo que se detallará en el documento Planos.

9. Conclusiones

En el presente documento se expone el diseño y desarrollo de una prótesis de mano antropomorfa para emplearse tanto por seres humanos que presenten amputación del miembro superior como para robótica, siendo este campo poco abarcado al verse más crítico el primer caso de uso. Mediante este diseño se impulsa el proyecto UNIQUE-HAND presentado por el equipo de investigación BE-UJI, habiéndose llevado a cabo un gran número de iteraciones en cuanto a diseño y programación. Se pretendía demostrar la validez de este primer prototipo realizando la impresión 3D de las piezas diseñadas, así como llevando a cabo la compra de material necesario para dar pie al primer paso hacia un proyecto final completamente funcional, pero esta última parte depende de terceros y de sus plazos de envío, lo que genera tiempos de espera. Por lo que no ha sido posible llevar a cabo la comprobación funcional del prototipo para su presentación en este documento.

En cuanto a la electrónica, se ha tratado de obtener un circuito de conexión válido para el funcionamiento del sistema, mediante el empleo una pequeña CNC para el mecanizado de una placa de cobre y, así, permitir al equipo de investigación dar un paso más para poder independizarse de las empresas creadoras de PCB, del inglés Printed Circuit Board (Placa de Circuito Impreso en castellano). No ha sido posible su obtención para presentarse en este documento, pero sí se ha realizado el montaje basto del circuito y la comprobación de su cumplimiento en base a las propuestas planteadas a lo largo del documento. Habría sido de gran ayuda mostrar una imagen más clara que la Figura 106, pero no h sido posible.

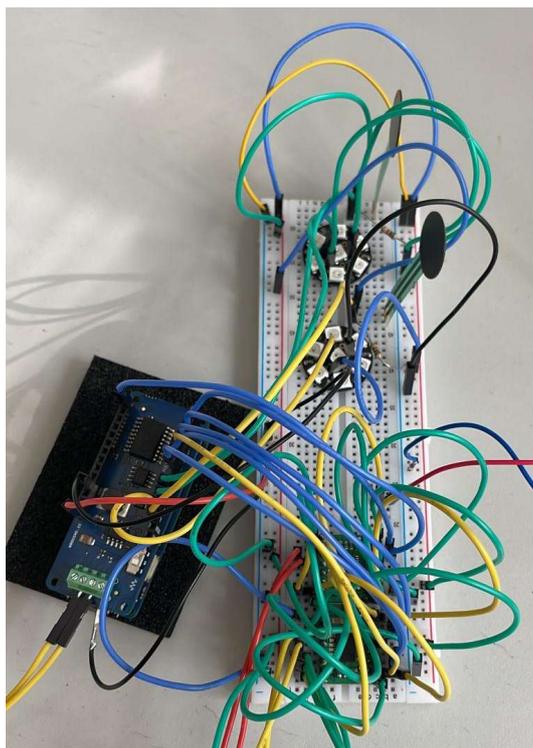


Figura 106. Circuito en bruto del elemento CAN Receiver

A pesar de estos inconvenientes, se pretende llevar a la realidad este diseño y comprobar su funcionalidad para replicar los agarres en los que se basa este trabajo además de continuar con el seguimiento del proyecto para presenciar su resultado final.

Además del diseño mecánico y mecatrónico ha podido comprobarse, en el apartado Cálculos, que el sistema presenta una baja eficiencia. Esto se debe a las pérdidas generadas por la transmisión entre los engranajes seleccionados (la transmisión de tipo sinfín-corona genera muchas pérdidas en la transmisión de potencia), dando como resultado una eficiencia, en este caso, de la mitad del valor propuesto. En añadido, al no haber sido posible el montaje físico del sistema diseñado, no se pudo realizar la comprobación del peso alcanzado. Esta propuesta era interesante, ya que un mecanismo de peso reducido es más fácil de cargar, lo que haría más sencillo su uso continuo por una persona que lo necesitara. Asimismo, esta pérdida de eficiencia provoca la necesidad de emplear elementos de mayor reducción de velocidad para obtener una mayor fuerza de agarre, ralentizando el movimiento del dedo y evitando llegar a la meta de flexionar el dedo índice en el tiempo acordado.

Dejando como tarea pendiente la comprobación real del mecanismo y adjuntando la Figura 107 y la Figura 108 se procede a concluir el documento, demostrando la réplica teórica de los agarres por los que se ha realizado este proyecto.

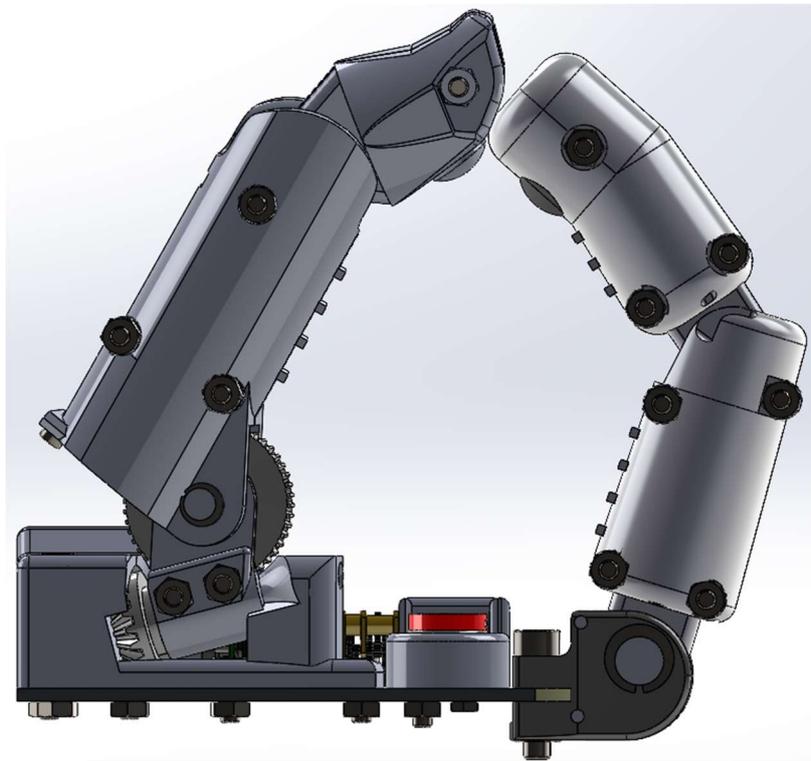


Figura 107. Réplica del agarre de tipo Pinza

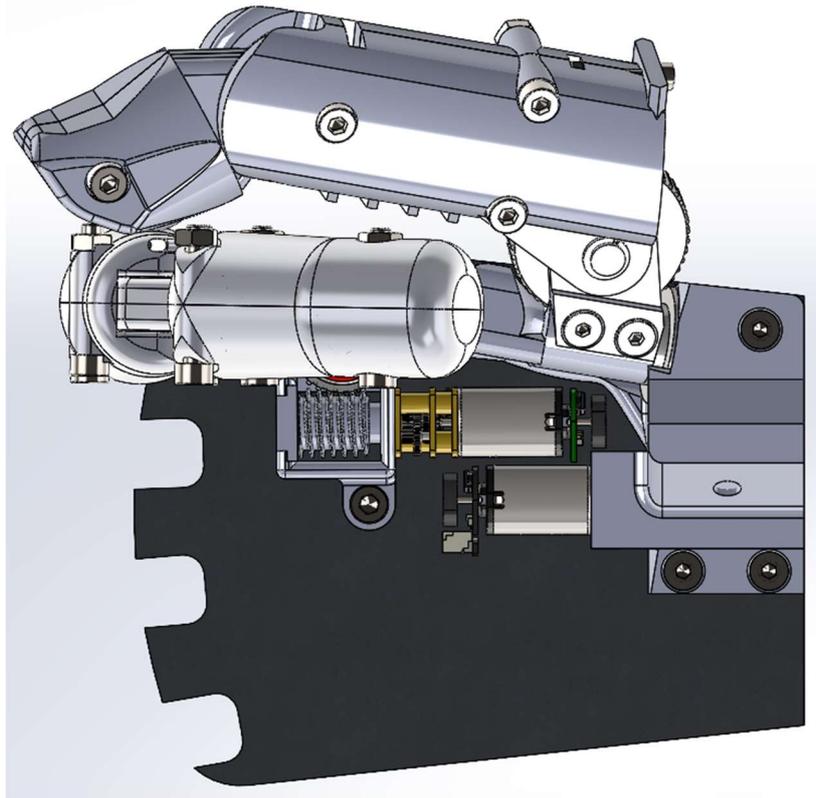


Figura 108. Réplica del agarre de tipo Pinza lateral

10. Bibliografía

- [1] Biomechanical and Ergonomics Investigation Group, «UNIQUE-HAND». <https://sites.google.com/uji.es/unique-hand/Home>
- [2] M. Vergara, M. J. Agost, y V. Bayarri, «Anthropometric characterisation of palm and finger shapes to complement current glove-sizing systems», *Int J Ind Ergon*, vol. 74, 2019, doi: 10.1016/j.ergon.2019.102836.
- [3] I. A. (Ibrahim A. Kapandji y M. Torres Lacomba, *Fisiología articular: esquemas comentados de mecánica humana*. Médica Panamericana, 2006.
- [4] Kim Norton, «Un breve recorrido por la historia de la prótesis · Volumen 17 · Número 7», nov. 2007. [En línea]. Available: <https://www.amputee-coalition.org/resources/spanish-history-prosthetics/>
- [5] «Historia de las prótesis desde la antigüedad hasta nuestros días», jun. 15, 2018. [En línea]. Available: <https://tratamientoyenfermedades.com/historia-de-las-protesis/>
- [6] Jofre L. Brito, Marlon X. Quinde, David Cusco, y John I. Calle, «Prótesis de Mano, ¿en qué estado se encuentran?», pp. 3-16, 2017. [En línea]. Available: <https://docplayer.es/61060746-Prtesis-de-mano-protesis-bionicas-en-que-estado-se-encuentran-jofre-l-brito-marlon-x-quinde-david-cusco-y-john-i-calle.html>
- [7] NCYT Amazings, «Mano protésica robótica neumática, más eficiencia a menor costo». [En línea]. Available: <https://noticiasdelaciencia.com/art/42465/mano-protetica-robotica-neumatica-mas-eficiencia-a-menor-costo>

- [8] «Sensor EMG Farnell». https://es.farnell.com/seeed-studio/101020058/placa-de-sensor-detector-emg/dp/3932088?gclid=Cj0KCQjwy5maBhDdARIsAMxrkw11PCuTUFLjY1baCUhjBDXfLeBqh0M87XsT_vHxXUGV6jygejzDeEaAoLDEALw_wcB&mckv=_dc|pcrid||plid||kword||match||slid||product|3932088|pgrid||ptaid|&CMP=KNC-GES-GEN-Shopping-Pmax-Low-08-Aug-2022&gross_price=true
- [9] Ottobock, «Mano Michelangelo», [En línea]. Available: <https://www.ottobock.com/es-es/product/8E500>
- [10] Össur, «i-Limb Quantum», [En línea]. Available: <https://www.ossur.com/es-es/protesica/miembro-superior/i-limb-quantum>
- [11] Tibor Moes, «¿Qué es el Bluetooth y para qué sirve?». <https://softwarelab.org/es/bluetooth/>
- [12] Delphine Lavignasse, «Control of anthropomorphic hand using flex sensors in the neck».
- [13] Tibor Moes, «¿Qué es WiFi, qué significa y para qué sirve?». <https://softwarelab.org/es/que-es-wifi-que-significa-y-para-que-sirve/>
- [14] «Arduino». <https://www.arduino.cc/>
- [15] Omega Engineering, «Galgas extensiométricas». <https://es.omega.com/prodinfo/galgas-extensiometricas.html>
- [16] «Galga extensiométrica», sep. 30, 2022. https://es.wikipedia.org/wiki/Galga_extensiom%C3%A9trica
- [17] Minebea intec, «Célula de carga». https://www.minebea-intec.com/es/experiencia-y-conocimientos/pesaje-e-inspeccion-wiki/celulas-de-carga?gclid=CjwKCAjwx7GYBhB7EiwA0d8oe6JDo0QMyuHuo9OeIPsD5ZVu2IS1w3tkLwmkcowJ4qVYxKz4hq0eVxoCaF0QAvD_BwE
- [18] «Dinamómetro mecánico». <https://www.directindustry.es/prod/ametech-sensors-test-calibration/product-15292-1778915.html>
- [19] Femto Instruments, «Dinamómetro digital». <https://femto.es/prd-frz-10090-dinamometro-digital>
- [20] Biomechanical and Ergonomics Investigation Group, «BENCH-HAND». <https://sites.google.com/a/uji.es/bench-hand/results#h.bbpze7ure3o>
- [21] Biomechanical and Ergonomics Investigation Group, «MOV MUS». <https://sites.google.com/a/uji.es/movmus/>
- [22] Biomechanical and Ergonomics Investigation Group, «EVREHAND». http://be.uji.es/proyectos/proyecto_evrehand.htm
- [23] Biomechanical and Ergonomics Investigation Group, «DEVALHAND». <https://sites.google.com/a/uji.es/devalhand/>
- [24] «Sodemann». https://www.muelles-industriales.es/?gclid=CjwKCAjwrOaBhA9EiwAUKLV4hsyz8B5w8rAnT-dwLnq-mUsUoY0kyy1WWmujMo1D4mZkHMVpOa9jRoCjowQAvD_BwE

- [25] Biomechanical and Ergonomics Investigation Group, «BruJa Hand». [En línea]. Available: <https://sites.google.com/a/uji.es/devalhand/bruja-hand>
- [26] «KHK Gears». <https://khkgears.net/new/>
- [27] Joseph T. Belter *et al.*, «Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands: A review 5», *J Rehabil Res Dev*, vol. 50, pp. 599-618, 2013.
- [28] «Tekscan». <https://www.tekscan.com/products-solutions/force-sensors/a301>
- [29] «Bricogeek». https://tienda.bricogeek.com/?gclid=CjwKCAjw-rOaBhA9EiwAUKLV4hDsAOU7De_Ta2_QwzWI_J1PkTVfHnKtQvM6g5bEUEN3xcwNba_dGRoCK-QQAvD_BwE
- [30] «Pololu». <https://www.pololu.com/>
- [31] Eduardo Frías Valero, «El Método de Elementos Finitos».
- [32] «Elegoo». <https://www.elegoo.com/>

II. Anexos

1.	Cálculos	95
1.1.	Dedo índice	95
1.1.1.	Sistema de retorno	95
1.1.2.	Sistema de accionamiento en carga máxima	100
1.1.3.	Sistema de flexión	101
1.1.4.	Comprobación del sistema de accionamiento en vacío	107
1.2.	Dedo pulgar	108
1.2.1.	Sistema de abducción-aducción	108
1.2.2.	Sistema de flexión	111
1.3.	Eficiencia del sistema	114
2.	Código de programación	114
2.1.	CAN-Sender	114
2.2.	CAN-Receiver	120
3.	Comprobación mediante el Método Elementos Finitos	128
3.1.	Dedo índice	128
3.2.	Dedo pulgar	133

1. Cálculos

En este apartado se presentan todos los cálculos llevados a cabo para el correcto funcionamiento de los sistemas de accionamiento y retorno de los dedos, las comprobaciones de la resistencia del diseño generado y el cumplimiento de las especificaciones de diseño impuestas anteriormente, además de los cálculos necesarios para la realización de los agarres de tipo pinza y pinza lateral requeridos para conocer las limitaciones de los sistemas de accionamiento.

Primeramente, se analiza el dedo índice, el cual consta de un sistema de accionamiento y otro de retorno. Seguidamente, el dedo pulgar constando un sistema para el accionamiento de la abducción-aducción y otro para la flexión del mismo.

1.1. Dedo índice

El cálculo a realizar para el diseño completo del sistema de accionamiento de la flexión y el de retorno del dedo índice se desglosa en motor eléctrico y sistema de engranajes, por un lado, y el cálculo de los resortes de retorno por otro. Siendo dos cálculos dependientes, pues si el motor no presenta una potencia mayor a la resistida por los resortes, el sistema no podrá flexionar, pero los resortes deben ser capaces de mantener el dedo en una posición inicial aceptable además de ser capaces de volver a esa posición inicial tras la apertura del agarre.

1.1.1. Sistema de retorno

Para realizar los cálculos de la fuerza que deben ejercer los resortes a instalar en el dedo, deben considerarse las 2 siguientes hipótesis:

- Hipótesis 1. El dedo índice se encuentra en horizontal, paralelo al suelo, con la palma mirando hacia abajo. El tendón no está tensado y debe cerrarse primero la articulación metacarpofalángica a la interfalángica. Esto se muestra en la Figura 109.

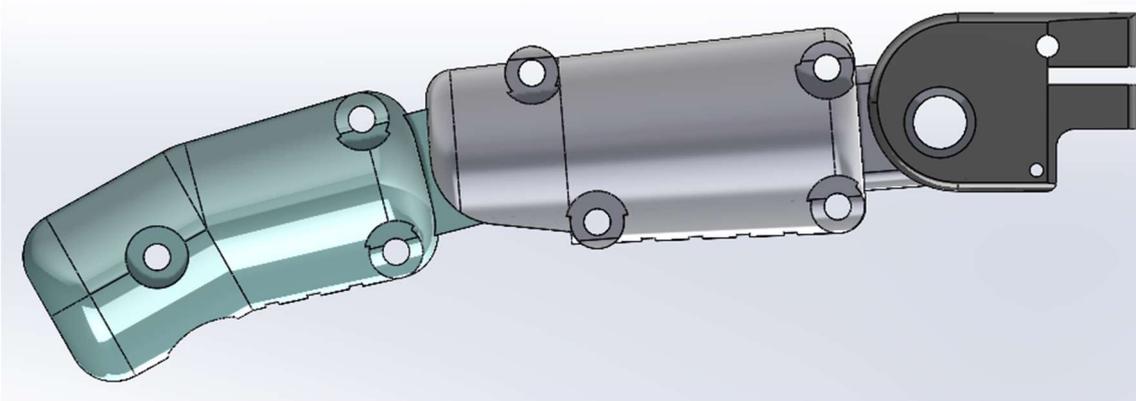


Figura 109. Disposición del índice en Hipótesis 1

- Hipótesis 2. La posición del dedo continúa horizontal, pero la articulación metacarpofalángica ya ha flexionado. Esto orienta la mano en dirección perpendicular al dedo, con la articulación interfalángica a punto de flexionar. Tal y como se observa en la Figura 110.

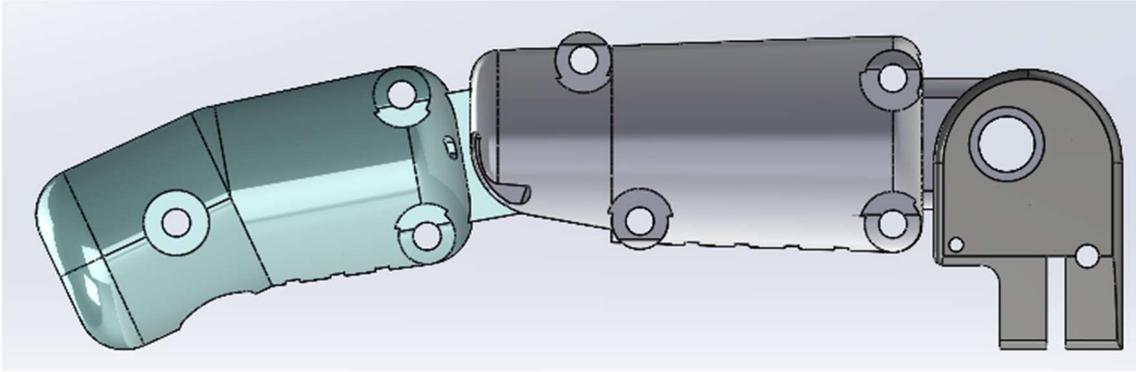


Figura 110. Disposición de índice en Hipótesis 2

Mediante las ecuaciones de Análisis Estático de Fuerzas y Momentos, puede estimarse la fuerza necesaria por los resortes para el cumplimiento de las hipótesis expuestas previamente haciendo uso de los datos mostrados en la Tabla 4.

Dato	Símbolo	Valor	Unidades
Distancia desde la articulación B hasta el centro de gravedad (cdg) del índice	L_B	50,00	mm
Distancia desde la articulación A hasta el cdg del conjunto de las últimas falanges	L_A	25,00	mm
Altura de aplicación de un resorte de fuerza constante hasta la articulación B	h_B	8,57	mm
Masa total del dedo índice	m_B	60,00	gr
Masa del conjunto formado por la falange intermedia y la distal	m_A	30,00	gr
Gravedad terrestre	g	9,81	m/s ²
Ángulo para precargar un resorte de torsión	θ_o	90,00	°
Ángulo de flexión a recorrer por un resorte de torsión	θ_1	90,00	°
Ángulo máximo otorgado por el resorte de torsión	$\theta_{m\acute{a}x}$	270,00	°

Tabla 4. Datos empleados para la selección de los resortes

Para la obtención de las ecuaciones se realiza el Diagrama del Sólido Libre de cada falange, siguiendo el esquema mostrado en la Figura 111.

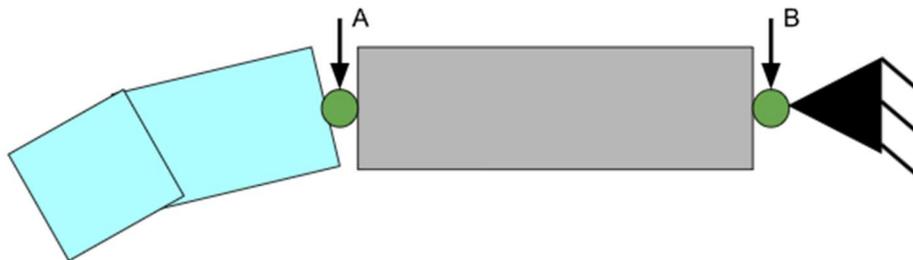


Figura 111. Esquema del dedo índice

En primera instancia, para el desarrollo del cálculo del resorte de posición la B respecto a la Hipótesis 1, puede considerarse solamente la falange proximal, sin obviar el peso adicional de la distal y sus elementos. Obteniendo un esquema como el mostrado en la Figura 112. Seguimiento del Diagrama del Sólido Libre (DSL) de la falange distal mostrado en la Figura 113, también respecto a la primera hipótesis.

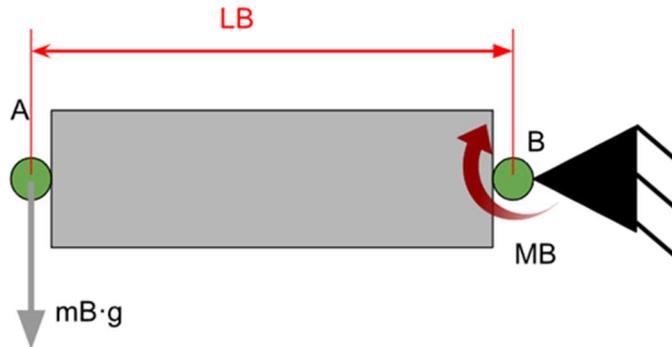


Figura 112. Esquema para el cálculo del Resorte B en H1

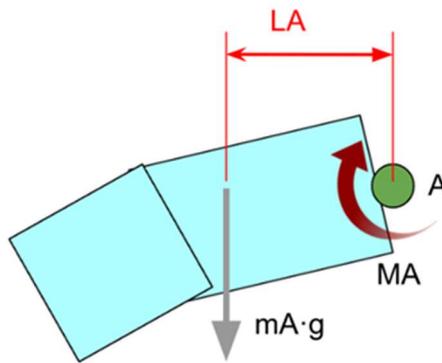


Figura 113. Esquema para el cálculo del Resorte A en H1

La resolución de la segunda hipótesis únicamente concierne a la falange distal, por lo que es más que suficiente estudiar su DSL, como en el caso anterior, añadiendo la carga generada por el resorte en la posición B. Dando como resultado el esquema de la Figura 114.

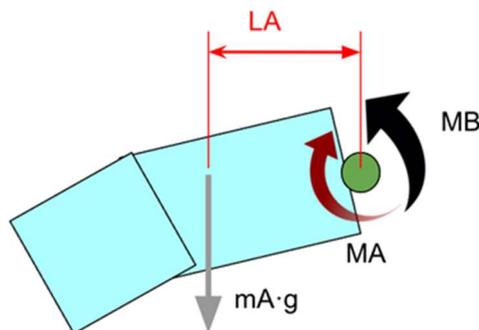


Figura 114. Esquema para el cálculo del Resorte A en H2

De esta manera, se llega a los sumatorios de momentos expuestos en las ecuaciones 1(1 y 2 considerando Hip.1 y la ecuación 3 considerando Hip. 2.

$$MA_{H1} = m_A \cdot g \cdot L_A \quad (1)$$

$$MB_{H1} = m_B \cdot g \cdot L_B \quad (2)$$

$$MA_{H2} = m_A \cdot g \cdot L_A + MB_{H1} \quad (3)$$

Puede observarse que no se vuelve a calcular el par MB_{H2} . Esto se debe a que en la segunda hipótesis este muelle ya ha flexionado, por lo que ya no es necesario considerarlo.

Al acudir al catálogo de resortes de torsión hace falta realizar comparaciones del par máximo a alcanzar, pues son los parámetros que otorga el fabricante para la selección de estos. Considerando una variación lineal del par respecto del ángulo rotado, es posible obtener un valor aproximado de cuál sería el producto a solicitar.

En cambio, al acudir al catálogo de los resortes de fuerza constante, se debe realizar la comparativa de la fuerza lineal resistida por el mismo en caso de extensión.

Para la obtención de los valores necesarios a comparar con el producto propuesto en ambos catálogos, se emplean las ecuaciones 4, 5 y 6.

$$MA = \max(MA_{H1}; MA_{H2}) \quad (4)$$

$$FB = MB/h_B \quad (5)$$

$$MA_{m\acute{a}x} = MA \cdot \theta_{m\acute{a}x}/\theta_0 \quad (6)$$

Dato	Símbolo	Valor	Unidades	Ecuación
Par a cumplir por el resorte a poner en la posición A en H1	MA_{H1}	7,36	Nmm	(1)
Par a cumplir por el resorte a poner en la posición B en H1	MB_{H1}	29,43	Nmm	(2)
Par a cumplir por el resorte en la posición A en H2	MA_{H2}	36,79	Nmm	(3)
Par requerido por el resorte en la posición A	MA	36,79	Nmm	(4)
Par requerido por el resorte en la posición B	MB	29,43	Nmm	(2)
Fuerza requerida por el resorte en la posición B	FB	3,43	N	(5)
Par máximo otorgado por el resorte de torsión	$MA_{m\acute{a}x}$	110,36	Nmm	(6)

Tabla 5. Resultados obtenidos para la preselección de los resortes

A lo largo de estos cálculos, puede observarse que el resorte a seleccionar para la posición A depende del seleccionado para la posición B. De manera que se seleccionará el elemento de catálogo requerido para la primera posición, para el posterior recálculo del valor a cumplir por el resorte de la posición A y la selección de este. Dicho lo cual, en la Figura 115 se muestra el catálogo al que se ha recurrido para escoger el Resorte de Fuerza constante a instalar, indicando el elemento que cumple con las condiciones idóneas tras haber acotado entre la variedad de posibilidades presentadas.

Di	De	F _n	t	W	S1	Ciclos de vida útil	hm	Material	N° de stock
Díámetro interno (mm)	Díámetro externo (mm)	Carga máxima en N en Ln (N)	Grosor del material (mm)	Anchura banda (mm)	Tracción (mm)	(Piezas)	Orificio para acoplamiento (mm)		
8,25	10,75	3,70	0,10	7,90	333,00	4.000,00	3,30	Acero inoxidable 301	CF015-0083
9,50	12,75	4,60	0,13	7,90	372,00	4.000,00	3,30	Acero inoxidable 301	CF017-0103
13,00	16,50	4,98	0,15	9,40	457,00	4.000,00	3,30	Acero inoxidable 301	CF022-0112
26,00	30,00	4,20	0,20	12,70	691,00	25.000,00	5,00	Acero inoxidable 301	CF033-0094
59,50	63,50	4,98	0,30	20,57	610,00	40.000,00	4,70	Acero inoxidable 301	CF042-0112

Figura 115. Catálogo de Resortes de Fuerza constante presentado por la empresa Sodemann [24]

El resorte escogido se adecúa tanto en valor como en dimensiones, pues, esta última, es una de las mayores limitaciones en el proyecto presentado. Solamente quedaría recalcular el resorte de la posición A y repetir el proceso de selección para este. Para ello, se reúnen los datos necesarios para dicho cálculo en la Tabla 6.

Dato	Símbolo	Valor	Unidades
Fuerza resistiva de catálogo del resorte instalado en B	FB	3,70 N	
Par a cumplir por el resorte a poner en la posición A en H1	MA_{H1}	7,36 Nmm	
Altura de aplicación de un resorte de fuerza constante hasta la articulación B	h_B	8,57 mm	
Ángulo para precargar un resorte de torsión	θ_o	90,00 °	
Ángulo de flexión a recorrer por un resorte de torsión	θ_1	90,00 °	
Ángulo máximo otorgado por el resorte de torsión	$\theta_{m\acute{a}x}$	270,00 °	

Tabla 6. Datos para el cálculo del Resorte de Torsión con valores de catálogo

Repetiendo el mismo procedimiento llevado a cabo para el cálculo previo de los resortes, se obtiene el nuevo valor del Resorte de Torsión a instalar en la posición A, mostrado en la Tabla 7, por lo que se emplean las mismas ecuaciones que las expuestas previamente además de la ecuación 7(7).

$$MB = FB \cdot h_B \quad (7)$$

Dato	Símbolo	Valor	Unidades	Ecuación
Par resistivo del resorte instalado en B	MB	31,71 Nmm		(7)
Par requerido por el resorte en la posición A	MA	39,07 Nmm		(4)
Par máximo requerido por el resorte en la posición A	$MA_{m\acute{a}x}$	117,20 Nmm		(6)

Tabla 7. Resultados para la selección del Resorte de Torsión

Obteniendo este valor y considerando las limitaciones de diseño expuestas en el apartado Especificaciones de diseño, se toma la decisión de seleccionar el resorte marcado en la Figura 116.

Material	d Diámetro del alambre (mm)	De Diámetro externo (mm)	Di Diámetro interno (mm)	Ddmax Eje máx. (mm)	n Bobinas elásticas (Piezas)	Ls1 Longitud de la pata (mm)	αn Giro máx. (grados)	Mn Par máx. (N mm)	Nº de stock	
Acero inoxidable 302	0,97	8,97	7,03	5,54	9,75	31,80	270,00	134,50	T038-270-218L	
Acero inoxidable 302	0,97	8,97	7,03	5,54	9,75	31,80	270,00	134,50	T038-270-218R	
Acero inoxidable 302	0,97	12,12	10,18	7,92	6,75	31,80	270,00	134,50	T038-270-312L	
Acero inoxidable 302	0,97	12,12	10,18	7,92	6,75	31,80	270,00	134,50	T038-270-312R	
Acero inoxidable 302	0,89	7,90	6,12	4,75	9,75	31,80	270,00	113,00	T035-270-187L	
Acero inoxidable 302	0,89	7,90	6,12	4,75	9,75	31,80	270,00	113,00	T035-270-187R	
Acero inoxidable 302	0,89	11,05	9,27	7,14	6,75	31,80	270,00	113,00	T035-270-281L	
Acero inoxidable 302	0,89	11,05	9,27	7,14	6,75	31,80	270,00	113,00	T035-270-281R	

Figura 116. Catálogo de Resortes de torsión presentado por la empresa Sodemann [24]

A continuación, en la Tabla 8 se presentan los valores de los resortes de catálogo escogidos tras los cálculos realizados.

Dato	Símbolo	Valor	Unidades
Fuerza resistiva del resorte instalado en B	FB	3,70	N
Par máximo resistivo del catálogo del resorte instalado en A	$MA_{máx}$	135,00	Nmm

Tabla 8. Valores de catálogo de los resortes seleccionados

1.1.2. Sistema de accionamiento en carga máxima

Resulta de vital importancia el cálculo de la fuerza requerida por el Tendón para el cumplimiento de todos los agarres a realizar. En este documento se plantea la realización del agarre de tipo pinza y pinza lateral, casos que casi no requieren de fuerza de presión; aunque se realiza el cálculo con la carga más elevada a cumplir por la mano completa para servir de base para el proyecto principal. Adicionalmente, se debe tener en cuenta el par resistivo generado por los

resortes al flexionar el dedo, teniendo una situación en la que el Tendón de accionamiento debe compensar tanto la carga de agarre como la resistencia de ambos resortes.

Dicho lo cual, en la Tabla 9 se leen los datos iniciales necesarios para los cálculos de la fuerza a compensar por el Tendón, empleando, así, las ecuaciones 8 y 9.

$$MA_{crit} = MA_{m\acute{a}x} \cdot \theta_{crit} / \theta_{m\acute{a}x} \quad (8)$$

$$T_{crit} = (MA_{crit} + MB) / h_T + FT_{m\acute{a}x} \quad (9)$$

Dato	Símbolo	Valor	Unidades
Par resistivo del resorte instalado en B	MB	31,71	Nmm
Ángulo de flexión del resorte A en situación crítica	θ_{crit}	166,64	°
Altura de paso del tendón	h_T	5,75	mm
Fuerza requerida por el tendón para cumplir agarre de carga máxima	$FT_{m\acute{a}x}$	38,57	N

Tabla 9. Datos para el cálculo del sistema de accionamiento en carga máxima

La Tabla 10 muestra los resultados obtenidos al sustituir los datos iniciales en las ecuaciones nombradas. Estos valores serán necesarios para la selección del sistema de accionamiento necesario para la flexión del índice.

Dato	Símbolo	Valor	Unidades	Ecuación
Par resistivo del resorte instalado en A en situación crítica	MA_{crit}	83,32	Nmm	(8)
Fuerza del tendón necesaria para el cumplimiento de situación crítica	T_{crit}	58,58	N	(9)

Tabla 10. Resultados del cálculo para el cumplimiento de accionamiento en carga máxima

1.1.3. Sistema de flexión

Empleando las ecuaciones básicas para la transmisión de Potencia mecánica entre engranajes, puede calcularse la fuerza de salida obtenida en el tendón en función de la potencia del motor, la relación de velocidad en el conjunto sinfín-corona y la distancia a la que se ancla dicho tendón. Para ello, se emplean las ecuaciones 10, 11, 12 y 13 junto con los parámetros expuestos en la Tabla 11, los cuales son empleados para la preparación de dichas ecuaciones. Más adelante se mostrarán la tabla que recoge los datos a sustituir por estos parámetros.

Dato	Símbolo	Valor	Unidades
Par otorgado por el motor	M_{in}	-	Nmm
Velocidad angular del eje del motor	ω_{in}	-	rpm
Potencia otorgada por el motor	H_{in}	-	W
Par de salida del conjunto de engranes	M_{out}	-	Nmm

Velocidad angular de salida del conjunto de engranes	ω_{out}	-	rpm
Potencia de salida del conjunto de engranes	H_{out}	-	W
Distancia de anclaje del tendón	d_T	-	Mm

Tabla 11. Parámetros para el cálculo de los motores requeridos

Estos parámetros serán sustituidos, posteriormente, por los valores presentados en la Tabla 12 según los datos recogidos del catálogo de la empresa *Pololu*, mostrados en la Figura 117, y *KHK Gears*, visualizados los Tornillos sinfín en la Figura 118 y sus coronas en la Figura 119, siendo:

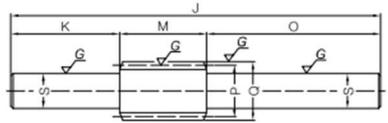
- Motor 1: Motor DC de 6 Voltios y Alta potencia de reducción 30:1.
- Motor 2: Motor DC de 6 Voltios y Alta potencia de reducción 50:1.
- Motor 3: Motor DC de 6 Voltios y Alta potencia de reducción 75:1.
- SC1: Reducción sinfín-corona 30:1.
- SC2: Reducción sinfín-corona 40:1.
- SC3: Reducción sinfín-corona 50:1.

Motor Type	Rated Voltage	Pololu Item #	Gear Ratio	No Load		At Maximum Efficiency					Max Power	Stall Extrapolation ⁽²⁾	
				Speed	Current	Speed	Torque	Current	Output	Efficiency		Torque	Current
				:1	RPM (±20%)	mA (±50%)	RPM	kg·mm	A	W		%	W
High-Power (HP 6V)	6 V	1000, 2210	4.995	6100	120	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	- ⁽¹⁾	1.6	1.1	1.6
		999, 2211	9.96	3100	100	2300	0.46	0.42	1.1	43	1.6	2.2	
		4784, 4785	15.25	2000		1600	0.58	0.37	0.95	42	1.5	3.0	
		1093, 2212	29.86	1000		830	1.0	0.36	0.89	41	1.5	5.7	
		998, 2213	51.45	590		490	1.5	0.32	0.75	38	1.3	8.6	
		2361, 2215	75.81	410		340	2.3	0.34	0.80	40	1.4	13	
		1101, 2214	100.37	310		250	2.9	0.33	0.73	37	1.3	17	
		997, 2386	150.58	210		170	3.9	0.31	0.68	37	1.2	24	
		996, 2216	210.59	150		120	5.0	0.32	0.62	32	1.1	30	
		995, 2217	248.98	120		100	5.5	0.30	0.59	32	1.1	34	
		994, 2218	297.92	100		87	6.5	0.31	0.58	31	1.1	40	
		4794, 4795	379.17	84		70	8.4	0.28	0.61	36	- ⁽³⁾	55	
		1595, 2373	986.41	31		26	20	0.32	0.53	28	- ⁽⁴⁾	120	

Figura 117. Catálogo Pololu micro metal Gearmotors [30]



Specifications	
Precision grade	KHK W 001 grade 2
Reference section of gear	Axial direction
Gear teeth	Standard full depth
Normal pressure angle	20°
Material	SCM440
Heat treatment	Thermal refined, gear teeth induction hardened
Tooth hardness	50 to 60HRC



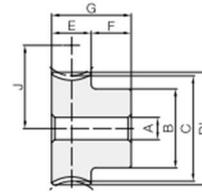
W5

Catalog Number	Axial module	Number of Starts	Nominal lead angle	Direction of helix	Shape	Total Length	Shaft length (L)	Neck length (left)	Face width	Neck length (right)	Shaft length (R)	Pitch dia.
						J	K	L	M	N	O	P
KWG0.5-R1 KWG0.5-R2	m0.5	1 2	3°11' 6°20'	R	W5	65	19	—	12	—	34	9
KWG0.8-R1 KWG0.8-R2	m0.8	1 2	3°49' 7°36'	R	W5	85	25	—	20	—	40	12

Figura 118. Catálogo KHK Gears del Tornillo sinfín [26]



Specifications	
Precision grade	KHK W 002 grade 2
Reference section of gear	Rotating plane
Gear teeth	Standard full depth
Normal pressure angle	20°
Material	CAC702 (old JIS A 2 BC2)
Heat Treatment	—
Tooth hardness	—



HA

Catalog Number	Reduction ratio	Transverse module	No. of teeth	No. of starts of mating worm	Lead angle	Direction of helix	Shape	Bore	Hub dia.	Pitch dia.	Throat dia.	Outside dia.	Face width	Hub width
								A _{H7}	B	C	D	D'	E	F
AG0.5-20R1	20	m0.5	20	1	3°11'	R	HA	4	9	10	—	11	5	7
AG0.5-20R2	10		20	2	6°20'			4	9	10		11		
AG0.5-30R1	30		30	1	3°11'			4	12	15		16		
AG0.5-30R2	15		30	2	6°20'			4	12	15		16		
AG0.5-40R1	40		40	1	3°11'			5	15	20		21		
AG0.5-50R1	50		50	1	3°11'			5	20	25		26		
AG0.5-60R1	60	60	1	3°11'	5	25	30	31						
AG0.8-20R1	20	m0.8	20	1	3°49'	R	HA	5	12	16	—	17.6	8	8
AG0.8-20R2	10		20	2	7°36'			5	12	16		17.6		
AG0.8-30R1	30		30	1	3°49'			5	18	24		25.6		
AG0.8-30R2	15		30	2	7°36'			5	18	24		25.6		
AG0.8-40R1	40		40	1	3°49'			6	20	32		33.6		
AG0.8-50R1	50		50	1	3°49'			8	25	40		41.6		
AG0.8-60R1	60	60	1	3°49'	8	25	48	49.6						

Figura 119. Catálogo de KHK Gears de la corona para el sinfín [26]

Dato	Símbolo	Valor	Unidades
Par otorgado por el motor 1	M_1	10,00	Nmm
Velocidad angular del eje del motor 1	ω_1	830,00	rpm
Potencia otorgada por el motor 1	H_1	0,87	W
Par otorgado por el motor 2	M_2	14,72	Nmm
Velocidad angular del eje del motor 2	ω_2	490,00	rpm
Potencia otorgada por el motor 2	H_2	0,76	W
Par otorgado por el motor 3	M_3	22,56	Nmm
Velocidad angular del eje del motor 3	ω_3	340,00	rpm
Potencia otorgada por el motor 3	H_3	0,80	W
Módulo de transmisión del conjunto sinfín-corona	m_{SC}	0,50	-
Eficiencia del conjunto sinfín-corona	η_{SC}	35,00	%
Diámetro interno de la corona	D_i	4,00	mm
Relación de velocidad del conjunto sinfín-corona 1	SR_1	0,03	-
Diámetro externo de la corona 1	D_1	15,00	mm
Relación de velocidad del conjunto sinfín-corona 2	SR_2	0,03	-
Diámetro externo de la corona 2	D_2	20,00	mm
Relación de velocidad del conjunto sinfín-corona 3	SR_3	0,02	-
Diámetro externo de la corona 3	D_3	25,00	mm

Tabla 12. Datos de catálogo de los motores Pololu y engranes KHK

La Figura 120 muestra el esquema del accionamiento del dedo índice, determinando el sentido de giro de la corona empleada y la dirección de salida del tendón hacia el índice.

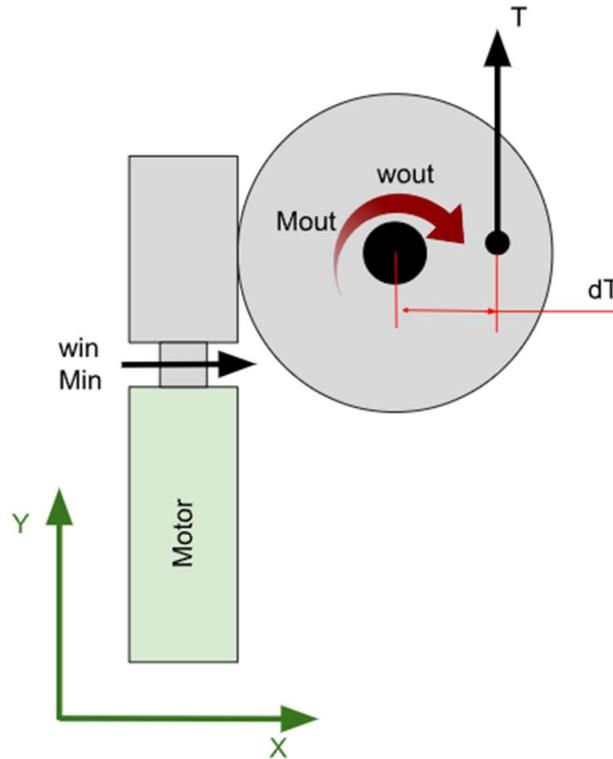


Figura 120. Esquema de la transmisión del accionamiento del índice

Para el cálculo de Momentos estáticos se considera el centro geométrico de la corona como punto de referencia siguiendo el criterio de signos mostrado en la misma Figura 120, siendo el sentido positivo del eje Z (eje perpendicular a los ejes X e Y) el que sale del papel. Teniendo en cuenta estas características, se plantean las ecuaciones 10, 11, 12 y 13.

$$M_{out} = M_{in} \cdot SR \cdot \eta_{SC} \quad (10)$$

$$w_{out} = w_{in} \cdot SR \quad (11)$$

$$H_{out} = H_{in} \cdot SR \quad (12)$$

$$M_{out} = T_{out} \cdot dT \quad (13)$$

Despejando la tensión de salida del tendón en la ecuación 13, se obtiene la ecuación 14. Pero esta ecuación por sí sola no aporta mucha información, pues el parámetro dT puede variar desde radio nulo hasta el radio máximo que permite la corona del conjunto. De tal manera que pueden diferenciarse las ecuaciones 15 y 16, según el valor límite de radio aplicado.

$$T_{out} = M_{out} / dT \quad (14)$$

$$T_{m\acute{a}x} = M_{out} / \frac{Di}{2} \quad (15)$$

$$T_{min} = \frac{M_{out}}{\frac{De}{2}} \quad (16)$$

Mediante estas ecuaciones y los datos recogidos en la Tabla 12, se ha realizado una serie de iteraciones para obtener los valores pertinentes de cada una de las combinaciones posibles. Dichos valores se recogen en la Tabla 13.

Dato	Símbolo	Valor	Unidades	Ecuación
Motor 1 y SC1	Par de salida	$M_{out_{1,1}}$	105,00 Nmm	(10)
	Velocidad angular de salida	$\omega_{out_{1,1}}$	27,67 rpm	(11)
	Potencia de salida	$H_{out_{1,1}}$	0,30 W	(12)
	Tensión máxima alcanzable	$T_{m\acute{a}x_{1,1}}$	52,50 N	(14)
	Tensión mínima alcanzable	$T_{min_{1,1}}$	14,00 N	(14)
Motor 1 y SC2	Par de salida	$M_{out_{1,2}}$	140,00 Nmm	(10)
	Velocidad angular de salida	$\omega_{out_{1,2}}$	20,75 rpm	(11)
	Potencia de salida	$H_{out_{1,2}}$	0,30 W	(12)
	Tensión máxima alcanzable	$T_{m\acute{a}x_{1,2}}$	70,00 N	(14)
	Tensión mínima alcanzable	$T_{min_{1,2}}$	14,00 N	(14)
Motor 1 y SC3	Par de salida	$M_{out_{1,3}}$	175,00 Nmm	(10)
	Velocidad angular de salida	$\omega_{out_{1,3}}$	16,60 rpm	(11)
	Potencia de salida	$H_{out_{1,3}}$	0,30 W	(12)
	Tensión máxima alcanzable	$T_{m\acute{a}x_{1,3}}$	87,50 N	(14)
	Tensión mínima alcanzable	$T_{min_{1,3}}$	14,00 N	(14)
Motor 2 y SC1	Par de salida	$M_{out_{2,1}}$	154,51 Nmm	(10)
	Velocidad angular de salida	$\omega_{out_{2,1}}$	16,33 rpm	(11)
	Potencia de salida	$H_{out_{2,1}}$	0,27 W	(12)
	Tensión máxima alcanzable	$T_{m\acute{a}x_{2,1}}$	77,25 N	(14)
	Tensión mínima alcanzable	$T_{min_{2,1}}$	20,60 N	(14)
Motor 2 y SC2	Par de salida	$M_{out_{2,2}}$	206,01 Nmm	(10)
	Velocidad angular de salida	$\omega_{out_{2,2}}$	12,25 rpm	(11)
	Potencia de salida	$H_{out_{2,2}}$	0,27 W	(12)
	Tensión máxima alcanzable	$T_{m\acute{a}x_{2,2}}$	103,01 N	(14)
	Tensión mínima alcanzable	$T_{min_{2,2}}$	20,60 N	(14)
Motor 2 y SC3	Par de salida	$M_{out_{2,3}}$	257,51 Nmm	(10)
	Velocidad angular de salida	$\omega_{out_{2,3}}$	9,80 rpm	(11)

	Potencia de salida	$H_{out_{2,3}}$	0,27 W	(12)
	Tensión máxima alcanzable	$T_{m\acute{a}x_{2,3}}$	128,76 N	(14)
	Tensión mínima alcanzable	$T_{m\acute{i}n_{2,3}}$	20,60 N	(14)
Motor 3 y SC1	Par de salida	$M_{out_{3,1}}$	236,91 Nmm	(10)
	Velocidad angular de salida	$\omega_{out_{3,1}}$	11,33 rpm	(11)
	Potencia de salida	$H_{out_{3,1}}$	0,28 W	(12)
	Tensión máxima alcanzable	$T_{m\acute{a}x_{3,1}}$	118,46 N	(14)
	Tensión mínima alcanzable	$T_{m\acute{i}n_{3,1}}$	31,59 N	(14)
	Par de salida	$M_{out_{3,2}}$	315,88 Nmm	(10)
Motor 3 y SC2	Velocidad angular de salida	$\omega_{out_{3,2}}$	8,50 rpm	(11)
	Potencia de salida	$H_{out_{3,2}}$	0,28 W	(12)
	Tensión máxima alcanzable	$T_{m\acute{a}x_{3,2}}$	157,94 N	(14)
	Tensión mínima alcanzable	$T_{m\acute{i}n_{3,2}}$	31,59 N	(14)
	Par de salida	$M_{out_{3,3}}$	394,85 Nmm	(10)
	Motor 3 y SC3	Velocidad angular de salida	$\omega_{out_{3,3}}$	6,80 rpm
Potencia de salida		$H_{out_{3,3}}$	0,28 W	(12)
Tensión máxima alcanzable		$T_{m\acute{a}x_{3,3}}$	197,43 N	(14)
Tensión mínima alcanzable		$T_{m\acute{i}n_{3,3}}$	31,59 N	(14)

Tabla 13. Resultados de las combinaciones de motor y sinfin-corona

Comparando los valores de $T_{m\acute{a}x}$ obtenidos con el calculado en la Tabla 10, puede escogerse el conjunto Motor+SC que más se adecúa para cumplir tanto con las fuerzas de agarre como con las características expuestas en el apartado Especificaciones de diseño.

Siendo el sistema seleccionado para el funcionamiento del dedo índice el compuesto por el Motor 3 y SC1, más concretamente:

- Pololu 75:1 Micro Metal Gearmotor HP 6V
- KHK Worm gear KWG0.5R1-AG0.5-30R1

Conociendo esta información, se es posible calcular el valor de la distancia a la que hay que anclar el Tendón a la corona, desde el centro de la misma como se veía en la Figura 120, para la compensación de T_{crit} . Realizando otro despeje en la ecuación 13 se obtiene la ecuación 17, mediante la cual se puede calcular dicha distancia.

$$dT [mm] = M_{out} / T_{out} = 4,04 \quad (17)$$

1.1.4. Comprobación del sistema de accionamiento en vacío

Una vez seleccionado el sistema de accionamiento de la flexión del índice, se debe comprobar si es capaz de cumplir con las condiciones de funcionamiento en vacío. Como una de las tareas a cumplimentar es la flexión completa del dedo índice en t segundos, se debe obtener el tiempo que realmente tardará el sistema seleccionado en realizar el desplazamiento descrito. También debe tenerse en cuenta que el Resorte de Torsión otorga un par resistivo dependiente del ángulo recorrido, por lo que también es tema de estudio en este apartado al encontrarse con una torsión total de 180° aproximadamente.

Debe contemplarse que la distancia a la que se ancle el Tendón debe ser tal que cumpla con el requisito de carga máxima, calculado previamente, y de tiempo requerido para el desplazamiento en vacío. Esto quiere decir que el caso más crítico será el que limite este valor, debiéndose obtener el número de vueltas a rotar por la Corona para enrollar filamento suficiente como para realizar la flexión completa.

Para ello, se emplean los datos recopilados en la Tabla 14 para su posterior sustitución en las ecuaciones 18, 19, 20 y 21, para el cálculo del radio de anclaje, además de las 22 y 23, para obtener el tiempo de flexión; debiendo haber sido medida la variación de longitud del filamento empleado en la flexión del índice, previamente. Dando como resultado los valores mostrados en la Tabla 15.

Dato	Símbolo	Valor	Unidades
Par otorgado por el motor	M_m	236,91	Nmm
Velocidad angular del eje del motor	ω_m	11,33	rpm
Potencia otorgada por el motor	H_m	0,28	W
Par resistivo del resorte instalado en B	MB	31,71	Nmm
Ángulo para precargar un resorte de torsión	θ_0	90,00	°
Ángulo de flexión a recorrer por un resorte de torsión	θ_1	90,00	°
Ángulo máximo otorgado por el resorte de torsión	$\theta_{m\acute{a}x}$	270,00	°
Par máximo resistivo del catálogo del resorte instalado en A	$MA_{m\acute{a}x}$	135,00	Nmm
Fuerza del tendón necesaria para el cumplimiento de situación crítica	T_{crit}	58,58	N
Altura de paso del tendón	h_T	5,75	mm
Tiempo de objetivo de la flexión completa	t_{obj}	1,5	seg.
Diferencia de longitud del tendón	ΔL_T	9,01	mm

Tabla 14. Datos para el cálculo del desplazamiento del dedo índice en vacío

$$M_T = MB + MA_{m\acute{a}x} \cdot (\theta_0 + \theta_1) / \theta_{m\acute{a}x} \quad (18)$$

$$T_0 = M_T / h_T \quad (19)$$

$$T = \acute{m}ax(T_{crit}; T_0) \quad (20)$$

$$d_T = M_T / T \quad (21)$$

$$n = \Delta L_T / d_T \cdot 2\pi \quad (22)$$

$$t = n / \frac{\omega_m}{60} \quad (23)$$

Dato	Símbolo	Valor	Unidades	Ecuación
Par requerido por el tendón en vacío	M_T	121,71	Nmm	(18)
Fuerza requerida por el tendón en vacío	T_0	21,17	N	(19)
Tensión a obtener para cumplir ambos requisitos	T	58,58	N	(20)
Distancia máxima de anclaje del tendón	d_T	4,04	mm	(21)
Revoluciones para cumplimiento del tiempo de flexión completa	n	0,35	Rev.	(22)
Tiempo requerido para flexión completa	t	1,88	seg.	(23)

Tabla 15. Resultados del cálculo del desplazamiento del dedo índice en vacío

Como puede observarse, el cumplimiento de la condición de tiempo es algo inviable de conseguir si no se pierde algún agarre. Pero se opta por llegar a un diseño funcional y capaz frente a situaciones reales en vez de conseguir flexionar el dedo en poco tiempo.

1.2. Dedo pulgar

Como se ha comentado anteriormente, el dedo pulgar consta de dos movimientos característicos:

- La abducción y la aducción
- La flexión

Llevar a cabo el primer tipo de desplazamiento requiere de poca potencia, pues es un movimiento sin cargas, únicamente para posicionar el dedo en la orientación correcta para su posterior flexión o la devolución del dedo a una postura extendida. El movimiento de flexión si solicita una mayor potencia, pues debe soportar las cargas generadas al llevar a cabo los distintos agarres.

1.2.1. Sistema de abducción-aducción

El sistema que otorga al mecanismo la posibilidad de replicar el movimiento de abducción-aducción debe ser capaz de rotar el dedo, en su totalidad, respecto del eje de giro. Para ello se considera la hipótesis expuesta a continuación:

- Hipótesis 1: el dedo pulgar se encuentra extendido, con su eje geométrico coincidente con un plano paralelo al plano horizontal de la mano tal y como se muestra en la Figura 121.

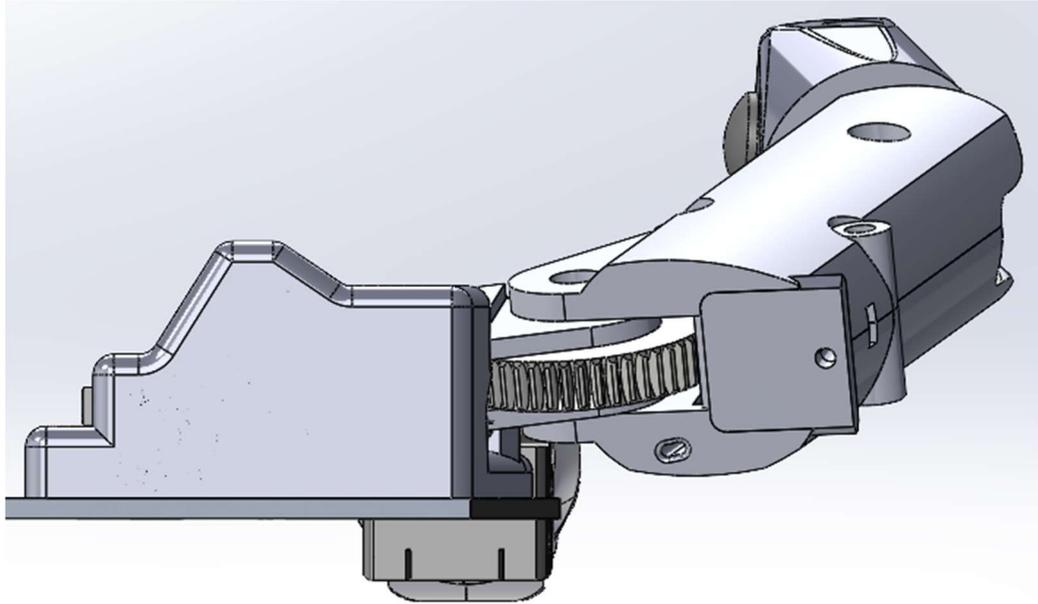


Figura 121. Posición del pulgar en Hipótesis 1

Comenzando con la Hipótesis 1, se puede simplificar la situación del dedo pulgar a un esquema como el mostrado en la Figura 122, obteniéndose la ecuación 24 al realizar un análisis estático de Momentos en el punto de unión A y la 25 al transformar la masa del pulgar en una fuerza debida al efecto de la gravedad.

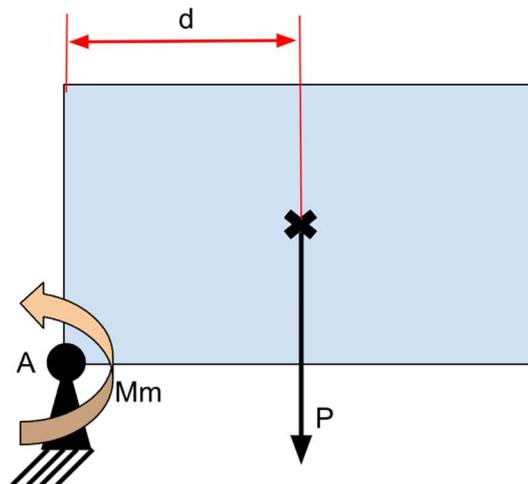


Figura 122. Esquema del pulgar en Hipótesis 1

$$M_{H1} = P \cdot d \quad (24)$$

$$P = m_p \cdot g \quad (25)$$

Para completar la resolución de la Hipótesis 1 se debe obtener la potencia de entrada al sistema de transmisión desde el motor. Esta potencia es la necesaria para cumplir con las condiciones de esta primera hipótesis, dando pie a las ecuaciones 26, 27 y 28 según el esquema de la Figura 123.

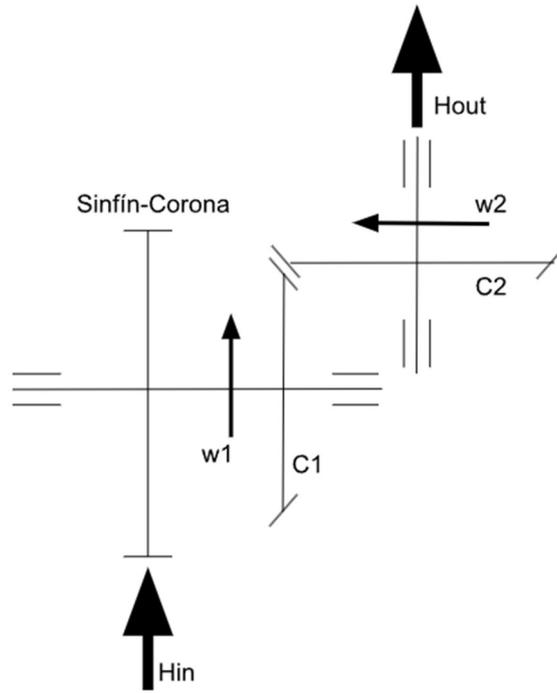


Figura 123. Esquema de la transmisión de potencia para la abducción del dedo pulgar

$$Mout_{H1} = M_{H1} \cdot i_c \quad (26)$$

$$i_c = z_1/z_2 \quad (27)$$

$$Mm_1 = Mout_{H1} \cdot SR/\eta_{SC} \quad (28)$$

Empleando los datos recopilados en la Tabla 16 para sustituirlos en las ecuaciones anteriores, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 17. Los datos pertinentes a los elementos de transmisión se han obtenido de los catálogos presentados previamente para la selección del sistema de flexión del índice (Figura 117 y Figura 118).

Dato	Símbolo	Valor	Unidades
Masa del dedo pulgar	m_p	32,000 g	
Distancia desde el cgd del pulgar en el plano estudiado hasta el punto A	d	30,000 mm	
Gravedad terrestre	g	9,810 m/s ²	
Número de dientes del Engranaje cónico conductor	z_1	20,000 dientes	
Número de dientes del Engranaje cónico conducido	z_2	20,000 dientes	
Eficiencia mecánica del conjunto sinfín-corona	η_{SC}	35,00 %	
Relación de transmisión del conjunto sinfín-corona 1:30	SR_1	0,033 -	
Relación de transmisión del conjunto sinfín-corona 1:40	SR_2	0,025 -	
Relación de transmisión del conjunto sinfín-corona 1:50	SR_3	0,020 -	

Tabla 16. Datos para el cálculo del sistema de abducción-aducción del pulgar

Dato	Símbolo	Valor	Unidades	Ecuación
Relación de transmisión del conjunto de engranajes cónicos	i_c	1,00	-	(27)
Peso del dedo pulgar en H1	P	0,31	N	(25)
Par resistivo generado por el peso del dedo pulgar	M_{H1}	9,418	Nmm	(24)
Par requerido por el motor según SC 1:30 en H1	$Mm_{H1,1}$	0,897	Nmm	(28)
Par requerido por el motor según SC 1:40 en H1	$Mm_{H1,2}$	0,673	Nmm	(28)
Par requerido por el motor según SC 1:50 en H1	$Mm_{H1,3}$	0,538	Nmm	(28)

Tabla 17. Resultados del sistema de Abducción-aducción del pulgar

Acudiendo al catálogo presentado previamente en la Figura 117 con los resultados obtenidos, puede observarse que el primer motor que cumple con el par es el primero, el 5:1 Micro Metal Gearmotor HP. A pesar de esto, se decide emplear un motor más potente para cubrir cualquier tipo de situación planteada por el usuario, además de unificar el montaje y reducir las probabilidades de equivocación durante el montaje. Por lo que se plantea el uso del mismo motor que el seleccionado para la flexión del dedo pulgar y su conjunto sinfín-corona, los cuales se decidirán más adelante.

1.2.2. Sistema de flexión

El sistema de flexión debe ser capaz de llevar a cabo todos los tipos de agarres expuestos anteriormente, además de soportar las máximas cargas generadas por los objetos más pesados o por los agarres más críticos. De esta manera, se considera la hipótesis expuesta a continuación:

- Hipótesis 2: el pulgar se desplaza a la posición pertinente para la ejecución del agarre que más fuerza de apriete requiere, para llevar a cabo dicho agarre sin perder el objeto. La Figura 124 muestra la ejecución del agarre estudiado.

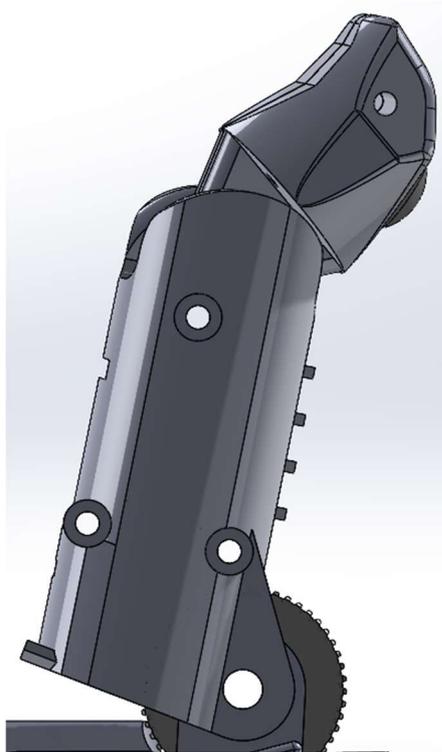


Figura 124. Posición del pulgar para la realización del agarre de Hipótesis 2

Esta segunda hipótesis se resuelve relacionando la transmisión desde el motor al dedo pulgar, considerando la carga necesaria para cumplir el agarre más crítico. El cálculo de dicho agarre no es parte de este documento, aunque para el proyecto global sí fue realizado por otro miembro del equipo. Considerando el esquema de la Figura 125, donde se tiene en cuenta la distancia de aplicación de la carga crítica descrita previamente, se obtiene la ecuación 29 al aplicar el análisis estático de momentos sobre el punto B.

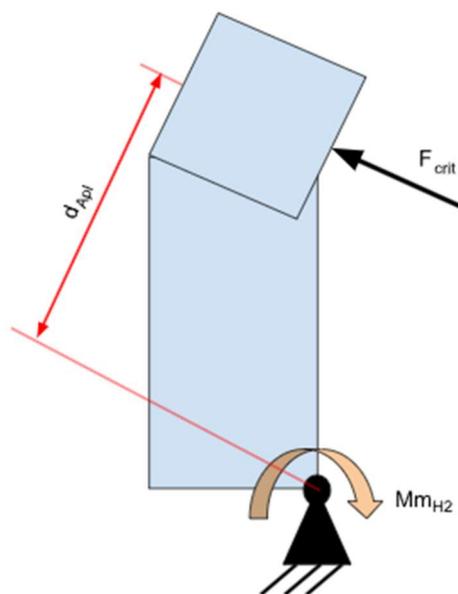


Figura 125. Esquema de la flexión del dedo pulgar en Hipótesis 2

$$M_{H2} = F_{crit} \cdot d_{Apl} \quad (29)$$

Tras estas consideraciones y el sistema de transmisión mostrado en los apartados del diseño mecánico, se obtiene la ecuación 30, pues la transmisión de potencia es directa. Esto se debe a que el motor debe poder vencer, como mínimo, el par generado por dicho agarre.

$$Mm_{H2} = M_{H2} \cdot SR/\eta_{SC} \quad (30)$$

Considerando estas ecuaciones y los datos mostrados en la Tabla 18, pueden obtenerse los valores expuestos en la Tabla 19 para la posterior selección del sistema de flexión a emplear.

Dato	Símbolo	Valor	Unidades
Distancia desde el punto de aplicación de la fuerza de agarre hasta el punto A	d_{Apl}	30,000	mm
Fuerza de apriete para sostener el objeto de agarre crítico	F_{crit}	6,72	N
Número de dientes del Engranaje cónico conductor	z_1	20,000	dientes
Número de dientes del Engranaje cónico conducido	z_2	20,000	dientes
Eficiencia mecánica del conjunto sinfín-corona	η_{SC}	35,00	%
Relación de transmisión del conjunto sinfín-corona 1:30	SR_1	0,033	-
Relación de transmisión del conjunto sinfín-corona 1:40	SR_2	0,025	-
Relación de transmisión del conjunto sinfín-corona 1:50	SR_3	0,020	-

Tabla 18. Datos para el cálculo del sistema de flexión del pulgar

Dato	Símbolo	Valor	Unidades	Ecuación
Relación de transmisión del conjunto de engranajes cónicos	i_c	1,00	-	(27)
Par de apriete para sostener el objeto de agarre crítico	M_{crit}	201,60	Nmm	(29)
Par requerido por el motor según SC 1:30 en H2	$Mm_{H2,1}$	19,20	Nmm	(30)
Par requerido por el motor según SC 1:40 en H2	$Mm_{H2,2}$	14,40	Nmm	(30)
Par requerido por el motor según SC 1:50 en H2	$Mm_{H2,3}$	11,52	Nmm	(30)

Tabla 19. Resultados del sistema de flexión del pulgar

En este caso, el motor seleccionado depende del conjunto sinfín-corona que presenta la reducción 1:50, pues así lo requiere el diseño. De manera que debe seleccionarse un motor que sea capaz de otorgar un par mayor o igual a $Mm_{H2,3}$.

Acudiendo de nuevo al catálogo de motores presentado en la Figura 117, se observa que el motor de ratio de reducción 50:1, aproximadamente, cumple con la situación planteada, pues este motor otorga un par de 1,5kg·mm que, haciendo una pequeña transformación de unidades, equivale a 14,715Nmm. Si bien el conjunto seleccionado es mucho mayor, en cuanto a potencia, que el planteado según los resultados de la Tabla 19, empleando un mecanismo más potente se

puede abarcar un mayor número de posibles usos que pueda darle el usuario y no se hayan planteado en los cálculos. Un ejemplo sería cargar una bolsa pesada únicamente por el dedo pulgar, o sostener un objeto excesivamente pesado.

1.3. Eficiencia del sistema

Como sucede con todo mecanismo, cada pareja de elementos de transmisión presenta un porcentaje de pérdida de potencia, por lo que cuanto más parejas de engranes se instalen, mucha menor eficiencia existirá en el sistema. De esta manera, se pretende obtener la eficiencia del sistema completo mediante las ecuaciones 31, 32 y 33, primero para el índice y, seguidamente, para el Pulgar tanto para el sistema de abducción como par el de flexión, empleando los datos de la Tabla 20 y recogiendo los resultados en la Tabla 21.

$$\eta_I = \eta_{SCI} \quad (31)$$

$$\eta_{PAbd} = \eta_C \cdot (\eta_{SCP}/100) \quad (32)$$

$$\eta_{PFlex} = \eta_{SCP} \quad (33)$$

Dato	Símbolo	Valor	Unidades
Eficiencia del conjunto SC seleccionado para el índice	η_{SCI}	35,00	%
Eficiencia del conjunto SC seleccionado para el pulgar	η_{SCP}	35,00	%
Eficiencia de la pareja de engranajes cónicos	η_C	66,00	%

Tabla 20. Datos para el cálculo de la eficiencia del sistema

Dato	Símbolo	Valor	Unidades	Ecuación
Eficiencia mecánica del índice	η_I	35,00	%	(31)
Eficiencia mecánica del sistema de abducción del pulgar	η_{PAbd}	23,10	%	(32)
Eficiencia mecánica del sistema de flexión del pulgar	η_{PFlex}	35,00	%	(33)

Tabla 21. Resultados de la eficiencia del sistema

Puede observarse que la eficiencia del sistema difiere mucho de la propuesta en el apartado de Especificaciones de diseño, siendo una pérdida de casi la mitad de la eficiencia propuesta. Esto proponiendo el caso más favorable de funcionamiento, pues deberían tenerse en cuenta pérdidas por rozamiento por el contacto entre los ejes de los elementos de transmisión y sus apoyos, además de las provocadas por el paso del tendón hacia su puno de fijado.

2. Código de programación

2.1. CAN-Sender

```
#include <CAN.h>
```

```

#include <WiFiNINA.h>
#include <utility/wifi_drv.h>

#define InicioParo    0x11
#define CambioMotor  0x12
#define HaceMotor    0x13
#define ActivoMotor   0x14

//Pines
int pulsAbre = A6;
int pulsCierra = A5;
int pulsCambio = A4;
int pulsGeneral = A3;

//Estados
int cualMotor = 0;
const boolean estadoMotor = 0;
boolean antirretorno = 0;
boolean inicio = 0;

//Dirección
const boolean turnCW = 0;
const boolean turnCCW = 1;

//Motores
static int MotorA = 0;    //Abducción Pulgar
static int MotorB = 1;    //Flexión Índice
static int MotorC = 2;    //Flexión Pulgar

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  if (!CAN.begin(500E3)) {
    while (1);
  }
  pinMode(pulsAbre, INPUT);
  pinMode(pulsCierra, INPUT);
  pinMode(pulsCambio, INPUT);
}

```

```

pinMode(pulsGeneral, INPUT);
WiFiDrv::pinMode(25, OUTPUT); //define green pin
WiFiDrv::pinMode(26, OUTPUT); //define red pin
WiFiDrv::pinMode(27, OUTPUT); //define blue pin
}

void loop() {
  if(digitalRead(pulsGeneral)==1){
    inicio = !inicio;
    while(digitalRead(pulsGeneral)==1){}
    CAN.beginPacket(InicioParo);
    CAN.write(inicio);
    CAN.endPacket();
  }
  if(inicio == 0){
    antirretorno = LOW;
  }
  if(inicio == 1){
    switch(cualMotor){
      case 0:
        if(digitalRead(pulsAbre)==1 && antirretorno==LOW){
          CAN.beginPacket(HaceMotor);
          CAN.write(turnCW);
          CAN.endPacket();
          CAN.beginPacket(ActivoMotor);
          CAN.write(!estadoMotor);
          CAN.endPacket();
          antirretorno = HIGH;
          while(digitalRead(pulsAbre)==1){}
        }

        if(digitalRead(pulsCierra)==1 && antirretorno==LOW){
          CAN.beginPacket(HaceMotor);
          CAN.write(turnCCW);
          CAN.endPacket();
          CAN.beginPacket(ActivoMotor);
          CAN.write(!estadoMotor);

```

```

    CAN.endPacket();
    antirretorno = HIGH;
    while(digitalRead(pulsCierra)==1){
}

    if((digitalRead(pulsAbre)==1 && antirretorno==HIGH) || (digitalRead(pulsCierra)==1
&& antirretorno==HIGH)){
        CAN.beginPacket(ActivoMotor);
        CAN.write(estadoMotor);
        CAN.endPacket();
        antirretorno = LOW;
        while((digitalRead(pulsAbre)==1) || digitalRead(pulsCierra)==1){
}

if(digitalRead(pulsCambio)==1 && antirretorno==LOW){
    while(digitalRead(pulsCambio)==1){
        cualMotor++;
        CAN.beginPacket(CambioMotor);
        CAN.write(cualMotor);
        CAN.endPacket();
    }
    break;

case 1:
if(digitalRead(pulsAbre)==1 && antirretorno==LOW){
    CAN.beginPacket(HaceMotor);
    CAN.write(turnCW);
    CAN.endPacket();
    CAN.beginPacket(ActivoMotor);
    CAN.write(!estadoMotor);
    CAN.endPacket();
    antirretorno = HIGH;
    while(digitalRead(pulsAbre)==1){
}

if(digitalRead(pulsCierra)==1 && antirretorno==LOW){
    CAN.beginPacket(HaceMotor);

```

```

    CAN.write(turnCCW);
    CAN.endPacket();
    CAN.beginPacket(ActivoMotor);
    CAN.write(!estadoMotor);
    CAN.endPacket();
    antirretorno = HIGH;
    while(digitalRead(pulsCierra)==1){
}

```

```

    if((digitalRead(pulsAbre)==1 && antirretorno==HIGH) || (digitalRead(pulsCierra)==1
&& antirretorno==HIGH)){
        CAN.beginPacket(ActivoMotor);
        CAN.write(estadoMotor);
        CAN.endPacket();
        antirretorno = LOW;
        while((digitalRead(pulsAbre)==1) || digitalRead(pulsCierra)==1){
}

```

```

if(digitalRead(pulsCambio)==1 && antirretorno==LOW){
    while(digitalRead(pulsCambio)==1){
        cualMotor++;
        CAN.beginPacket(CambioMotor);
        CAN.write(cualMotor);
        CAN.endPacket();
    }
    break;

```

```

case 2:
if(digitalRead(pulsAbre)==1 && antirretorno==LOW){
    CAN.beginPacket(HaceMotor);
    CAN.write(turnCW);
    CAN.endPacket();
    CAN.beginPacket(ActivoMotor);
    CAN.write(!estadoMotor);
    CAN.endPacket();
    antirretorno = HIGH;
    while(digitalRead(pulsAbre)==1){

```

```

}

if(digitalRead(pulsCierra)==1 && antirretorno==LOW){
    CAN.beginPacket(HaceMotor);
    CAN.write(turnCCW);
    CAN.endPacket();
    CAN.beginPacket(ActivoMotor);
    CAN.write(!estadoMotor);
    CAN.endPacket();
    antirretorno = HIGH;
    while(digitalRead(pulsCierra)==1){}
}

if((digitalRead(pulsAbre)==1 && antirretorno==HIGH) || (digitalRead(pulsCierra)==1
&& antirretorno==HIGH)){
    CAN.beginPacket(ActivoMotor);
    CAN.write(estadoMotor);
    CAN.endPacket();
    antirretorno = LOW;
    while((digitalRead(pulsAbre)==1) || digitalRead(pulsCierra)==1){}
}

if(digitalRead(pulsCambio)==1 && antirretorno==LOW){
    while(digitalRead(pulsCambio)==1){
        cualMotor++;
        if(cualMotor>=3){
            cualMotor = 0;
            CAN.beginPacket(CambioMotor);
            CAN.write(cualMotor);
            CAN.endPacket();
            return;
        }
    }
    break;
}
}
}

```

2.2. CAN-Receiver

```
#include <CAN.h>
#include <WiFiNINA.h>
#include <utility/wifi_drv.h>
#include <Adafruit_NeoPixel.h>

#define InicioParo      0x11
#define CambioMotor    0x12
#define HaceMotor      0x13
#define ActivoMotor    0x14

//Variables
boolean inicio = 0;
int motor = 0;
boolean hace = 0;
boolean activa = 0;
const boolean turnCW = 0;
const boolean turnCCW = 1;
int estadoLEDB = 0;
int estadoLEDC = 0;

//Motores
const int pinAIN1 = 0;    //Dirección A1
const int pinAIN2 = 1;    //Dirección A2
const int pinPWMA = 2;    //Potencia A
const int pinBIN1 = 3;    //Dirección B1
const int pinBIN2 = 3;    //Dirección B2
const int pinCIN1 = 5;    //Dirección C1
const int pinCIN2 = 6;    //Dirección C2

//Sensores
const int pinSensFB = A1;
const int pinNPB = A2;
const int pinSensFC = A3;
const int pinNPC = A4;

//velocidades
const int velCierra = 200;
const int velAbre = velCierra/2;
const int velAbd = 100;

//Límites de rango
int maxR1 = 246;          //2,5N
int maxR2 = 391;          //6,5N
int maxR3 = 466;          //10N

//NeoPixel
Adafruit_NeoPixel strip = Adafruit_NeoPixel(7, pinNPB, NEO_GRB + NEO_KHZ800);
Adafruit_NeoPixel pixel = Adafruit_NeoPixel(7, pinNPC, NEO_GRB + NEO_KHZ800);

//Activación del motor
void motorDrive (int motorNumber, boolean motorDirection, int motorSpeed){
```

```

boolean pinIn;           // Direction is given by pinXINI and !pinXIN2
if (motorDirection == turnCW) // pinXINI = HIGH, pinXIN2 = LOW -> Clockwise
    pinIn = HIGH;       // pinXINI = LOW, pinXIN2 = HIGH -> Counterclockwise
else
    pinIn = LOW;
switch (motorNumber){
    case 0:
        // Motor A
        digitalWrite (pinAIN1, pinIn);
        digitalWrite (pinAIN2, !pinIn);
        analogWrite (pinPWMA, motorSpeed);
        break;

    case 1:
        // Motor B
        digitalWrite (pinBIN1, pinIn);
        digitalWrite (pinBIN2 , !pinIn);
        analogWrite (pinPWMA, motorSpeed); //0-255
        break;

    case 2:
        // Motor C
        digitalWrite (pinCIN1, pinIn);
        digitalWrite (pinCIN2 , !pinIn);
        analogWrite (pinPWMA, motorSpeed); //0-255
        break;
    }
}

//Parada del motor
void motorStop (int motorNumber){
    switch (motorNumber){
        case 0:
            // Motor A
            digitalWrite (pinAIN1, LOW);
            digitalWrite (pinAIN2, LOW);
            analogWrite (pinPWMA, 0); //0-255
            break;

        case 1:
            // Motor B
            digitalWrite (pinBIN1, LOW);
            digitalWrite (pinBIN2 , LOW);
            analogWrite (pinPWMA, 0);
            break;

        case 2:
            // Motor C
            digitalWrite (pinCIN1, LOW);
            digitalWrite (pinCIN2 , LOW);
            analogWrite (pinPWMA, 0);
            break;
    }
}

```

```

void funcionColorB(int valorSensor, int maxRango1, int maxRango2)
{
    strip.setBrightness(20);
    if (valorSensor==0 && valorSensor<(maxRango1/150))
    {
        strip.setPixelColor(0, strip.Color(0, 0, 0));
        strip.setPixelColor(1, strip.Color(0, 0, 0));
        strip.setPixelColor(2, strip.Color(0, 0, 0));
        strip.setPixelColor(3, strip.Color(0, 0, 0));
        strip.setPixelColor(4, strip.Color(0, 0, 0));
        strip.setPixelColor(6, strip.Color(0, 0, 0));
        strip.setPixelColor(7, strip.Color(0, 0, 0));
    }
    if (valorSensor>(maxRango1/150) && valorSensor<=(maxRango1+(maxRango2-
maxRango1)*7/16))
    {
        strip.setPixelColor(0, strip.Color(0, 255, 0));
        strip.setPixelColor(1, strip.Color(0, 70, 255));
        strip.setPixelColor(2, strip.Color(0, 255, 0));
        strip.setPixelColor(3, strip.Color(0, 0, 0));
        strip.setPixelColor(4, strip.Color(0, 255, 0));
        strip.setPixelColor(5, strip.Color(0, 0, 0));
        strip.setPixelColor(6, strip.Color(0, 255, 0));
    }
    if (valorSensor>(maxRango1+(maxRango2-maxRango1)*7/16) &&
valorSensor<=(maxRango1+(maxRango2-maxRango1)*12/16))
    {
        strip.setPixelColor(0, strip.Color(255, 191, 0));
        strip.setPixelColor(1, strip.Color(0, 70, 255));
        strip.setPixelColor(2, strip.Color(255, 191, 0));
        strip.setPixelColor(3, strip.Color(0, 70, 255));
        strip.setPixelColor(4, strip.Color(255, 191, 0));
        strip.setPixelColor(5, strip.Color(0, 0, 0));
        strip.setPixelColor(6, strip.Color(255, 191, 0));
    }
    if (valorSensor>(maxRango1+(maxRango2-maxRango1)*12/16) &&
valorSensor<=maxRango2)
    {
        strip.setPixelColor(0, strip.Color(255, 0, 0));
        strip.setPixelColor(1, strip.Color(0, 70, 255));
        strip.setPixelColor(2, strip.Color(255, 0, 0));
        strip.setPixelColor(3, strip.Color(0, 70, 255));
        strip.setPixelColor(4, strip.Color(255, 0, 0));
        strip.setPixelColor(5, strip.Color(0, 70, 255));
        strip.setPixelColor(6, strip.Color(255, 0, 0));
    }
    strip.show();
}

void funcionColorC(int valorSensor, int maxRango1, int maxRango2)
{
    pixel.setBrightness(20);
    if (valorSensor==0 && valorSensor<(maxRango2/150))

```

```

    {
        pixel.setPixelColor(0, pixel.Color(0, 0, 0));
        pixel.setPixelColor(1, pixel.Color(0, 0, 0));
        pixel.setPixelColor(2, pixel.Color(0, 0, 0));
        pixel.setPixelColor(3, pixel.Color(0, 0, 0));
        pixel.setPixelColor(4, pixel.Color(0, 0, 0));
        pixel.setPixelColor(6, pixel.Color(0, 0, 0));
        pixel.setPixelColor(7, pixel.Color(0, 0, 0));
    }
    if (valorSensor>(maxRango2/150) && valorSensor<=(maxRango1+(maxRango2-
maxRango1)*7/16))
    {
        pixel.setPixelColor(0, pixel.Color(0, 255, 0));
        pixel.setPixelColor(1, pixel.Color(0, 70, 255));
        pixel.setPixelColor(2, pixel.Color(0, 255, 0));
        pixel.setPixelColor(3, pixel.Color(0, 0, 0));
        pixel.setPixelColor(4, pixel.Color(0, 255, 0));
        pixel.setPixelColor(5, pixel.Color(0, 0, 0));
        pixel.setPixelColor(6, pixel.Color(0, 255, 0));
    }
    if (valorSensor>(maxRango1+(maxRango2-maxRango1)*7/16) &&
valorSensor<=(maxRango1+(maxRango2-maxRango1)*12/16))
    {
        pixel.setPixelColor(0, pixel.Color(255, 191, 0));
        pixel.setPixelColor(1, pixel.Color(0, 70, 255));
        pixel.setPixelColor(2, pixel.Color(255, 191, 0));
        pixel.setPixelColor(3, pixel.Color(0, 70, 255));
        pixel.setPixelColor(4, pixel.Color(255, 191, 0));
        pixel.setPixelColor(5, pixel.Color(0, 0, 0));
        pixel.setPixelColor(6, pixel.Color(255, 191, 0));
    }
    if (valorSensor>(maxRango1+(maxRango2-maxRango1)*12/16) &&
valorSensor<=maxRango2)
    {
        pixel.setPixelColor(0, pixel.Color(255, 0, 0));
        pixel.setPixelColor(1, pixel.Color(0, 70, 255));
        pixel.setPixelColor(2, pixel.Color(255, 0, 0));
        pixel.setPixelColor(3, pixel.Color(0, 70, 255));
        pixel.setPixelColor(4, pixel.Color(255, 0, 0));
        pixel.setPixelColor(5, pixel.Color(0, 70, 255));
        pixel.setPixelColor(6, pixel.Color(255, 0, 0));
    }
    pixel.show();
}

void funcionRespuestaB(int estadoRespB, int SensorB){
    switch(estadoRespB)
    {
        case 0:
            funcionColorB(analogRead(SensorB), 0, maxR3);
            delay(5);
            break;

        case 1:

```

```

funcionColorB(analogRead(SensorB), 0, maxR1);
delay(5);
break;

case 2:
funcionColorB(analogRead(SensorB), maxR1, maxR2);
delay(5);
break;

case 3:
funcionColorB(analogRead(SensorB), maxR2, maxR3);
delay(5);
break;
}
}
void funcionRespuestaC(int estadoRespC, int SensorC){
switch(estadoRespC)
{
case 0:
funcionColorC(analogRead(SensorC), 0, maxR3);
delay(5);
break;

case 1:
funcionColorC(analogRead(SensorC), 0, maxR1);
delay(5);
break;

case 2:
funcionColorC(analogRead(SensorC), maxR1, maxR2);
delay(5);
break;

case 3:
funcionColorC(analogRead(SensorC), maxR2, maxR3);
delay(5);
break;
}
}

void setup() {
Serial.begin(9600);
while (!Serial);
Serial.println("CAN Receiver");
if (!CAN.begin(500E3)) {
Serial.println("Starting CAN failed!");
while (1);
}
WiFiDrv::pinMode(25, OUTPUT); //En este ha decidido ser Rojo
WiFiDrv::pinMode(26, OUTPUT); //En este ha decidido ser Verde
WiFiDrv::pinMode(27, OUTPUT); //Azul
pinMode(pinAIN1, OUTPUT);
pinMode(pinAIN2, OUTPUT);
pinMode(pinPWMA, OUTPUT);

```

```

pinMode(pinBIN1, OUTPUT);
pinMode(pinBIN2, OUTPUT);
pinMode(pinCIN1, OUTPUT);
pinMode(pinCIN2, OUTPUT);
strip.begin();
strip.show();
pixel.begin();
pixel.show();
pinMode(pinSensFB, INPUT);
pinMode(pinNPB, OUTPUT);
pinMode(pinSensFC, INPUT);
pinMode(pinNPC, OUTPUT);
}

void loop() {
int packetSize = CAN.parsePacket();
if (CAN.available() && packetSize>=0) {
  if(CAN.packetId()==InicioParo){
    Serial.print("Inicio = ");
    inicio = CAN.read();
    Serial.println(inicio);
  }
  if(inicio == LOW){
    WiFiDrv::analogWrite(25, 255);
    WiFiDrv::analogWrite(26, 0);
    WiFiDrv::analogWrite(27, 0);
  }
  if(inicio == HIGH){
    WiFiDrv::analogWrite(25, 255);
    WiFiDrv::analogWrite(26, 255);
    WiFiDrv::analogWrite(27, 255);
    if(CAN.packetId()==CambioMotor){
      Serial.print("Cambio = ");
      WiFiDrv::analogWrite(25, 0);
      WiFiDrv::analogWrite(26, 0);
      WiFiDrv::analogWrite(27, 255);
      motor = CAN.read();
      Serial.println(motor);
    }
    if(CAN.packetId()==HaceMotor){
      Serial.print("Hace = ");
      hace = CAN.read();
      Serial.println(hace);
    }
    if(CAN.packetId()==ActivoMotor){
      Serial.print("Activa = ");
      activa = CAN.read();
      Serial.println(activa);
      if(hace==LOW && activa==HIGH){
        WiFiDrv::analogWrite(25, 0);
        WiFiDrv::analogWrite(26, 255);
        WiFiDrv::analogWrite(27, 0);
      }
    }
  }
}

```

```

        if(hace==HIGH && activa==HIGH){
            WiFiDrv::analogWrite(25, 255);
            WiFiDrv::analogWrite(26, 150);
            WiFiDrv::analogWrite(27, 0);
        }
    }
}
Serial.println();
}
if(inicio == LOW){
    motor = 0;
    activa = 0;
}
if(inicio == HIGH){
    funcionRespuestaB(estadoLEDB, pinSensFB);
    switch(estadoLEDB){
        case 0:
            if(analogRead(pinSensFB)>=maxR1/150){
                estadoLEDB++;
            }
            break;
        case 1:
            if((analogRead(pinSensFB)>=maxR1) && hace==LOW){
                estadoLEDB++;
            }
            if((analogRead(pinSensFB)<(maxR1/150)) && hace==HIGH){
                estadoLEDB--;
            }
            break;
        case 2:
            if((analogRead(pinSensFB)>=maxR2) && hace==LOW){
                estadoLEDB++;
            }
            if((analogRead(pinSensFB)<(maxR1*5/6)) && hace==HIGH){
                estadoLEDB--;
            }
            break;
        case 3:
            if((analogRead(pinSensFB)<(maxR2*5/6)) && hace==HIGH){
                estadoLEDB--;
            }
            break;
    }
    funcionRespuestaC(estadoLEDC, pinSensFC);
    switch(estadoLEDC){
        case 0:
            if(analogRead(pinSensFC)>=maxR1/150){
                estadoLEDC++;
            }
            break;
        case 1:
            if((analogRead(pinSensFC)>=maxR1) && hace==LOW){
                estadoLEDC++;
            }
    }
}

```

```

}
if((analogRead(pinSensFC)<(maxR1/150)) && hace==HIGH){
    estadoLEDC--;
}
break;
case 2:
if((analogRead(pinSensFC)>=maxR2) && hace==LOW){
    estadoLEDC++;
}
if((analogRead(pinSensFC)<(maxR1*5/6)) && hace==HIGH){
    estadoLEDC--;
}
break;
case 3:
if((analogRead(pinSensFC)<(maxR2*5/6)) && hace==HIGH){
    estadoLEDC--;
}
break;
}
if(activa == LOW){
    motorStop(motor);
    Serial.print("Motor ");
    Serial.print(motor);
    Serial.println(" parado");
}
if(activa == HIGH){
    switch(motor){
        case 0:
            motorDrive(motor, hace, velAbd);
            Serial.print("Motor 0");
            if(hace == LOW){
                Serial.println(" abduce");
            }
            if(hace == HIGH){
                Serial.println(" aduce");
            }
            break;
        case 1:
            if(hace == LOW){
                motorDrive(motor, hace, velAbre);
                Serial.println("Motor 1 abre");
            }
            if(hace == HIGH){
                motorDrive(motor, hace, velCierra);
                Serial.println("Motor 1 cierra");
            }
            break;
        case 2:
            if(hace == LOW){
                motorDrive(motor, hace, velAbre);
                Serial.println("Motor 2 abre");
            }
            if(hace == HIGH){

```

```
        motorDrive(motor, hace, velCierra);
        Serial.println("Motor 2 cierra");
    }
    break;
}
}
}
```

3. Comprobación mediante el Método Elementos Finitos

El Método de Elementos Finitos se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, esta transformación se denomina discretización del modelo. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo del cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos [31].

3.1. Dedo índice

Para el estudio mediante MEF del dedo índice, se han planteado dos situaciones. La primera (Hipótesis 1) consiste en soportar la carga crítica a flexión, utilizada para la selección del sistema de accionamiento de este dedo, habiéndola mayorado al doble y, la segunda (Hipótesis 2), en soportar la carga generada por el Pulgar al realizar un agarre de tipo pinza lateral con el valor de fuerza máxima aportado en la Tabla 1 del apartado de Especificaciones de diseño. La segunda hipótesis se tiene en cuenta solo para la falange proximal, pues la distal no sufre cargas en dicho agarre.

3.1.1. Falange distal

En primera instancia se requiere del estudio de la falange distal, pues es la primera porción del dedo que soporta la carga del agarre. Planteando una fijación de tipo empotrada en el punto de unión entre falanges y aplicando la carga de estado crítico (38,57N) junto con la reacción del tendón (58,58N) en sus puntos de aplicación, se obtiene un modelo de estudio como el mostrado en la Figura 126.

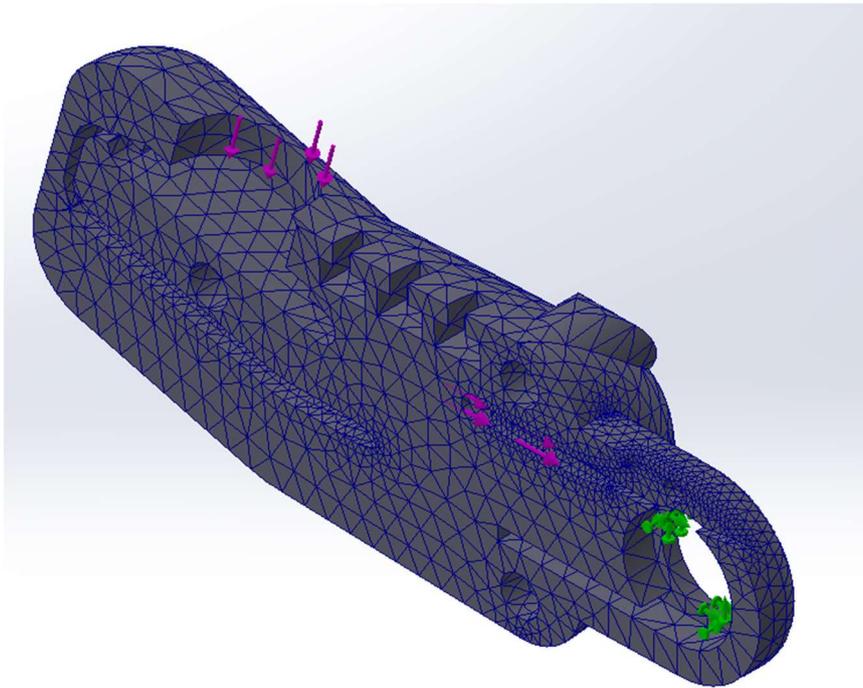


Figura 126. Modelo de simulación para la falange distal de índice

Se plantea esta misma situación para la otra mitad de la falange distal del índice. Tras la simulación se obtienen los resultados mostrados en la Figura 127 y la Figura 128.

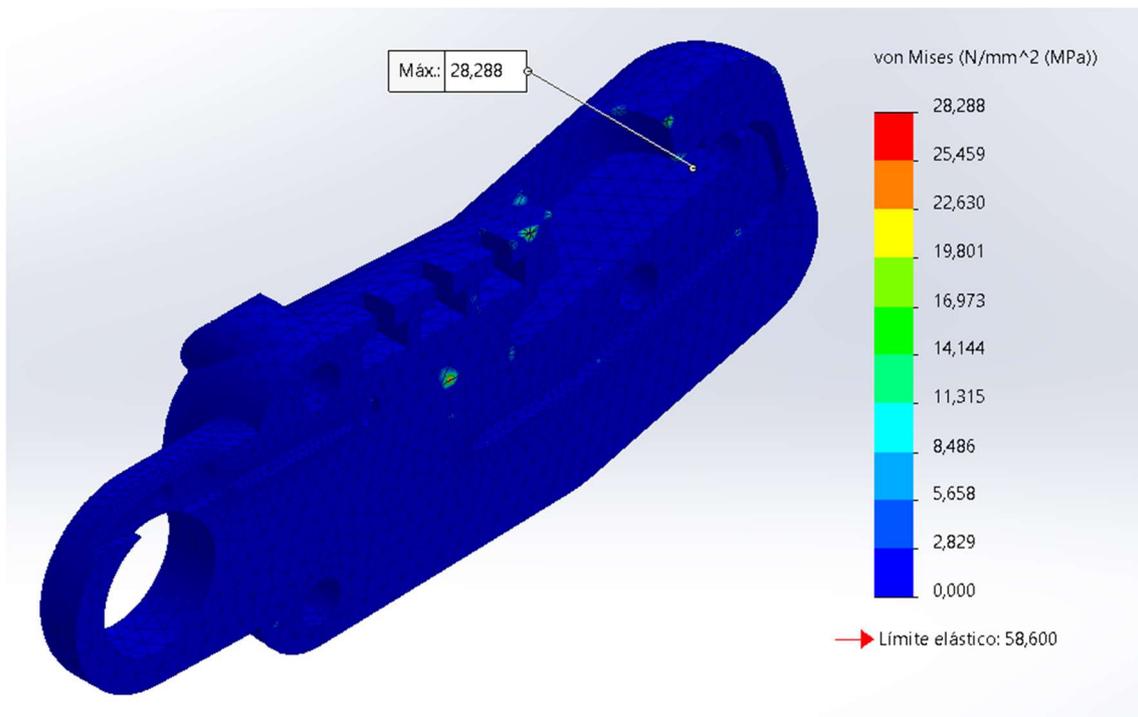


Figura 127. Resultado del análisis MEF de la primera mitad de la falange distal del índice

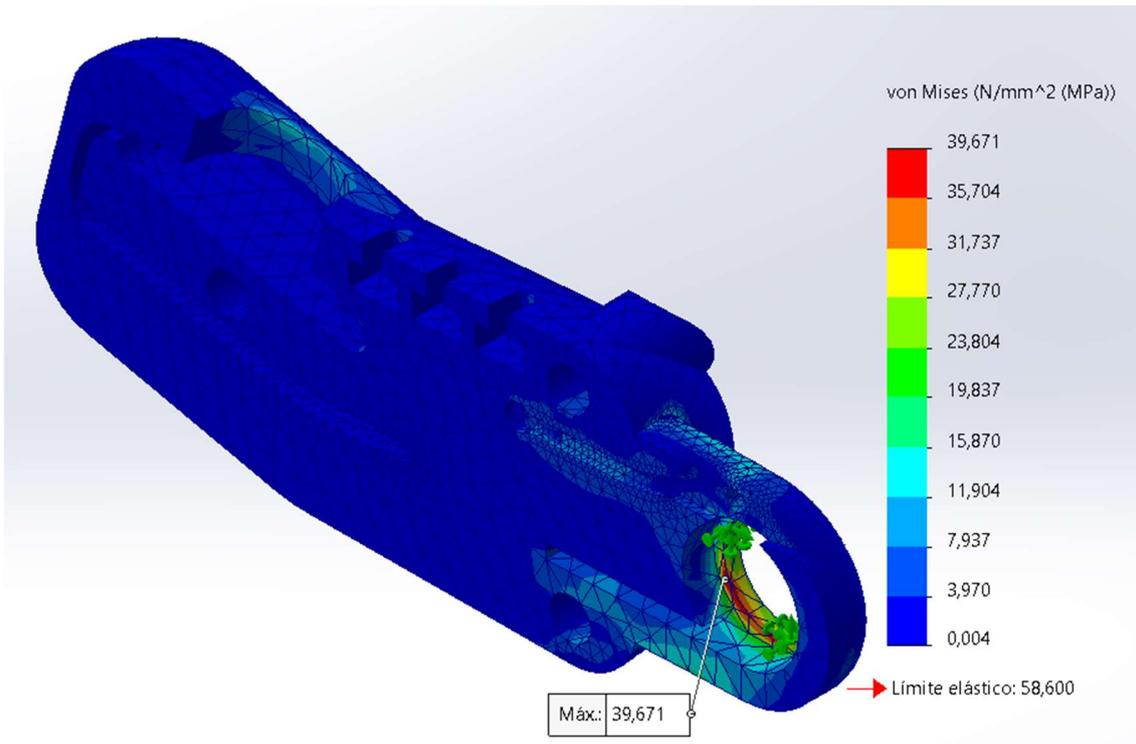


Figura 128. Resultado del análisis MEF de la segunda mitad de la falange distal del índice

3.1.2. Falange proximal

Mediante la transmisión de la carga generada sobre el puno de unión entre falanges es posible plantear la situación de la falange proximal del índice, dando pie a una hipótesis como la mostrada en la Figura 129. En ella puede observarse que se ha repetido el tipo de unión empotrada, en este caso para la unión proximal en vez de la interfalángica, además de observarse la tensión generada por el elemento deflexión y la carga provocada por la falange distal.

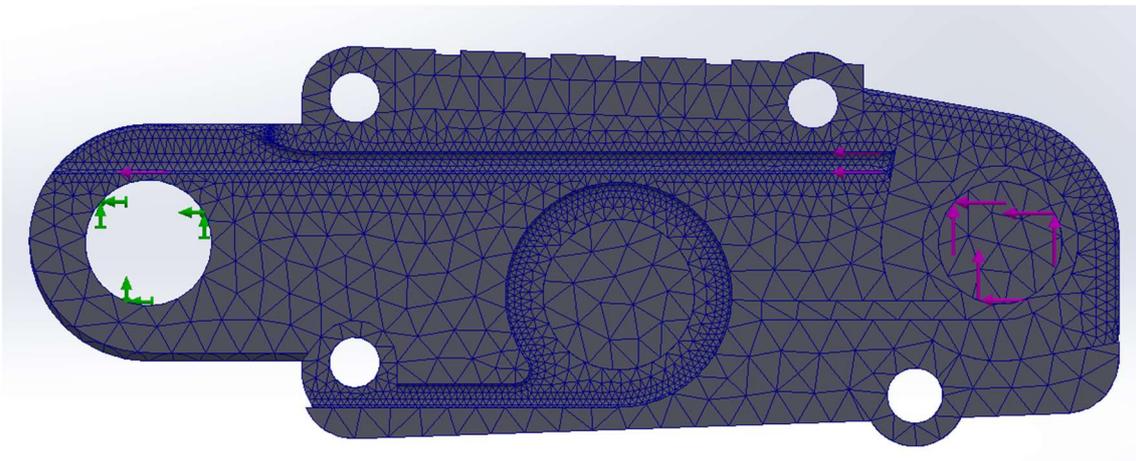


Figura 129. Modelo de simulación para la falange proximal del índice

Siguiendo este modelo, se obtiene los resultados mostrados en la Figura 130, para la primera mitad de la falange, y la Figura 131, para la segunda.

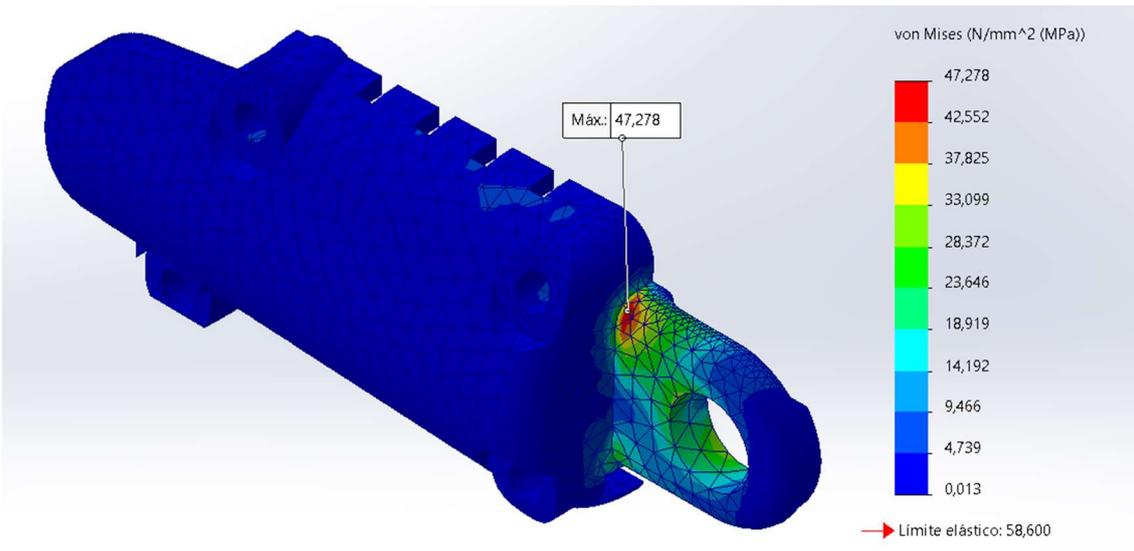


Figura 130. Resultado del análisis MEF de la primera mitad de la falange proximal del índice

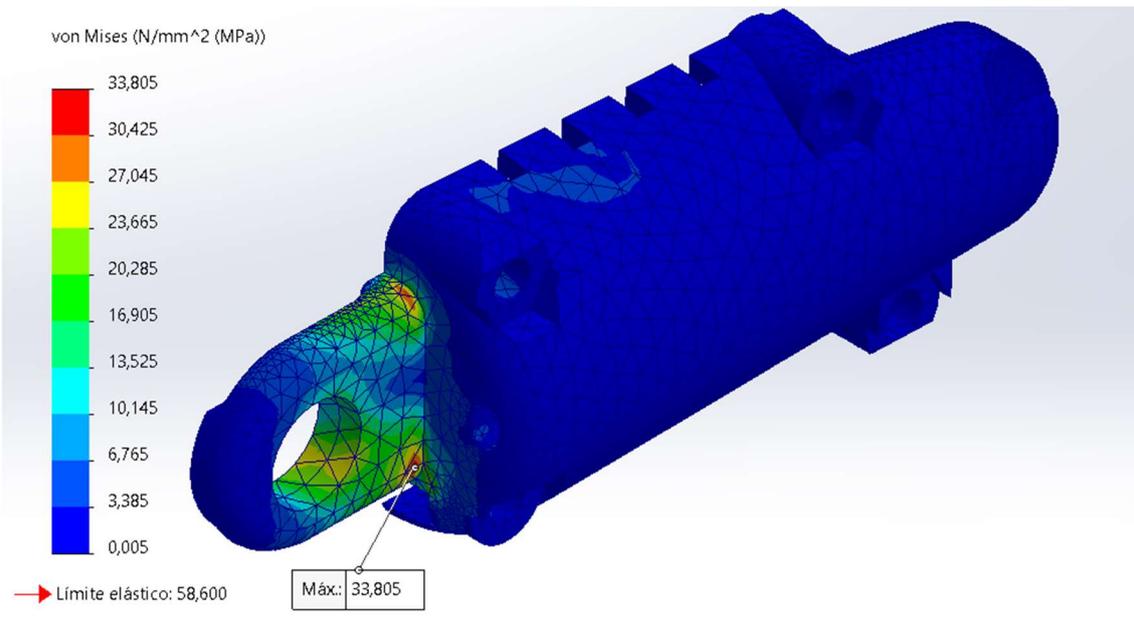


Figura 131. Resultado del análisis MEF de la segunda mitad de la falange proximal del índice

Asimismo, también se ha considerado la situación de agarre de tipo pinza lateral por el que se realiza este trabajo. Siendo una carga aplicada la deseada al inicio y propuesta en el apartado Especificaciones de diseño, se obtiene el modelo presentado en la Figura 132.

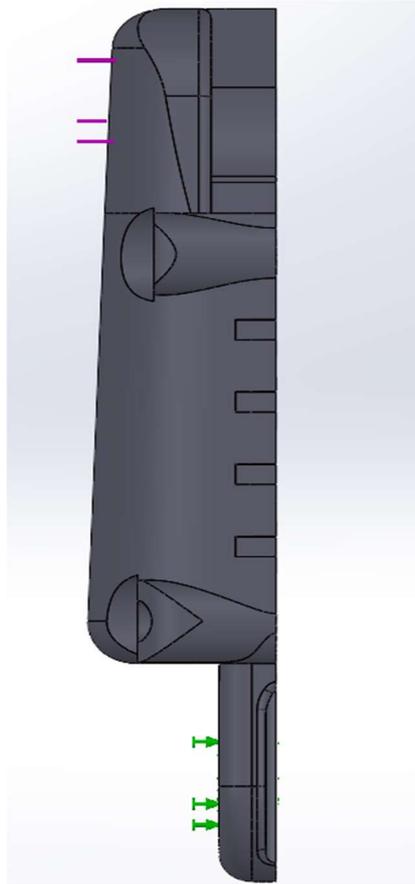


Figura 132. Modelo de simulación de cargas horizontales en para la falange proximal del índice
 Obteniendo los resultados mostrados en la Figura 133 y la Figura 134.

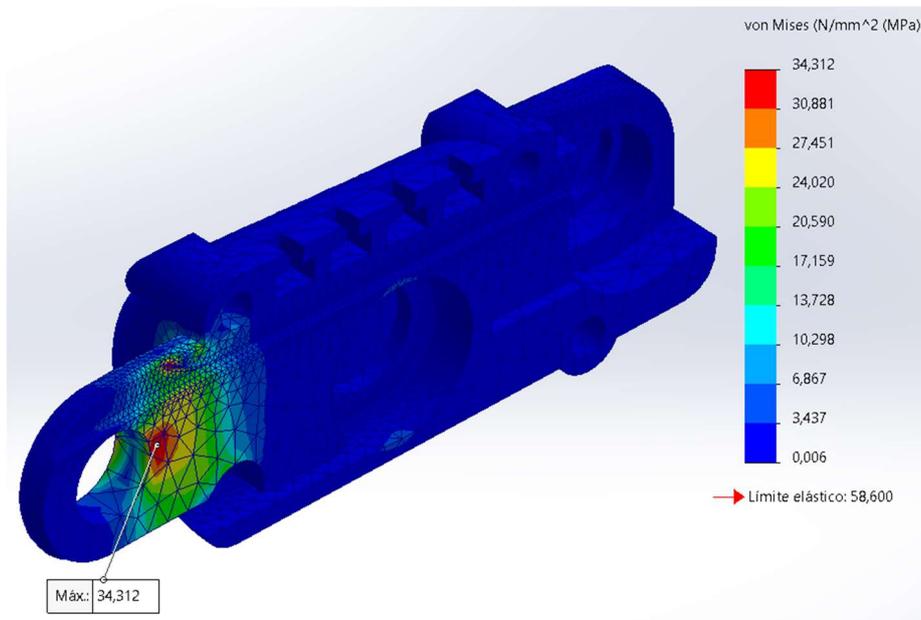


Figura 133. Resultado del análisis MEF para la primera mitad de la falange proximal del índice para agarre pinza lateral

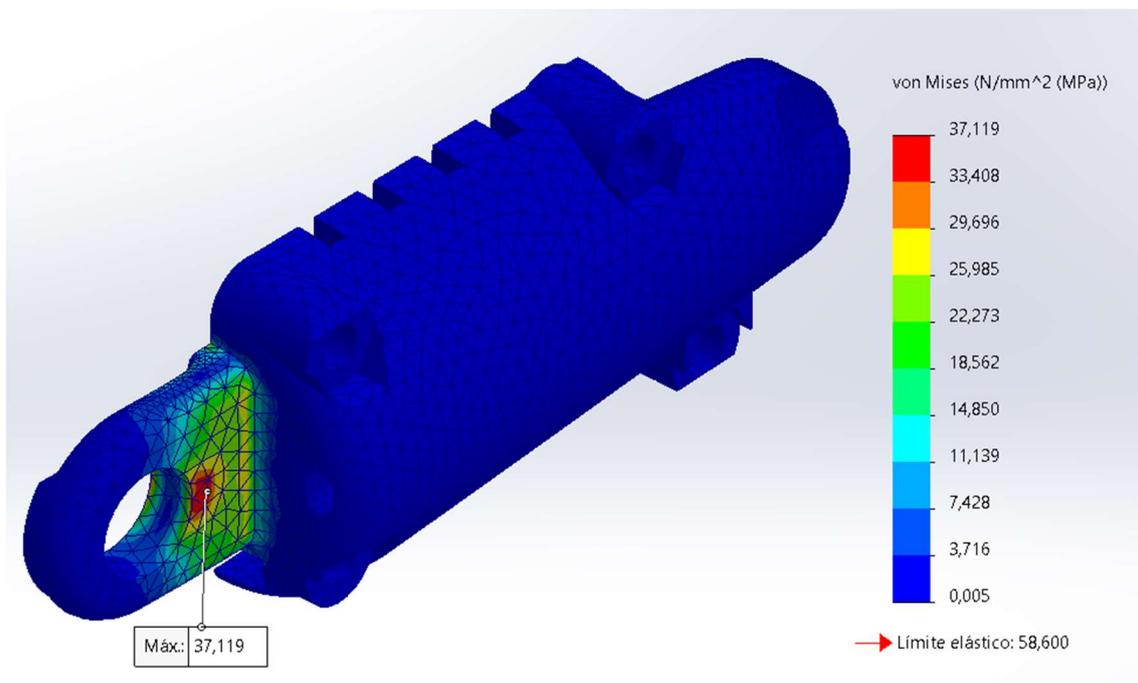


Figura 134. Resultado del análisis MEF para la segunda mitad de la falange proximal del índice para agarre pinza lateral

3.2. Dedo pulgar

Como se ha comentado para el análisis del dedo índice, este otro miembro también va a ser estudiado bajo dos condiciones. En la primera se plantea un agarre de carga crítica (Hipótesis 1), mientras que la segunda (Hipótesis 2) plantea fuerzas horizontales que puedan provenir de impactos o de apoyos indebidos por parte del usuario.

Consecuentemente, en la Figura 135 puede observarse el resultado obtenido para la primera mitad de la falange proximal bajo las consideraciones de la primera hipótesis, seguida de la Figura 136, siendo esta misma mitad, ahora, bajo la segunda hipótesis. Asimismo, la Figura 137 muestra el resultado dado por la otra media falange proximal bajo la primera situación de carga, finalizando con la misma porción estudiando, en este caso, los efectos de la segunda hipótesis en la Figura 138.

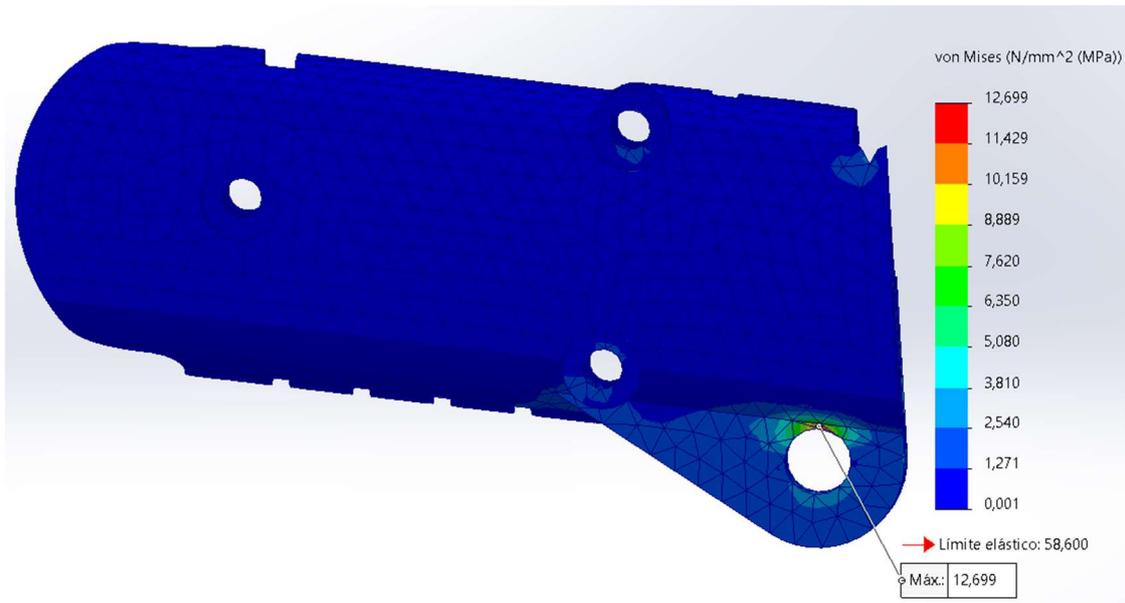


Figura 135. Resultado del análisis MEF para la primera mitad de la falange proximal del pulgar en Hip.1

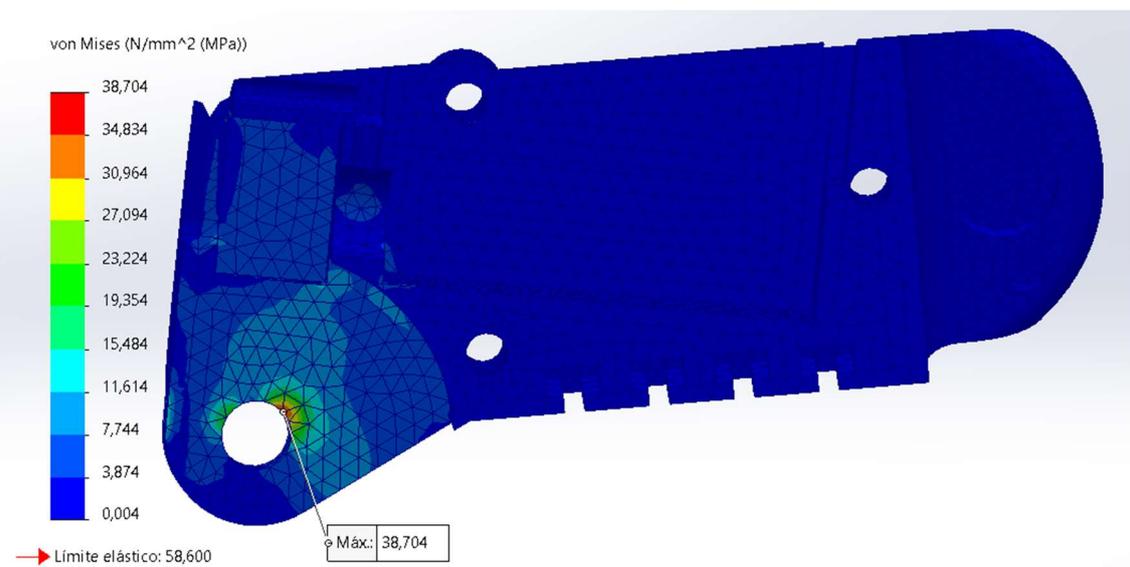


Figura 136. Resultado del análisis MEF para la primera mitad de la falange proximal del pulgar en Hip.2

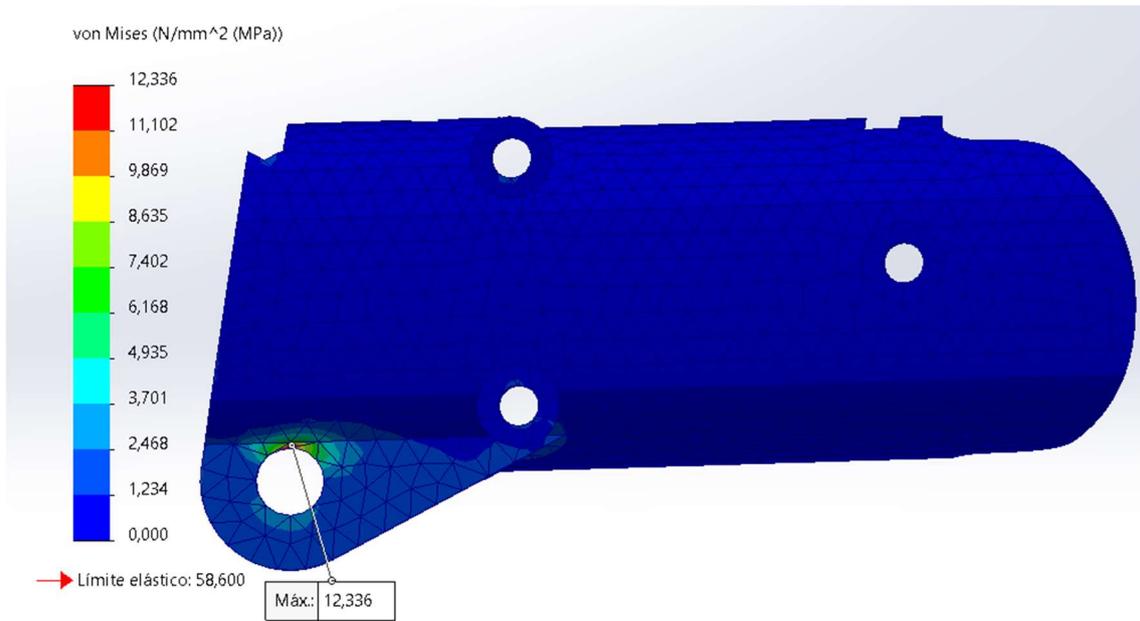


Figura 137. Resultado del análisis MEF para la segunda mitad de la falange proximal del pulgar en Hip.1

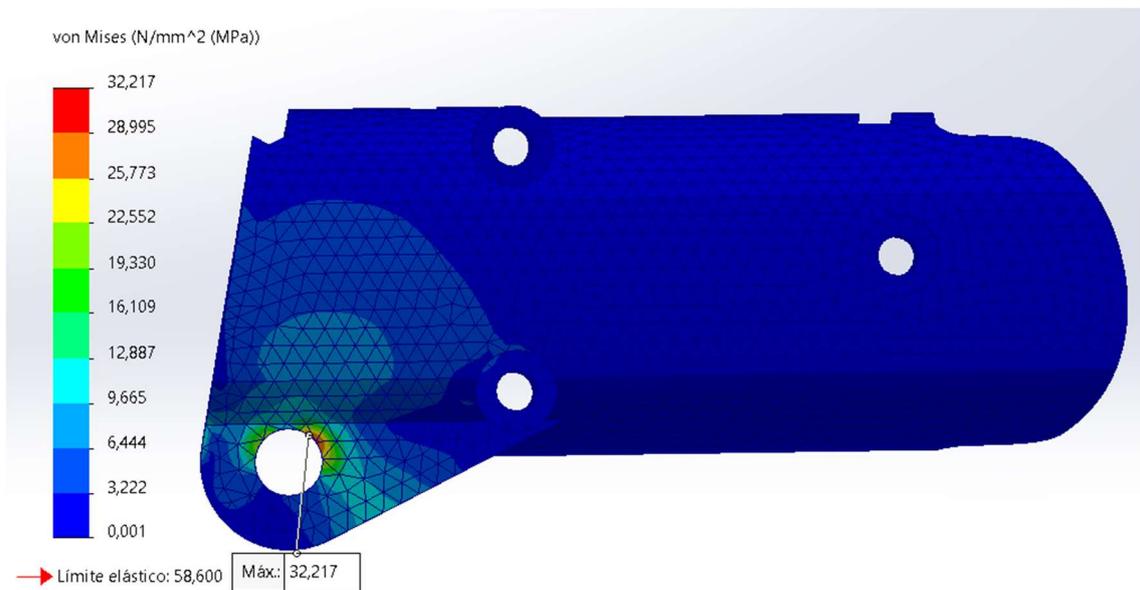


Figura 138. Resultado del análisis MEF para la segunda mitad de la falange proximal del pulgar en Hip.2

Puede observarse en la Figura 139 el resultado obtenido para la primera mitad de la falange distal, así como el obtenido para la segunda en la Figura 140 bajo las condiciones expuestas previamente.

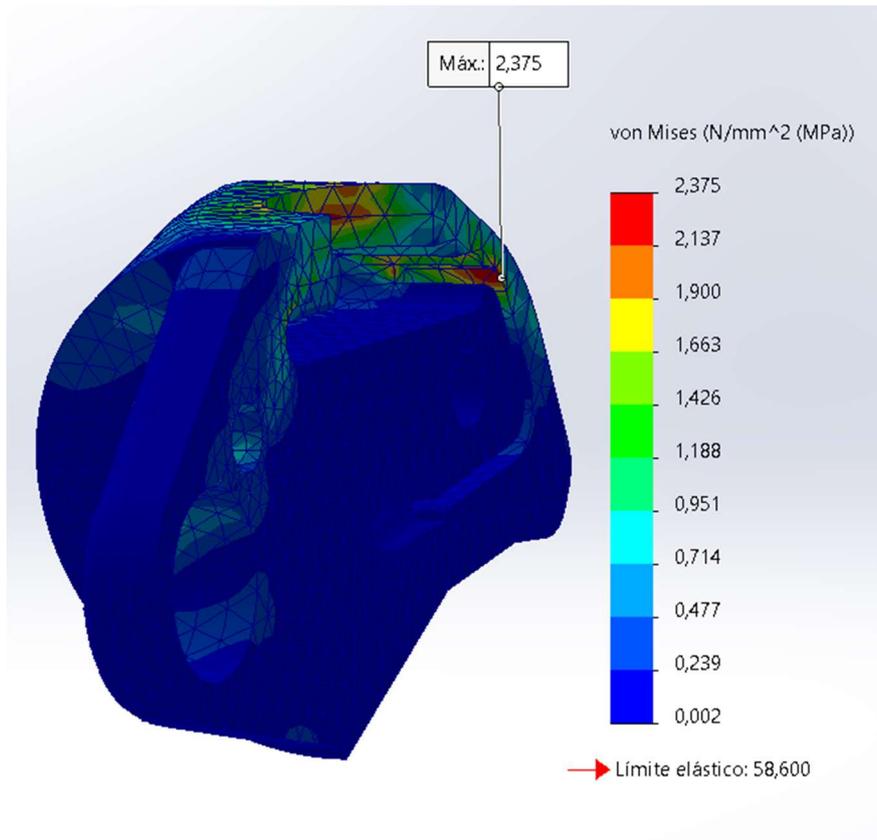


Figura 139. Resultado del análisis MEF para la primera mitad de la falange distal del pulgar

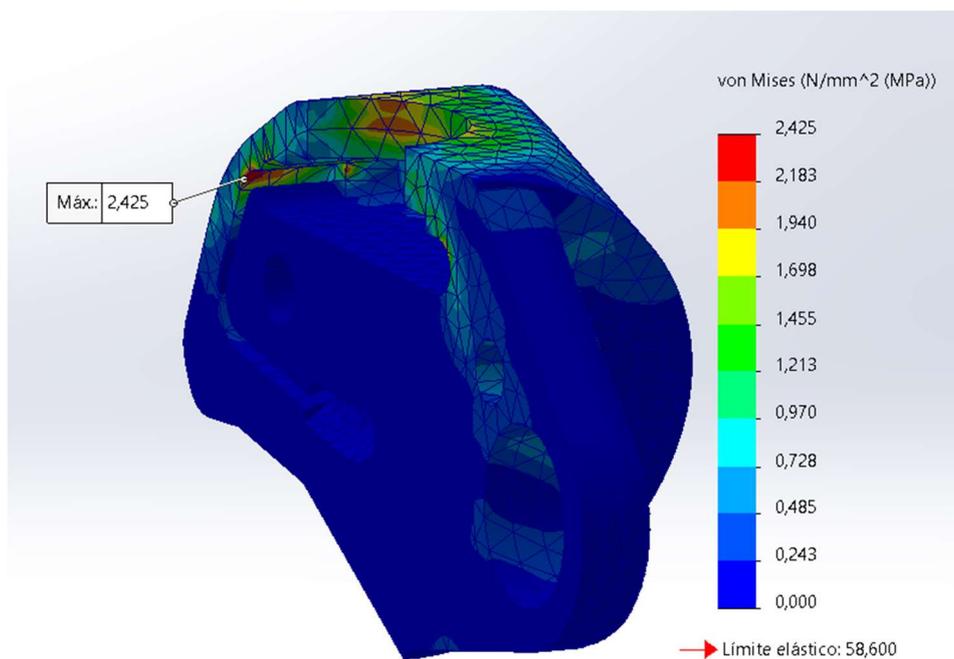


Figura 140. Resultado del análisis MEF para la segunda mitad de la falange distal del pulgar

III. Pliego de condiciones

1.	Condiciones generales	140
1.1.	Objeto	140
1.2.	Documentos que definen el proyecto.....	140
1.3.	Condiciones facultativas.....	140
1.4.	Accidentes de trabajo	140
1.5.	Condiciones generales de explotación.....	141
1.6.	Normativa	141
1.7.	Plazos y condiciones generales del proyecto	141
1.8.	Responsabilidad del proyectista.....	141
2.	Condiciones particulares	141
2.1.	Condiciones del Software empleado.....	141
2.2.	Dossier técnico	142
3.	Condiciones de suministro	142
3.1.	Especificaciones de materiales	142
3.2.	Especificaciones para la adquisición de componentes.....	142
3.3.	Especificaciones de fabricación y montaje.....	143
4.	Recomendaciones de seguridad.....	144

1. Condiciones generales

1.1. Objeto

La propuesta de este Pliego de Condiciones es la de fijar los criterios de la relación establecida entre el encargado del desarrollo del proyecto y la empresa contratante para tal tarea.

1.2. Documentos que definen el proyecto

A continuación, se exponen los documentos encargados de marcar las especificaciones a respetar en el presente proyecto. Siendo:

- Este Pliego de Condiciones
- La documentación tanto gráfica como escrita que da pie al resultado del proyecto: la Memoria (junto a sus anexos), el Presupuesto y los Planos.

En caso de posibles discrepancias debido al orden prioritario de lectura, será necesario seguir el siguiente listado:

1. Pliego de condiciones
2. Presupuesto
3. Memoria
4. Planos

1.3. Condiciones facultativas

Para llevar a cabo este documento de Trabajo de Final de Grado intervienen las personas físicas o jurídicas enumeradas a continuación:

- **Proyectista.** Encargado de la concepción, gestión, desarrollo y puesta a punto del proyecto aquí expuesto, siendo este el autor del TFG.
- **Promotor.** Aquel que adquiere los servicios del proyectista y los derechos sobre la explotación del proyecto, pudiendo realizar futuros cambios si fueran requeridos. En esta ocasión se trata del Grupo de Investigación de Biomecánica y Ergonomía de la Universitat Jaume I (BE-UJI).

1.4. Accidentes de trabajo

La cobertura de los accidentes ocurridos se aplica en caso de encontrarse dentro de las instalaciones de la empresa durante el horario laboral o en el contexto de una misión confiada por la entidad contratadora, aplicando la normativa de seguridad y salud expuesta en el artículo 18.1 de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales y de acuerdo con la Política de Prevención de Riesgos de la UJI.

1.5. Condiciones generales de explotación

El Grupo de Investigación de Biomecánica y Ergonomía quedarán a cargo de la propiedad intelectual integral de los elementos que constituyen el mecanismo protésico desarrollado en este proyecto, siendo libres de modificarlos y mejorarlos según criterios propios. En estos elementos se encuentran los archivos de diseño de cada miembro expuesto, así como el plano de circuito y código de programación del sistema mecatrónico requerido para el correcto funcionamiento de la prótesis.

1.6. Normativa

Los elementos suministrados se entregarán conforme a las normas UNE, CEI, DIN y NF. Permitiendo el uso de normas específicas siempre que sean equivalentes a las anteriores. Estas equivalencias deberán ser adjuntadas al desarrollo del documento.

En cada documento prevalecen las especificaciones literales a las gráficas, al igual que en el documento de Planos, donde prevalece la cota sobre la medida a escala.

1.7. Plazos y condiciones generales del proyecto

La elaboración del presente trabajo se ha regido por el grupo de investigación UNIQUE-HAND, realizando el horario más conveniente para la ejecución de este.

1.8. Responsabilidad del proyectista

El proyectista debe asumir las responsabilidades descritas a continuación, desde la firma del contrato:

- Compromiso sobre la conclusión del trabajo siguiendo las condiciones fijadas.
- Garantizar la ejecución del mismo según lo establecido en los documentos, proporcionando el nivel de calidad adecuado de gestión del proyecto y del producto final.
- Observar el cumplimiento de las normas a que se sujeta el proyecto.

2. Condiciones particulares

2.1. Condiciones del Software empleado

Las especificaciones de software se rigen por las versiones empleadas en el desarrollo del proyecto, siendo las expuestas a continuación:

- Versión de SolidWorks empleada es la del año 2022.
- La versión de Arduino empleada es la v1.8.19.

- Versión de KiCad usada es la v6.0..2.
- El sistema operativo sobre el que se trabaja es Windows 11.

2.2. Dossier técnico

Tras finalizar el proyecto, se deben facilitar los documentos técnicos siguientes al promotor, de manera que pueda comprender todo el trabajo:

- Archivos de diseño de las piezas del ensamblaje, así como los montajes compuestos, un listado de los componentes empleados y los planos de dichos diseños.
- Plano del circuito mecatrónico instalado, junto con el software redactado y el listado de los componentes empleados.

3. Condiciones de suministro

3.1. Especificaciones de materiales

Para cumplir con las consideraciones de los materiales y componentes a emplear para el ensamble del proyecto son:

- La bancada sobre la que se realiza el montaje debe ser una placa de Aluminio con las medidas expuestas en el documento Planos.
- El resto de piezas diseñadas deben obtenerse mediante impresión 3D, pudiendo variar entre filamento de tipo PLA o mediante ABS-Resina, a excepción de las piezas detalladas como impresas en Filaflex.
- La placa sobre la que se realiza el montaje del circuito debe ser de cobre con un espesor de 0,35mm.

3.2. Especificaciones para la adquisición de componentes

En la Tabla 22 se reúnen las referencias comerciales de los componentes empleados en el montaje del proyecto.

Concepto	Designación	Referencia	Proveedor
Componentes mecánicos	Conjunto sinfín-corona KWG0.5R1-AG0.5-30R1	KWG0.5R1-AG0.5-30R1	KHK Gears
	Conjunto sinfín-corona KWG0.5R1-AG0.5-50R1	KWG0.5R1-AG0.5-50R1	KHK Gears
	Pareja de engranajes cónicos sinterizados LM0.8-20	LM0.8-20	KHK Gears
	Tornillos y tuercas M3	PRO-0131	Bricogeek

	Resorte de Torsión T038-270-218R	T038-270-218R	Sodemann
	Resorte de Fuerza constante CF015-0083	CF015-0083	Sodemann
	Micro metal gearmotor 1:30	1093	Pololu
Componentes electrónicos	Micro metal geramotor 1:75	2361	Pololu
	FlexiForce A301 Sensor	A301	Tekscan
	Pulsador switch 12mm	CPM-0039	Bricogeek
	Resistencia 330Ω	PRO-0022	Bricogeek
	NeoPixel Jewel - 7 x WS2812 5050 RGB LED	WS2812 5050	Bricogeek
	Arduino MKR CAN Shield	ASX00005	Arduino
	Arduino MKR WiFi 1010	ABX00023	Arduino
	Driver Pololu A4988 StepStick	MOT-0014	Bricogeek
	Encoder para miro metal	RUE-0010	Bricogeek

Tabla 22. Referencias comerciales de los componentes del proyecto

3.3. Especificaciones de fabricación y montaje

Para la fabricación mediante impresión 3D de las piezas, debe tenerse en cuenta las tolerancias de impresión del equipo a emplear. En este caso, se ha debido considerar una tolerancia de $\pm 0,2mm$ según el tipo de superficie. Por ejemplo, los orificios han debido hacerse con un diámetro $+0,2mm$; por el contrario, el resto de superficies al aire se han considerado espesores con una

En cuanto al circuito, debe seguirse el plano planteado en el documento pertinente y tener en consideración que el componente Arduino MKR CAN Shield va conectado sobre el componente Arduino MKR WiFi 1010 tal y como se observa en la Figura 141. Además, para el funcionamiento de los motores, debe conectarse una fuente de tensión a un voltaje de +6V en los puntos de conexión pertinentes.



Figura 141. Montaje de las placas Arduino para el funcionamiento del circuito eléctrico

4.Recomendaciones de seguridad

Se recomienda evitar el contacto directo con las vías del circuito, pues por la corriente que va a circular por ellas podría ser dañina para el ser humano. Debe tenerse cuidado al iniciar los motores, ya que, al estar expuestos sus sistemas de reducción, la persona encargada de su montaje podría contactar con estos y dañarse superficialmente.

IV. Presupuesto

1.	Coste del personal.....	147
2.	Amortización del Hardware	147
3.	Amortización del Software.....	147
4.	Coste de los componentes y del material	148
5.	Resumen del coste.....	149
6.	Coste de ejecución por contrato.....	149

1. Coste del personal

Longitudes de filamento necesario para hacer la impresión completa, tiempo estimado de montaje del sistema, elementos mecánicos y electrónicos instalados, tiempo requerido en la codificación.

En la Tabla 23 se recoge la monetización que debería recibir un Ingeniero Mecánico por el trabajo realizado expuesto en este documento, así como las horas invertidas también por el Técnico de laboratorio para el manejo del equipo de impresión y montaje.

Empleado	Coste por hora [€/h]	Tiempo [h]	Coste [€]
Ingeniero mecánico	25	500	12.500,00
Técnico	15	20	300,00
TOTAL [€]			12.800,00

Tabla 23. Coste de personal para el desarrollo del proyecto

2. Amortización del Hardware

En este caso se considera el gasto generado en la obtención del equipo empleado y el tiempo de empleo dado a dicho equipo. Empleando la ecuación 34 para el cálculo de la amortización individual de cada elemento, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 24.

$$Amortización [€] = Coste del componente [€] \cdot \frac{Tiempo de uso [meses]}{12 \left[\frac{meses}{año} \right] \cdot Vida\ útil [años]} \quad (34)$$

Componente	Tiempo de uso [meses]	Vida útil [años]	Coste [€]	Amortización [€]
Ordenador	5,0	5,0	1.200,00	100,00
Impresora 3D	0,2	6,0	500,00	1,39
CNC 3018 Pro	0,2	7,0	160,00	0,38
TOTAL [€]				101,77

Tabla 24. Amortización del Hardware

3. Amortización del Software

Considerando los programas empleados para el desarrollo del proyecto y sustituyendo en la ecuación 34, como en el apartado anterior, obviando el parámetro de vida útil, se obtienen los valores de la Tabla 25.

Componente	Tiempo de uso [meses]	Coste [€/año]	Amortización [€]
SolidWorks	5,0	4.000,00	1.666,67
Arduino	2,0	0,00	0,00
GRBL	0,2	0,00	0,00
TOTAL [€]			1.666,67

Tabla 25. Amortización del Software

4. Coste de los componentes y del material

Se pretende emplear la máxima cantidad posible de elementos comerciales, pues resulta más cómodo y económico en caso de llevar a cabo el montaje del diseño en repetidas ocasiones en vez de tratar con componentes diseñados exclusivamente para estas ocasiones. Recopilando los elementos empleados en la Tabla 26, los cuales se comercializan por Bricogeek [29], Pololu [30] y Arduino [14], y el filamento de impresión 3D en la Tabla 27, vendidos en cantidades de 1kg por Elegoo [32] aunque no llegase a dar uso a la totalidad comprada.

Componentes	Coste unitario [€/ud.]	Unidades [-]	Coste [€]
Placa metálica mecanizada	200,00	1	200,00
Conjunto sinfín-corona R30	200,14	2	400,28
Conjunto sinfín-corona R50	219,38	1	219,38
Pareja de engranajes cónicos	21,84	1	21,84
Resorte de Torsión T038-270-218R	6,26	1	6,26
Resorte de Fuerza constante CF015-0083	14,44	1	14,44
Motor micro metal HP1:50	24,08	3	72,24
Encoder par motor micro metal	10,29	2	20,58
Driver Motor Pololu	5,63	2	11,26
Placa Arduino MKR 1010 WiFi	33,50	2	67,00
Placa MLR CAN Shield	33,50	2	67,00
Sensor FlexiForce A301	63,55	2	127,10
LED REG NeoPixel Jewel	13,37	2	26,74
Pulsador mecánico	0,61	4	2,44
Resistencia	0,03	6	0,15
Tornillos M3 Allen	0,03	11	0,29
Tuercas M3	0,03	11	0,29
TOTAL [€]			1.257,31

Tabla 26. Coste de los componentes de montaje

Material	Cantidad [kg]	Coste [€/kg]	Coste total [€]
PLA	1,00	25,00	25,00
ABS-Resine	1,00	35,00	35,00
FilaFlex	1,00	67,52	67,52
TOTAL [€]			127,52

Tabla 27. Coste de material de impresión 3D

5. Resumen del coste

El resumen del coste del proyecto se reúne en la Tabla 28, siendo un total de 15.953,26€.

Concepto	Coste [€]
Personal	12.800,00
Equipo	101,77
Software	1.666,67
Componentes	1.257,31
Material	127,52
TOTAL [€]	15.953,26

Tabla 28. Resumen del coste del proyecto

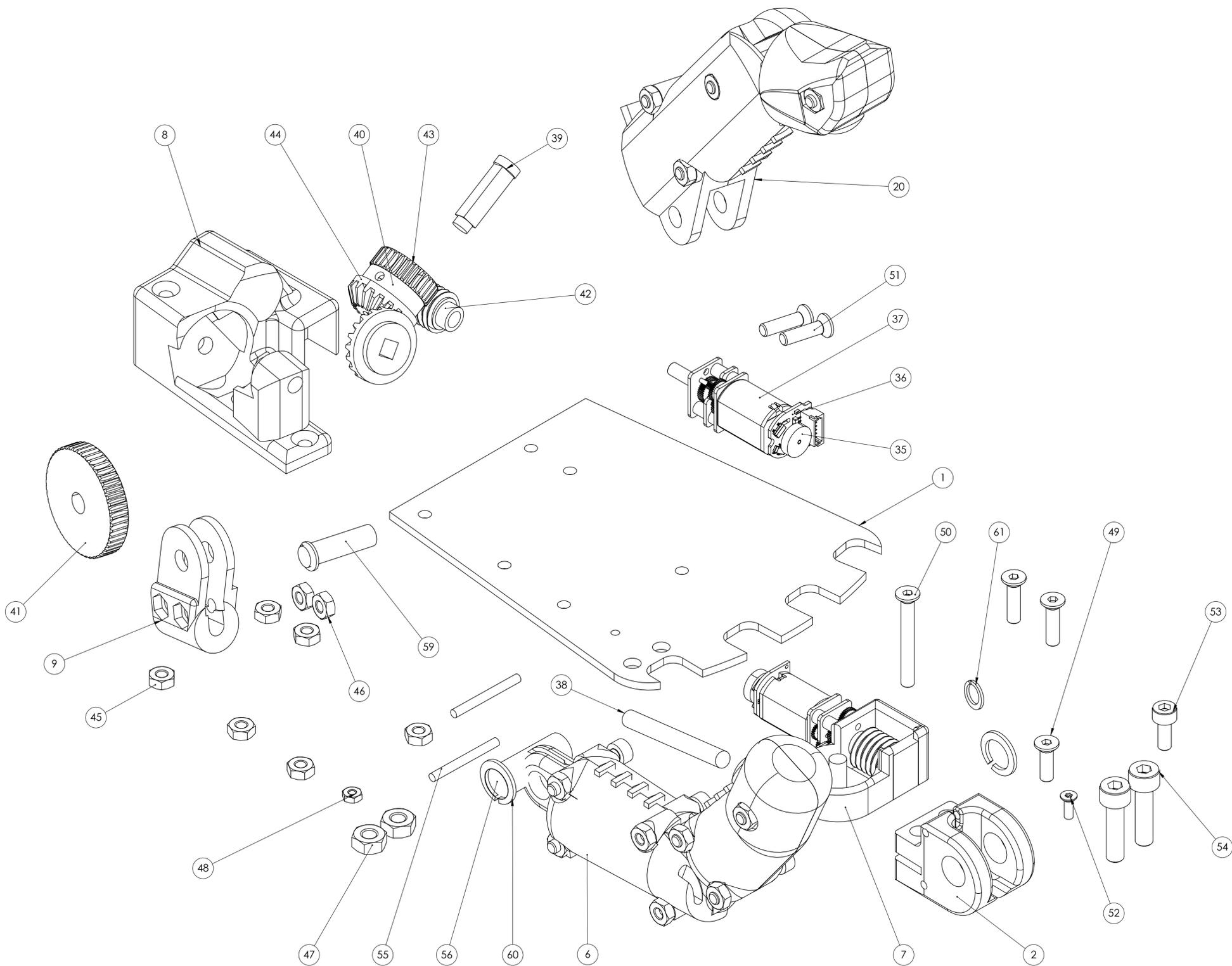
6. Coste de ejecución por contrato

Debe considerarse el hecho de que al llevar a cabo un proyecto de este estilo y comercializarlo, se desea generar una cierta cantidad de beneficios, además de considerar el gasto en IVA que lleva consigo. De tal manera se considera un 20% de beneficios sobre el coste del proyecto, al cual hay que sumar el 21% de IVA, obteniendo el presupuesto final mostrado en la Tabla 29.

Concepto	Coste [€]
Presupuesto	15.953,26
Beneficio (20%)	3.190,65
Subtotal	19.143,92
21% IVA	4.020,22
TOTAL [€]	23.164,14

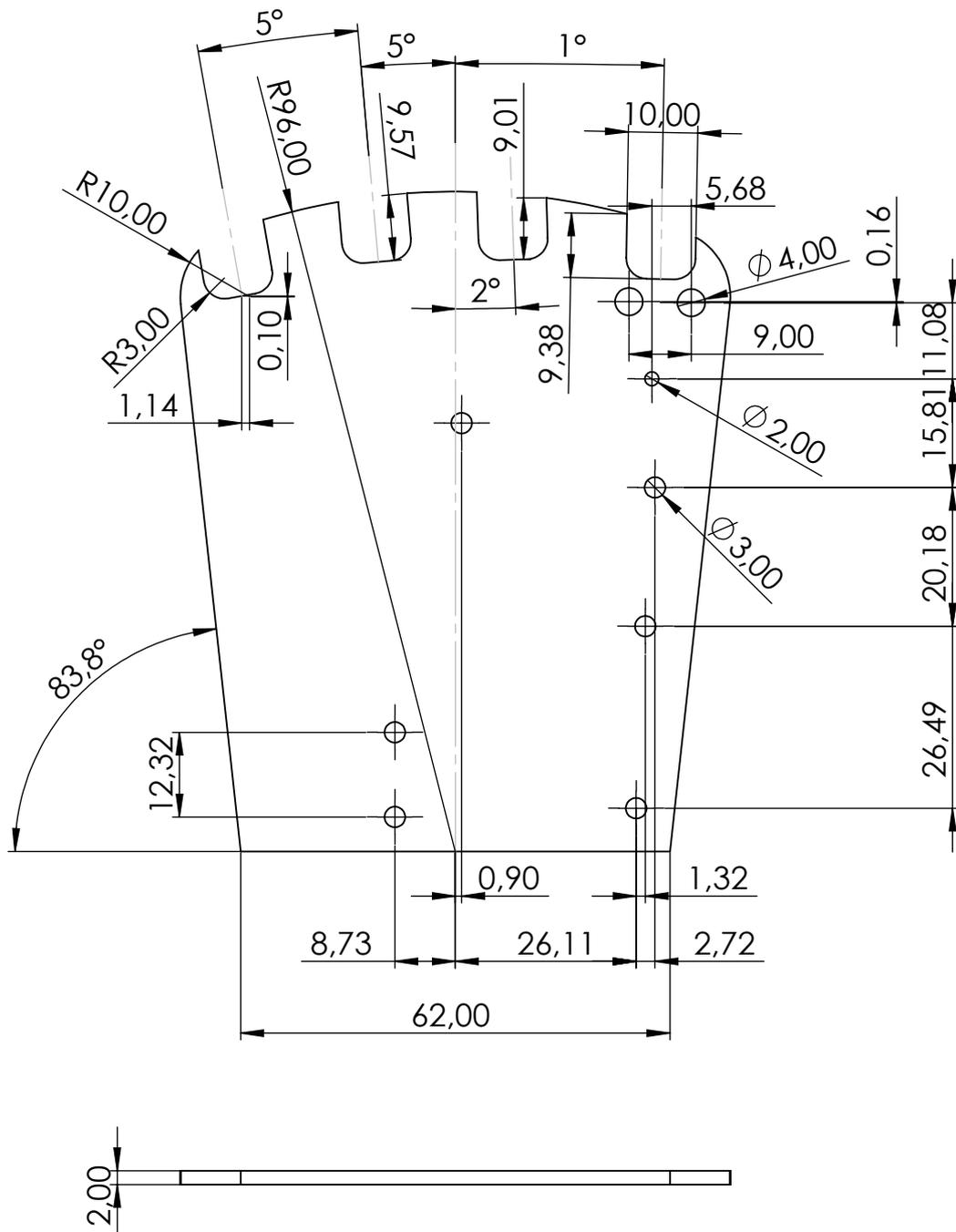
Tabla 29. Presupuesto final para la realización del proyecto

V. Planos



61	Truarc 5560-20	Anillo retenedor Comercial	2
60	Truarc 5560-31	Anillo retenedor Comercial	2
59	Pasador 5x18mm	Pasador metálico Comercial	1
56	Pasador 7,5x20mm	Pasador metálico Comercial	1
55	Pasador 1x20mm	Pasador metálico Comercial	2
54	ISO 4762 M4 x 16 - 16N	Tornillo cabeza allen M3x16 longitud roscada 16	2
53	ISO 4762 M3 x 8 - 8N	Tornillo cabeza allen M3x20 longitud roscada 20	1
52	ISO 14581 M2x6x6-N	Tornillo avellanado allen M2x6 longitud roscada 6	1
51	ISO 10642 - M3 x 12 - 12N	Tornillo avellanado allen M3x12 longitud roscada 12	4
50	ISO 10642 - M3 x 25 - 25N	Tornillo avellanado allen M3x25 longitud roscada 25	1
49	ISO 10642 - M3 x 10 - 10N	Tornillo avellanado allen M3x10 longitud roscada 10	2
48	ISO - 4032 - M2 - D - N	Tuerca hexagonal M2 Comercial	2
47	ISO - 4032 - M4 - D - C	Tuerca hexagonal M4 Comercial	2
46	ISO - 4032 - M3 - D - C	Tuerca hexagonal M3 Comercial	2
45	ISO - 4032 - M3 - D - N	Tuerca hexagonal M3 Comercial	17
44	LM0_8_20_On_2_3	Cónico KHK 20 dientes módulo 1 Comercial	2
43	AG0_5_30R1_On_3_2_3	Corona KHK 30 dientes módulo 0.5 Comercial	1
42	KWG0_5_R1__1__On_JSG_2_3	Sinfin KHK 1 espira módulo 0.5 Comercial	1
41	AG0_5_50R1_On	Corona KHK 50 dientes módulo 0.5 Comercial	1
40	Anillo achaflanado		1
39	Eje cuadrado de sección variable	Pieza de diseño	1
38	Eje cilíndrico abducción dedo Pulgar	Varilla metálica Comercial	1
37	Micro metal gearmotor con eje extendido	Micro metal gearmotor Pololu Comercial	3
36	PCB micro metal gearmotor Pololu encoder	PCB para Encoder Magnético Micromotor Pololu Comercial	2
35	Micro metal gearmotor Pololu encoder	Encoder magnético para Micromotor Pololu Comercial	3
10	Ensamble dedo Pulgar	Ensamblaje de piezas de diseño	1
9	Metacarpiano dedo Pulgar	Pieza de diseño	1
8	Soporte sistema de abducción Pulgar	Pieza de diseño	1
7	Accionamiento dedo Índice	Ensamblaje para accionamiento del dedo Índice	1
6	Ensamble dedo Índice	Ensamblaje de piezas de diseño	1
2	Articulación proximal del Índice	Pieza de diseño	1
1	Bancada	Placa metálica Comercial a partir de diseño	1
N.º DE ELEMENTO	NOMBRE DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD

Idioma:	Formato:	Unidad dimensional:	Escala:	Representación:	Material:
es	A1	mm	2:1		Específico del elemento
Propietario legal:	Tipo de documento:	Created por:	Fecha:		
	Dibujo de diseño	Álvaro Hernández	2022/10/18		
Escuela Superior de Tecnología	Triluo:	Montaje del sistema	Nº de Plano:		
			1		



Idioma: es	Formato: A4	Unidad dimensional: mm	Escala: 1:1	Representación: 	Material: Aluminio aleado 1060
---------------	----------------	---------------------------	----------------	---------------------	-----------------------------------

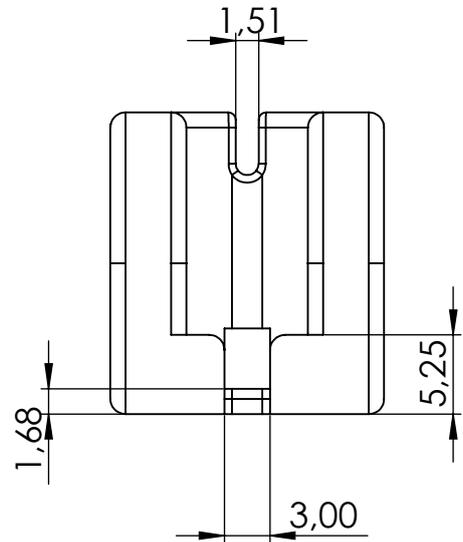
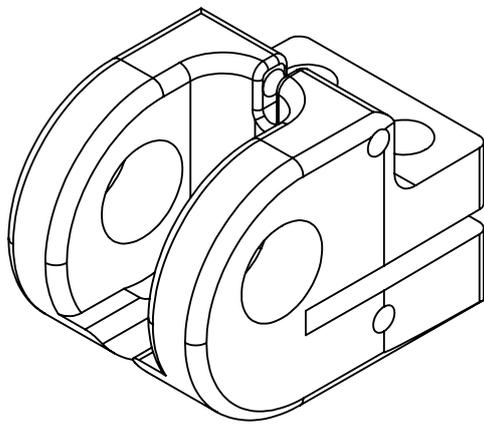
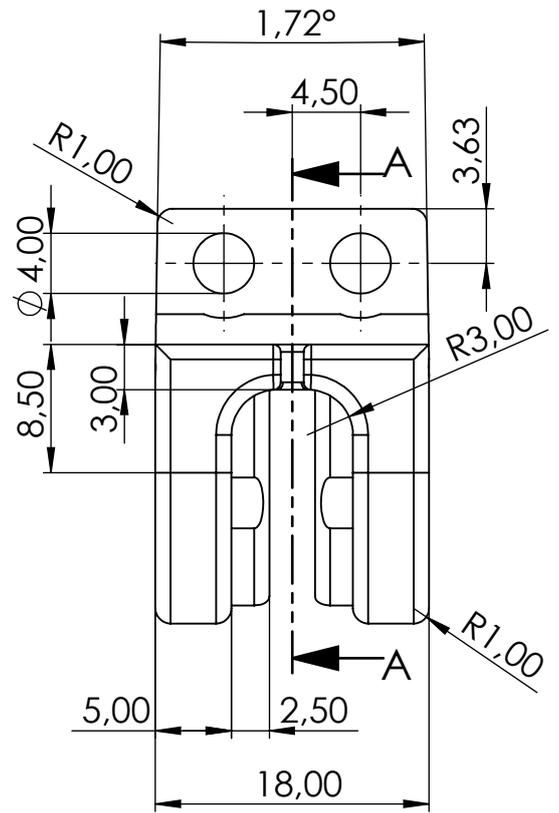
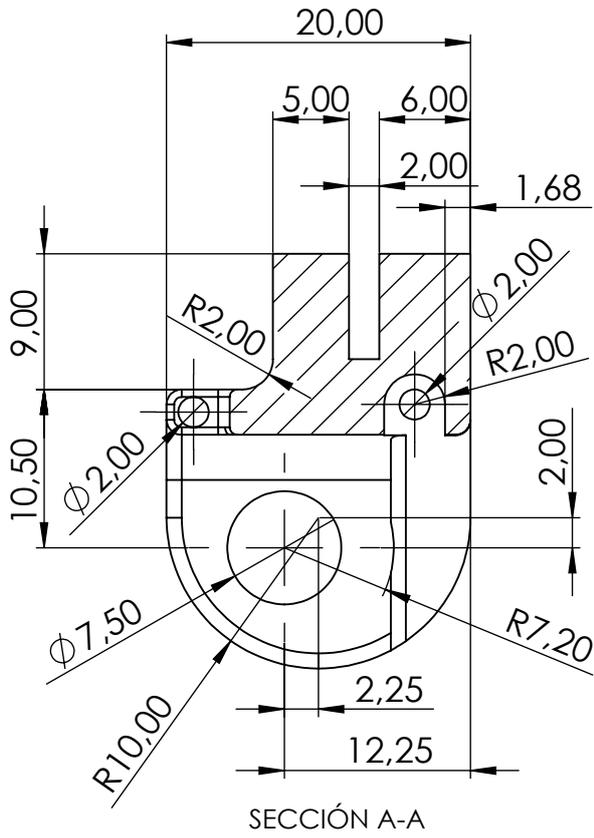
Propietario legal:

UNIVERSITAT JAUME I
 Escuela Superior de Tecnología

Biomecánica y Ergonomía

Tipo de documento:
Dibujo de diseño
 Creado por:
Álvaro Hernández
 Título:
Bancada

Fecha:
 2022/10/18
 N° de Plano:
1.1



Idioma: es	Formato: A4	Unidad dimensional: mm	Escala: 2:1	Representación: 	Material: ABS-Resina like
---------------	----------------	---------------------------	----------------	---------------------	------------------------------

Propietario legal:

 UNIVERSITAT
 JAUME I
 Escuela Superior
 de Tecnología

Biomecánica y
 Ergonomía

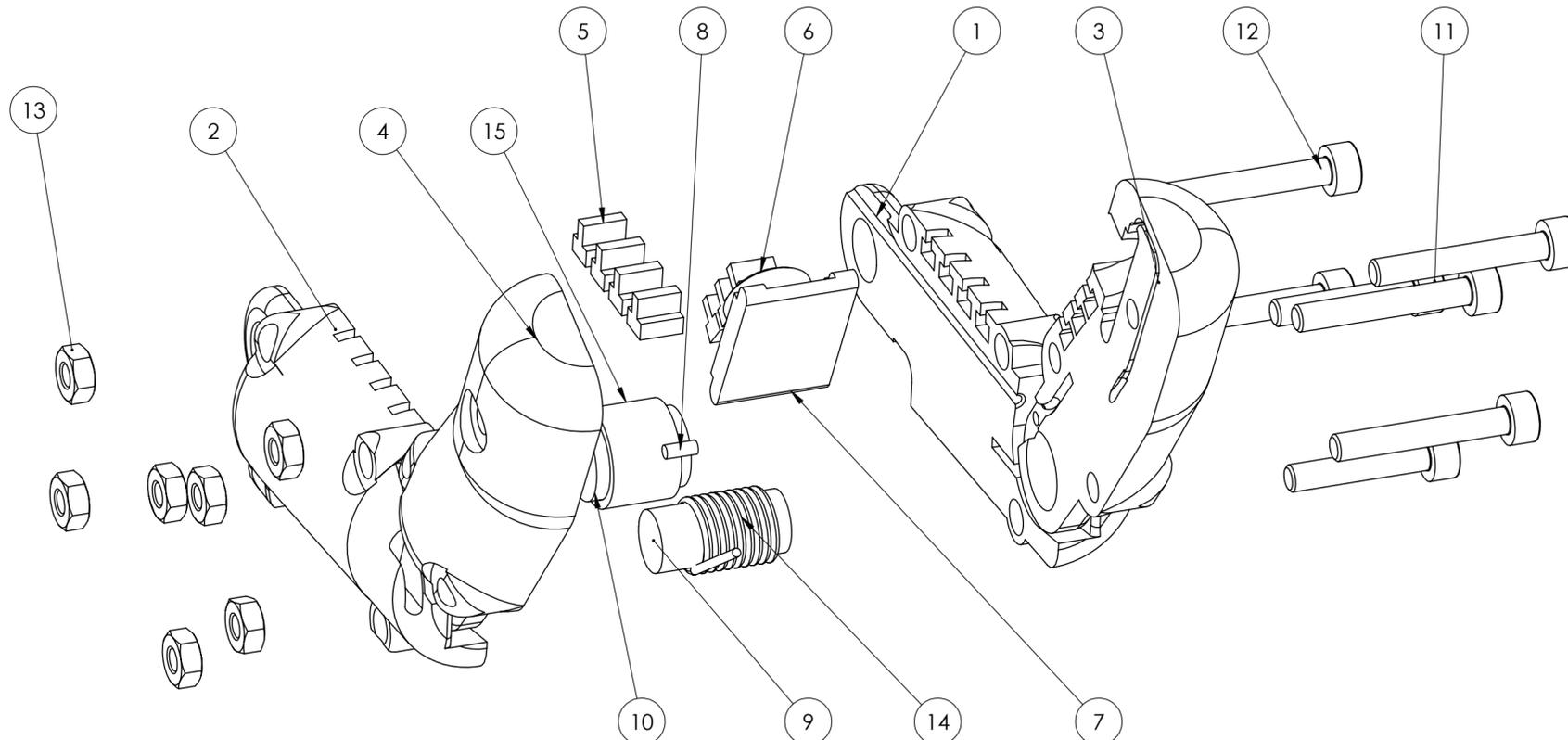
Tipo de documento:
 Dibujo de diseño

Creado por:
 Álvaro Hernández

Fecha:
 2022/10/18

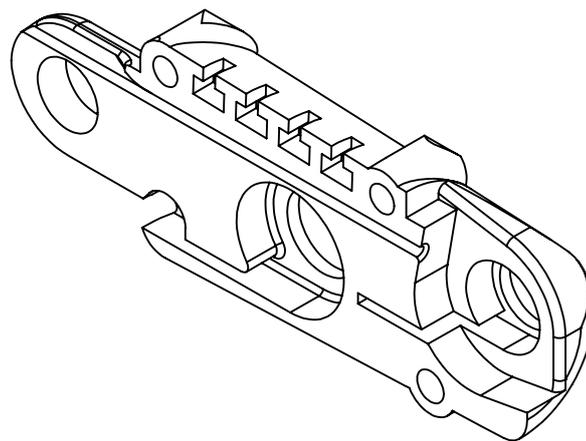
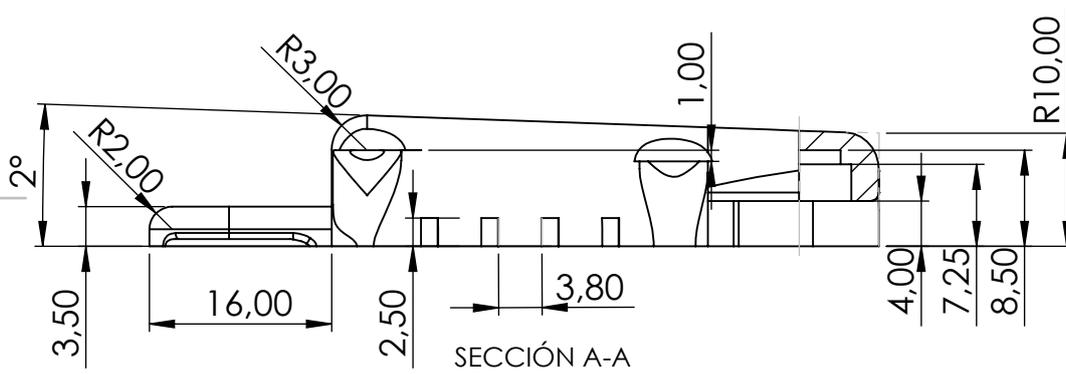
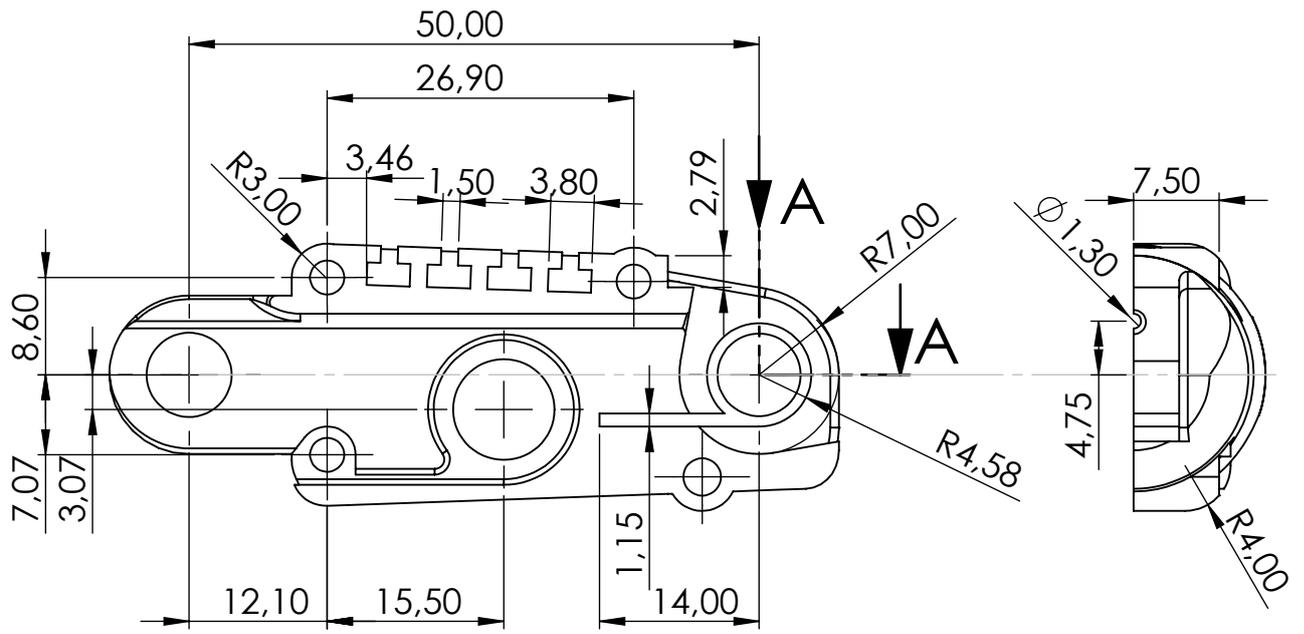
Título:
 Articulación proximal del Índice

Nº de Plano:
 1.2



15	CF015-0083	Resorte de fuerza constante Comercial	1
14	T038-270-218R	Resorte de torsión Comercial	1
13	ISO - 4032 - M3 - D - N	Tuerca cabeza hexagonal M3	7
12	ISO 4762 M3 x 20 - 20N	Tornillo cabeza allen M3x20 longitud roscada 20	5
11	ISO 4762 M3 x 16 - 16N	Tornillo cabeza allen M3x16 longitud roscada 16	2
10	Pasador 8,9x11mm	Pasador metálico Comercial	1
9	Pasador 7x15mm	Pasador metálico Comercial	1
8	Pasador 1,55x3,2mm	Pasador metálico Comercial	1
7	Soporte sensor y pulpejo	Pieza de diseño	1
6	Pulpejo	Pieza de diseño	1
5	Pieza de contacto	Pieza de diseño	7
4	2ª Mitad falange distal Índice	Pieza de diseño	1
3	1ª Mitad falange distal Índice	Pieza de diseño	1
2	2ª Mitad falange proximal Índice	Pieza de diseño	1
1	1ª Mitad falange proximal Índice	Pieza de diseño	1

N.º DE ELEMENTO	NOMBRE DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
Idioma:	Formato:	Unidad dimensional:	Escala:
es	A2	mm	2:1
Representación:		Material:	
		Específico del elemento	
Propietario legal:		Tipo de documento:	Creado por:
Escuela Superior de Tecnología		Dibujo de diseño	Álvaro Hernández
		Título:	Fecha:
		Ensamble dedo índice	2022/10/18
			Nº de Plano:
			1.3



Idioma: es	Formato: A4	Unidad dimensional: mm	Escala: 1,5:1	Representación: 	Material: ABS-Resina like
---------------	----------------	---------------------------	------------------	---------------------	------------------------------

Propietario legal:

UNIVERSITAT JAUME I
 Escuela Superior de Tecnología

BE
 Biomecánica y Ergonomía

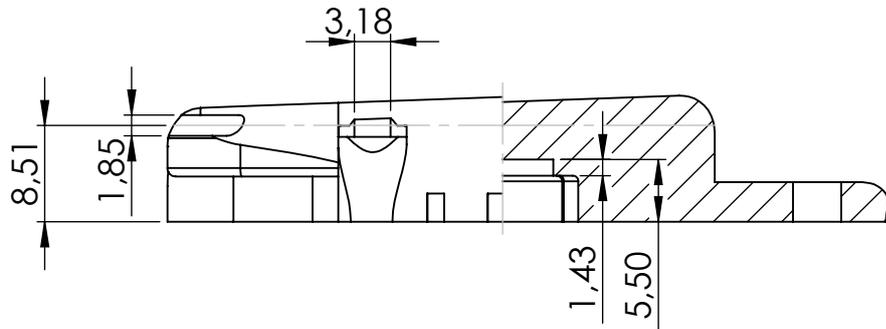
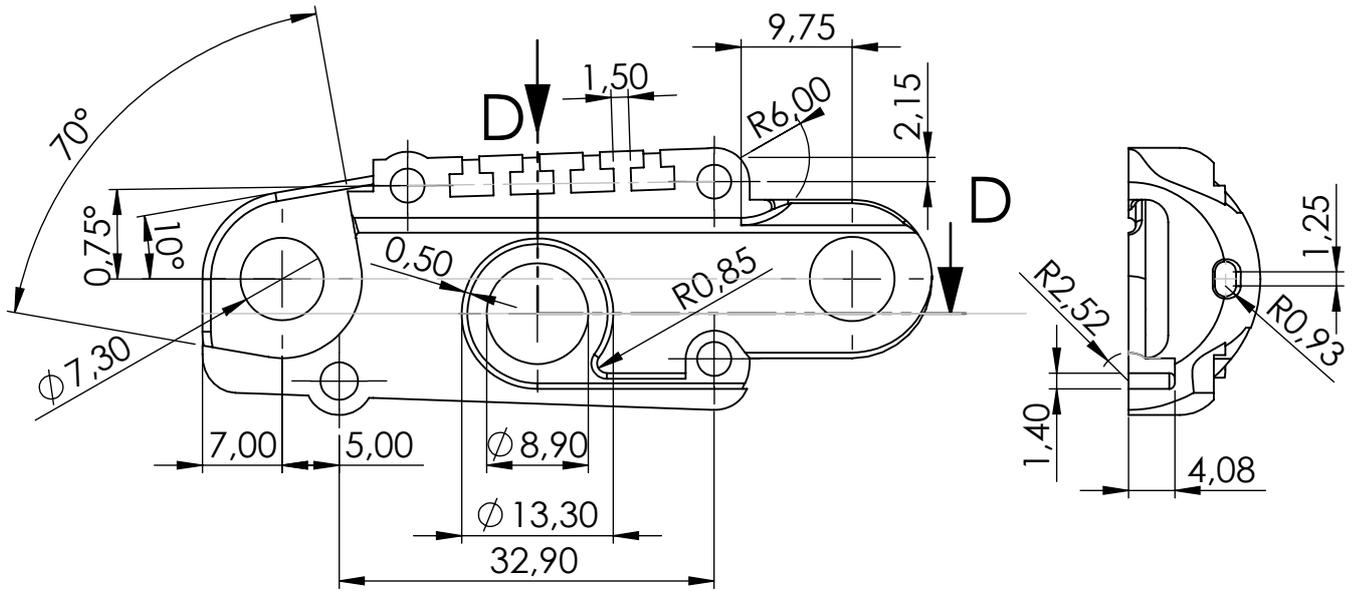
Tipo de documento:
Dibujo de diseño

Título:
Primera mitad falange proximal dedo índice

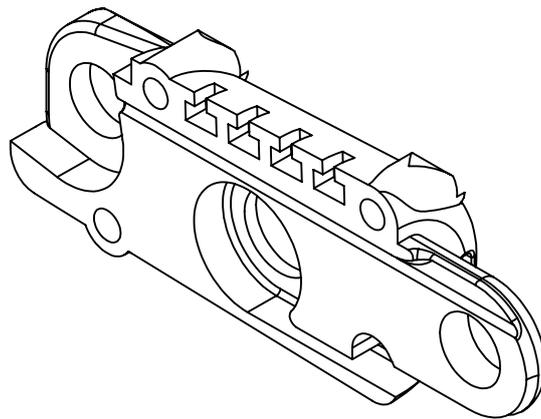
Creado por:
Álvaro Hernández

Fecha:
 2022/10/18

Nº de Plano:
1.3.1



SECCIÓN D-D



Idioma: es	Formato: A4	Unidad dimensional: mm	Escala: 1,5:1	Representación: 	Material: ABS-Resina like
---------------	----------------	---------------------------	------------------	---------------------	------------------------------

Propietario legal:

UNIVERSITAT JAUME I
 Escuela Superior de Tecnología

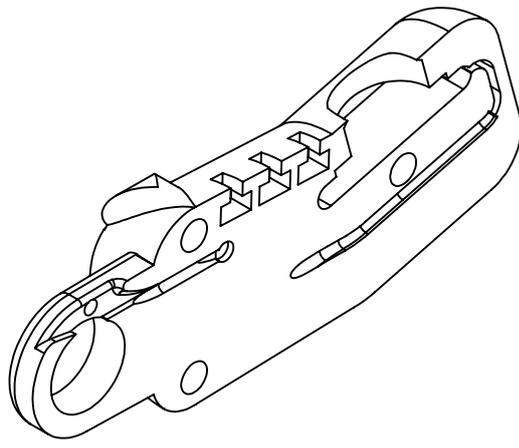
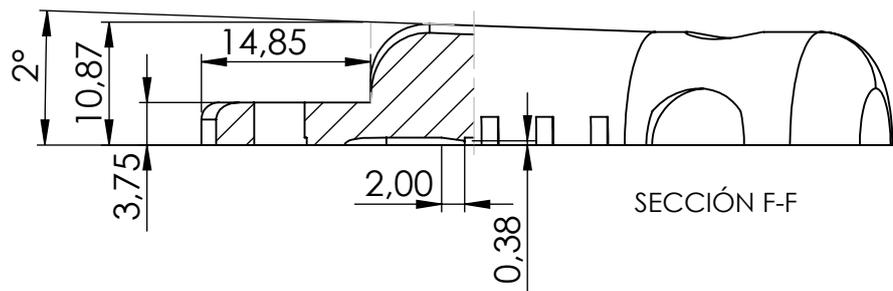
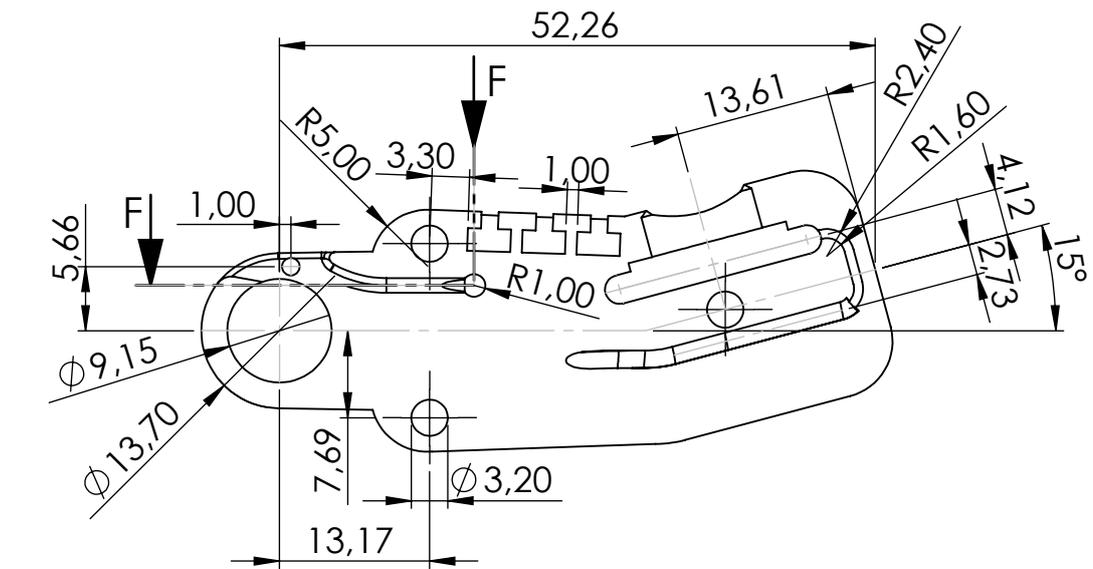
BE
 Biomecánica y Ergonomía

Tipo de documento:
Dibujo de diseño
 Título:
Segunda mitad falange proximal dedo Índice

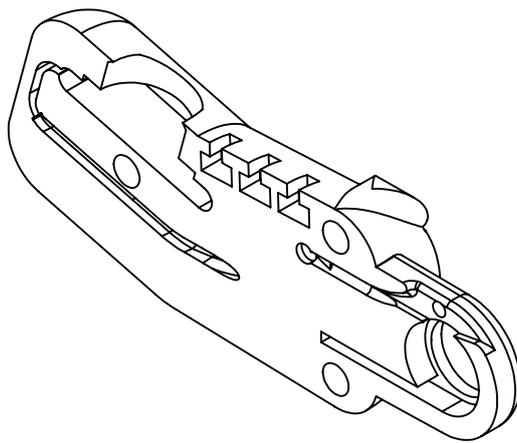
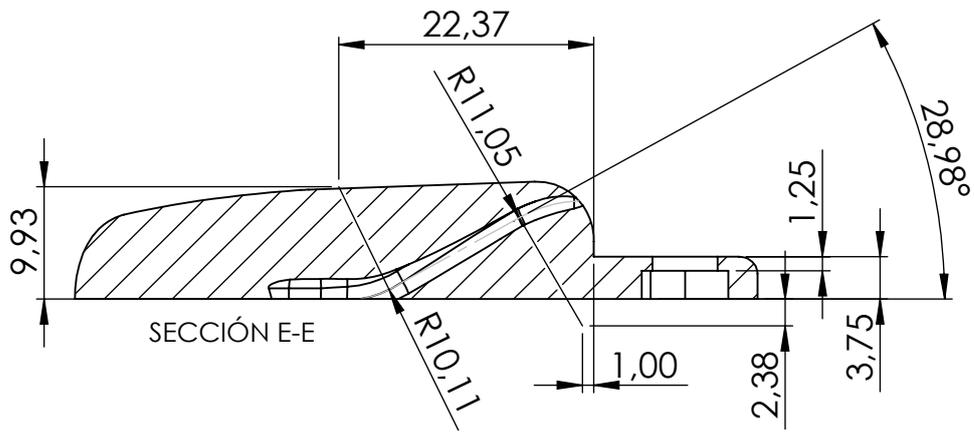
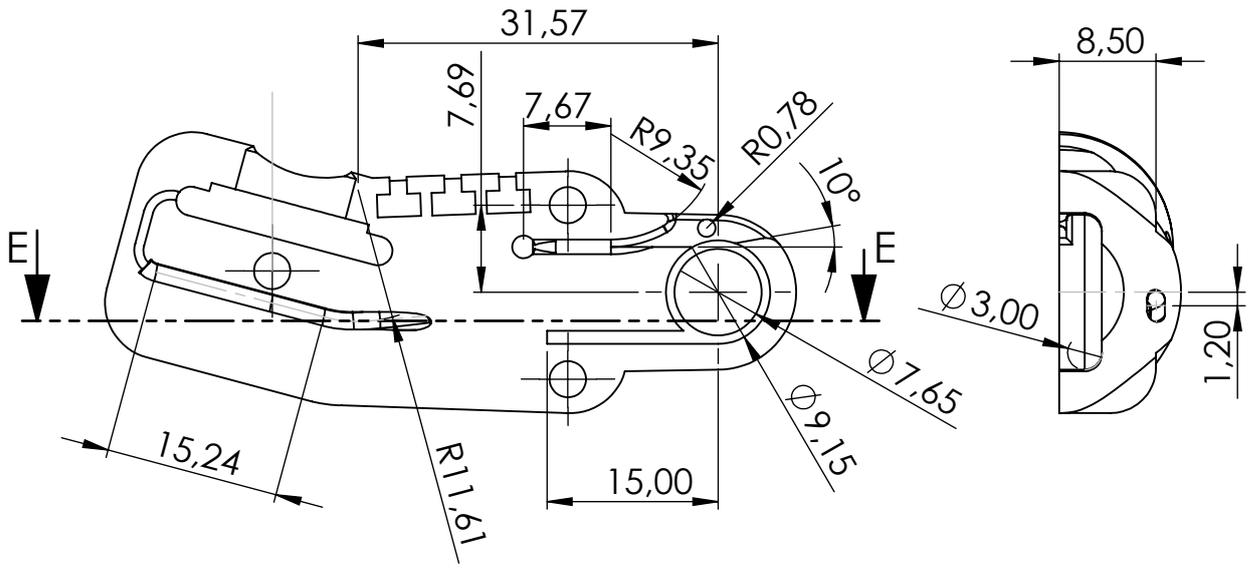
Creado por:
Álvaro Hernández

Fecha:
2022/10/18

Nº de Plano:
1.3.2



Idioma: es	Formato: A4	Unidad dimensional: mm	Escala: 1,5:1	Representación: 	Material: ABS-Resina like
Propietario legal: UNIVERSITAT JAUME I Escuela Superior de Tecnología		Tipo de documento: Dibujo de diseño	Creado por: Álvaro Hernández	Fecha: 2022/10/18	
Título: Primera mitad falange distal dedo índice			Nº de Plano: 1.3.3		



Idioma: es	Formato: A4	Unidad dimensional: mm	Escala: 1,5:1	Representación: 	Material: ABS-Resina like
---------------	----------------	---------------------------	------------------	---------------------	------------------------------

Propietario legal:

 UNIVERSITAT JAUME I
 Escuela Superior de Tecnología

Biomecánica y Ergonomía

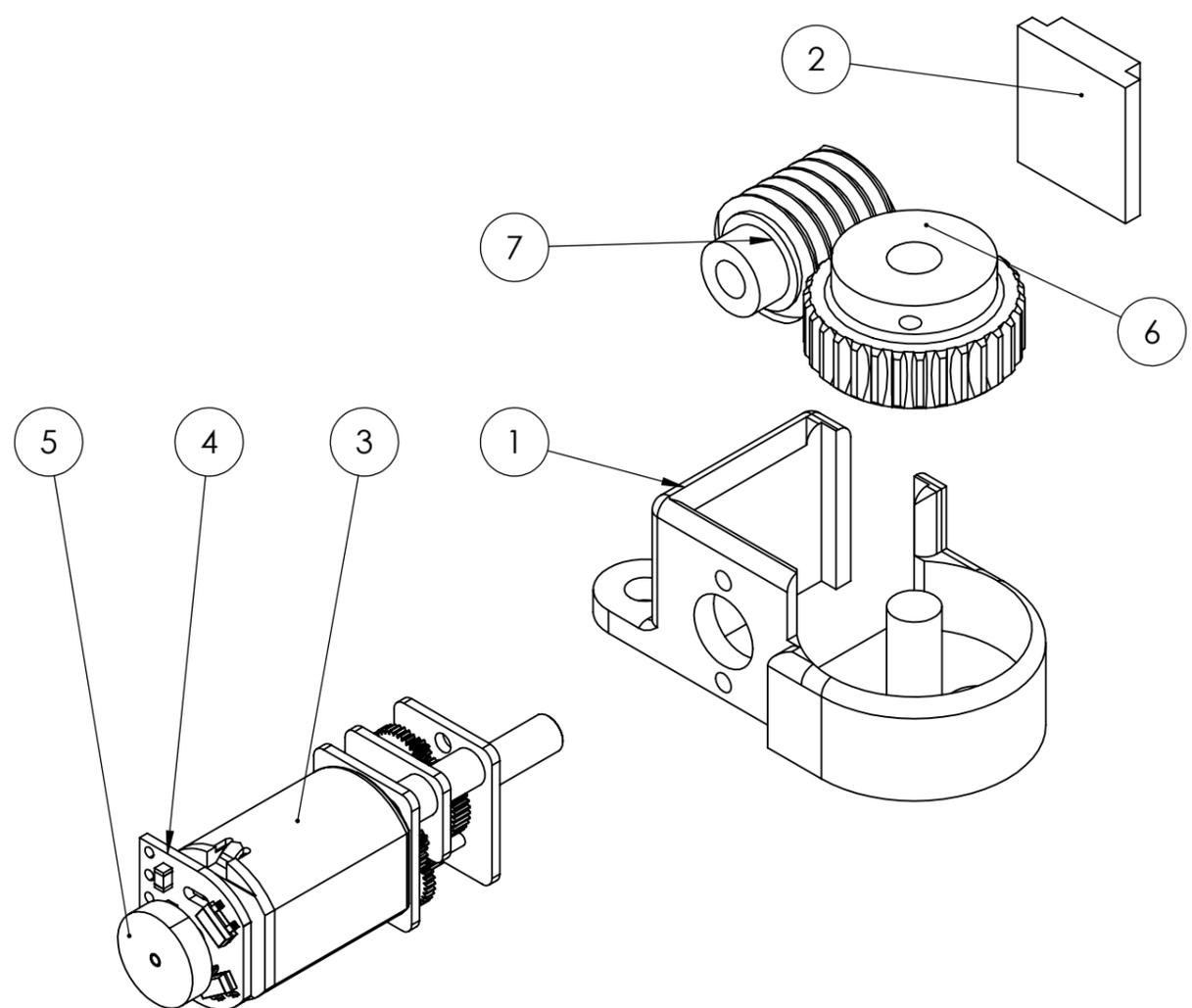
Tipo de documento:
Dibujo de diseño

Creado por:
Álvaro Hernández

Fecha:
2022/10/18

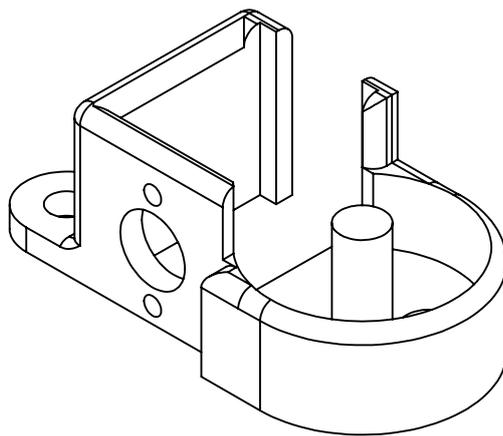
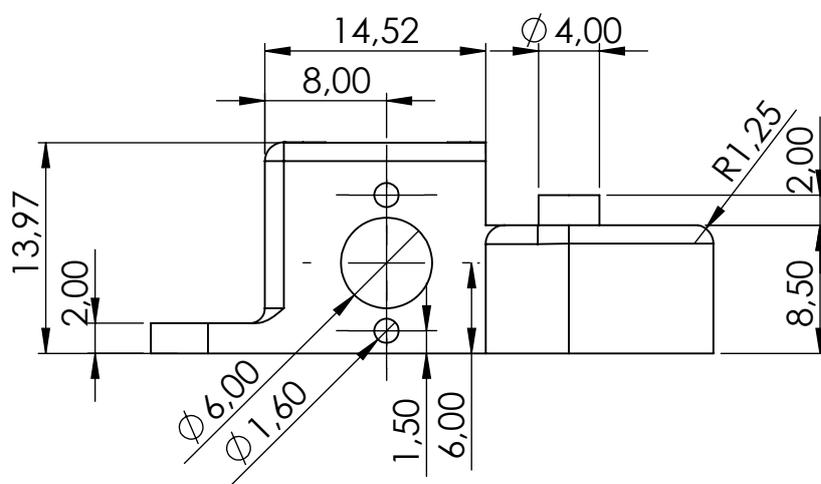
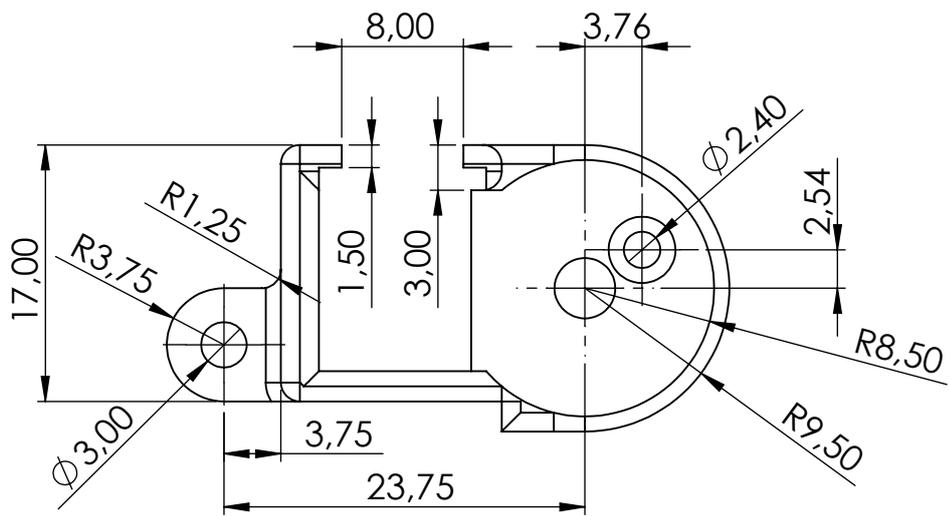
Título:
Segunda mitad falange distal
dedo índice

Nº de Plano:
1.3.4



7	KWG0_5_R1_1__On	Sinfín KHK 1 espira módulo 0.5 Comercial	1
6	AG0_5_30R1_On_3_2_3	Corona KHK 30 dientes módulo 0.5 Comercial	1
5	Micro metal gearmotor Pololu encoder	Encoder magnético para Micromotor Pololu Comercial	1
4	PCB micro metal gearmotor Pololu encoder	PCB para Encoder Magnético Micromotor Pololu Comercial	1
3	Micro metal gearmotor con eje extendido	Micro metal gearmotor Pololu Comercial	1
2	Tope axial Sinfín dedo Índice	Pieza de diseño	1
1	Soporte sistema de accionamiento dedo Índice	Pieza de diseño	1
N.º DE ELEMENTO	NOMBRE DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD

Idioma: es	Formato: A3	Unidad dimensional: mm	Escala: 2:1	Representación: 	Material: Específico del elemento
Propietario legal: Escuela Superior de Tecnología		Tipo de documento: Dibujo de diseño	Creado por: Álvaro Hernández	Fecha: 2022/10/18	Nº de Plano: 1.4
Título: Accionamiento dedo Índice					



Idioma: es	Formato: A4	Unidad dimensional: mm	Escala: 2:1	Representación: 	Material: ABS-Resina like
---------------	----------------	---------------------------	----------------	---------------------	------------------------------

Propietario legal:

 UNIVERSITAT JAUME I
 Escuela Superior de Tecnología

Biomecánica y Ergonomía

Tipo de documento:
 Dibujo de diseño

Creado por:
 Álvaro Hernández

Fecha:
 2022/10/18

Título:
 Soporte sistema de accionamiento dedo Índice

Nº de Plano:
 1.4.1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

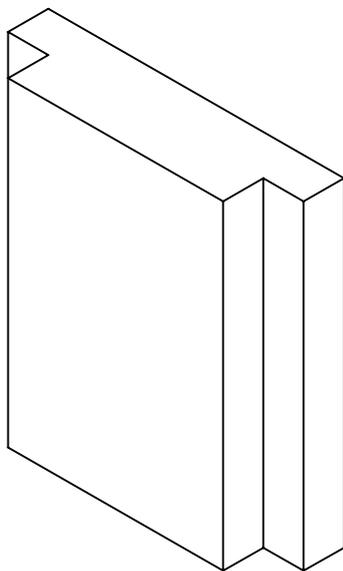
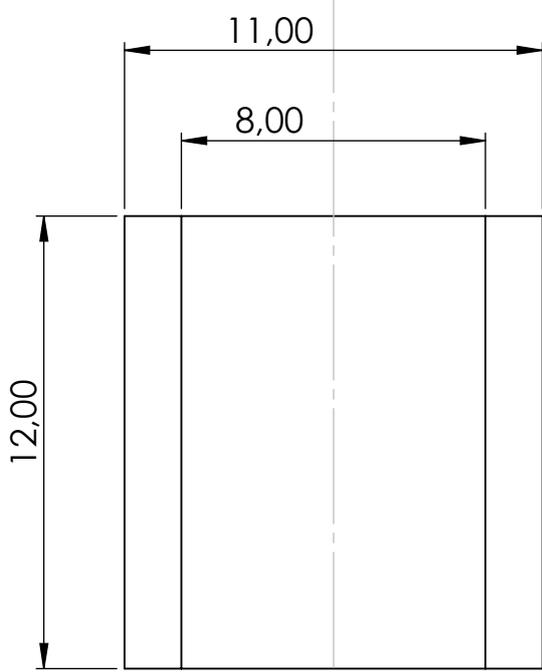
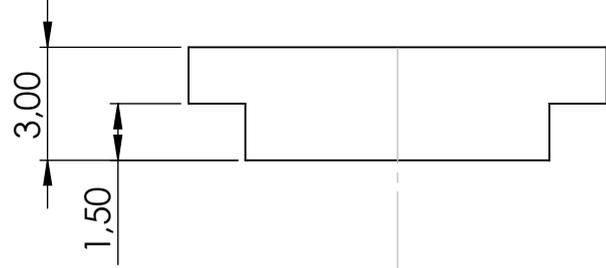
D

C

C

B

B



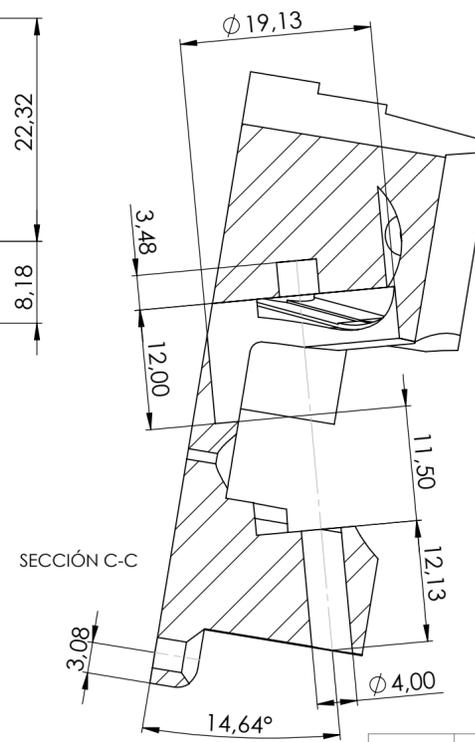
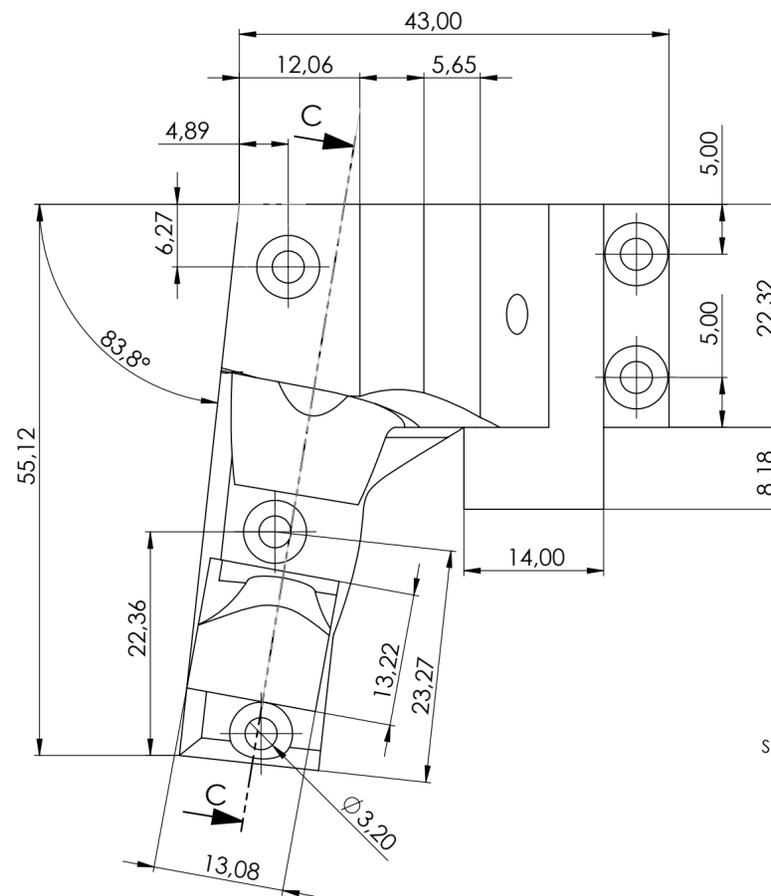
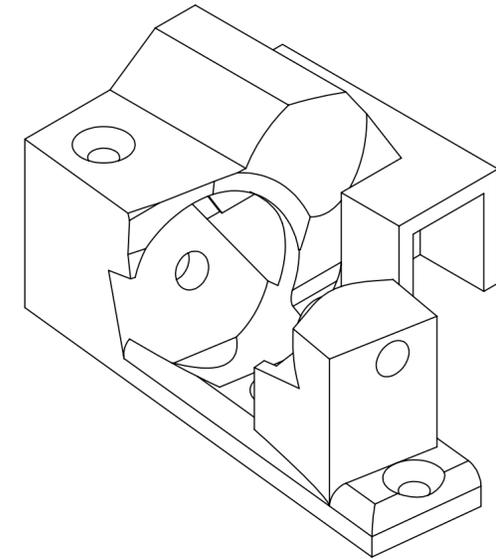
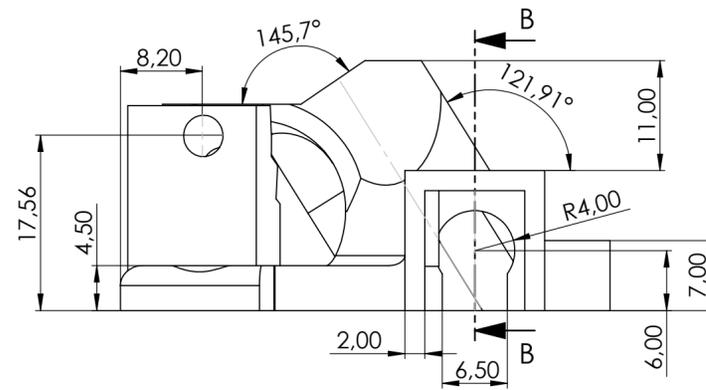
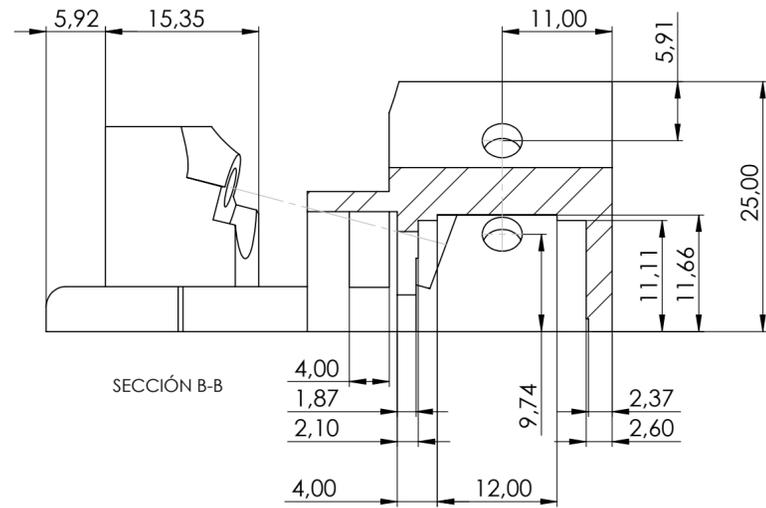
Idioma: es	Formato: A4	Unidad dimensional: mm	Escala: 5:1	Representación: 	Material: ABS-Resina like
---------------	----------------	---------------------------	----------------	---------------------	------------------------------

Propietario legal: UNIVERSITAT JAUME I Escuela Superior de Tecnología	 Biomecánica y Ergonomía	Tipo de documento: Dibujo de diseño	Creado por: Álvaro Hernández	Fecha: 2022/10/18
		Título: Tope axial Sinfín dedo Índice		Nº de Plano: 1.4.2

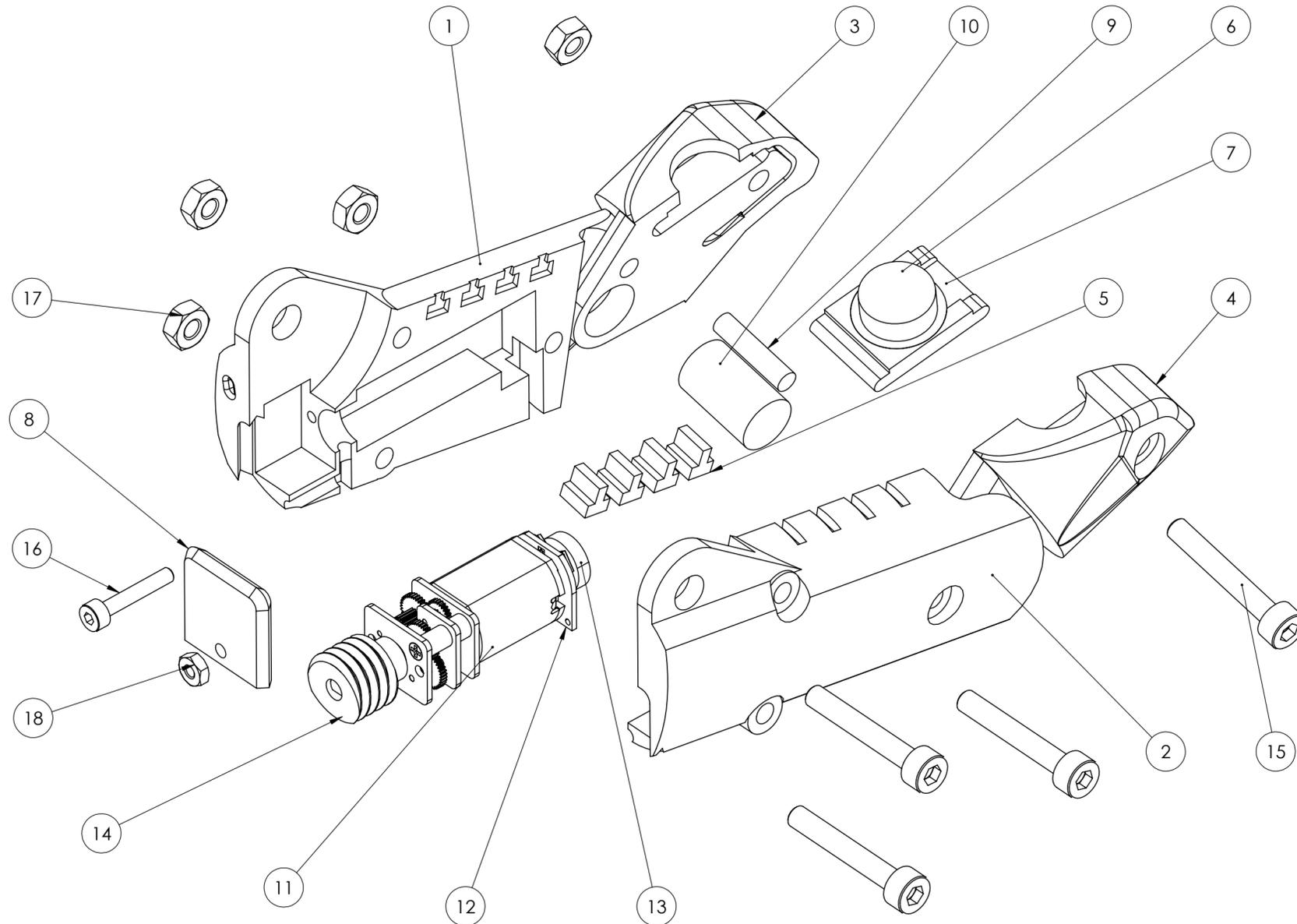
A

A

4 3 2 1



Idioma: es	Formato: A2	Unidad dimensional: mm	Escala: 5:1	Representación: 	Material: ABS-Resina like
Propietario legal: 		Tipo de documento: Dibujo de diseño		Creado por: Álvaro Hernández	Fecha: 2022/10/18
Título: Soporte sistema de abducción Pulgar				Nº de Plano: 1.5	



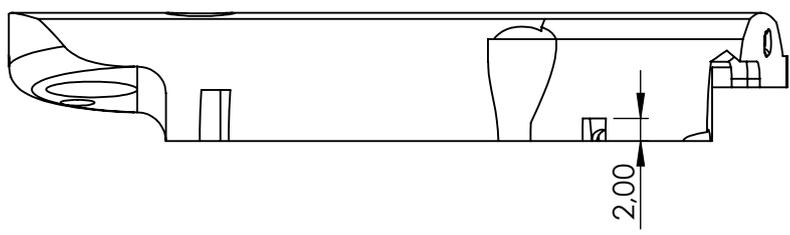
18	ISO - 4032 - M2 - D - N	Tuerca hexagonal M2 Comercial	1
17	ISO - 4032 - M3 - D - N	Tuerca hexagonal M3 Comercial	4
16	ISO 4762 M2 x 12 - 12N	Tornillo cabeza allen M2x12 longitud roscada 12 Comercial	1
15	ISO 4762 M3 x 16 - 16N	Tornillo cabeza allen M3x16 longitud roscada 20 Comercial	4
14	KWG0_5_R1_1_On	Sinfin KHK 1 espira módulo 0.5 Comercial	1
13	Micro metal gearmotor Pololu encoder	Encoder magnético para Micromotor Pololu Comercial	1
12	PCB micro metal gearmotor Pololu encoder	PCB para Encoder Magnético Micromotor Pololu Comercial	1
11	Micro metal gearmotor con eje extendido	Micro metal gearmotor Pololu Comercial	1
10	Pasador 8x13mm	Pasador metálico Comercial	1
9	Pasador 3x13mm	Pasador metálico Comercial	1
8	Tope axial para Sinfin del Pulgar	Pieza de diseño	1
7	Soporte sensor y pulpejo	Pieza de diseño	1
6	Pulpejo	Pieza de diseño	1
5	Pieza de contacto	Pieza de diseño	4
4	2ª Mitad falange distal Pulgar	Pieza de diseño	1
3	1ª Mitad falange distal Pulgar	Pieza de diseño	1
2	2ª Mitad falange proximal Pulgar	Pieza de diseño	1
1	1ª Mitad falange proximal Pulgar	Pieza de diseño	1
N.º DE ELEMENTO	NOMBRE DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD

Idioma:	Formato:	Unidad dimensional:	Escala:	Representación:	Material:
es	A2	mm	2:1		Específico del elemento
Propietario legal:		Tipo de documento:	Creado por:	Fecha:	
		Dibujo de diseño	Álvaro Hernández	2022/10/18	
		Título:	Nº de Plano:		
		Ensamble dedo pulgar	1.6		

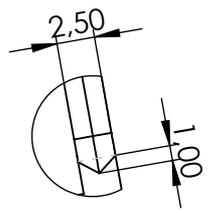
4 3 2 1

F

F

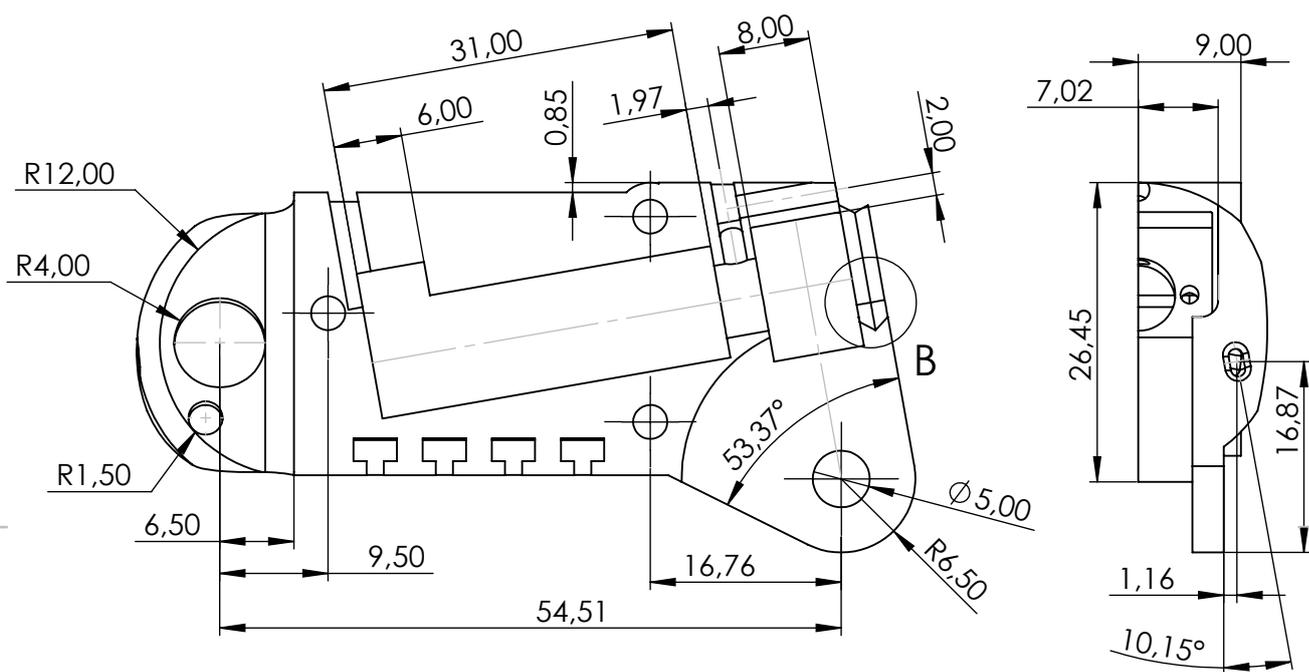


DETALLE B



E

E

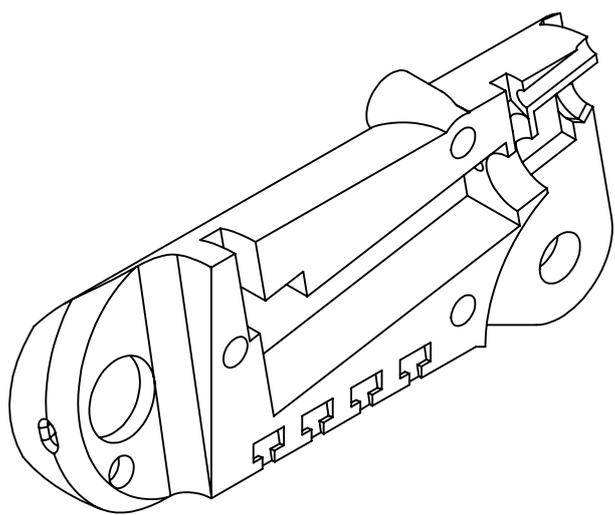


D

D

C

C



B

B

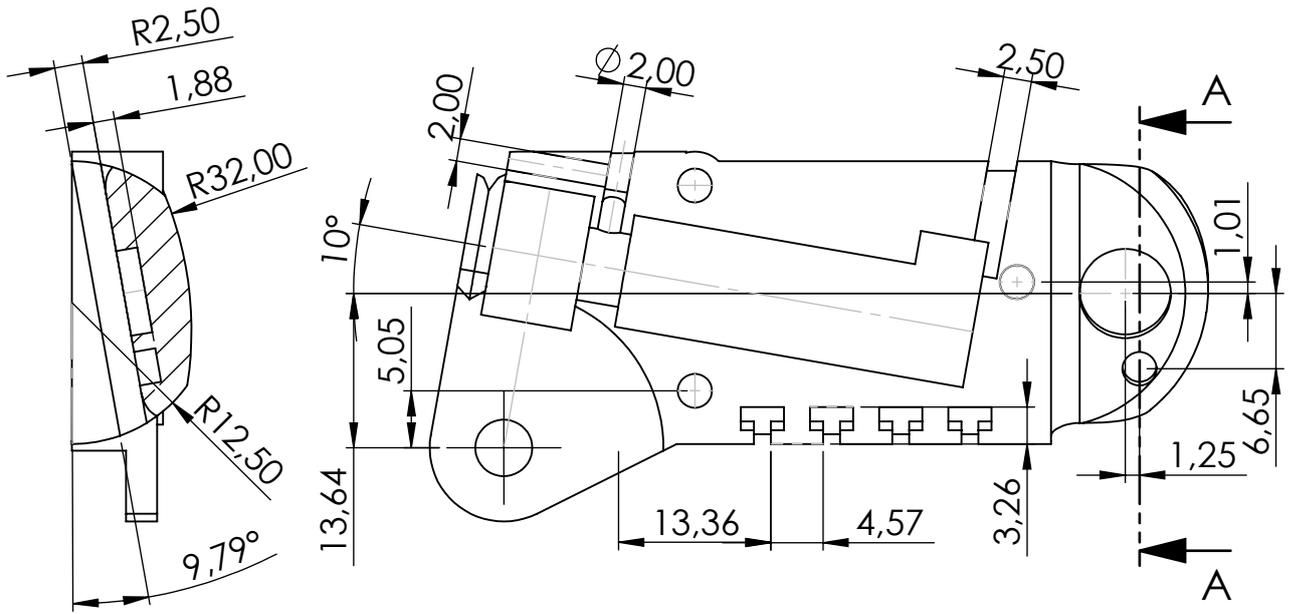
Idioma: es	Formato: A4	Unidad dimensional: mm	Escala: 1,5:1	Representación: 	Material: ABS-Resina like
---------------	----------------	---------------------------	------------------	---------------------	------------------------------

A

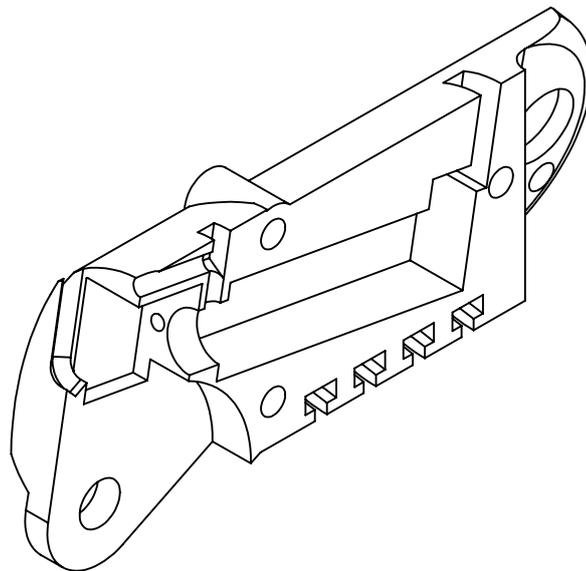
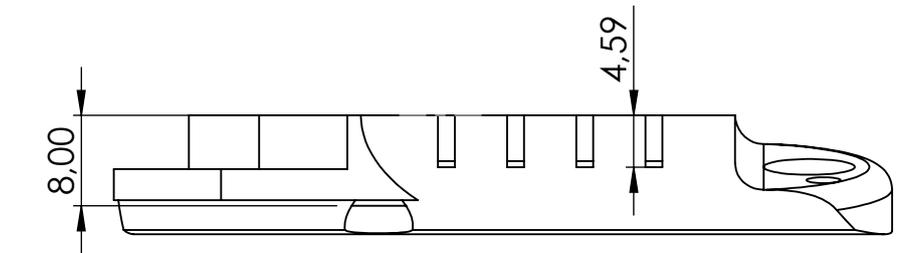
A

Propietario legal: UNIVERSITAT JAUME I Escuela Superior de Tecnología		Tipo de documento: Dibujo de diseño	Creado por: Álvaro Hernández	Fecha: 2022/10/18
Título: Primera mitad falange proximal dedo Pulgar			Nº de Plano: 1.6.1	

4 3 2 1



SECCIÓN A-A



Idioma: es	Formato: A4	Unidad dimensional: mm	Escala: 1,5:1	Representación: 	Material: ABS-Resina like
---------------	----------------	---------------------------	------------------	---------------------	------------------------------

Propietario legal:

 UNIVERSITAT
 JAUME I
 Escuela Superior
 de Tecnología

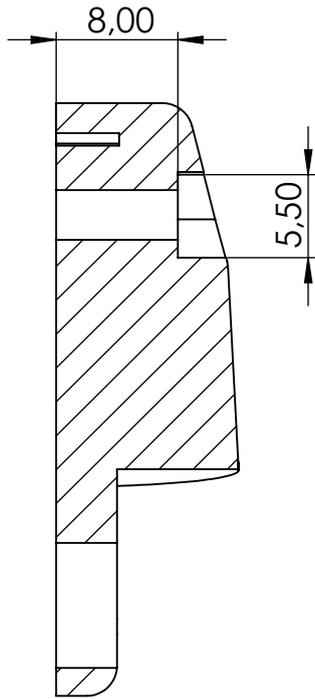

 Biomecánica y
 Ergonomía

Tipo de documento:
 Dibujo de diseño
 Título:
 Segunda mitad falange proximal
 dedo Pulgar

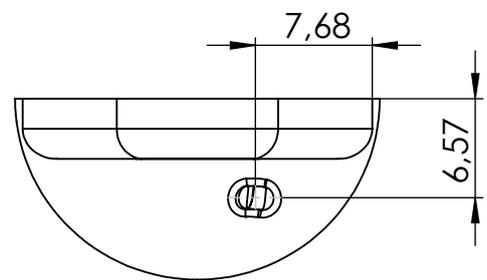
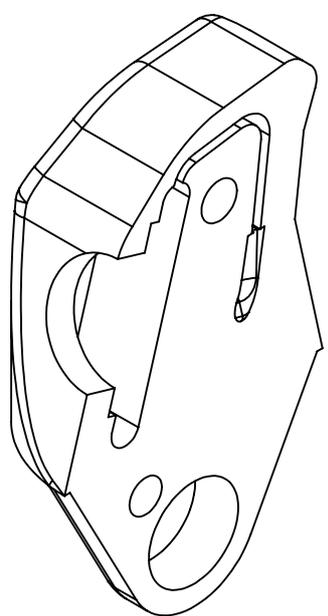
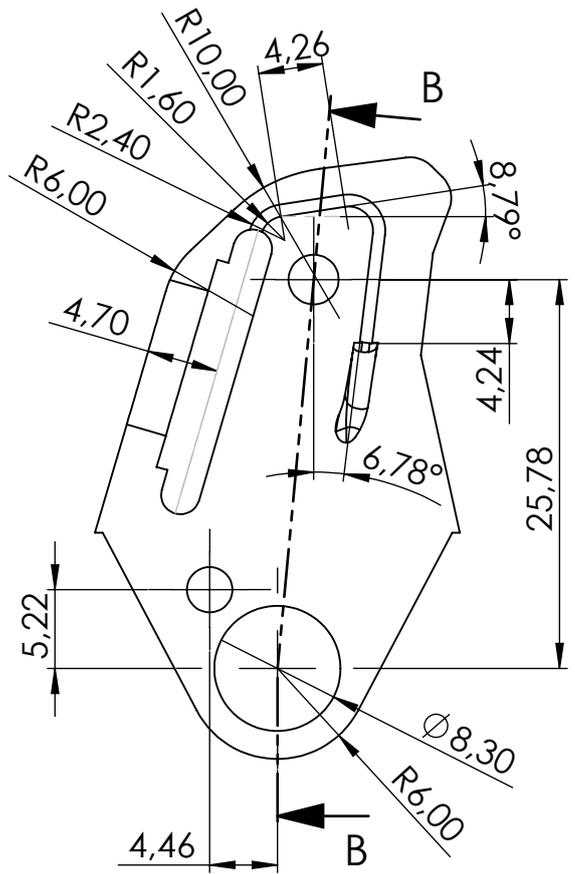
Creado por:
 Álvaro Hernández

Fecha:
 2022/10/18

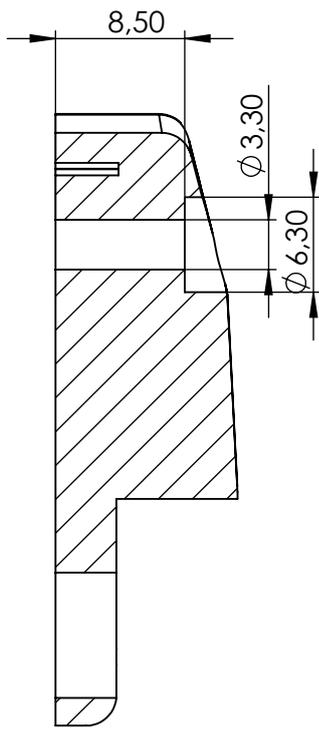
Nº de Plano:
 1.6.2



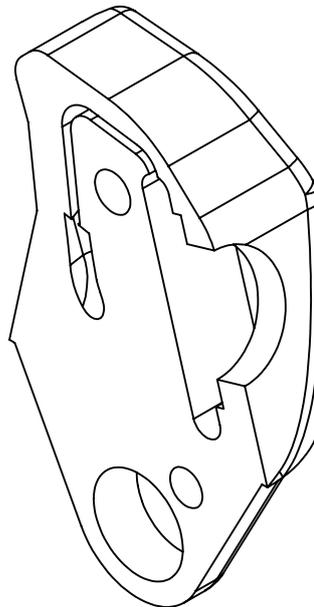
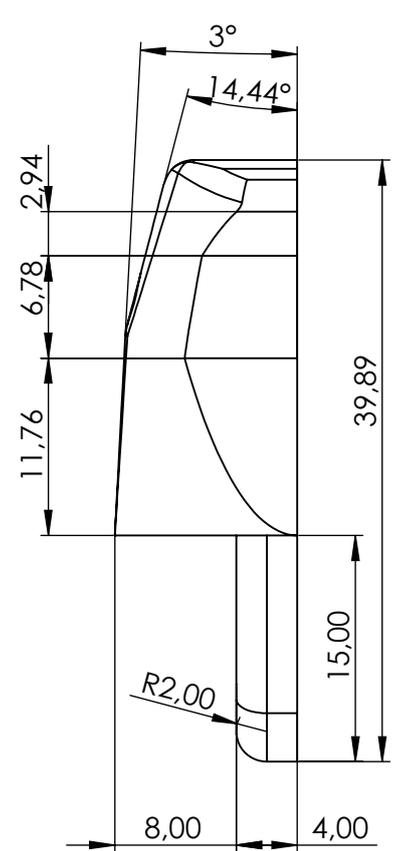
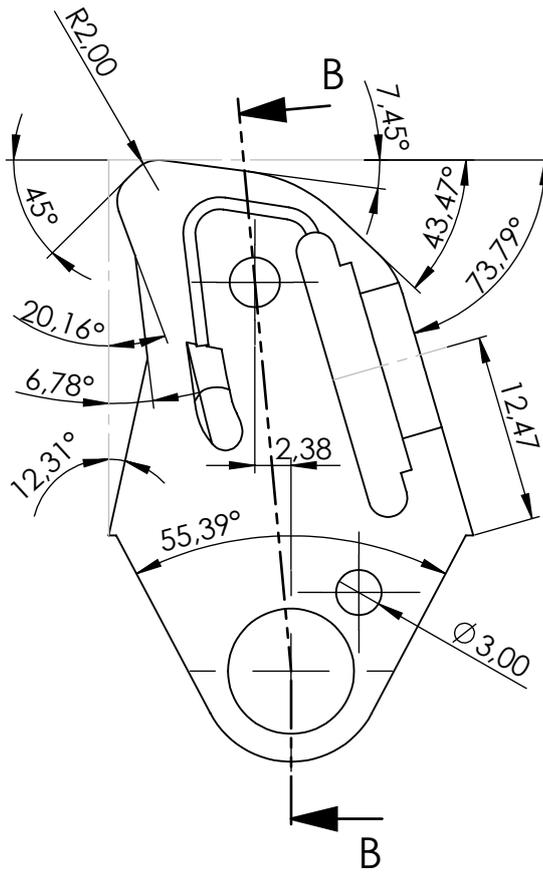
SECCIÓN B-B



Idioma: es	Formato: A4	Unidad dimensional: mm	Escala: 2:1	Representación: 	Material: ABS-Resina like
Propietario legal: UNIVERSITAT JAUME I Escuela Superior de Tecnología		Tipo de documento: Dibujo de diseño	Creado por: Álvaro Hernández	Fecha: 2022/10/18	Nº de Plano: 1.6.3
Título: Primera mitad flange distal dedo Pulgar					



SECCIÓN B-B



Idioma: es	Formato: A4	Unidad dimensional: mm	Escala: 2:1	Representación: 	Material: ABS-Resina like
---------------	----------------	---------------------------	----------------	---------------------	------------------------------

Propietario legal:

UNIVERSITAT JAUME I
 Escuela Superior de Tecnología

Biomecánica y Ergonomía

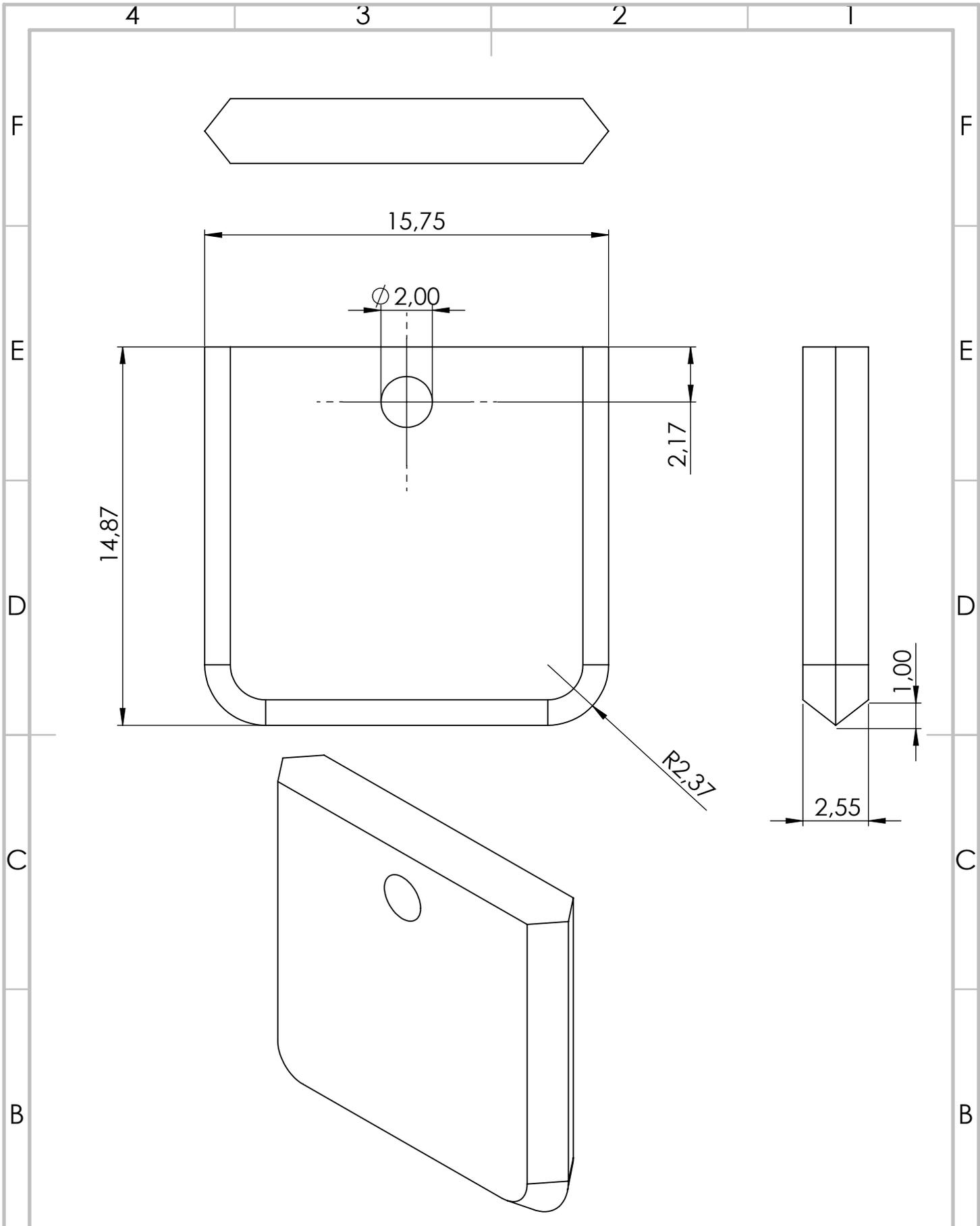
Tipo de documento:
Dibujo de diseño

Creado por:
Álvaro Hernández

Fecha:
2022/10/18

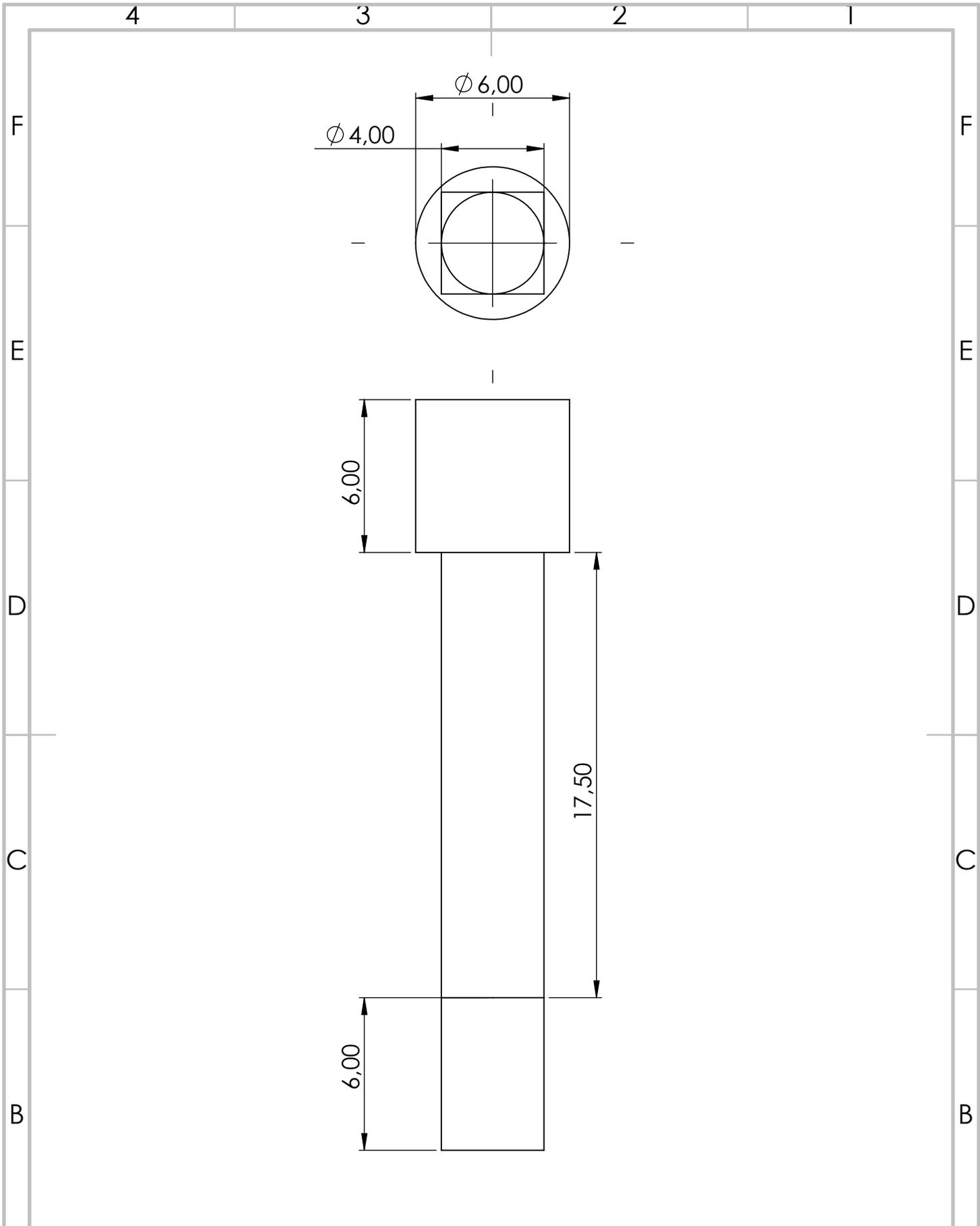
Título:
Segunda mitad falange distal
dedo Pulgar

Nº de Plano:
1.6.4



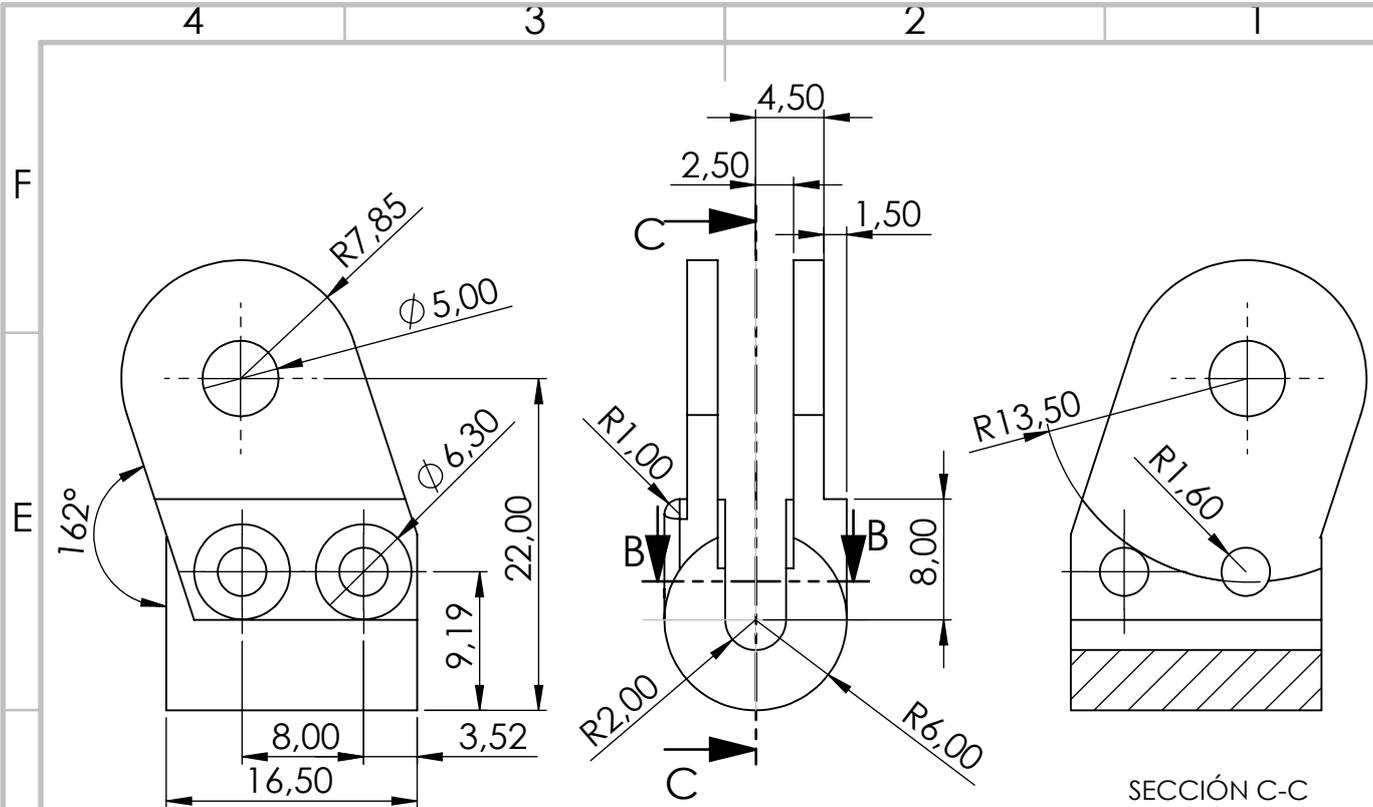
Idioma: es	Formato: A4	Unidad dimensional: mm	Escala: 5:1	Representación: 	Material: ABS-Resina like
---------------	----------------	---------------------------	----------------	---------------------	------------------------------

Propietario legal: UNIVERSITAT JAUME I Escuela Superior de Tecnología	 Biomecánica y Ergonomía	Tipo de documento: Dibujo de diseño	Creado por: Álvaro Hernández	Fecha: 2022/10/18
		Título: Tope axial para sinfín del Pulgar		Nº de Plano: 1.6.5

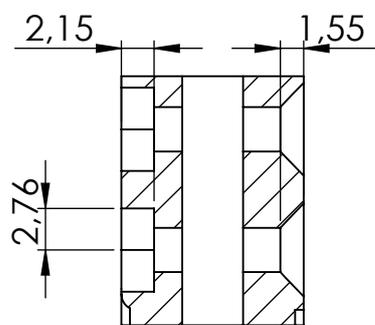


Idioma: es	Formato: A4	Unidad dimensional: mm	Escala: 5:1	Representación: 	Material: Acero
---------------	----------------	---------------------------	----------------	---	--------------------

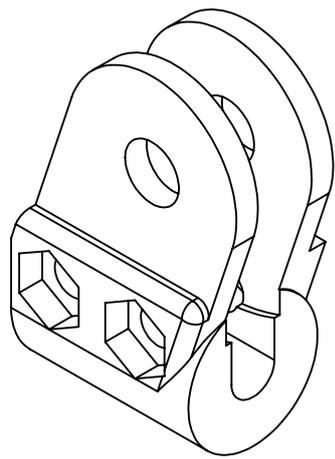
Propietario legal:  UNIVERSITAT JAUME I Escuela Superior de Tecnología	 Biomecánica y Ergonomía	Tipo de documento: Dibujo de diseño	Creado por: Álvaro Hernández	Fecha: 2022/10/18
		Título: Eje cuadrado de sección variable		Nº de Plano: 1.7



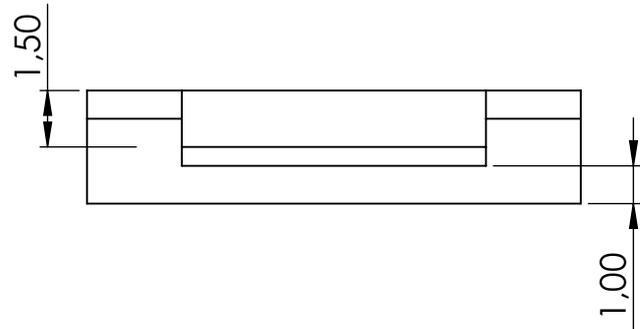
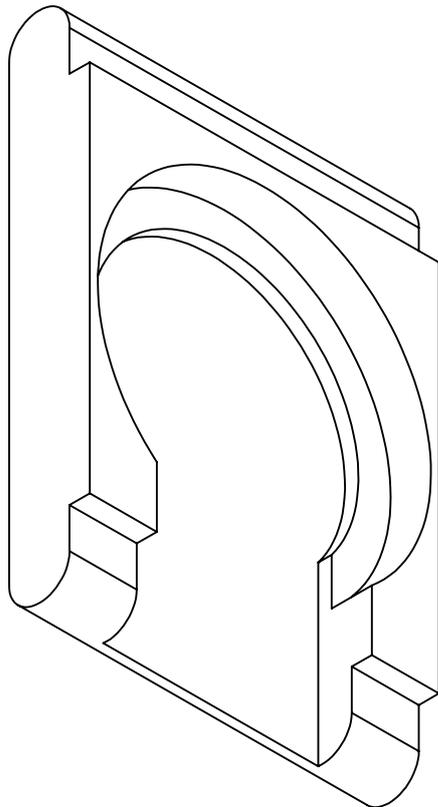
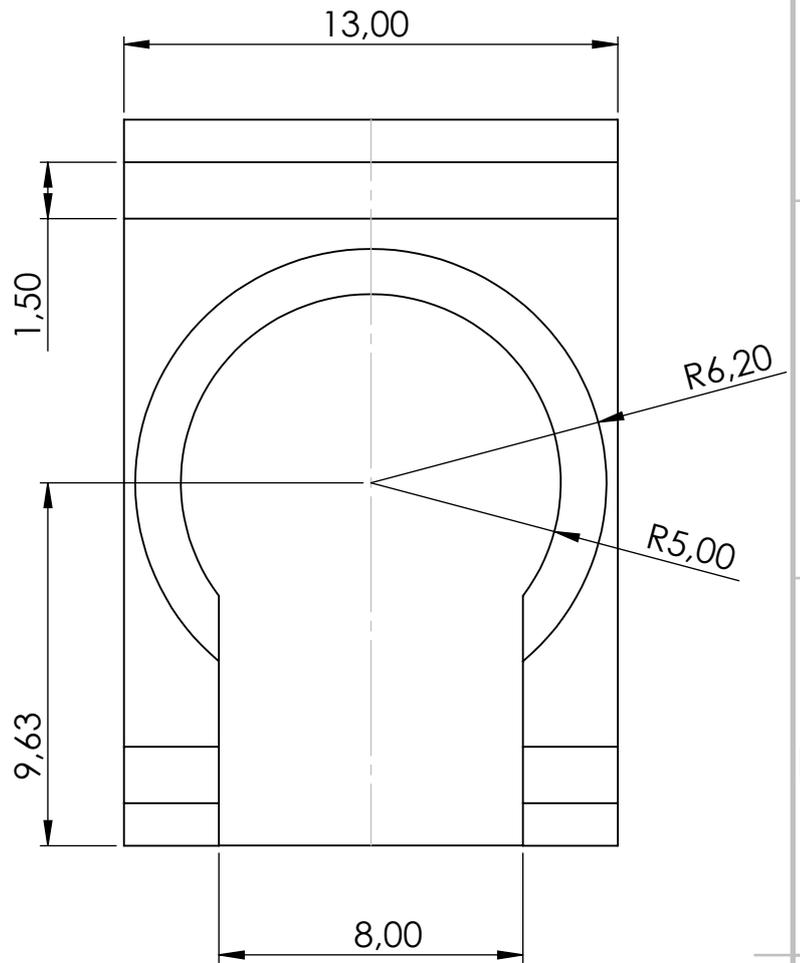
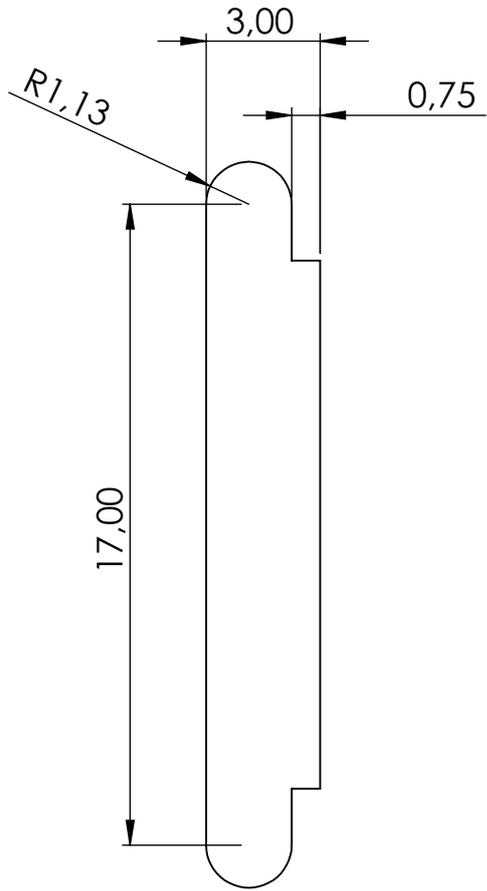
SECCIÓN C-C



SECCIÓN B-B



Idioma: es	Formato: A4	Unidad dimensional: mm	Escala: 2:1	Representación: 	Material: ABS-Resina like
Propietario legal: UNIVERSITAT JAUME I Escuela Superior de Tecnología		Tipo de documento: Dibujo de diseño		Creado por: Álvaro Hernández	Fecha: 2022/10/18
Título: Metacarpiano dedo Pulgar				Nº de Plano: 1.8	



Idioma:
es

Formato:
A4

Unidad dimensional:
mm

Escala:
5:1

Representación:

Material:
ABS-Resina like

Propietario legal:

UNIVERSITAT
JAUME I
Escuela Superior
de Tecnología

Biomecánica y
Ergonomía

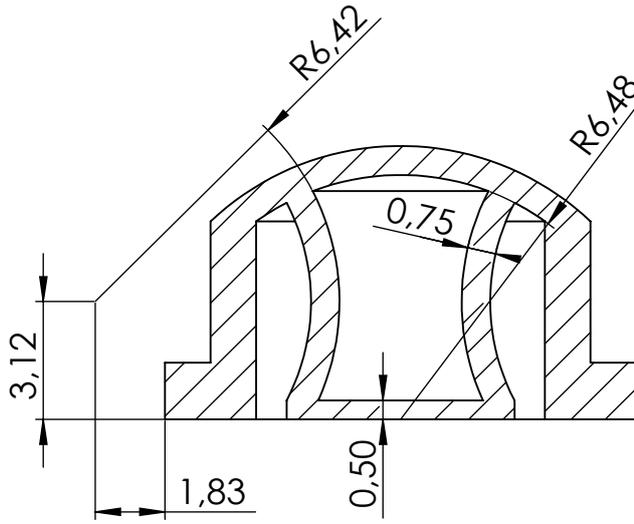
Tipo de documento:
Dibujo de diseño

Creado por:
Álvaro Hernández

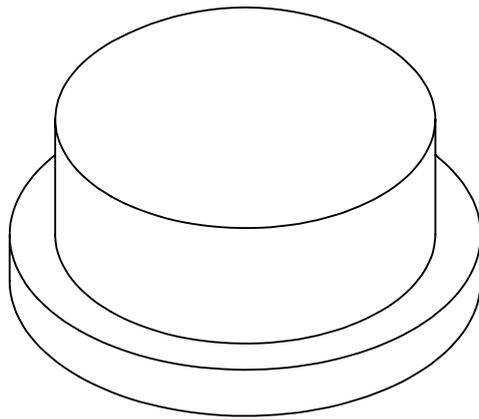
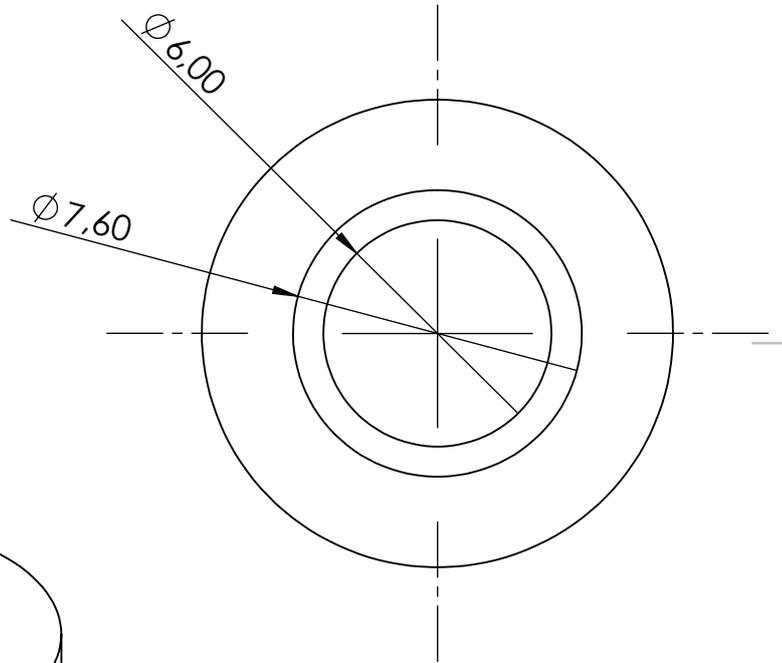
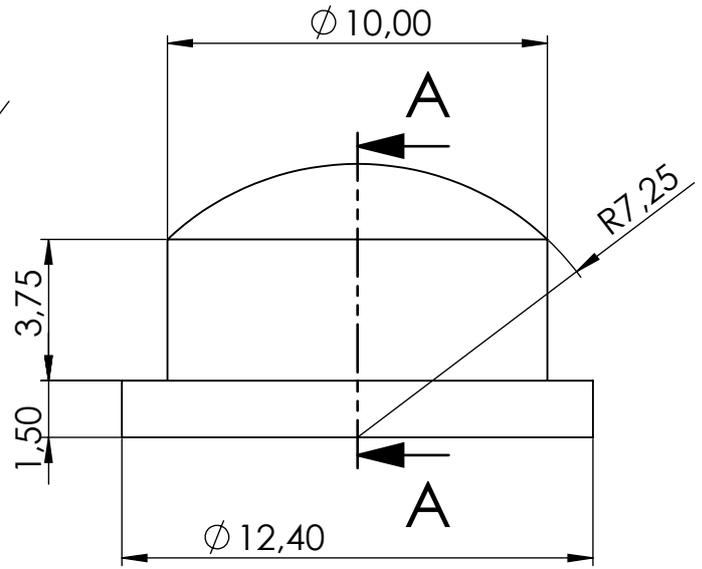
Fecha:
2022/10/18

Título:
Soporte sensor y pulpejo

Nº de Plano:
1.9



SECCIÓN A-A



Idioma:
es

Formato:
A4

Unidad dimensional:
mm

Escala:
5:1

Representación:

Material:
FilaFlex

Propietario legal:

UNIVERSITAT
JAUME I
Escuela Superior
de Tecnología

Biomecánica y
Ergonomía

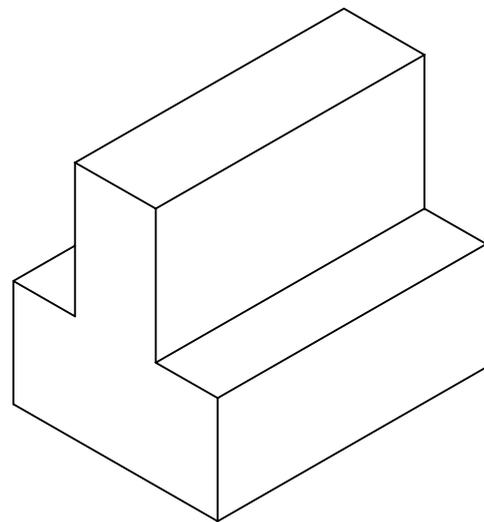
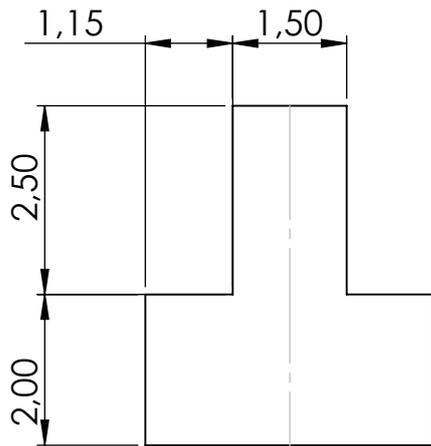
Tipo de documento:
Dibujo de diseño

Creado por:
Álvaro Hernández

Fecha:
2022/10/18

Título:
Pulpejo

Nº de Plano:
1.10



Idioma:
es

Formato:
A4

Unidad dimensional:
mm

Escala:
10:1

Representación:


Material:
FilaFlex

Propietario legal:

UNIVERSITAT
JAUME I
Escuela Superior
de Tecnología


Biomecánica y
Ergonomía

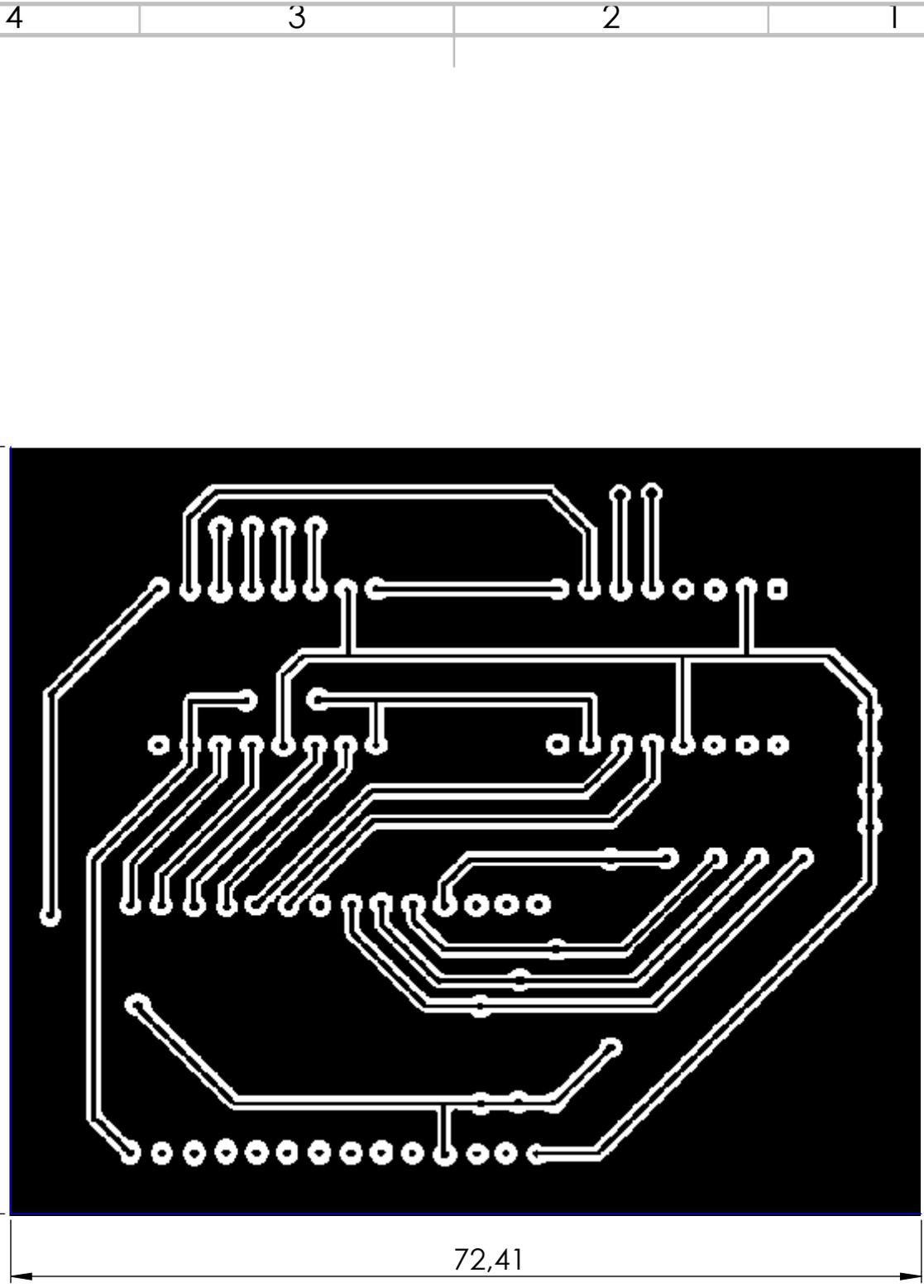
Tipo de documento:
Dibujo de diseño

Creado por:
Álvaro Hernández

Fecha:
2022/10/18

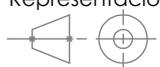
Título:
Pieza de contacto

Nº de Plano:
1.11



61,50

72,41

Idioma: es	Formato: A4	Unidad dimensional: mm	Escala: 2:1	Representación: 	Material: Cobre
Propietario legal:  UNIVERSITAT JAUME I Escola Superior de Tecnologia	 Biomecánica y Ergonomía	Tipo de documento: Dibujo de diseño		Creado por: Álvaro Hernández	Fecha: 2022/10/18
		Título: Plano placa mecanizada			Nº de Plano: 2