

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**Diseño de un guante con movimiento independiente por cada dedo basado
en tecnología de soft robotics para el apoyo en el proceso de rehabilitación
de manos**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

AUTOR:

Anders Jeanpierre López Junchaya

ASESOR:

José Gustavo García Sulca


Lima, Noviembre de 2022

Informe de Similitud

Yo, Jose Gustavo García Sulca, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado Diseño de un guante con movimiento independiente por cada dedo basado en tecnología de soft robotics para el apoyo en el proceso de rehabilitación de manos, del/de la autor(a)/ de los(as) autores(as) López Junchaya, Anders Jeanpierre de constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 23%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 24/11/2022.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 20 de enero del 2023

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>García Sulca, Jose Gustavo</u>	
DNI: 70348242	Firma 
ORCID: 0000-0003-1970-7578	



RESUMEN

El presente documento presenta el diseño del prototipo de un dispositivo de rehabilitación para manos a través de movimientos independientes de cada dedo, el objetivo principal de este dispositivo es la realización de ejercicios que propicien la recuperación de los músculos de la mano luego de sufrir una lesión.

Para conseguir esto, primero, se definió el problema y se propusieron objetivos específicos que servirían para verificar el avance, así como se limitó el alcance del proyecto. A continuación, se realizó una búsqueda de datos que servirán como base al momento de diseñar el producto, así como buscar productos ya existentes que puedan servir como base o comparación con el planteado en el presente. Luego de ello, se estableció una lista de requerimientos del proyecto, en base a esta se tiene que realizar el concepto de diseño del proyecto. Posteriormente, se realiza la descomposición de funciones a través del árbol de funciones y medios que facilita la elección de estos últimos para cada función mencionada. En las últimas etapas de la metodología a seguir, se realizan diversas arquitecturas y diagramas, esto con la finalidad de mostrar cómo interactúan los diversos medios elegidos, tanto como sistema mecánico como el flujo de la información. Una vez obtenido el diseño conceptual, se procede a la implementación: primero, se realiza el diseño de los subsistemas (electrónico, control, mecánico y neumático); segundo, se procede a la selección de elementos y cálculo del costo del proyecto; finalmente, se realizan las pruebas para verificar el funcionamiento del prototipo.

En conclusión, se obtuvo el diseño conceptual, luego se implementó el prototipo, se empleó también un controlador PI para llevar los dedos a las posiciones deseadas, obteniendo así un prototipo que cumple con el movimiento independiente de cada dedo como es requerido.



DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a mi familia: a mis padres y a mi hermano, quienes estuvieron a mi lado brindándome su apoyo y consejo en todo momento incluyendo los más difíciles; a mis abuelos y tíos, quienes me acompañaron y apoyaron en todo momento alentándome a conseguir mi meta.

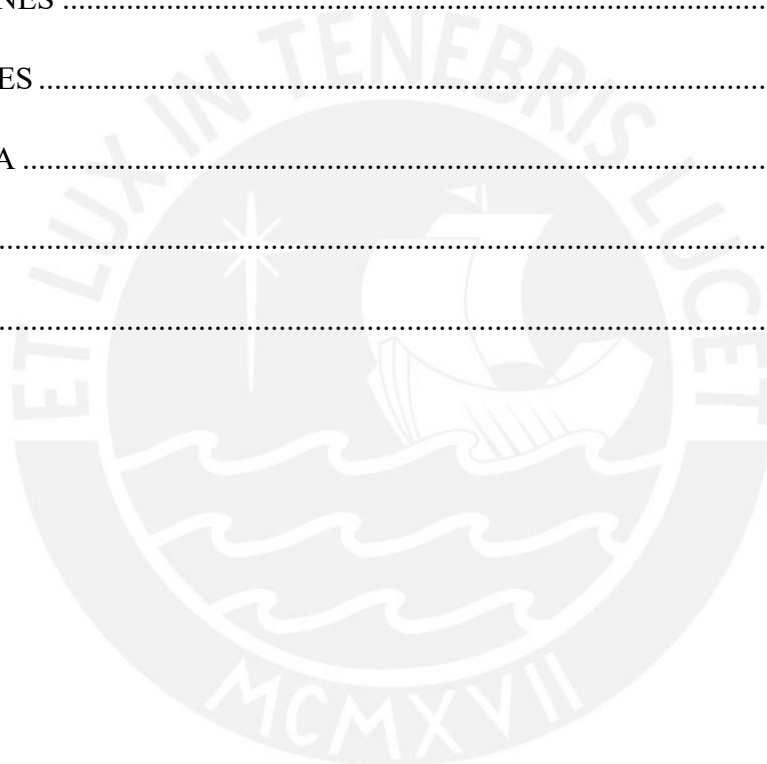
Una dedicatoria especial para mi bisabuela, Marina, quien desde pequeño me cuidó y me impulsó hacia mi meta de convertirme en ingeniero, sé que desde el cielo está muy orgullosa de lo que he podido conseguir. Siempre recordaré su historia y sus anécdotas, su lección de vida hacia mí.

Finalmente, un agradecimiento a todos mis amigos, quienes me apoyaron cuando lo necesité; a las personas que estuvieron a mi lado durante esta aventura; a mis compañeros de estudio y profesores por las lecciones enseñadas.

INDICE DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	i
INDICE DE TABLAS	iv
INDICE DE FIGURAS	v
LISTA DE SÍMBOLOS	viii
INTRODUCCIÓN	1
1. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE	4
1.1 ANTECEDENTES	4
1.1.1. Anatomía de la mano.....	4
1.1.2. Terapia física para las manos.....	11
1.2. ESTADO DEL ARTE.....	14
1.2.1. Dispositivos para terapia de manos basado en robotica convencional... 14	14
1.2.2. Dispositivos para terapia de manos basado en soft robotics.	16
2. REQUERIMIENTOS Y MODELAMIENTO	19
2.1 REQUERIMIENTOS	19
2.2. ÁRBOL DE FUNCIONES Y MEDIOS	20
2.2.1. Primer nivel.	20
2.2.2. Segundo nivel.	20
2.2.3. Tercer nivel.....	34
2.3. CONCEPTO DE SOLUCIÓN	42
3. DISEÑO MECÁNICO, NEUMÁTICO Y ELECTRÓNICO DEL GUANTE DE REHABILITACIÓN	52
3.1. DISEÑO MECÁNICO.....	52
3.1.1. Actuador pneunet.....	52
3.2. DISEÑO NEUMÁTICO	55
3.2.1. Selección de materiales.	56
3.3. DISEÑO ELECTRÓNICO	59
3.3.1. Selección de materiales.	59
3.4. DISEÑO DE LA INTERFAZ DE USUARIO.....	64
3.5. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL.....	66
4. PLANOS Y ESTIMACIÓN DE COSTOS	67

4.1. LISTA DE PLANOS	67
4.2. ESTIMACIÓN DE COSTOS	68
4.2.1. Costos por componentes comerciales y materiales.	68
4.2.2. Costos por fabricación.	70
5. EXPERIMENTACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS DEL GUANTE DE REHABILITACIÓN	71
5.1. EXPERIMENTACIÓN DE MATERIALES	71
5.2. IMPLEMENTACIÓN DEL GUANTE DE REHABILITACIÓN	75
5.3. PRUEBAS CON EL GUANTE	77
OBSERVACIONES	83
CONCLUSIONES	84
BIBLIOGRAFÍA	85
ANEXO A	88
ANEXO B	93



INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Promedio de fuerza en las manos de hombres y mujeres (Muñoz, De La Vega, Lopez, Ortiz, & Lucero, 2009).....	6
Tabla 1.2. Fuerzas máximas para realizar la flexión y extensión de los dedos (Adaptado de Koiva, Hilsenbeck, & Castellini, 2012)	6
Tabla 1.3. Longitudes promedio del sector de las falanges del dedo pulgar en mujeres, expresado en mm (Binvignat, Almagià, Lizana, & Olave, 2012).....	7
Tabla 1.4. Longitudes promedio del sector de las falanges del dedo índice en mujeres, expresado en mm (Binvignat, Almagià, Lizana, & Olave, 2012).....	7
Tabla 1.5. Longitudes promedio del sector de las falanges del dedo medio en mujeres, expresado en mm (Binvignat, Almagià, Lizana, & Olave, 2012).....	7
Tabla 1.6. Longitudes promedio del sector de las falanges del dedo anular en mujeres, expresado en mm (Binvignat, Almagià, Lizana, & Olave, 2012).....	8
Tabla 1.7. Longitudes promedio del sector de las falanges del dedo meñique en mujeres, expresado en mm (Binvignat, Almagià, Lizana, & Olave, 2012).....	8
Tabla 1.8. Longitudes promedio del sector de las falanges del dedo pulgar en hombres, expresado en mm (Binvignat, Almagià, Lizana, & Olave, 2012).....	8
Tabla 1.9. Longitudes promedio del sector de las falanges del dedo índice en hombres, expresado en mm (Binvignat, Almagià, Lizana, & Olave, 2012).....	9
Tabla 1.10. Longitudes promedio del sector de las falanges del dedo medio en hombres, expresado en mm (Binvignat, Almagià, Lizana, & Olave, 2012).....	9
Tabla 1.11. Longitudes promedio del sector de las falanges del dedo anular en hombres, expresado en mm (Binvignat, Almagià, Lizana, & Olave, 2012).....	9
Tabla 1.12. Longitudes promedio del sector de las falanges del dedo meñique en hombres, expresado en mm (Binvignat, Almagià, Lizana, & Olave, 2012).....	10
Tabla 1.13. Promedio de medida de los dedos para hombres y mujeres	10
Tabla 1.14. Comparación de sistemas basados en soft robotics para rehabilitación de manos	18
Tabla 2.1. Matriz morfológica del nivel dos	33
Tabla 2.2. Matriz morfológica del nivel tres.....	41
Tabla 3.1. Comparación de compresores	56
Tabla 3.2. Características de las válvulas solenoides	57
Tabla 3.3. Características del sensor flex.....	59
Tabla 3.4. Características del sensor de fuerza	60
Tabla 3.5. Comparación entre pantallas táctiles	60
Tabla 3.6. Pines requeridos en el sistema	61
Tabla 3.7. Voltaje, corriente y potencia de cada elemento que requiera una fuente de alimentación.....	62
Tabla 4.1. Lista de planos	68
Tabla 4.2. Detalles de precio y precio total de componentes en soles.....	69
Tabla 4.3. Detalles de precio y precio total de componentes en dólares	69
Tabla 4.4. Costos de los materiales a emplear para la fabricación de piezas	69
Tabla 4.5. Costo total del proyecto	70
Tabla A.0.1. Comparación de soluciones del segundo nivel	90
Tabla A. 0.2. Comparación de soluciones del nivel tres del árbol de funciones	92

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Huesos que conforman la mano y su clasificación (Rocha, Lara, & Gómez, 2012)	5
Figura 1.2. Músculos de la mano (Rocha, Lara, & Gómez, 2012).	5
Figura 1.3. Movilidad de la articulación trapeziometacarpiana (Gómez & Gómez, 2020).....	11
Figura 1.4. Flexión y extensión de la articulación metacarpofalángica inhibiendo el movimiento de la articulación trapeziometacarpiana a través de ortesis (Gómez & Gómez, 2020)	12
Figura 1.5. Ejercicios con masilla terapéutica (Rodríguez, 2020)	12
Figura 1.6. Ejercicio de mano extendida (López, 2013)	13
Figura 1.7. Ejercicio con pulgar tocando la punta de los dedos (López, 2013)	13
Figura 1.8. Ejercicio con pulgar tocando la base de los dedos (López, 2013)	13
Figura 1.9. Arreglo de los actuadores del rehabilitador (Mosquera, Benavides, Ojeda, & Ortiz, 2018)	14
Figura 1.10. Dispositivo I-TRAVLE (Rodríguez, 2020)	15
Figura 1.11. Dispositivo Gloreha (VIRTUALEXPO GROUP, s.f.)	15
Figura 1.12. HandTutor (VIRTUALEXPO GROUP, s.f.)	16
Figura 1.13. Dispositivo moviendo el dedo índice y pulgar	17
Figura 1.14. Guante cerrado sobre un objeto	17
Figura 1.15. Exoesqueleto en acción	18
Figura 2.1. Primer nivel del árbol de descomposición de funciones	20
Figura 2.2. Primera subfunción del nivel dos con sus medios	21
Figura 2.3. Encoder	21
Figura 2.4. Flex sensor	22
Figura 2.5. Potenciómetro	22
Figura 2.6. Sensor RVDT	23
Figura 2.7. Acelerómetro	23
Figura 2.8. Segunda subfunción del nivel dos con sus medios	23
Figura 2.9. Sensor de presión con tecnología de galgas extensiométricas	24
Figura 2.10. Sensor de presión capacitivo	24
Figura 2.11. Sensor de presión piezorresistivo	25
Figura 2.12. Sensor de presión resonante	25
Figura 2.13. Tercera subfunción del nivel dos con sus medios	26
Figura 2.14. Arduino UNO	26
Figura 2.15. Raspberry Pi	27
Figura 2.16. Nvidia Jetson Nano	27
Figura 2.17. Asus Tinkerboard	27
Figura 2.18. Cuarta subfunción del nivel 2 con sus medios	28
Figura 2.19. Pantalla LED	28
Figura 2.20. Diodos LED	29
Figura 2.21. Quinta subfunción del segundo nivel con sus medios	29
Figura 2.22. Pulsador	30
Figura 2.23. Pantalla táctil	30
Figura 2.24. Sexta subfunción del nivel dos con sus medios	30
Figura 2.25. Baterías recargables	31
Figura 2.26. Esquema de la fuente conmutada	31
Figura 2.27. Octavo subsistema del nivel dos con sus medios	32
Figura 2.28. Compresor de aire	34
Figura 2.29. Primera subfunción del nivel tres con su medio	34

Figura 2.30. Tuberías para aire comprimido.....	35
Figura 2.31. Manguera neumática	35
Figura 2.32. Segunda subfunción del nivel 3 con sus medios	36
Figura 2.33. Válvula reguladora de presión.....	36
Figura 2.34. Tercera subfunción del nivel tres con su medio	36
Figura 2.35. Filtro de aire comprimido	37
Figura 2.36. Cuarta subfunción del nivel tres con su medio.....	37
Figura 2.37. PneuNets.....	38
Figura 2.38. McKibben	38
Figura 2.39. Quinta subfunción del nivel 3 del árbol de funciones con sus medios.....	38
Figura 2.40. Válvula 3/2 vías.....	39
Figura 2.41. Válvula 3/3 vías.....	39
Figura 2.42. Válvula 2/2 vías.....	40
Figura 2.43. Sexta subfunción del nivel 3 del árbol de funciones con sus medios.....	40
Figura 2.44. Arquitectura del sistema mecatrónico	43
Figura 2.45. Vista frontal del guante en la mano	44
Figura 2.46. Vista de perfil del guante en la mano con los elementos que lo componen.....	45
Figura 2.47. Vista general de la zona de control y actuación	46
Figura 2.48. Vista a detalle de la zona de control y actuación.....	47
Figura 2.49. Arquitectura eléctrica-electrónica del sistema.....	48
Figura 2.50. Diagrama de flujos del sistema.....	49
Figura 2.51. Diagrama de operaciones del sistema.....	50
Figura 2.52. Diagrama de clases del sistema	51
Figura 3.1. Parte inferior del molde	53
Figura 3.2. Parte superior del molde.....	53
Figura 3.3. Molde para la parte inferior del actuador	54
Figura 3.4. Parte inferior del actuador obtenido a partir de silicona.....	55
Figura 3.5. Parte superior del actuador obtenido a partir de silicona	55
Figura 3.6. Actuador completo después de unir la parte inferior y superior	55
Figura 3.7. Catálogo de conector recto hilo interior o hembra	58
Figura 3.8. Catálogo de conectores TE igual.....	58
Figura 3.9. Pinout de Arduino Mega	62
Figura 3.10. Estructura de la caja.....	63
Figura 3.11. Primer Nivel de la caja	63
Figura 3.12. Segundo nivel de la caja.....	64
Figura 3.13. Caja completa	64
Figura 3.14. Pantalla principal	65
Figura 3.15. Pantalla de selección de ejercicio	65
Figura 3.16. Pantalla de comienzo	65
Figura 3.17. Pantalla de selección de continuar o terminar	66
Figura 3.18. Sistema de control realimentado	66
Figura 4.1. Cotización de los moldes del actuador	70
Figura 5.1. Escala de dureza Shore	71
Figura 5.2. Actuador Soft Robotics (Cappello, y otros, 2018)	72
Figura 5.3. Modelado del actuador PneuNet	72
Figura 5.4. Actuador impreso en TPU	73
Figura 5.5. Molde del actuador	74
Figura 5.6. Actuador obtenido a partir del molde preliminar	74
Figura 5.7. Conexión de válvula solenoide.....	75
Figura 5.8. Conexión entre componentes neumáticos para un dedo.....	75

Figura 5.9. Vista superior del guante con los sensores de fuerza y un actuador	76
Figura 5.10. Vista inferior del guante, con los sensores flex	76
Figura 5.11. Capa de tela sobre los sensores y lugar de los actuadores en el guante	77
Figura 5.12. Prototipo del guante de rehabilitación completo	77
Figura 5.13. Curva estática del actuador.....	78
Figura 5.14. Sistema de control	79
Figura 5.15. Respuesta al escalón de la planta.....	79
Figura 5.16. Respuesta al escalón de la planta controlada.....	80
Figura 5.17. Simulación del sistema realimentado	81
Figura 5.18. Gráfica obtenida del ángulo medido y el ángulo deseado	81
Figura A.0.1. Functions and means tree	88
Figura A.0.2. Posibles soluciones analizadas para el nivel dos.....	89
Figura A.0.3. Posibles soluciones para el nivel tres del árbol de funciones.....	91



LISTA DE SÍMBOLOS

- F : Fuerza sobre los dedos [N]
P : Presión [N/mm²]
T : Intervalo de muestreo [s]
f : Frecuencia de muestreo [Hz]
 β : Ángulo de los dedos [°]



INTRODUCCIÓN

La OMS define a la rehabilitación como: “un conjunto de intervenciones encaminadas a optimizar el funcionamiento y reducir la discapacidad en personas con afecciones de salud en la interacción con su entorno” (2020). En la actualidad, se estima que cerca del 31.23% de la población mundial tiene alguna afección de salud que se beneficia de la rehabilitación (Organización Mundial de la Salud, 2020). Una persona, en el transcurso de la vida, muy probablemente, va a necesitar algún tratamiento de rehabilitación a consecuencia de una lesión, intervención quirúrgica o porque se ha debilitado por la edad. Se debe considerar también que, la rehabilitación es personalizada, pues cada persona tiene sus propias necesidades dependiendo tanto de las preferencias como de las zonas del cuerpo que necesiten tratamiento. Además, se conoce mediante un estudio que las personas que estén recibiendo una terapia de rehabilitación, pueden verse obligadas a dejar el tratamiento debido a problemas económicos o sociales (Pineda, 2018). La OMS, advierte que uno de los principales problemas en el aspecto económico son los elevados gastos directos y la insuficiencia de financiamiento; en el aspecto social, se pueden identificar los largos plazos de espera (2020). Por otro lado, ante la actual situación sobre el COVID-19, cerca del 60% al 70% de los servicios de rehabilitación existente se han visto perturbados por la pandemia (Organización Mundial de la Salud, 2020).

Ante estos problemas y otros, la OMS puso en marcha el plan Rehabilitación 2030 en el año 2017, esto con la finalidad de: “que la rehabilitación forme parte de la atención sanitaria a todos los niveles de salud, así como una cobertura universal” (Organización Mundial de la Salud, 2020).

Finalmente, según el Instituto Nacional de Rehabilitación, se registró una atención en terapia física de 121 895 personas a lo largo del año (2017). Los pacientes, con discapacidad de disposición corporal y de destreza, atendidos fueron 15 077 (Instituto Nacional de Rehabilitación, 2017). Estas discapacidades mencionadas, en su mayoría, tienen que ver con dificultades o deficiencias en el uso de las extremidades superiores, es decir, los brazos, en mayor incidencia en las manos (Instituto Nacional de Rehabilitación). Es por ello que en el

presente trabajo se abordará el tema de rehabilitación de manos, para ayudar a personas que necesiten una terapia.

Por otro lado, se tiene conocimiento de nuevas tecnologías, como la de soft robotics, estos son robots con características morfológicas y constitutivas no convencionales. Existen dos enfoques para clasificarlos: el primero hace referencia a robots convencionales que han sido modificados para tener un comportamiento más seguro; el segundo hace referencia a robots contruidos por materiales cuyo módulo de elasticidad está en el orden de 10^2 - 10^6 Pa (Medina & Vélez, 2014).

El objetivo del proyecto es desarrollar un sistema mecatrónico que permita la rehabilitación de los dedos de un paciente ejercitándolos, variando la cantidad, movimientos y posición de los mismos según determinados ejercicios ya preestablecidos, de manera constante y desde un lugar que sea conveniente para no arriesgar la salud del paciente ante la actual pandemia. Estos ejercicios servirán para la rehabilitación de los dedos de las manos frente a alguna lesión que los haya afectado. Para cumplir con ello, se proponen objetivos secundarios, entre los cuales: primero, se debe revisar información sobre ejercicios motrices de rehabilitación y tecnologías existentes que sirvan como base; segundo, definir el concepto de solución óptimo teniendo en cuenta las necesidades del usuario y requerimientos del producto. Además, se debe verificar que la presión ejercida sobre los dedos no sea demasiada para evitar más lesiones. Por otro lado, el dispositivo se debe diseñar de manera que sea cómodo para el paciente. Se buscará restablecer el movimiento de los músculos de las manos que se puedan atrofiar debido al reposo que conlleva el haberse lesionado la mano, así como el de los ligamentos, para retornar a la normalidad el movimiento de las manos. Para la implementación, se debe determinar el material a usar en los actuadores en base a la experimentación con dos tipos de material distintos, diseñar un actuador basado en neumática que satisfaga el movimiento requerido por los ejercicios, diseñar un subsistema neumático para realizar el movimiento de los actuadores. Con esto se puede proceder a: implementar el prototipo del guante con los sensores y actuadores con el fin de generar movimiento y medir la posición de los dedos, implementar los prototipos de los subsistemas neumáticos y de control en paralelo al guante para asegurar el funcionamiento óptimo del guante; y, unir los subsistemas para obtener el sistema mecatrónico completo y funcional.

Se plantea el diseño e implementación de un guante que permita realizar ejercicios de los dedos, para así mejorar la capacidad motriz en las manos, así como la fuerza de agarre para apoyarlos durante el proceso de rehabilitación; además de tener un sistema completo para el accionamiento del guante por cualquier persona sin experiencia en rehabilitación. Si bien, no

se podrá realizar ejercicios tan complejos ni una gran cantidad de ellos, ni se contará con el movimiento de la muñeca, se espera tener un resultado óptimo para que poco a poco la persona vaya recuperando la movilidad.

La metodología que se planea seguir consiste en la identificación del problema a resolver y en base a ello, obtener una idea preliminar del producto, que luego se mejorará cuando se analice el marco teórico y el estado del arte. Después de analizar el estado del arte, se planteará una idea del producto, con lo cual se establecerá los requisitos del usuario, y con ellos, se definirán las especificaciones del proyecto que se desarrollará. Luego, se desarrollará la descomposición funcional y la síntesis de medios, donde se realizará la matriz morfológica y se llegará a la mejor solución de medios a emplear para el proyecto. En base a lo obtenido, se realizará la arquitectura del sistema mecatrónico. Posteriormente, se llegará al modelo conceptual del proyecto, para luego pasar a un modelo preliminar que se espera obtener. Una vez determinado el modelo, se procede a elegir los actuadores y sensores a emplear, con ello definir los materiales adicionales a necesitar, desarrollar el diseño específico de los dominios presentados (neumático, electrónico, control); a continuación, se deben realizar los planos y diagramas de los dominios desarrollados. Por último, integrar los dominios presentados y verificar el funcionamiento (De Negri, Muñoz, & Vigolo, 2021).

CAPÍTULO 1

1. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se describirán los procesos de terapia de rehabilitación de manos empleados comúnmente, así como se llevará a cabo el análisis del estado del arte a partir de mecanismos o proyectos ya existentes que puedan servir de base para este proyecto.

1.1 ANTECEDENTES

Para conocer el tratamiento físico que se le puede dar a un paciente, se debe identificar las partes de las manos que necesitan la terapia, así como los valores máximos tanto en flexión como fuerza que pueden resistir.

1.1.1. Anatomía de la mano.

Las manos, son la extremidad más distal del miembro superior, están adaptadas para realizar una infinidad de movimientos gracias a la acción de los músculos y a los ligamentos que le sirven de sujeción. La mano tiene una estructura formada por: huesos, músculos, venas, arterias, piel y uñas. Las lesiones pueden producirse en los huesos y ligamentos en mayor proporción que en músculos. Son 27 huesos los que componen la estructura ósea de la mano como se puede apreciar en la Figura 1.1.



Figura 1.1. Huesos que conforman la mano y su clasificación (Rocha, Lara, & Gómez, 2012)

Por otro lado, los músculos que componen las manos son mayor en cantidad que los huesos y se agrupan según sus funciones, como se aprecia en la Figura 1.2, para el presente trabajo, se abordará solo dos tipos de músculos y un grupo de ellos. Los músculos extensores de los dedos son cinco: extensor común de los dedos, extensor propio del meñique, extensor propio del índice, extensor corto del pulgar y largo del pulgar. El otro tipo de músculos son los flexores de los dedos, son dos: común profundo y común superficial. El grupo de músculos de interés son los grupos musculares que forman los dedos: interóseos, umbricales, músculos dedicados al pulgar y los destinados al movimiento del dedo meñique (Rocha, Lara, & Gómez, 2012).



Figura 1.2. Músculos de la mano (Rocha, Lara, & Gómez, 2012).

Se debe considerar también que las falanges de los dedos están en reposo a 45° , mientras que flexionan cuando forman 90° entre dos falanges seguidas. El estado de hiperextensión se logra formando un ángulo de 0° entre las falanges (Chavarría).

Como se muestra en la Tabla 1.1, la fuerza aplicable en las manos, como máximo, está determinada por el sexo de la persona, se trabajará con estos valores en los siguientes capítulos.

Tabla 1.1. Promedio de fuerza en las manos de hombres y mujeres (Muñoz, De La Vega, Lopez, Ortiz, & Lucero, 2009)

	KG. FUERZA		LB. FUERZA	
	MEDIA	DESV. EST.	MEDIA	DESV. EST.
MUJERES	24.04	5.13	53.00	11.31
HOMBRES	42.05	9.51	92.70	20.97

Estas fuerzas son las que una persona puede soportar en las manos sin sufrir una lesión, ahora, en la Tabla 1.2, se presentará las fuerzas máximas para realizar el movimiento de flexión y extensión de los dedos.

Tabla 1.2. Fuerzas máximas para realizar la flexión y extensión de los dedos (Adaptado de Koiva, Hilsenbeck, & Castellini, 2012)

Dedos	Flexión (N)	Extensión (N)
Índice	15.15	5.67
Medio	14.99	5.63
Anular	13.02	3.83
Meñique	13.20	3.50
Pulgar	16.12	8.96

Estas fuerzas mínimas y máximas, brindan una idea de cómo debe ir variando la fuerza aplicada sobre los dedos al momento de realizar el movimiento de estos en los ejercicios de rehabilitación.

Con respecto al tamaño de las manos, se toma en cuenta un estudio realizado sobre aspectos biométricos de las manos de personas mayores de 18 años hasta 65 años en el que se obtuvo una longitud promedio de las falanges de los dedos y las desviaciones estándar correspondientes a estos (Binvignat, Almagià, Lizana, & Olave, 2012), como en este trabajo se realizarán ejercicios de rehabilitación en los dedos, se debe conocer la longitud de estos, tanto para hombres como para mujeres.

Entonces, según el estudio realizado, se obtuvieron los siguientes resultados de cada dedo de la mano en mujeres que se presentan en las Tablas 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 y 1.7

En las Tablas 1.8, 1.9, 1.10, 1.11, 1.12, se presentan los resultados de la longitud de cada dedo de la mano en hombres en un rango de 18 a 65 años.

Tabla 1.3. Longitudes promedio del sector de las falanges del dedo pulgar en mujeres, expresado en mm (Binvignat, Almagià, Lizana, & Olave, 2012)

edades	Falange proximal		Falange distal	
	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq
18-19	36±8	37±9	29±4	28±4
20-24	37±6	36±7	29±4	28±4
25-29	38±5	37±7	29±3	29±3
30-34	32±7	32±8	27±5	26±5
35-39	37±7	36±6	27±5	27±4
40-44	35±6	36±6	28±3	28±3
45-49	36±7	35±7	28±5	27±4
50-54	35±7	35±6	29±6	28±4
55-59	33±7	33±7	28±4	28±4
60-64	34±8	31±8	28±3	28±3
65-69	33±7	35±8	30±5	29±2

Tabla 1.4. Longitudes promedio del sector de las falanges del dedo indice en mujeres, expresado en mm (Binvignat, Almagià, Lizana, & Olave, 2012)

edades	Falange proximal		Falange media		Falange distal	
	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq
18-19	44±12	43±12	27±7	28±6	22±3	22±3
20-24	45±11	45±11	28±6	28±6	22±3	22±3
25-29	46±11	46±11	29±5	29±6	23±2	23±2
30-34	36±15	35±14	24±7	23±7	20±4	20±4
35-39	44±11	44±11	28±6	29±7	21±4	21±4
40-44	46±11	45±10	28±6	28±6	22±2	22±2
45-49	45±10	45±10	28±6	28±6	23±3	22±3
50-54	43±13	42±13	27±6	27±6	22±3	22±2
55-59	38±15	39±13	25±8	24±7	22±4	22±4
60-64	37±12	39±17	25±7	25±6	21±3	21±2
65-69	40±16	40±17	27±9	27±9	23±3	22±3

Tabla 1.5. Longitudes promedio del sector de las falanges del dedo medio en mujeres, expresado en mm (Binvignat, Almagià, Lizana, & Olave, 2012)

edades	Falange	proximal	Falange	media	Falange	distal
	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq
18-19	46±14	46±14	32±8	32±7	23±4	23±4
20-24	49±13	48±13	32±6	32±6	23±4	23±4
25-29	50±12	49±12	33±5	32±6	23±2	24±2
30-34	39±17	38±16	28±7	28±8	23±9	23±9
35-39	50±12	50±11	32±7	32±7	23±4	22±4
40-44	49±11	48±12	32±7	32±6	24±2	24±2
45-49	49±12	49±12	33±6	32±6	24±3	23±3
50-54	46±14	45±14	31±6	31±7	24±3	23±3
55-59	41±16	41±16	29±9	28±8	23±4	23±4
60-64	40±15	37±14	28±8	29±8	23±3	22±2
65-69	47±18	46±19	32±10	32±10	23±3	24±3

Tabla 1.6. Longitudes promedio del sector de las falanges del dedo anular en mujeres, expresado en mm (Binvignat, Almagià, Lizana, & Olave, 2012)

edades	Falange	proximal	Falange	media	Falange	distal
	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq
18-19	51±12	50±11	34±6	34±5	24±4	25±3
20-24	50±13	50±12	34±6	34±5	25±3	25±3
25-29	51±13	52±14	35±8	35±7	27±4	27±4
30-34	49±12	49±11	34±7	35±6	27±4	26±4
35-39	44±15	44±14	31±8	30±8	26±4	26±6
40-44	52±15	51±13	33±9	33±11	25±6	25±7
45-49	52±12	52±12	36±7	36±8	26±4	26±3
50-54	52±12	52±12	34±6	34±6	25±3	25±3
55-59	49±17	49±16	33±9	33±9	27±3	26±4
60-64	45±17	46±16	33±9	33±8	27±4	26±4

Tabla 1.7. Longitudes promedio del sector de las falanges del dedo meñique en mujeres, expresado en mm (Binvignat, Almagià, Lizana, & Olave, 2012)

edades	Falange	proximal	Falange	media	Falange	distal
	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq
18-19	40±9	40±9	25±5	25±5	22±3	23±3
20-24	40±10	41±10	25±6	25±5	23±3	23±3
25-29	42±12	42±12	27±6	28±8	24±3	24±3
30-34	40±10	40±10	26±6	26±5	23±3	23±3
35-39	34±13	35±12	24±7	23±7	23±3	23±3
40-44	40±15	39±15	27±7	26±7	22±6	22±5
45-49	43±10	43±11	27±5	27±7	23±4	23±3
50-54	43±10	42±10	26±5	25±5	22±3	22±3
55-59	39±14	38±13	25±7	25±8	24±4	23±3
60-64	38±14	38±14	25±8	26±7	23±4	24±3

Tabla 1.8. Longitudes promedio del sector de las falanges del dedo pulgar en hombres, expresado en mm (Binvignat, Almagià, Lizana, & Olave, 2012)

edades	Falange	proximal	Falange	distal
	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq
18-19	41±7	41±7	32±4	32±4
20-24	40±6	40±6	32±3	32±3
25-29	42±7	42±7	34±4	34±5
30-34	41±9	41±8	32±5	31±5
35-39	39±8	38±8	32±4	31±5
40-44	40±10	40±11	31±9	31±8
45-49	44±4	43±6	33±3	32±4
50-54	41±7	40±7	32±4	32±4
55-59	39±11	40±12	33±4	33±4
60-64	38±9	38±10	33±4	33±5

Tabla 1.9. Longitudes promedio del sector de las falanges del dedo índice en hombres, expresado en mm (Binvignat, Almagià, Lizana, & Olave, 2012)

edades	Falange	proximal	Falange	media	Falange	distal
	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq
18-19	51±12	51±11	31±6	32±5	24±3	24±4
20-24	50±12	50±12	31±6	31±6	24±3	24±3
25-29	50±13	51±13	31±7	31±7	25±3	25±4
30-34	49±12	50±11	32±7	32±6	25±4	24±4
35-39	43±13	44±12	30±6	29±7	24±3	25±2
40-44	50±16	50±14	30±9	31±9	24±6	24±6
45-49	53±12	50±11	32±7	32±7	24±3	25±3
50-54	51±11	51±11	31±6	31±6	24±3	24±3
55-59	47±16	48±15	30±9	30±8	25±3	25±3
60-64	45±16	45±17	31±9	31±9	25±3	25±3

Tabla 1.10. Longitudes promedio del sector de las falanges del dedo medio en hombres, expresado en mm (Binvignat, Almagià, Lizana, & Olave, 2012)

edades	Falange	proximal	Falange	media	Falange	distal
	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq
18-19	55±13	53±12	35±6	35±6	25±4	25±4
20-24	53±13	54±13	36±6	35±6	25±3	25±3
25-29	56±14	55±14	37±8	36±8	27±4	27±4
30-34	53±13	53±12	35±7	36±7	27±4	26±4
35-39	47±16	47±14	33±8	32±7	26±3	26±3
40-44	55±16	55±16	34±11	35±11	26±6	26±7
45-49	57±13	57±13	38±8	37±8	26±3	26±2
50-54	56±13	56±12	36±7	36±7	26±4	26±4
55-59	53±17	52±16	36±10	35±9	27±4	28±5
60-64	49±18	51±17	35±10	35±8	26±4	26±4

Tabla 1.11. Longitudes promedio del sector de las falanges del dedo anular en hombres, expresado en mm (Binvignat, Almagià, Lizana, & Olave, 2012)

edades	Falange proximal		Falange media		Falange distal	
	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq
18-19	44±13	43±13	31±6	31±6	23±3	23±3
20-24	45±12	45±11	30±6	30±6	23±4	23±4
25-29	45±12	45±12	31±6	32±7	23±3	23±2
30-34	35±16	34±14	26±8	24±8	21±4	22±4
35-39	47±10	46±11	30±7	30±7	22±4	22±4
40-44	46±11	46±10	31±6	31±6	24±2	24±3
45-49	45±11	45±11	31±6	30±6	23±3	23±3
50-54	43±13	42±13	30±7	30±6	23±3	23±3
55-59	37±15	37±15	27±8	27±8	23±4	23±4
60-64	34±14	35±13	27±7	28±8	22±2	22±3
65-69	42±19	42±18	30±9	31±10	24±1	24±1

Tabla 1.12. Longitudes promedio del sector de las falanges del dedo meñique en hombres, expresado en mm (Binvignat, Almagià, Lizana, & Olave, 2012)

edades	Falange proximal		Falange media		Falange distal	
	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq	Mano der	Mano izq
18-19	36±10	35±11	22±5	23±5	20±3	21±3
20-24	37±9	36±10	22±5	22±5	20±3	20±3
25-29	37±9	37±10	23±5	23±3	20±2	20±2
30-34	29±14	29±13	19±6	19±7	19±3	19±3
35-39	37±10	37±9	22±5	22±6	20±3	19±3
40-44	37±9	37±9	23±5	22±6	20±3	20±3
45-49	37±9	37±10	23±4	23±5	20±3	20±3
50-54	34±12	33±11	21±6	22±6	20±3	20±2
55-59	30±13	30±13	20±7	20±7	19±4	20±3
60-64	30±12	29±10	20±6	21±5	19±2	20±3
65-69	36±15	36±15	23±7	23±7	20±5	20±3

Con la información presentada previamente, se infiere y se presenta la longitud total de cada dedo en promedio, con la que se trabajará en el presente documento, para hombres y mujeres en la Tabla 1.13.

Tabla 1.13. Promedio de medida de los dedos para hombres y mujeres

Dedos	Hombres (mm)	Mujeres (mm)
Pulgar	72.9	63.5
Índice	104.2	91
Medio	115	100.4
Anular	94.5	109.1
Meñique	76	88.5

En el presente trabajo, se emplearán las medidas promedio de los dedos para hombre y mujeres, y en base a ellos se realizarán los cálculos y el diseño del guante para rehabilitación.

1.1.2. Terapia física para las manos.

Existen varios tipos de ejercicios para rehabilitar las manos después de haber sufrido un accidente que dejara inmobilizadas las manos durante un periodo de tiempo mediano o largo. Lo mismo en el caso de haber sido sometido a un procedimiento quirúrgico invasivo. Al período en el que se centrará se le conoce como pos-inmovilización, este periodo es uno de los varios que se comprende en el tratamiento de manos, es decir: el periodo de análisis de la mano, operación, entre otros (Cantero, 2020). Uno de los principales objetivos en este periodo es: recuperar la funcionalidad de la mano y disminuir la discapacidad percibida (Gómez & Gómez, 2020).

La propiocepción es uno de los sentidos somáticos más importantes y engloba la sensación de posición, estática o dinámica, y control neuromuscular de las articulaciones (Gómez & Gómez, 2020). En las Figuras 1.3 y 1.4, se observa algunos ejemplos de ejercicios destinados a mejorar la propiocepción, así como la movilidad y la funcionalidad de la mano.



Figura 1.3. Movilidad de la articulación trapeciometacarpiana (Gómez & Gómez, 2020)

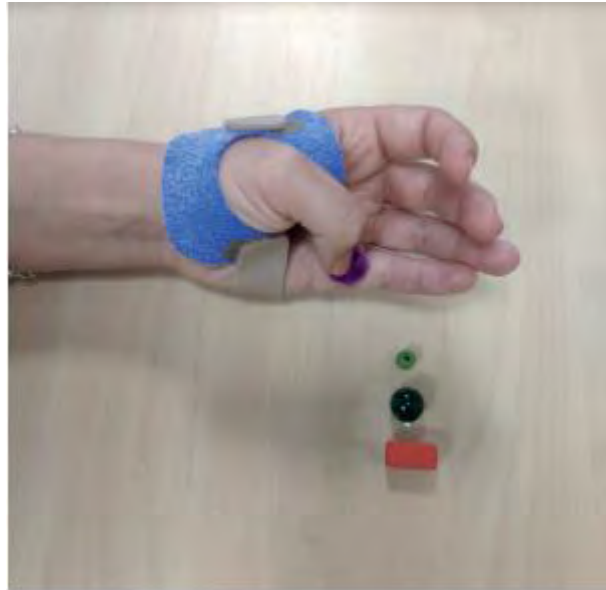


Figura 1.4. Flexión y extensión de la articulación metacarpofalángica inhibiendo el movimiento de la articulación trapeciometacarpiana a través de ortesis (Gómez & Gómez, 2020)

En ambas figuras, se muestran ejercicios que involucran solo el movimiento del pulgar manteniendo, tanto los otros dedos como la palma, estáticos. También existen ejercicios de resistencia y fuerza que involucran a todos los dedos, ese es el caso de los ejercicios presentados en la Figura 1.5.

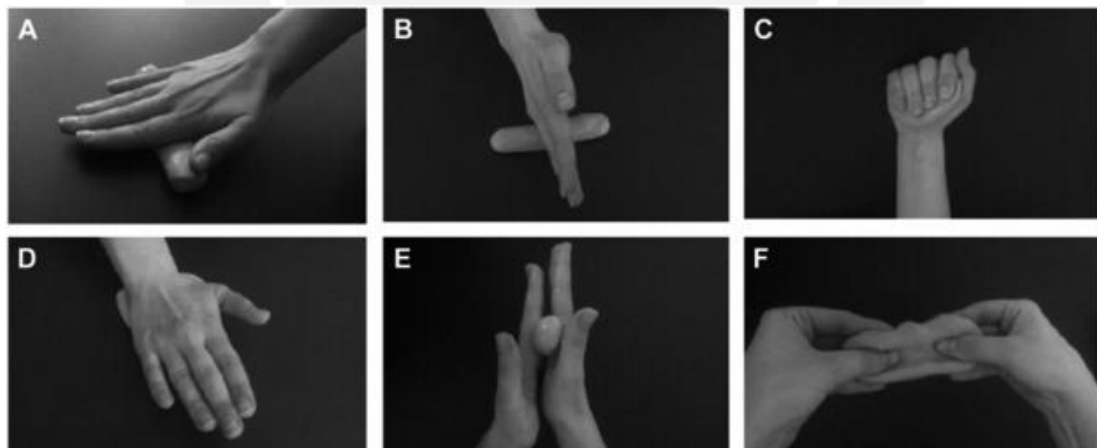


Figura 1.5. Ejercicios con masilla terapéutica (Rodríguez, 2020)

El ejercicio de interés para el presente trabajo sería el de la Figura 1.5.C, debido a que se muestra un ejercicio en el que los dedos se contraen y generan cierta presión sobre un objeto, este proceso podría ser simulado por un guante robótico.

López propone una serie de ejercicios de manos y muñecas para realizarlos unos 30 minutos al día (2013), de todos los que propone, solo se mostrará tres de ellos que implican el movimiento de dedos de la mano siendo el primer ejercicio el de la Figura 1.6 que muestra la mano

extendida separando los dedos en forma de abanico. En la Figura 1.7, con el pulgar se trata de tocar las puntas de los otros dedos de la misma mano. Por último, en la Figura 1.8, se muestra un ejercicio que consiste en tocar con el pulgar, la base de los otros cuatro dedos (López, 2013).



Figura 1.6. Ejercicio de mano extendida (López, 2013)



Figura 1.7. Ejercicio con pulgar tocando la punta de los dedos (López, 2013)



Figura 1.8. Ejercicio con pulgar tocando la base de los dedos (López, 2013)

1.2. ESTADO DEL ARTE

Se presentarán dispositivos usados en la rehabilitación de manos, actuadores soft robotics, sensores de posición y de presión.

1.2.1. Dispositivos para terapia de manos basado en robotica convencional.

En esta parte se revisarán dispositivos aplicados a la rehabilitación de manos usando robótica convencional, se presentan 4 de dichos dispositivos.

1.2.1.1. *Rehabilitador pasivo de dedos de la mano.*

Se presenta una propuesta de control para un rehabilitador de dedos de la mano. La misma está enmarcada dentro de un proyecto de investigación multidisciplinario en la Universidad Técnica del Norte (Ecuador) cuyo propósito es la producción de dispositivos médicos. La creación de un aparato automático que asista al fisioterapeuta en la rehabilitación de la mano pudiera permitir la atención de pacientes de forma simultánea (Mosquera, Benavides, Ojeda, & Ortiz, 2018). Este proyecto se basa en un sistema háptico accionado mediante un sistema neumático que mueve los dedos de las manos, facilitando así el ejercicio de los dedos luego de una lesión.



Figura 1.9. Arreglo de los actuadores del rehabilitador (Mosquera, Benavides, Ojeda, & Ortiz, 2018)

1.2.1.2. *I-travle.*

El objetivo principal de este proyecto es realizar la rehabilitación de manos y explorar el valor adicional de adaptabilidad del sistema a la capacidad funcional del paciente y las necesidades de terapia, permitiendo así al paciente entrenar o ejercitarse independientemente. Este dispositivo combina un sistema háptico, permitiendo solo el movimiento de los dedos, junto a

imágenes 2D que conforman una especie de videojuego, haciendo así la terapia más divertida para el paciente.



Figura 1.10. Dispositivo I-TRAVLE (Rodríguez, 2020)

1.2.1.3. **Gloreha WORKSTATION Plus.**

Es un proyecto que realiza movilización de los dedos y terapia con juegos interactivos avanzada. La movilización pasiva, enriquecida por efectos audiovisuales con la posibilidad de realizar ejercicios funcionales, es ideal para iniciar el tratamiento. El uso de juegos interactivos para todo el miembro superior es útil para perfeccionar los movimientos activos y para entrenar las habilidades cognitivas (VIRTUALEXPO GROUP, s.f.). También cuenta con una guía virtual para hacer los ejercicios más entretenidos y que los usuarios no se vean aburridos durante el tiempo que dure la terapia.



Figura 1.11. Dispositivo Gloreha (VIRTUALEXPO GROUP, s.f.)

1.2.1.4. HandTutor.

HandTutor se basa en los principios aceptados del entrenamiento orientado a la discapacidad (IOT) y la rehabilitación fisioterapéutica con ejercicios controlados. Hand Tutor proporciona rehabilitación de terapia física a un nivel personalizado del paciente con retroalimentación precisa en tiempo real sobre el desempeño del paciente. Los ejercicios de fisioterapia están diseñados en forma de juegos desafiantes y son adecuados para una amplia variedad de lesiones y enfermedades neurológicas y ortopédicas. Combina también una guía virtual con un dispositivo háptico (VIRTUALEXPO GROUP, s.f.). Este sistema va guiando a las personas para que realicen los ejercicios, además, cuenta con un sistema de retroalimentación que informa cómo está haciendo los ejercicios el paciente y qué le falta.



Figura 1.12. HandTutor (VIRTUALEXPO GROUP, s.f.)

1.2.2. Dispositivos para terapia de manos basado en soft robotics.

Similar al inciso anterior, en este se presentan dispositivos diseñados usando actuadores soft robotics para colaborar con la rehabilitación de dedos y manos.

1.2.2.1. Dispositivo soft robotics para la rehabilitación de manos.

Es un dispositivo hecho con material flexible para fomentar la rehabilitación de las manos del paciente. Cuenta con una base hecha de silicona que puede hincharse para simular la inclinación de la mano al momento de lanzar una pelota. Integra este sistema electroneumático con un juego estimulante para fomentar el interés del paciente por la terapia (Reymundo, 2016). Se puede apreciar el sistema de funcionamiento del sistema en la Figura 1.13.



Figura 1.13. Dispositivo moviendo el dedo índice y pulgar

1.2.2.2. *Guante de apoyo basado en el control humano.*

Consta de un guante diseñado para implementarse mediante actuadores suaves, flexiona los dedos de las manos para simular el agarre de un objeto. Emplea sensores flexibles para conocer el ángulo de los dedos, para así implementar un control sobre estos. Además, tiene un modo de enseñanza en el cual se cierra la mano sobre cierto objeto, el guante guarda los ángulos del dedo, y posteriormente en el modo de control o ejecución, realiza el mismo movimiento (Kadowaki, Noritsugu, Takaiwa, Sasaki, & Kato, 2011). El funcionamiento de este guante se puede apreciar en la Figura 1.14.



Figura 1.14. Guante cerrado sobre un objeto

1.2.2.3. *Mano de asistencia con cinco dedos.*

Es un exoesqueleto que cuenta con tres articulaciones el dedo índice, 3 articulaciones para los dedos medio, anular y meñique, así como dos articulaciones para el dedo pulgar, esto es con el fin de que el usuario pueda realizar sus tareas cotidianas sin problemas. Además, se propone un nuevo mecanismo para no emplear un sensor de fuerza en el sistema, cuenta también con un sistema de doble sensado. Integra un algoritmo de control bioeléctrico, con el cual se controla el movimiento a través de la energía eléctrica producida por los músculos (Hasegawa, Mikami, Watanabe, & Sankai, 2008). El funcionamiento se observa en la Figura 1.15.



Figura 1.15. Exoesqueleto en acción

Tabla 1.14. Comparación de sistemas basados en soft robotics para rehabilitación de manos

Proyecto por autor	Accionamiento	Novedades	Sensores y actuadores
Reymundo	Neumático	Integra un juego	Compresor, válvulas
Kadowaki	Neumático	Modo enseñanza	Sensores de curvatura, compresora
Hasegawa	Neumático	<ul style="list-style-type: none"> - Algoritmo de control bioeléctrico - Medir la fuerza mediante electrodos 	Electrodos, motores

De las tecnologías presentadas en este inciso, y de los sistemas ya existentes, se concluye que el proyecto, para cumplir con su objetivo de ayudar en la rehabilitación de manos, debe realizar dos tipos de ejercicios, estos están representados en la Figura 1.5 apartado C, y en la Figura 1.8, para realizar estos movimientos, debe contar con actuadores soft robotics para que el contacto sea más suave y ergonómico. Además, para conocer la posición de los dedos, y saber cuándo detener el sistema, se debe emplear un sensor de posición flexible para medir la posición de los dedos y verificar si están cerrados o abiertos. Por consiguiente, al emplearse actuadores soft robotics, se debe considerar la presión sobre los dedos, es por ello que se usará un sensor de presión para que esta no exceda los valores límites de 18.7 kPa aproximadamente (se tomó en consideración para el cálculo de la presión una mano mediana de adulto y los valores de fuerza máxima de la Tabla 1.2).

CAPÍTULO 2

2. REQUERIMIENTOS Y MODELAMIENTO

En este capítulo, se presentarán la lista de requerimientos del proyecto, así como algunos diseños conceptuales que servirán de ideas sobre cómo debe ser el proyecto.

2.1 REQUERIMIENTOS

En función del análisis presentado en la parte final de la sección 1.2, se elaboró una lista de requerimientos del proyecto que se llevará a cabo. A continuación, se presenta dicha lista:

- Empleo de material antideslizante.
- Limitar el costo de máquina a menos de 1000 soles.
- Controlar la presión menor a 18 kPa.
- Emplear actuadores como mínimo un 80% eficientes.
- Emplear una interfaz sencilla.
- Limitar las dimensiones del guante a menos de 20 cm x 8 cm x 5 cm.
- Diseñar el sistema con bordes redondeados.
- Emplear filtros en la entrada del sistema para polvo.
- Usar componentes que requieran mantenimiento mínimo cada 2 semanas.
- Contar con acceso a todas las superficies.
- Diseñar el sistema con piezas estandarizadas y comerciales dentro del mercado nacional.
- Emplear materiales con módulo de esfuerzo cortante mayores a 75 Mpa.
- Realizar una apropiada instalación de las tuberías según ISO 4414.
- Usar un material suave.

- Limitar el ruido a menos de 60 dBA.
- Emplear un voltaje de trabajo de 220 V AC, regulado a 12V DC.
- Consumir menos de 400 W.

En base a los requerimientos presentados, se definen las principales funciones de la máquina y utilizar estos requerimientos como criterios para elegir los medios que se desarrollarán mejor en las funciones que se requiera.

2.2. ÁRBOL DE FUNCIONES Y MEDIOS

Para seguir con la metodología, se organizarán las principales funciones del sistema por niveles, esto permitirá desintegrar las funciones generales a otras más específicas para poder elegir los medios que satisfacen las necesidades de cada función.

2.2.1. Primer nivel.

Para iniciar, se identifica la función principal de nuestro sistema, que es la de: Realizar ejercicios de rehabilitación para las manos. Se tienen dos medios para realizar esta función general, esto se muestra en la Figura 2.1.

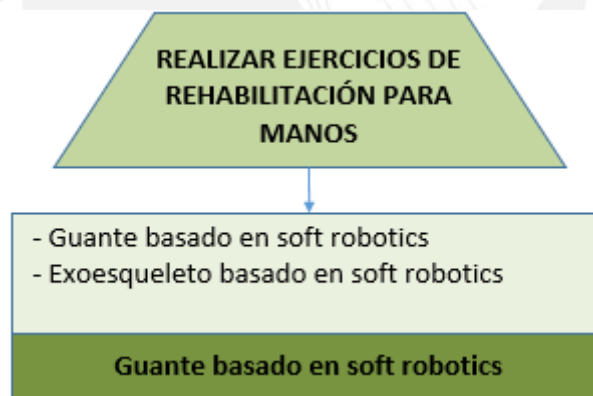


Figura 2.1. Primer nivel del árbol de descomposición de funciones

Como se puede ver en la Figura 2.1, de las dos subfunciones o medios, se elige la opción de Guante basado en soft robotics tomando en cuenta los requerimientos del sistema.

2.2.2. Segundo nivel.

Después de elegir el medio para el nivel 1, se descompone en más subfunciones, entonces a partir de ello, se tienen 7 subfunciones que se irán presentando una por una; además se explicará cada uno de los medios elegidos para este nivel.

2.2.2.1. *Accionar el movimiento en los dedos.*

Se consideran distintos actuadores clasificándolos por el sistema que los acciona, ya sea uno eléctrico o uno neumático.

2.2.2.1.1. *Sistema eléctrico.*

Son dispositivos formados por polímeros que pueden sufrir cambios debido a un estímulo eléctrico. Posee propiedades como grandes fuerzas de tensión, alta densidad de potencia.

2.2.2.1.2. *Sistema neumático.*

Son dispositivos o sistemas que requieren de aire comprimido para generar movimiento o cambios en su posición.

Como se muestra en la Figura 2.2, se tiene la subfunción y los medios, así como el mejor medio elegido en función de los requerimientos del sistema.

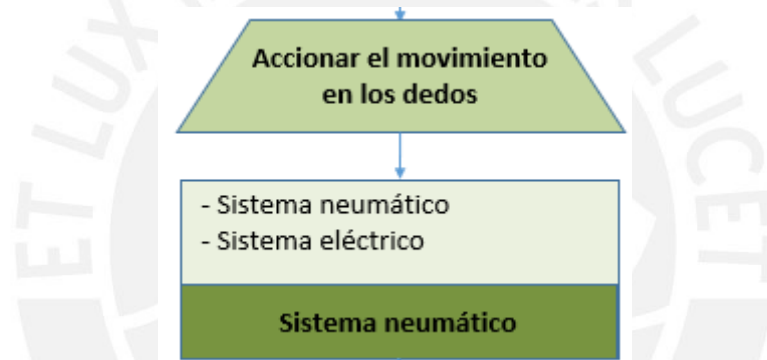


Figura 2.2. Primera subfunción del nivel dos con sus medios

2.2.2.2. *Determinar la posición de los dedos.*

Para esta subfunción, se eligieron medios basados en sensores de posición rotatorios, para así determinar el giro de los dedos.

2.2.2.2.1. *Encoder.*

Es un sensor de flexión o sensor de flexión es un sensor que mide la cantidad de desviación o flexión. Por lo general, el sensor está pegado a la superficie y la resistencia del elemento sensor varía al doblar la superficie.



Figura 2.3. Encoder

2.2.2.2.2. *Flex Sensor.*

Los Sensores Flex son resistencias analógicas que trabajan como divisores de tensión variable. Dentro del sensor se encuentran elementos resistivos de carbono dentro de un sustrato flexible y delgado (Peña, 2020).



Figura 2.4. Flex sensor

2.2.2.2.3. *Sensores potenciométricos.*

Un potenciómetro es un dispositivo que permite medir giros. Un potenciómetro giratorio, puede medir ángulos. Es una resistencia variable, esto permite medirla para obtener el ángulo de giro de la perilla.



Figura 2.5. Potenciómetro

2.2.2.2.4. *Sensores RVDT.*

Los sensores de ángulo inductivos RVDT son transductores de tipo inductivo que miden la posición angular de una forma inductiva, sin rozamiento. Por todo ello, los sensores de ángulo inductivos RVDT son elementos sin rozamiento, por tanto, sin desgaste, muy indicados en aplicaciones donde hay muchos millones de operaciones y se quiere asegurar el correcto funcionamiento (Sensing sensores de medida, s.f.).



Figura 2.6. Sensor RVDT

2.2.2.2.5. Acelerómetro.

Los acelerómetros se utilizan en mediciones de aceleración gravitacional estática, lo que le permite determinar el ángulo de desviación del objeto medido de la vertical, así como en mediciones de aceleración dinámica debido a golpes, movimiento, impacto o vibración (TME Electronic Components, 2020).

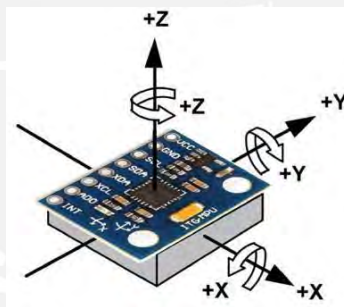


Figura 2.7. Acelerómetro

Se muestra en la Figura 2.8, la organización de la subfunción y de los medios, así como el medio óptimo para esta subfunción.

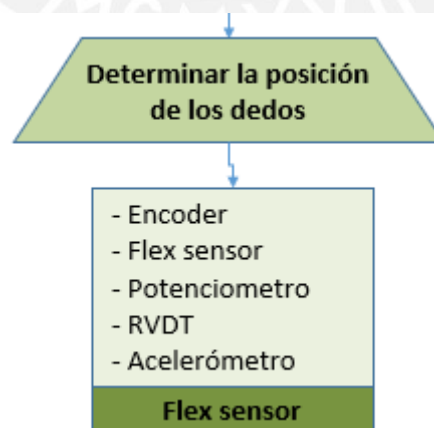


Figura 2.8. Segunda subfunción del nivel dos con sus medios

2.2.2.3. *Determinar la presión sobre los dedos.*

Los medios elegidos para esta subfunción son diversos sensores de presión, entre los cuales, según el tipo, se elige el adecuado para nuestro sistema.

2.2.2.3.1. *Sensores de presión con tecnología de galgas extensométricas.*

Tienen un elemento de detección de la presión al que se adhieren galgas extensométricas metálicas o en el que se aplican galgas de película estrecha mediante pulverización. Este elemento de medición puede ser una membrana u otros materiales dependiendo del uso. Las principales ventajas de este diseño de tipo tubular monolítico son un aumento de la rigidez y la capacidad de medir presiones muy elevadas (hasta 15.000 bar). La conexión eléctrica normalmente se establece a través de un puente de Wheatstone, que proporciona una buena amplificación de la señal y resultados de medición precisos y constantes (HBM, s.f.).



Figura 2.9. Sensor de presión con tecnología de galgas extensométricas

2.2.2.3.2. *Sensores de presión capacitivos.*

Utilizan una cavidad de presión y una membrana para formar un condensador variable. La membrana se deforma cuando se aplica presión y la capacitancia se reduce de manera proporcional. Este cambio en la capacitancia se puede medir eléctricamente y correlacionarse con la presión aplicada. Este tipo de sensores están limitados a presiones bajas, hasta alrededor de 40 bar (HBM, s.f.).



Figura 2.10. Sensor de presión capacitivo

2.2.2.3.3. *Sensores de presión piezorresistivos.*

Consisten en una membrana con galgas extensométricas integradas que detectan la deformación derivada de la presión aplicada. Estas galgas se suelen configurar formando un puente de Wheatstone, de esta manera podemos conseguir amplificar la señal de salida. Debido al material utilizado, pueden utilizarse hasta presiones en torno a 1000 bar (HBM, s.f.).



Figura 2.11. Sensor de presión piezorresistivo

2.2.2.3.4. *Sensores de presión resonantes.*

Utilizan los cambios en la frecuencia de resonancia en un mecanismo de detección para medir el esfuerzo provocado por la presión aplicada. Dependiendo del diseño de estos sensores, el elemento resonante puede estar expuesto al medio, dependiendo de este la frecuencia de resonancia. En algunos casos, estos sensores son sensibles a los impactos y las vibraciones que pueda causar interferencias o cambios ajenos a la presión ejercida (HBM, s.f.).



Figura 2.12. Sensor de presión resonante

De todos los sensores presentados, se elige el sensor piezorresistivo debido a su capacidad para instalarse en los dedos del guante, entonces el bloque de subfunción queda como se muestra en la Figura 2.13.

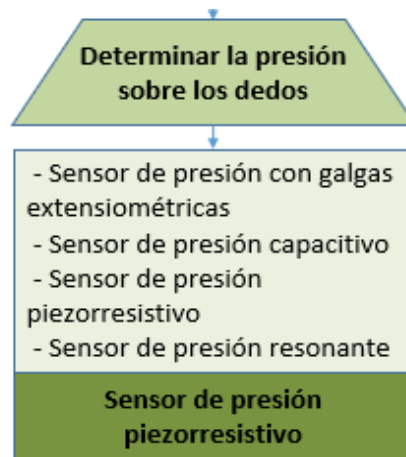


Figura 2.13. Tercera subfunción del nivel dos con sus medios

2.2.2.4. *Controlar el sistema.*

Para controlar los movimientos y el sistema en sí, se planea elegir entre microcontroladores y SBC (Single Board Computer).

2.2.2.4.1. *Arduino Uno.*

El Arduino Uno es una placa de microcontrolador basado en el microchip Atmega328P tiene 14 pines digitales de entrada y salida, de los cuales 6 pueden ser usados como salida PWM. También cuenta con 6 entradas analógicas (Arduino Store, s.f.).



Figura 2.14. Arduino UNO

2.2.2.4.2. *Raspberry Pi.*

La Raspberry Pi es la placa de un ordenador simple compuesto por un SoC, CPU, memoria RAM, puertos de entrada y salida de audio y vídeo, conectividad de red, ranura SD para almacenamiento, conexiones para periféricos de bajo nivel, esto hace que se pueda usar para proyectos de electrónica (Rodríguez, 2018).



Figura 2.15. Raspberry Pi

2.2.2.4.3. *Nvidia Jetson Nano.*

Es un pequeño, poderoso computador que permite ejecutar múltiples redes neuronales en paralelo para aplicaciones como, clasificación por imágenes, detección de objetos, segmentación, y procesamiento de voz, puede ser usado para el desarrollo de aplicaciones basadas en Inteligencia artificial (Nvidia Developer, s.f.).



Figura 2.16. Nvidia Jetson Nano

2.2.2.4.4. *Asus Tinkerboard.*

El Tinker Board de Asus es una computadora de una sola placa diseñada para aficionados, creadores y entusiastas de IOT familiarizados con las SBC. Cuenta con un SoC de 1.8 GHz de cuatro núcleos con 2GB de RAM DDR3, red LAN Gbit no compartida, Wi-Fi con soporte de antena IPEX actualizable y conectividad GPIO codificada por colores (Mecatronica Uno, s.f.).



Figura 2.17. Asus Tinkerboard

En la Figura 2.18 se muestra el resultado final de la elección entre el mejor controlador para el sistema.

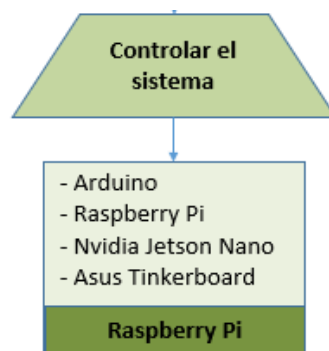


Figura 2.18. Cuarta subfunción del nivel 2 con sus medios

2.2.2.5. *Mostrar señales al usuario.*

Para interactuar con el usuario, el sistema debe mostrar señales de su funcionamiento, para esto se cuenta con los siguientes medios:

2.2.2.5.1. *Pantalla LED.*

Una pantalla LED es un dispositivo conformado por LEDs que pueden ser monocromáticos, de tipo bicolor o policromáticos (RGB).

Estos LEDs forman píxeles que agrupados permiten mostrar información. En pantallas de LEDs con píxeles RGB se obtiene una paleta de colores, a través de la mezcla o combinación de la luz, para así obtener un despliegue de millones o trillones de colores al que puede llegar cualquier proyector, televisor o monitor convencional (REMOTEMEDIA, s.f.).

Debido a su gran resistencia, maniobrabilidad, simplicidad para lograr la dimensión deseada de pantalla, facilidad para su mantenimiento, etc., se adapta fácilmente a los espacios en la intemperie o para uso interior. Esta tecnología se puede apreciar en la Figura 2.19.

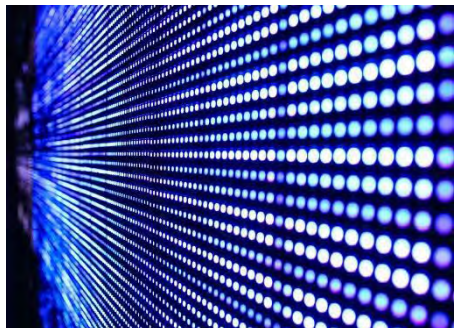


Figura 2.19. Pantalla LED

2.2.2.5.2. *Indicadores LEDs.*

Los indicadores se basan en el uso de luces LED de distintos colores con el fin de dar a conocer el estado de una función de algún sistema. Así como las luces que denotan si un aparato electrónico está encendido o apagado; estos leds puede ser diodos, como se muestran en la Figura 2.20.



Figura 2.20. Diodos LED

Entonces, como se aprecia en la Figura 2.21, la pantalla LED será mejor para mostrar señales a los usuarios.

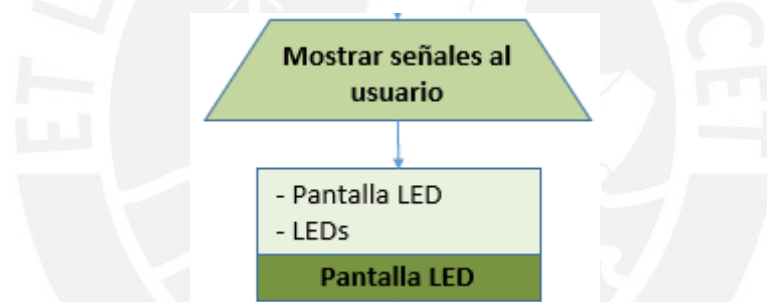


Figura 2.21. Quinta subfunción del segundo nivel con sus medios

2.2.2.6. *Recibir señales del usuario.*

Esta subfunción implica recibir indicaciones dadas por el usuario del sistema, y estas deben transmitirse al sistema de control del proyecto. Para satisfacer esta subfunción se plantea el uso de pulsadores o de una pantalla táctil.

2.2.2.6.1. *Pulsadores.*

Un botón o pulsador eléctrico es un componente eléctrico que permite o impide la libre circulación de la corriente dependiendo del estado en el que se encuentre. El paso de la corriente se consigue mediante contactos eléctricos y cada uno de estos tiene dos estados, abierto y cerrado. En la Figura 2.22 se puede apreciar un pulsador.



Figura 2.22. Pulsador

2.2.2.6.2. Pantalla táctil.

Inventada por E. A. Johnson entre los años 1965-1967 que explicaba el funcionamiento de su dispositivo como un toque de capacitancia, hoy en día es considerada como un medio de entrada y salida estándar por usuarios de dispositivos como portátiles, smartphones, etc.

Esta tecnología está basada en una pantalla de capacitancia que usa al vidrio como aislador eléctrico y, además, está revestido por un conductor transparente. Aprovechan la capacidad del cuerpo humano para transmitir energía eléctrica; es decir, en el momento que el usuario toca la pantalla, se genera un campo eléctrico, el cual es registrado y traducido en comandos. Esto se puede apreciar en las pantallas táctiles de los celulares, tal y como muestra la Figura 2.23.



Figura 2.23. Pantalla táctil

De estos medios, resultó como mejor opción la de una pantalla táctil, tal y como se muestra en la Figura 2.24.

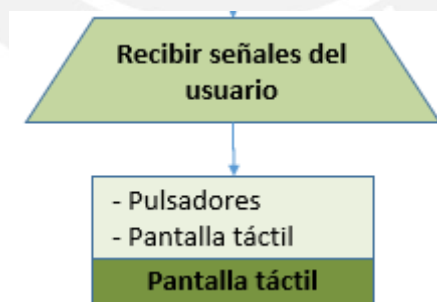


Figura 2.24. Sexta subfunción del nivel dos con sus medios

2.2.2.7. Energizar los sistemas.

También se tiene que energizar el sistema de control, para esto se tienen dos medios planteados, de los cuales se deberá seleccionar el que se adapte mejor a los requerimientos. Deberá proveer de una alimentación constante y de corriente continua.

2.2.2.7.1. Baterías recargables.

Una pila recargable es un acumulador eléctrico cuya carga puede ser restablecida, a diferencia de las pilas no recargables. Debe poderse identificar visualmente que es recargable, ya que hacerlo sobre una batería convencional, puede ser peligroso. Al pasar corriente, esta circula entre los puntos en ambos sentidos, acción que hace posible que el metal se regenere. Se podría pensar que esto haría de las baterías, elementos eternos, pero la realidad es que, en cada una de esas cargas, se genera una pérdida de metal, por lo que la vida de una batería no será infinita (Ferrer, s.f.).



Figura 2.25. Baterías recargables

2.2.2.7.2. Fuente conmutada.

Es un dispositivo electrónico utilizado para proporcionar diversos niveles de salida DC, este transforma la energía eléctrica a través de dispositivos de dispositivos de conmutación que se enciende y apagan a altas frecuencias, y con componentes de almacenamiento de energía eléctrica como capacitores o inductores para la suministración de energía cuando el dispositivo de conmutación se encuentra en el estado no conductor (Electronica Completa, s.f.). Un esquema de una fuente conmutada se muestra en la Figura 2.26.

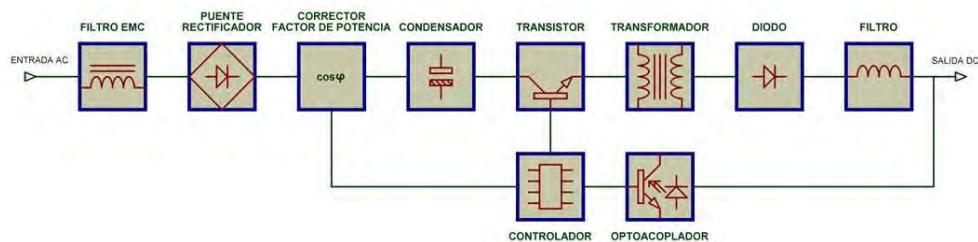


Figura 2.26. Esquema de la fuente conmutada

Después de comparar estos dos medios, se opta por la fuente conmutada ya que debido a que el sistema permanecerá conectado a una toma eléctrica de pared, no será necesario hacerlo portátil y usar baterías para energizar el sistema de control. Esto se ve reflejado en la Figura 2.27.

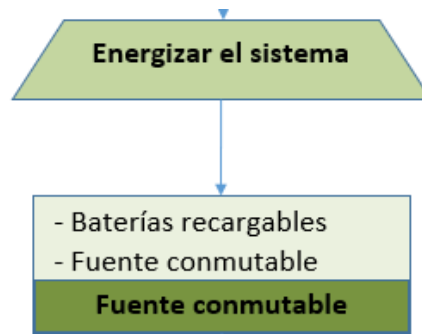


Figura 2.27. Octavo subsistema del nivel dos con sus medios

A continuación, se presenta la matriz morfológica que se empleó para definir las soluciones posibles para el nivel 2 del árbol de descomposición de funciones, este se puede apreciar en la Tabla 2.1.



Tabla 2.1. Matriz morfológica del nivel dos

Funciones	Principio de trabajo 1	Principio de trabajo 2	Principio de trabajo 3	Principio de trabajo 4	Principio de trabajo 5
Accionar el movimiento en los dedos	 Sistema neumático	 Sistema electrónico			
Determinar la posición de los dedos	 Encoder	 Sensor Flex	 Potenciómetro	 RVDT	 Acelerómetro
Medir la presión sobre los dedos	 Sensor de presión con galgas extensiométricas	 Sensor de presión capacitivo	 Sensor de presión piezorresistivo	 Sensor de presión resonante	
Controlar los movimientos	 Arduino Uno	 Raspberry Pi	 Nvidia Jetson Nano	 Asus Tinkerboard	
Mostrar señales al usuario	 Pantalla LED	 Luces LED			
Recibir señales del usuario	 Pulsadores	 Pantalla Táctil			
Energizar al sistema	 Baterías recargables	 Fuente conmutable			

2.2.3. Tercer nivel.

En este nivel, solo se verán las subfunciones que se necesitan para realizar el movimiento de las manos, es decir aquellas que componen al sistema neumático elegido en el segundo nivel. Estas subfunciones son 6.

2.2.3.1. *Comprimir aire.*

El único medio que satisface el cumplimiento de esta función es un compresor.

2.2.3.1.1. *Compresor.*

Es una máquina térmica diseñada para aumentar la presión de cierto tipo de fluidos llamados compresibles, tales como gases y vapores. La compresión se realiza mediante un intercambio de energía entre la máquina y el fluido, en el cual el trabajo realizado por el compresor es transferido al fluido aumentando su presión y energía cinética impulsándole a fluir (Ibarra, 2021). Se plantea usar uno como en la Figura 2.28.



Figura 2.28. Compresor de aire

La elección de este medio en la subfunción mencionada se aprecia en la Figura 2.29.

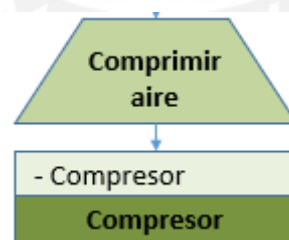


Figura 2.29. Primera subfunción del nivel tres con su medio

2.2.3.2. *Transportar aire comprimido.*

En este subsistema, se pueden emplear dos medios: tuberías o mangueras neumáticas, entonces se realizó la comparación entre ellas.

2.2.3.2.1. *Tuberías.*

Son cilindros huecos que se emplean para transportar fluidos, en este caso, el aire. Están hechos de diferentes materiales como: PVC, galvanizado, acero inoxidable, aluminio. Son rígidos como en la Figura 2.30.



Figura 2.30. Tuberías para aire comprimido

2.2.3.2.2. *Mangueras neumáticas.*

Es el medio por el cual el aire comprimido fluye en un sistema neumático hacia los diferentes elementos. Se emplea junto a un conector rápido o una conexión neumática, tienen el objetivo de unir los diferentes componentes neumáticos. Esta se puede encontrar en diferentes diámetros y en diferentes materiales (ROME CO INDUSTRIAL, 2018). Se muestra una manguera neumática en la Figura 2.31.



Figura 2.31. Manguera neumática

La elección del mejor medio, en este caso la manguera neumática se ve reflejado en la Figura 2.32.

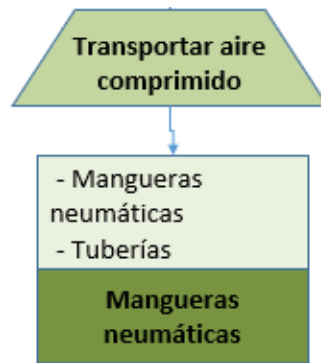


Figura 2.32. Segunda subfunción del nivel 3 con sus medios

2.2.3.3. Regular el paso de aire.

Para regular el paso del aire y por ende la presión generada sobre la mano por este, se debe usar una válvula, la que cumple con esta función es la reguladora de presión.

2.2.3.3.1. Regulador de presión.

Un regulador de Presión es una válvula que controla una característica específica de un sistema. Son aparatos de control de flujo diseñados para mantener una presión constante aguas debajo de los mismos. Este debe ser capaz de mantener la presión, sin afectarse por cambios en las condiciones operativas del proceso para el cual trabaja (MUNDO HVACR, 2007).



Figura 2.33. Válvula reguladora de presión

Como para esta función solo se tiene un medio, queda como se muestra en la Figura 2.34.

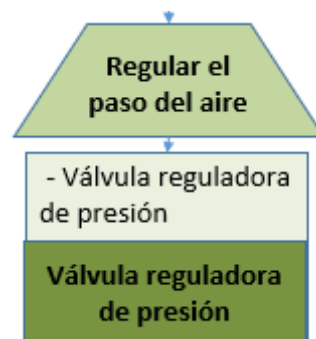


Figura 2.34. Tercera subfunción del nivel tres con su medio

2.2.3.4. *Filtrar el aire.*

Esta función implica filtrar el aire que sale del compresor y pasa por la válvula para retener las partículas de polvo que pueda tener y así evitar que lleguen a los canales de nuestro sistema. Para cumplir con esta función solo existe un medio que es el filtro de aire.

2.2.3.4.1. *Filtro de aire comprimido.*

Los filtros para aire comprimido protegen contra el polvo, la suciedad, el aceite y el agua. Por ejemplo, el polvo produce desgaste en el equipo, y puede hacer que las válvulas neumáticas se atoren. Un ejemplo de esto es el filtro de aire presentado en la Figura 2.35.



Figura 2.35. Filtro de aire comprimido

La función y su único medio quedan representados en el árbol de descomposición de funciones de la manera que se aprecia en la Figura 2.36.



Figura 2.36. Cuarta subfunción del nivel tres con su medio

2.2.3.5. *Generar el movimiento en los dedos.*

Para definir los medios de esta subfunción, se identificaron los principales actuadores de soft robotics.

2.2.3.5.1. *PneuNets.*

Los actuadores elastoméricos accionados neumáticamente son capaces de proporcionar un movimiento no lineal. Este actuador suave está compuesto de una serie de canales y cámaras dentro del elastómero, estos canales se inflan al ser presurizados y debido a esto, se crea el movimiento.

Para cambiar el tipo de movimiento, se debe cambiar la geometría del elastómero. Una de sus principales características es que son altamente resistentes; sin embargo, necesitan de un gran espacio de trabajo debido a que, al llenarse de aire, el elastómero aumenta su volumen (Medina & Vélez, 2014).

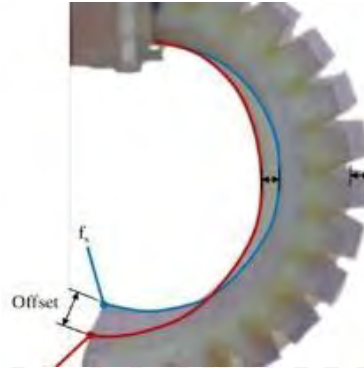


Figura 2.37. PneuNets

2.2.3.5.2. McKibben.

Conocido como PAM, es un dispositivo contráctil, que al aplicarle aire presurizado es capaz de generar grandes fuerzas y movimiento no lineal, se le conoce también como músculo artificial neumático (Medina & Vélez, 2014).



Figura 2.38. McKibben

La función y el medio elegido se refleja en la Figura 2.39.

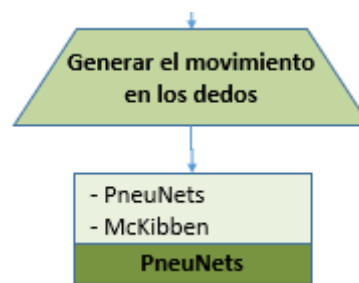


Figura 2.39. Quinta subfunción del nivel 3 del árbol de funciones con sus medios

2.2.3.6. Permitir el paso del aire.

Esta función permitirá el flujo del aire comprimido hacia el actuador, y también para dejar escapar el aire una vez que el ejercicio haya terminado.

2.2.3.6.1. Válvulas 3/2 vías.

Estas válvulas permitirán la salida del aire y el flujo de este hacia el actuador en dos estados contando con tres vías. Las vías son: la salida del aire al medio, la entrada de aire del compresor y la salida del aire hacia el actuador. El primer estado, que es el inicial, tiene la salida al actuador conectada a la salida del aire. El segundo estado conecta la salida de aire del compresor hacia la entrada de aire del compresor.

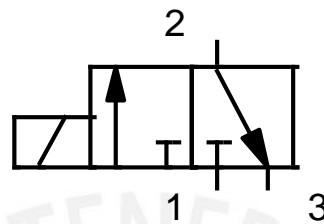


Figura 2.40. Válvula 3/2 vías

2.2.3.6.2. Válvulas 3/3 vías.

Estas válvulas permitirán la salida del aire y el flujo de este hacia el actuador en tres estados contando con tres vías. Las vías son: la salida del aire al medio, la entrada de aire del compresor y la salida del aire hacia el actuador. El primer estado, que es el inicial, tiene todas las salidas aisladas. El segundo estado conecta la salida de aire del compresor hacia la entrada de aire del compresor. Y el tercer estado, conecta la salida del actuador hacia la salida al exterior.

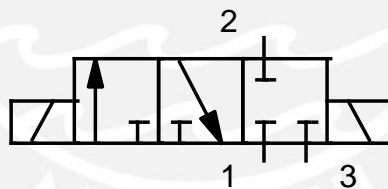


Figura 2.41. Válvula 3/3 vías

2.2.3.6.3. Válvulas 2/2 vías.

Estas válvulas permitirán la salida del aire y el flujo de este hacia el actuador en dos estados contando con dos vías. Las vías son: la entrada de aire del compresor y la salida del aire hacia el actuador. El primer estado, que es el inicial, tiene todas las salidas aisladas. El segundo estado conecta la salida de aire del compresor hacia la entrada de aire del compresor. Con este tipo de válvula, se contarían con dos para cada dedo.

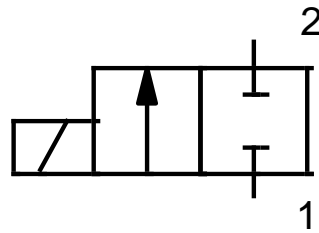


Figura 2.42. Válvula 2/2 vías











Se muestra la función y la elección del medio en la Figura 2.43.



Figura 2.43. Sexta subfunción del nivel 3 del árbol de funciones con sus medios

En la Tabla 2.2, se muestra la matriz morfológica usada en el nivel tres del árbol de descomposición de funciones.

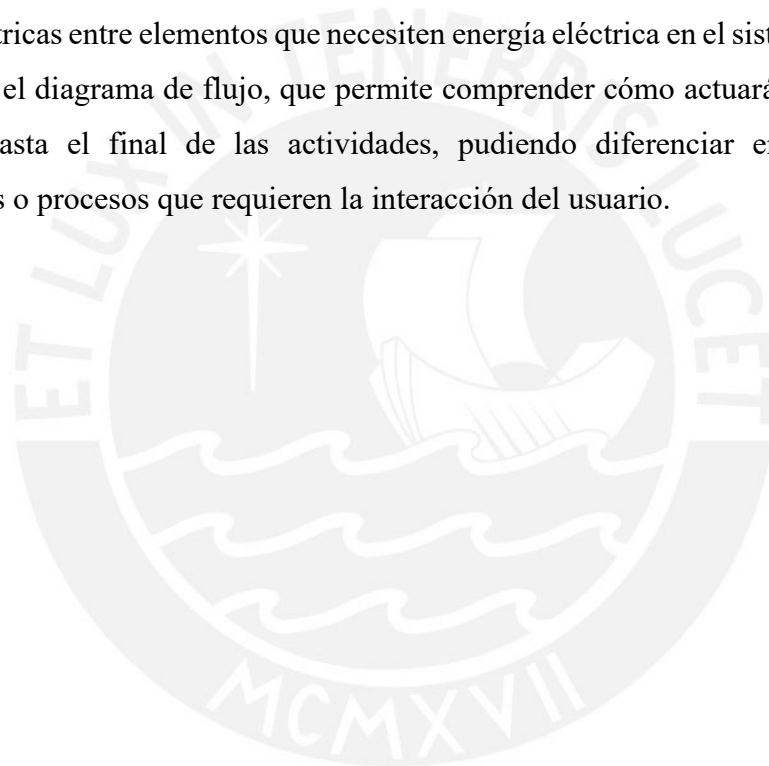
Tabla 2.2. Matriz morfológica del nivel tres

Función	Principio de trabajo 1	Principio de trabajo 2	Principio de trabajo 3
Comprimir aire	 Compresor		
Transportar aire comprimido	 Mangueras neumáticas	 Tuberías neumáticas	
Regular el paso de aire	 Regulador de presión		
Filtrar el aire	 Filtro de aire		
Generar el movimiento de los dedos	 PneuNets	 McKibben	
Permitir el paso de aire	 Valvula 3/2 vias	 Valvula 3/3 vias	 Valvula 2/2 vias

En el Anexo A, se muestra el árbol de descomposición de funciones completo, así como las tablas de comparación para cada nivel presentado.

2.3. CONCEPTO DE SOLUCIÓN

Una vez que se definen los elementos que compondrán el sistema en el árbol de descomposición de funciones, se puede establecer una relación entre ellos, esta servirá para dar una visión más detallada de cómo se comportará el sistema y cómo se relacionarán las partes que los componen. Además, sirve para identificar las conexiones y los pasos para ensamblar dichos componentes. En la Figura 2.44, se presenta la arquitectura mecatrónica del sistema, donde se aprecia la relación entre los distintos elementos del sistema. En la Figura 2.45 y la Figura 2.46, se puede ver un modelo preliminar del sistema del guante sobre la mano. En la Figura 2.47 y 2.48 se aprecia el modelo de la zona de control y actuación de todo el sistema. En la Figura 2.49, se muestra la arquitectura eléctrica/electrónica, donde se puede apreciar las conexiones eléctricas entre elementos que necesiten energía eléctrica en el sistema. En la Figura 2.50 se muestra el diagrama de flujo, que permite comprender cómo actuará el sistema desde el encendido hasta el final de las actividades, pudiendo diferenciar entre procesos ya predeterminados o procesos que requieren la interacción del usuario.



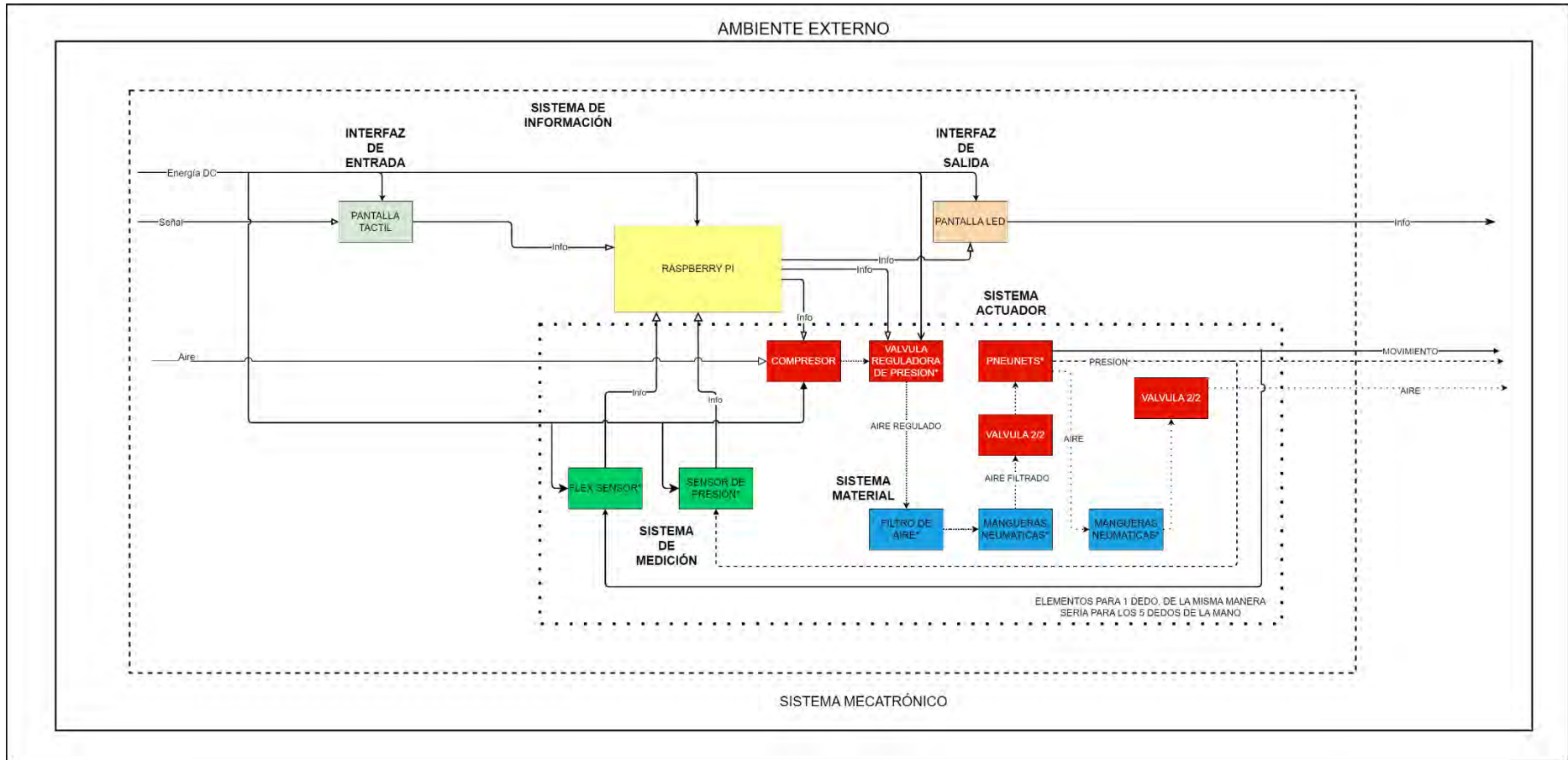


Figura 2.44. Arquitectura del sistema mecatrónico

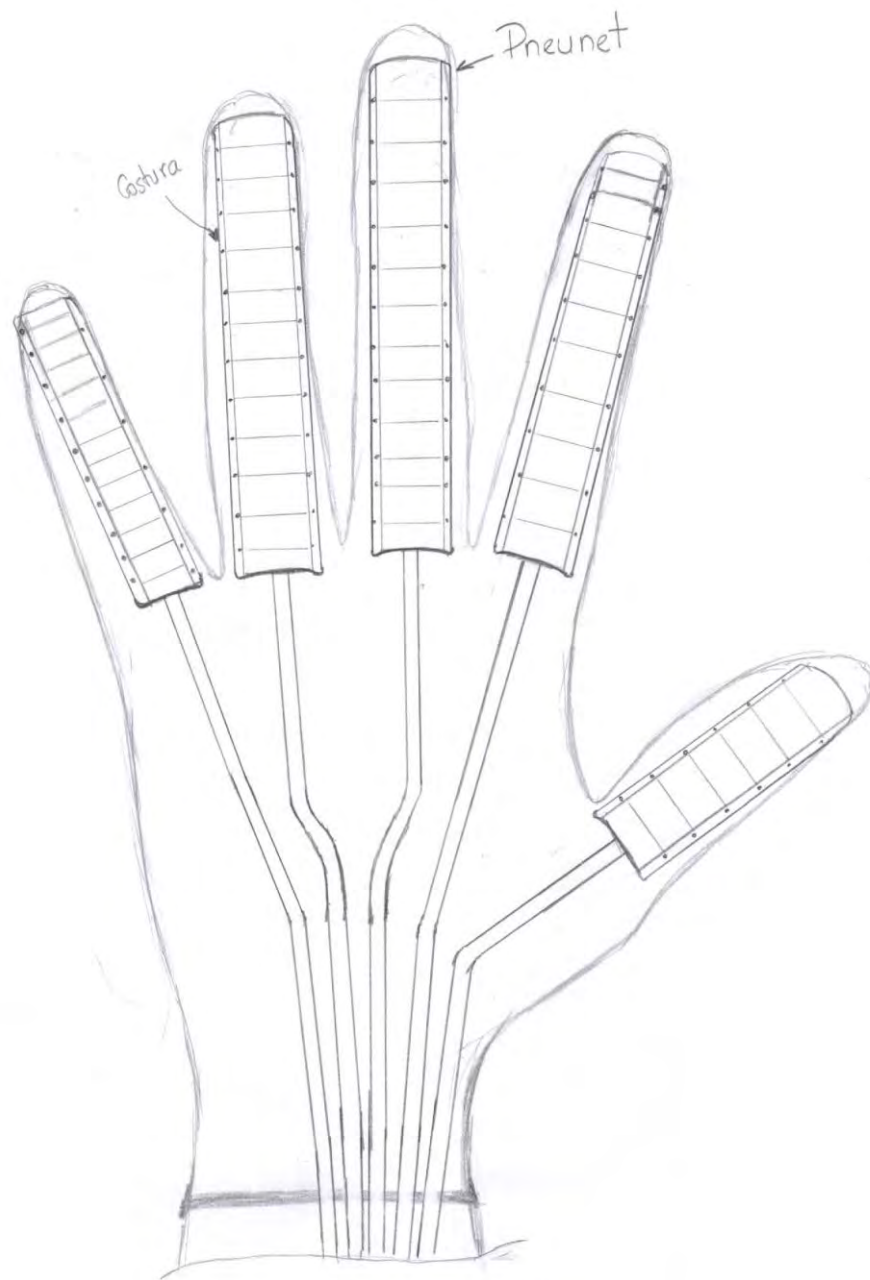


Figura 2.45. Vista frontal del guante en la mano

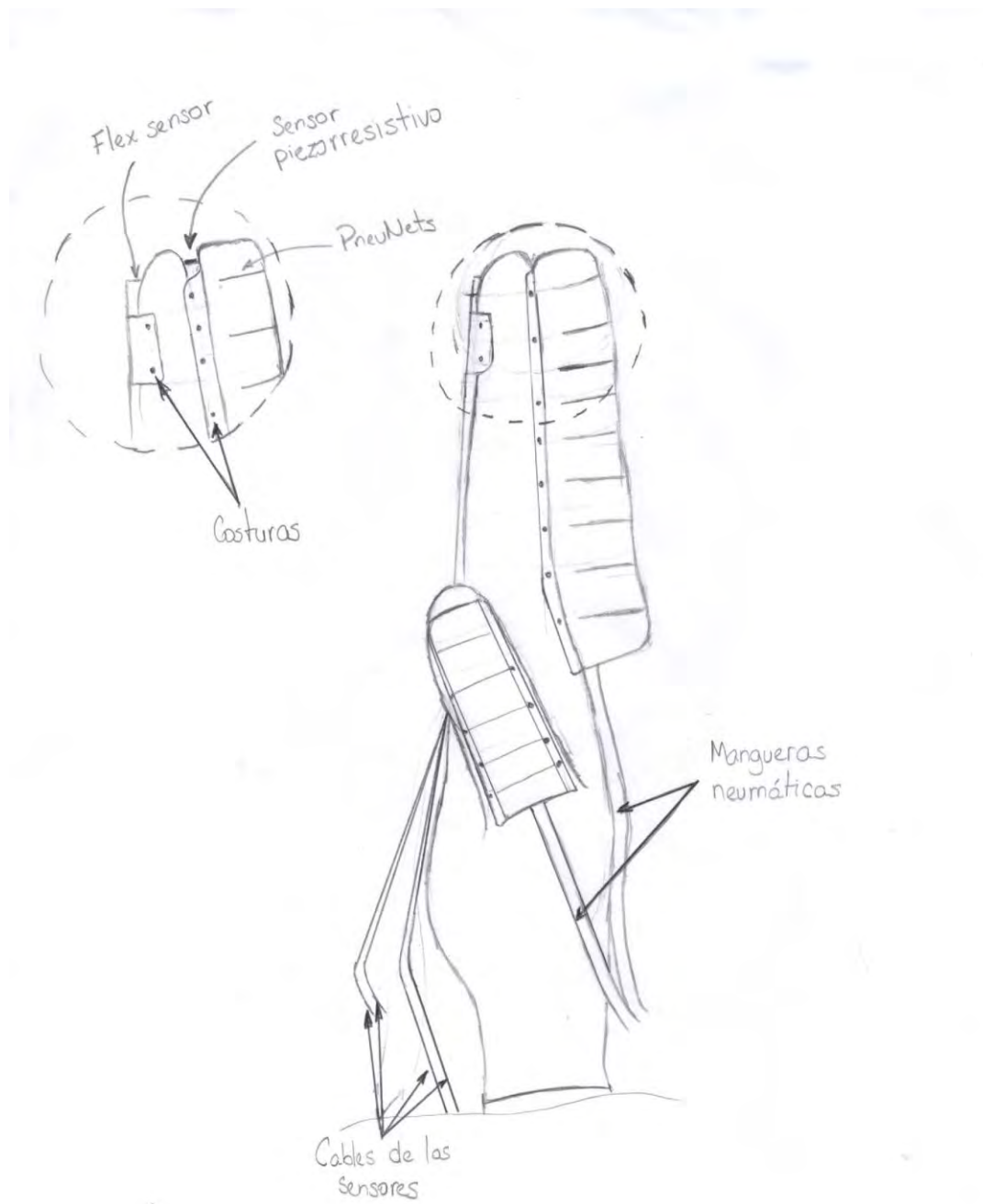


Figura 2.46. Vista de perfil del guante en la mano con los elementos que lo componen

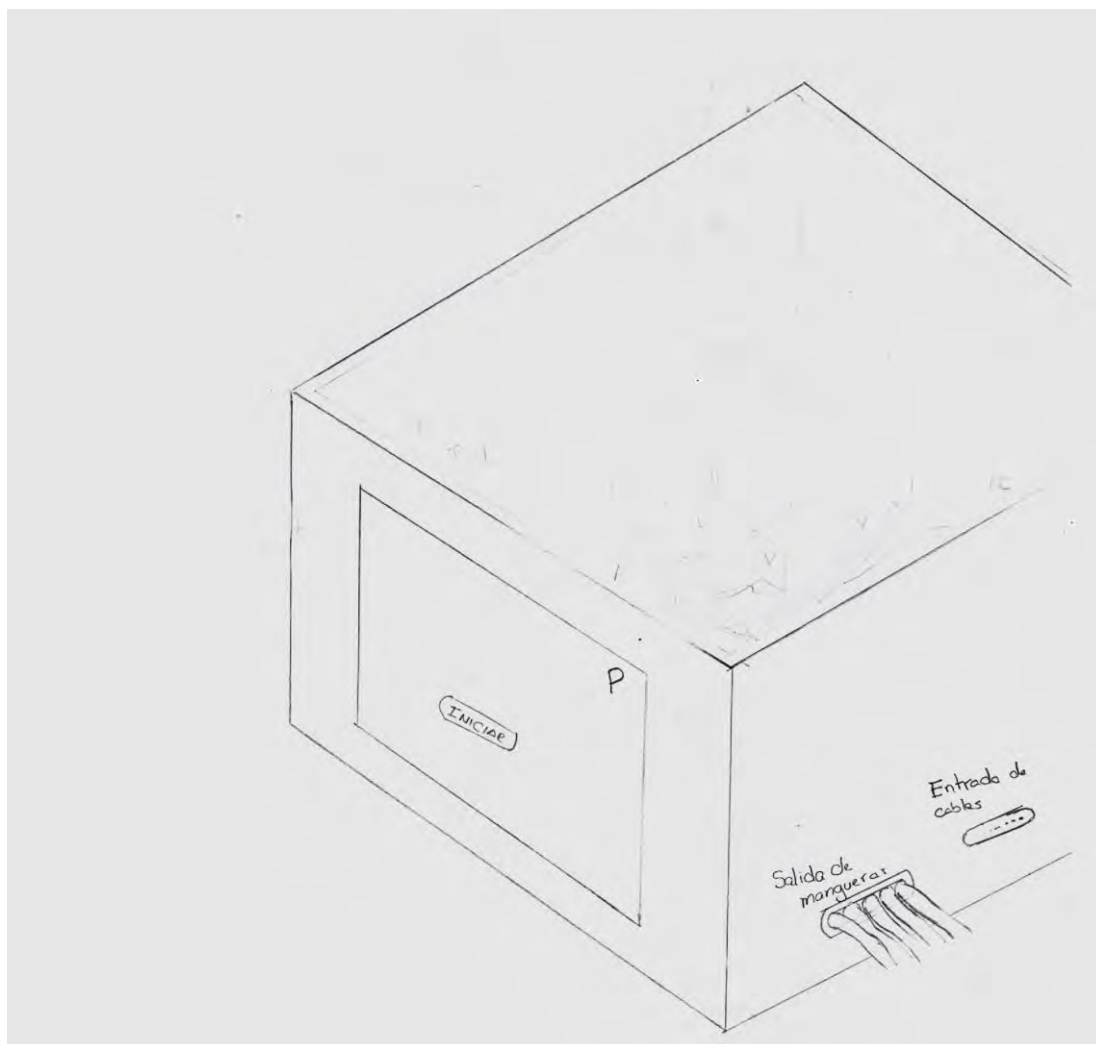


Figura 2.47. Vista general de la zona de control y actuación

MCMXVII

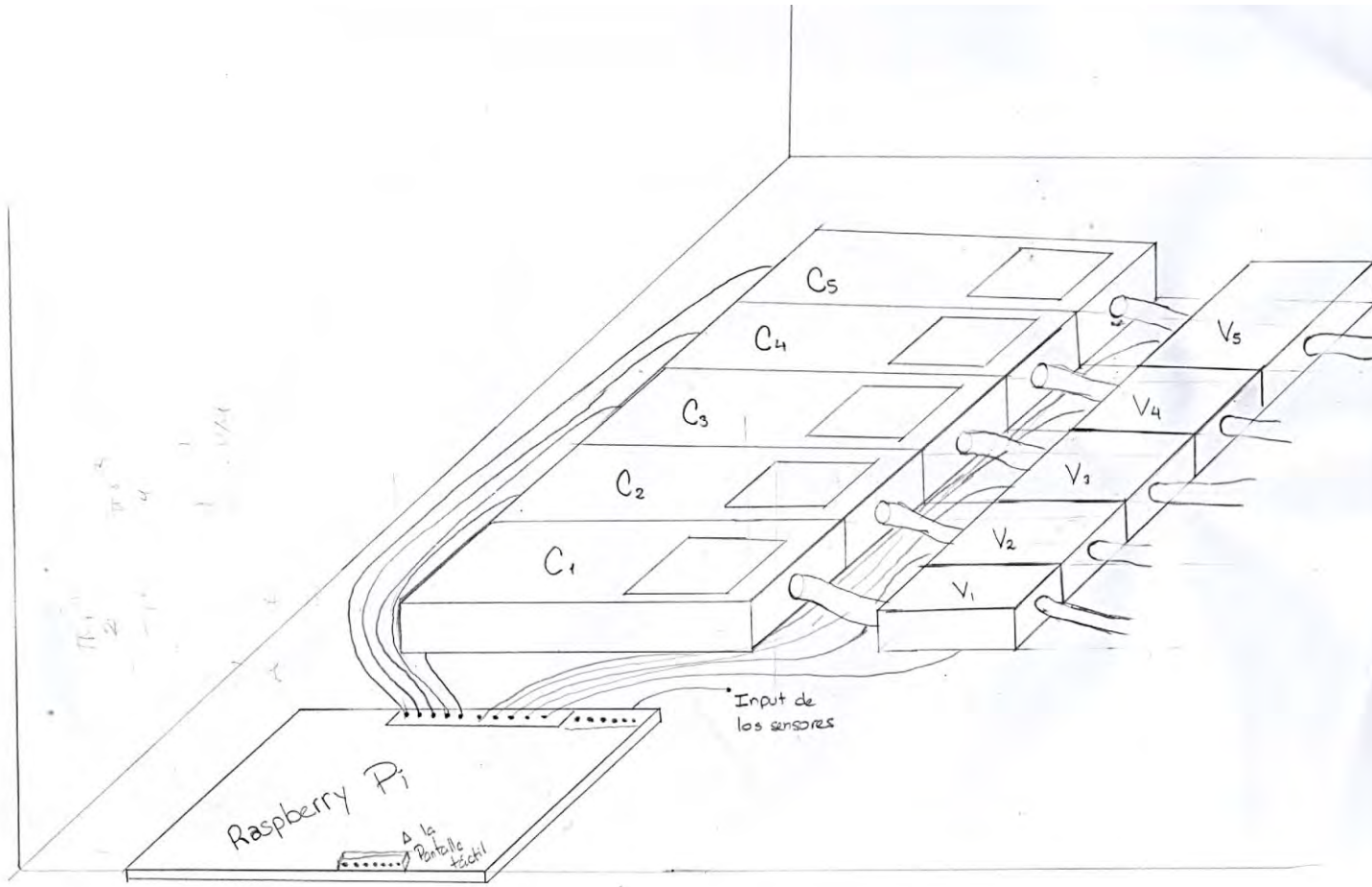


Figura 2.48. Vista a detalle de la zona de control y actuación

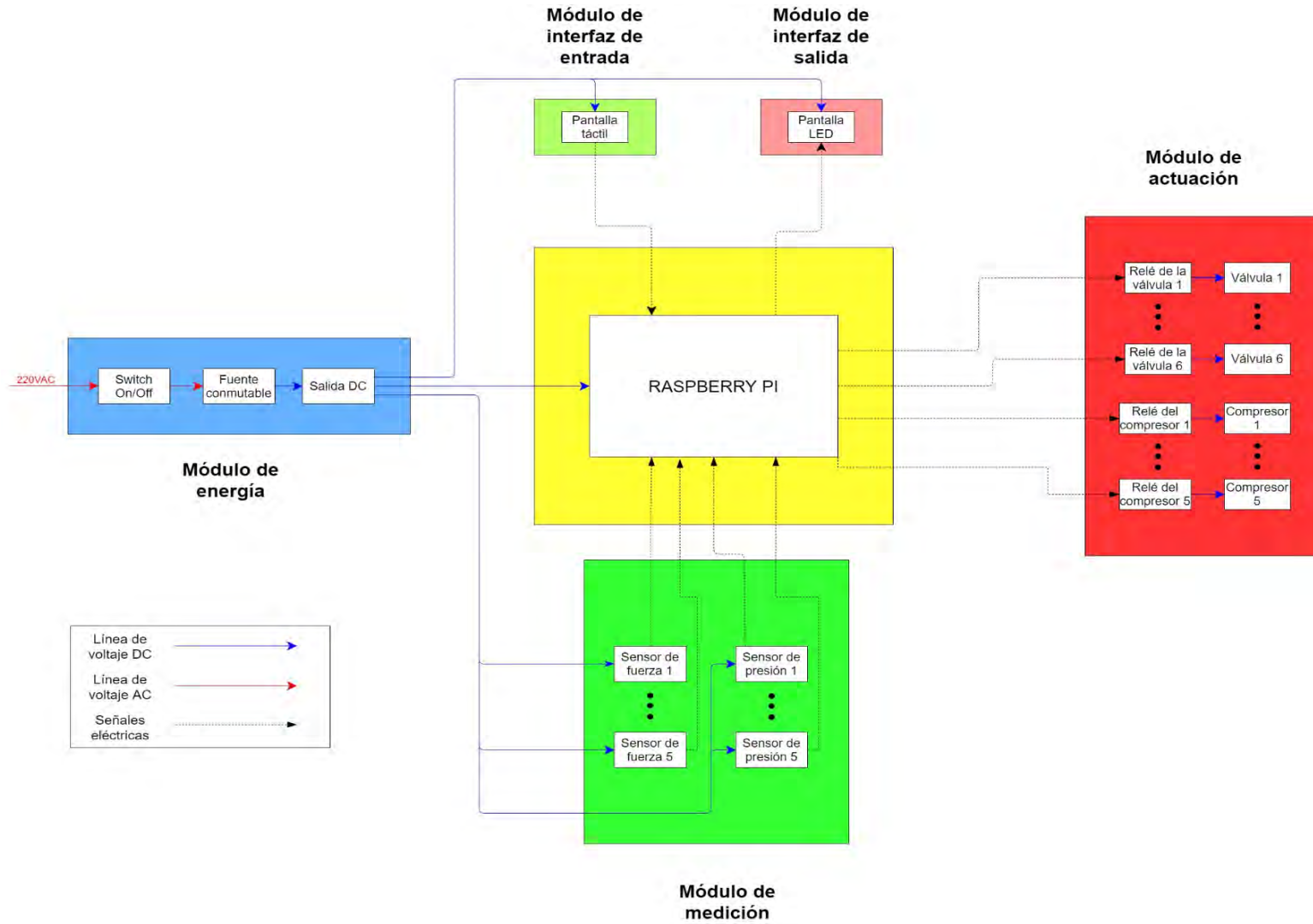


Figura 2.49. Arquitectura eléctrica-electrónica del sistema

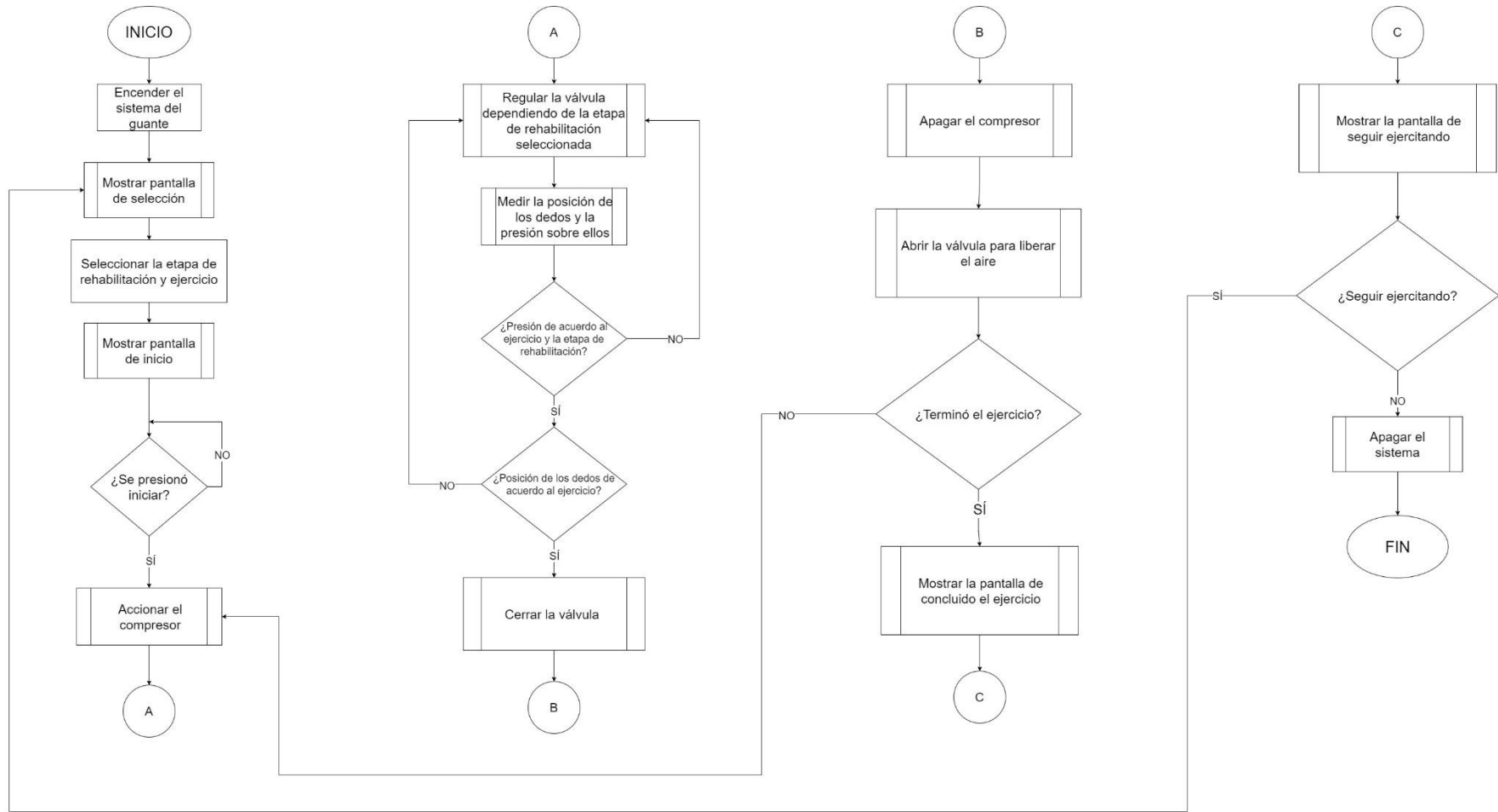


Figura 2.50. Diagrama de flujos del sistema

En la Figura 2.51, se presenta el diagrama de operaciones, que hace referencia a la interacción que el usuario tendrá con el sistema.

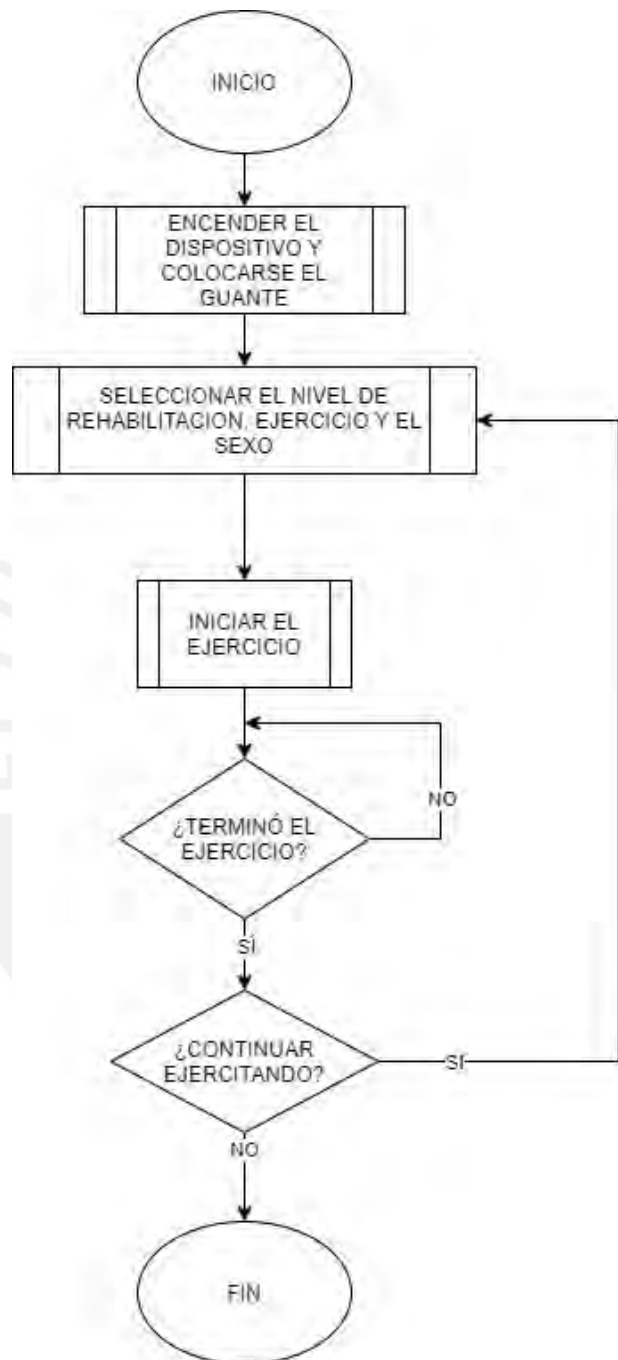


Figura 2.51. Diagrama de operaciones del sistema

Con estos diagramas, se puede definir una relación entre las clases del sistema a desarrollar, esta relación se presenta en la Figura 2.52.

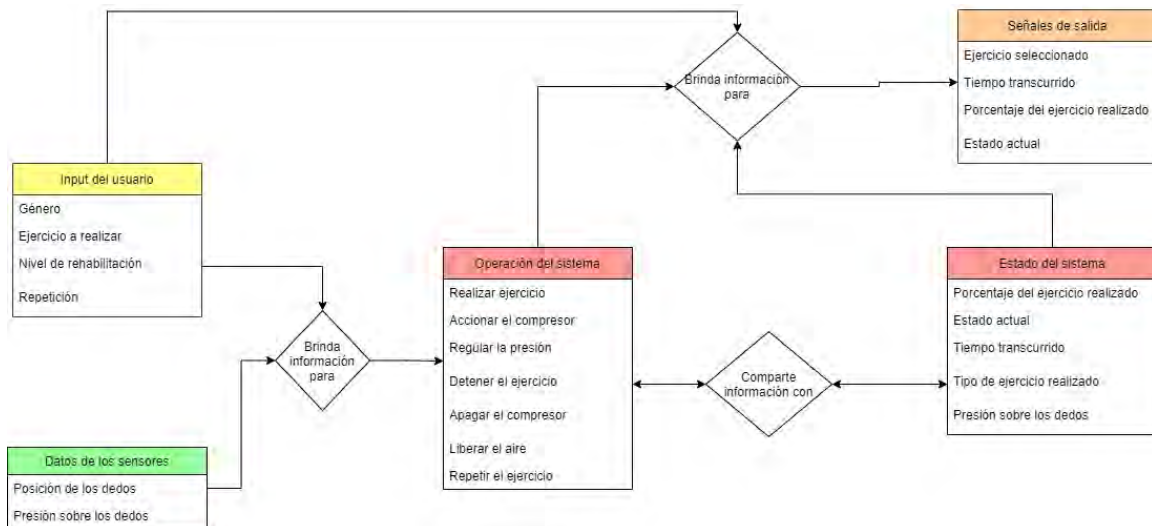


Figura 2.52. Diagrama de clases del sistema

Una vez definido el diagrama de clases del sistema, se puede tener una idea clara del concepto del producto, de cómo será la conexión eléctrica y electrónica, así como la distribución y las principales características del sistema mecánico que se debe trabajar. Esto aporta una visión más detallada y comprensiva de la correlación entre los componentes elegidos en el árbol de descomposición de funciones.

CAPITULO 3

3. DISEÑO MECÁNICO, NEUMÁTICO Y ELECTRÓNICO DEL GUANTE DE REHABILITACIÓN

En este capítulo se diseñarán los actuadores, el sistema electrónico, así como el neumático; además se seleccionarán los materiales para ello.

3.1. DISEÑO MECÁNICO

Se elegirán los materiales adecuados para cada subsistema que forma parte del proyecto. Se iniciará con el actuador pneunet, en cuyo caso se probará con diferentes materiales; en segundo lugar, se continuará con el subsistema neumático; por último, se terminará con el subsistema electrónico.

3.1.1. Actuador pneunet.

Se procederá a mostrar el diseño del molde para la producción del actuador, en este caso se opta por crear la pieza mediante silicona como se explica en el Capítulo 5.

El actuador está basado en uno realizado por Cappello, y otros en el año 2018, con ciertas modificaciones para fines de este proyecto. El actuador diseñado es de perfil rectangular con pequeñas cámaras separadas por un canal para que fluya el aire, esta división está pensada para que el aire ingrese en esas cámaras y permita que estas se inflen y se curven, para que el dedo también siga esa trayectoria, el ancho de cada actuador es fijo en 15 mm y la altura también, siendo esta una de 13 mm. La cantidad de cámaras varía según la longitud del dedo, el ancho de cada cámara es de 9 mm. Con esto en mente, se pasa al diseño del molde para obtener el actuador ya descrito.

3.1.1.1. *Diseño del molde.*

Como se mencionó en el apartado anterior, los actuadores se fabricarán por medio de moldes, es decir, fabricación por moldeo empleando silicona como material a trabajar. Para el diseño de los moldes, se emplean los datos presentados en la Tabla 1.13, estas longitudes servirán de referencia para el largo del actuador que se tendrá después del proceso. La longitud del actuador puede ser muy grande para algunos tipos de mano, esto no es impedimento para su uso, pues el actuador de contraerá de igual manera. Se planea tener paredes de 2mm de espesor, por lo que se diseñan partes cuya distancia entre caras sea de 2mm. En la Figura 3.1, se puede ver el fondo del molde, sobre este irá otra pieza que se encajará en los dos agujeros que tiene en la cara lateral y apoyará un apoyo cilíndrico en el lado opuesto de la pieza. En la Figura 3.2, se muestra la pieza que se colocará sobre la parte superior del molde, donde se pueden ver los puntos de apoyo.

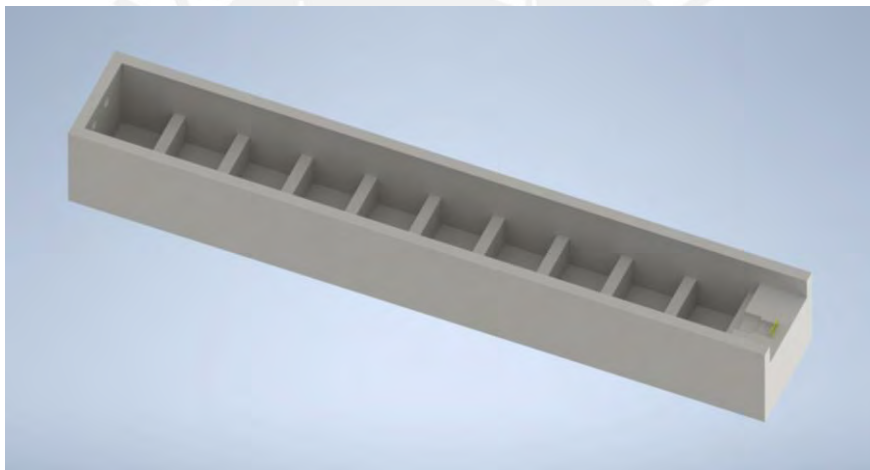


Figura 3.1. Parte inferior del molde

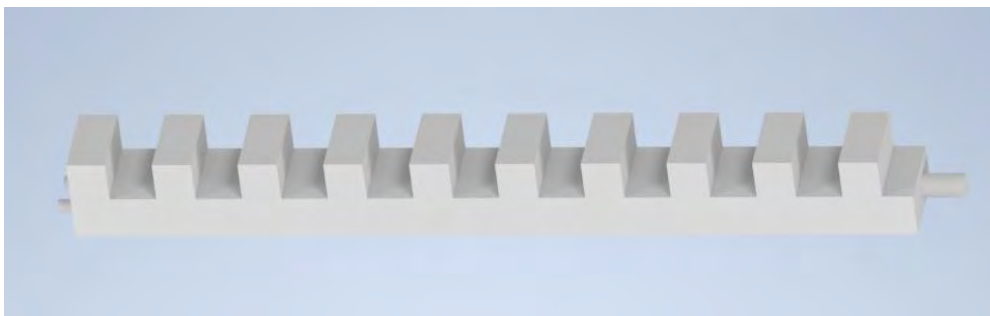


Figura 3.2. Parte superior del molde

Como la parte obtenida de este molde es hueca, hace falta la parte inferior del actuador, esta se obtiene también por moldeo, del ancho del actuador y con agujeros que servirán para coser este al guante, el molde de la parte inferior se presenta en la Figura 3.3.



Figura 3.3. Molde para la parte inferior del actuador

Para imprimir estos moldes, se emplean los siguientes parámetros de impresión:

- Velocidad de impresión: 50 mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 150 mm/s
- Flujo de impresión: 95%
- Relleno: 20%
- Velocidad de retracción: 50 mm/s
- Temperatura de impresión: 205°C

Estos parámetros son calculados en base a experimentos previos de impresión 3D. Una vez impresos los moldes, se procede a usar la silicona, esta está compuesta de dos componentes que se deben mezclar en iguales proporciones antes de colocarse sobre el molde; luego de mezclar, se deja secar para después extraer las piezas. En la Figura 3.4 se muestra la parte inferior del actuador; y, en la Figura 3.5, la parte superior. Al unir estas dos partes mediante silicona en el perímetro del actuador, se obtiene la pieza completa. Entonces, en la Figura 3.6, se muestra el actuador después de unir la parte superior e inferior. Se determinó mediante experimentación que la presión máxima soportada por el actuador, debido a su grosor, es de 6 psi; además, se recomienda pasar la silicona en el molde por una cámara de vacío para extraer las pequeñas burbujas de aire que pueda contener la silicona después de mezclada y de vaciada en el molde.

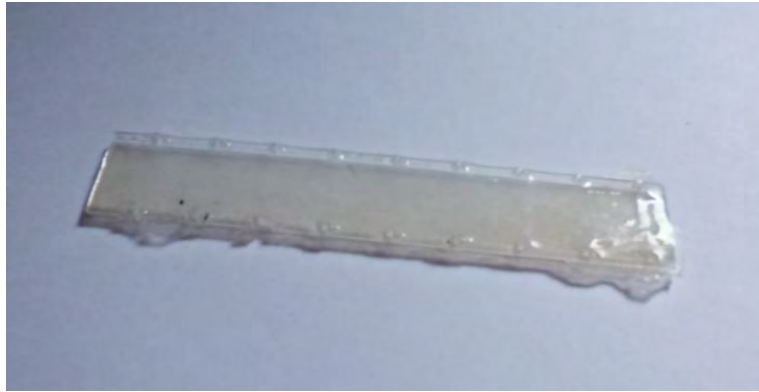


Figura 3.4. Parte inferior del actuador obtenido a partir de silicona

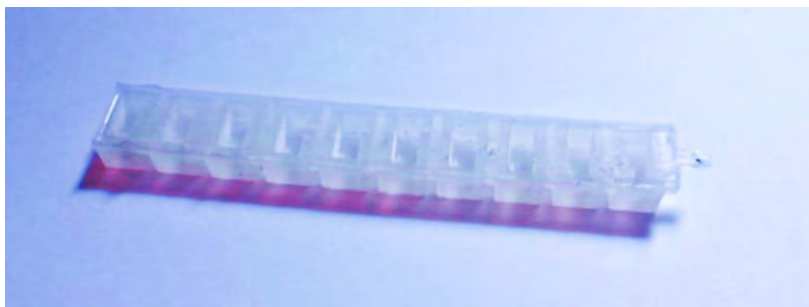


Figura 3.5. Parte superior del actuador obtenido a partir de silicona



Figura 3.6. Actuador completo después de unir la parte inferior y superior

3.2. DISEÑO NEUMÁTICO

En este apartado, se diseñará el subsistema neumático que se empleará para generar el aire comprimido necesario para accionar el actuador diseñado previamente.

Se requiere que un compresor provea del aire para que el actuador realice el movimiento deseado, para ello se contará con un compresor por cada dedo; además se requiere de válvulas que permitan el paso del aire hacia el actuador, y otra que permita la salida de este una vez que se haya terminado el ejercicio. Entonces, se requerirán 5 compresores, 10 válvulas solenoides

(cinco por cada dedo para dejar pasar el aire desde el compresor hacia el actuador y cinco que serán empleadas por los dedos para liberar el aire al interior de cada actuador).

3.2.1. Selección de materiales.

La selección de materiales es algo que se debe realizar para definir qué modelo exacto de actuador, sensor, o medio de conexión se empleará para el subsistema a desarrollar. En esta parte, se abarca esa elección, así como se presentan datos técnicos de cada material.

3.2.1.1. Compresor.

Se empleará un compresor con presión de salida regulable, con el fin de variar la presión en los actuadores neumáticos. En vista a ello, se encontraron dos compresores que cumplen con esa característica. La comparación entre ellos se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Comparación de compresores

CARACTERISTICAS	XIAOMI MI COMPRESOR	AUTOSTYLE
Presión máxima	3 – 150 psi (regulable)	0.7 MPa
Voltaje de operación	5 V	12 V
Temperatura de trabajo	-10°C hasta 45°C	-
Dimensiones	124 x 71 x 45.3 mm	-
Capacidad de batería	2000 mAh	-
Imagen referencial		

Debido a que el Xiaomi es de una dimensión portátil y fácil de acomodar en un área de trabajo de aproximadamente 40 cm x 40 cm, se empleará ese compresor.

3.2.1.2. Válvulas solenoides.

Como se definió, se usarán válvulas solenoides que solo aperturen o cierren el paso del aire. Las válvulas a emplear cuentan con las características presentadas en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Características de las válvulas solenoides

CARACTERÍSTICAS	
Diámetro	½"
Voltaje de operación	12 V
Corriente de operación	0.3 A

3.2.1.3. *Mangueras.*

Como la válvula a emplear es de ½", en búsqueda de los conectores, estos deben ser del tipo hembra, y para estos, las mangueras que se pueden emplear son de 8, 10, o 12 mm; además, la manguera del compresor es de 10 mm. Es por ello que, se emplearán mangueras de poliuretano de 10 mm de diámetro exterior y 6.5 mm de diámetro exterior.

3.2.1.4. *Conectores.*

Para conectar la manguera del compresor a la válvula y para conectar la manguera de poliuretano a la válvula (tanto para dejar fluir el aire hacia el actuador como para dejar pasar el aire por la válvula que sacará el aire hacia el exterior), se emplean conectores rectos de hilo interior, como la válvula es de ½", se necesita un roscado de ese tipo con una salida para manguera de 10mm. Esta opción se ve en la Figura 3.7.

Para conectar la manguera hacia el actuador y la manguera que liberará el aire hacia la válvula al exterior, se usará un conector tipo TEE de 10 mm como se puede ver en la Figura 3.8.

Conector recto hilo Interior



Ø G	Ø D	Código
1/8	4	0.451.140.410
1/8	6	0.451.140.610
1/8	8	0.451.140.810
1/8	10	0.451.141.010
1/4	4	0.451.140.413
1/4	6	0.451.140.613
1/4	8	0.451.140.813
1/4	10	0.451.141.013
1/4	12	0.451.141.213
3/8	4	0.451.140.417
3/8	6	0.451.140.617
3/8	8	0.451.140.817
3/8	10	0.451.141.017
3/8	12	0.451.141.217
1/2	8	0.451.140.821
1/2	10	0.451.141.021
1/2	12	0.451.141.221

Figura 3.7. Catálogo de conector recto hilo interior o hembra

Conector te igual



Ø G	Código
4	0.451.040.400
6	0.451.040.600
8	0.451.040.800
10	0.451.041.000
12	0.451.041.200
14	0.451.041.400
16	0.451.041.600

Figura 3.8. Catálogo de conectores TE igual

Cabe resaltar que la parte neumática será controlada por un subsistema electrónico, es decir, un controlador que ejecutará un programa de control para accionar las partes en el momento adecuado.

3.3. DISEÑO ELECTRÓNICO

En esta parte, se debe seleccionar los materiales electrónicos a emplear, así como definir cómo irán conectados entre ellos.

3.3.1. Selección de materiales.

En el capítulo 2, se definieron los tipos de sensores y actuadores a usar, en esta parte se seleccionarán a detalle el modelo y tamaño de cada uno de ellos.

3.3.1.1. *Sensor Flex.*

Para medir el giro de los dedos, se usará el sensor flex tal como se planteó en el capítulo anterior. Existen dos tipos de estos sensores: los de 2.2” y los de 4.5”, pero estos últimos no se encuentran en stock en tiendas comerciales, por lo que se emplearán los de 2.2”, que también cumplen con la función de medir el giro del dedo desde la base de estos. En la Tabla 3.3, se presentan las características más importantes del sensor flex.

Tabla 3.3. Características del sensor flex

CARACTERÍSTICAS	
Modelo	FS-L0055-103-ST
Ciclo de vida	>1 millón de flexiones
Temperatura de funcionamiento	-35°C hasta 80°C
Potencia máxima	0.5W
Tipo de señal	Analógico
Resistencia en reposo	25 k Ω \pm 30%
Resistencia doblado	50 k Ω como mínimo

3.3.1.2. *Sensor de fuerza.*

Entre los distintos sensores de fuerza que se buscaron, existe uno que también es flexible, este es el FSR 402, que puede medir fuerzas hasta de 20 N. En la Tabla 1.2, se presentaron las fuerzas promedio a las que se produce la flexión de cada dedo, y ninguna sobrepasa los 20N, por lo que este sensor es adecuado para la tarea y con este se trabajará. En la Tabla 3.4, se presentan las principales características de este sensor.

Tabla 3.4. Características del sensor de fuerza

CARACTERÍSTICAS	
Rango de fuerza	0.2 – 20 N
Resistencia sin actuación	10 MΩ
Diámetro total	18.29 mm
Vida útil	10 000 000 activaciones
Temperatura de funcionamiento	-35°C hasta 80°C
Tipo de señal	Analógico

3.3.1.3. Pantalla LCD Táctil.

Se empleará un Display LCD TFT de 2.4” o un Shield Display LCD TFT de 3.5”. A continuación, en la Tabla 3.5 se presenta una comparación entre las características de las pantallas presentadas.

Tabla 3.5. Comparación entre pantallas táctiles

CARACTERÍSTICA	SHIELD DISPLAY LCD TFT	DISPLAY LCD TFT
Voltaje de operación	5 V	3.3 V
Controlador LCD	ILI9486	ILI9431
Controlador táctil	-	XPT2046
Profundidad de color	16/18 bpp	18 bpp
Cantidad de colores	262144 colores	262144 colores
Cantidad de pines	8 digitales y 5 analógicos	5 digitales

Como ambas pantallas tienen características similares, se optará por la que ofrece mayor facilidad para conexión e instalación, en este caso, al ser un shield tiene los pines para su conexión directa al microcontrolador elegido. Entonces se empleará el Shield Display LCD TFT.

3.3.1.4. Controlador.

La conexión electrónica del sistema estará dada por la arquitectura presentada en la Figura 64. Sin embargo, se realizará un cambio en el módulo controlador debido a la cantidad de pines necesarios. Esto se presentará en la Tabla 3.6, donde se muestran los pines necesarios en el controlador.

Tabla 3.6. Pines requeridos en el sistema

DISPOSITIVO	TIPO DE PINES	CANTIDAD DE PINES
Válvulas solenoides	Digital	10
Control presión compresor	Digital	15
Pantalla LCD	Digital	8
Pantalla táctil	Analógico	5
Sensor flex	Analógico	5
Sensor de fuerza	Analógico	5

Como se muestra, se necesitan 33 pines digitales y 15 analógicos. Anteriormente se había planteado usar el Raspberry Pi como controlador; sin embargo, este no cuenta con ADC, por lo que no se podrían conectar los 15 pines analógicos que se requieren. Además, si se quiere diseñar ADC's para la Raspberry, cada ADC usaría 4 pines digitales (dependiendo del tipo de módulo ADC a usar, hay algunos que usan 8), por lo que serían un total de 93 pines digitales que se requerirían para el funcionamiento del sistema, esto no es viable ya que el Raspberry no cuenta con esa cantidad de pines. No obstante, el Arduino Mega sí cuenta con la cantidad de pines requeridos como se muestra en el pinout de la Figura 3.9, ya que tienen 54 pines digitales y 16 analógicos, por esta razón, se usará el Arduino Mega en este proyecto.

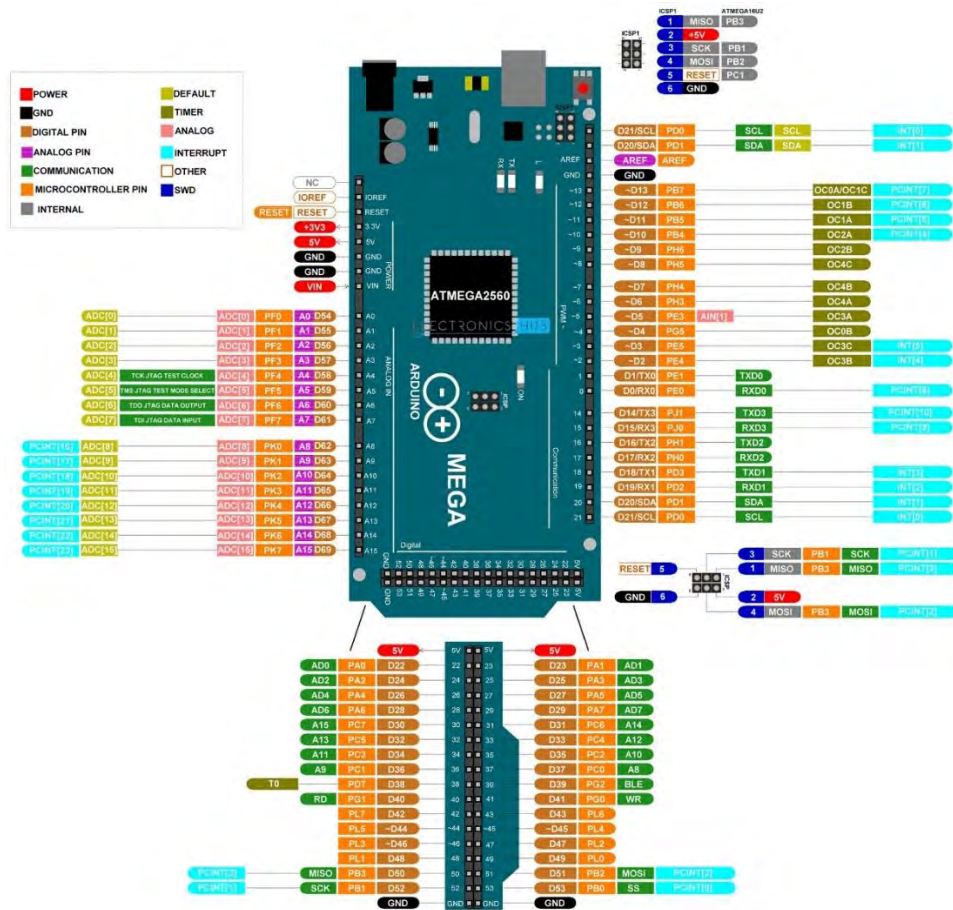


Figura 3.9. Pinout de Arduino Mega

3.3.1.5. Fuente de voltaje.

Con el fin de seleccionar la fuente de alimentación del sistema, se tomará en cuenta el voltaje requerido por cada elemento, así como la corriente. Con ello se seleccionará la fuente conmutable más adecuada para el proyecto. Los sensores flex y de fuerza, serán conectados directamente al microcontrolador, por lo que no necesitan una fuente de alimentación externa. Además, como los compresores tienen batería interna y un cargador con adaptador, estos se conectarán directamente a la toma de corriente de 220V AC. En la Tabla 3.7, se muestra el voltaje, amperaje y potencia consumida por cada elemento.

Tabla 3.7. Voltaje, corriente y potencia de cada elemento que requiera una fuente de alimentación

COMPONENTE	CANT.	VOLTAJE (V)	CORRIENTE (A)	POTENCIA (W)
Pantalla táctil	1	5	0.15	0.75
Arduino Mega	1	12	1	12
Válvula	10	12	0.3	36
TOTAL				48.75

Entonces, se tendrían 48.75 W, si se emplea una fuente de 12V, esta debe contar con un mínimo de 4.0625 A. Como se menciona en el capítulo 2, se usará una fuente conmutable, esta será de 12V 5A. Como también se necesitan 5V para el funcionamiento de la pantalla táctil, se usará un regulador de voltaje LM7805.

En la parte de los anexos, se muestra el diagrama esquemático de conexiones del proyecto. Con la finalidad de ordenar los componentes, y contenerlos, se diseñó una caja que contiene a todos los elementos que no van en el guante. Para efectos de este documento, no se fabricó dicha caja; sin embargo, los planos de despiece y ensamble, se encuentran al final del documento. En la Figura 3.10, se muestra la estructura general de la caja; en la Figura 3.11 se muestra la caja con el primer nivel acoplado; en la Figura 3.12, con el segundo nivel acoplado; en la Figura 3.13, la caja con la tapa.

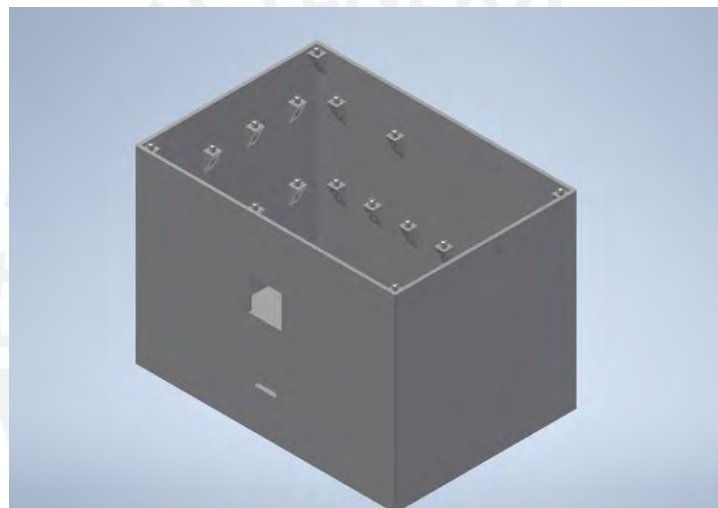


Figura 3.10. Estructura de la caja

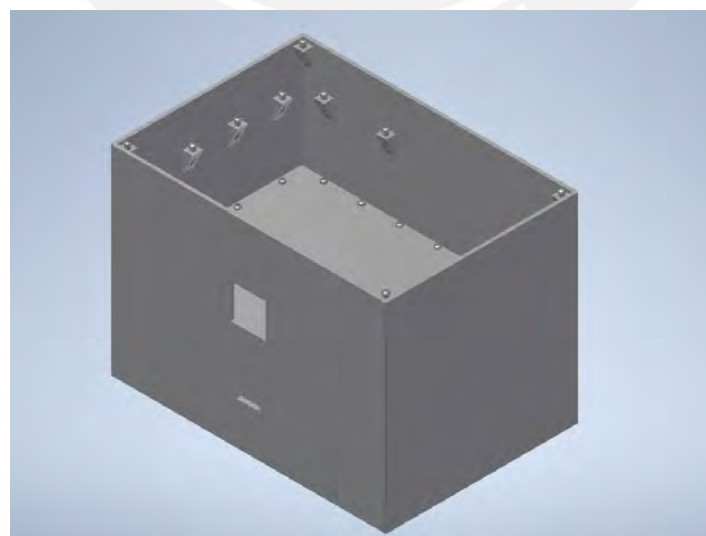


Figura 3.11. Primer Nivel de la caja

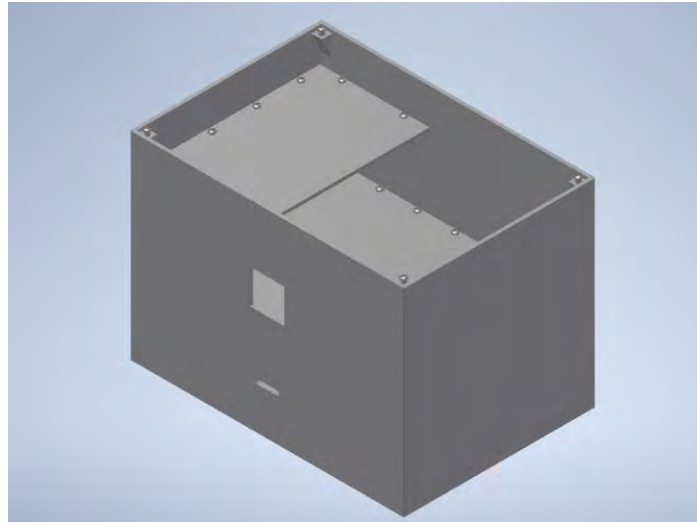


Figura 3.12. Segundo nivel de la caja

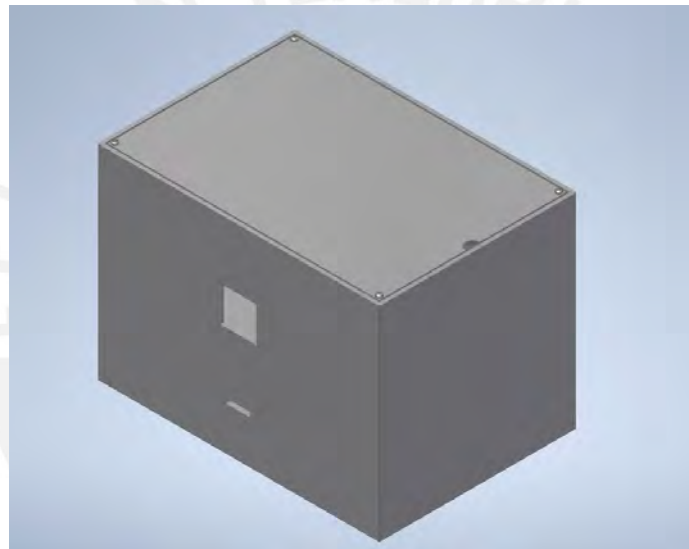


Figura 3.13. Caja completa

3.4. DISEÑO DE LA INTERFAZ DE USUARIO

En esta parte, se presentan las pantallas con las que interactuará el usuario a fin de operar el guante de rehabilitación. Como se empleará el microcontrolador Arduino Mega, la programación de las pantallas se llevará a cabo en el IDE de Arduino.

A continuación, en la Figura 3.14, se muestra la pantalla principal. En la Figura 3.15, se muestra la selección del ejercicio; en la Figura 3.16, la pantalla para dar comienzo al ejercicio; en la Figura 3.17, si se quiere continuar con los ejercicios, o se finaliza.

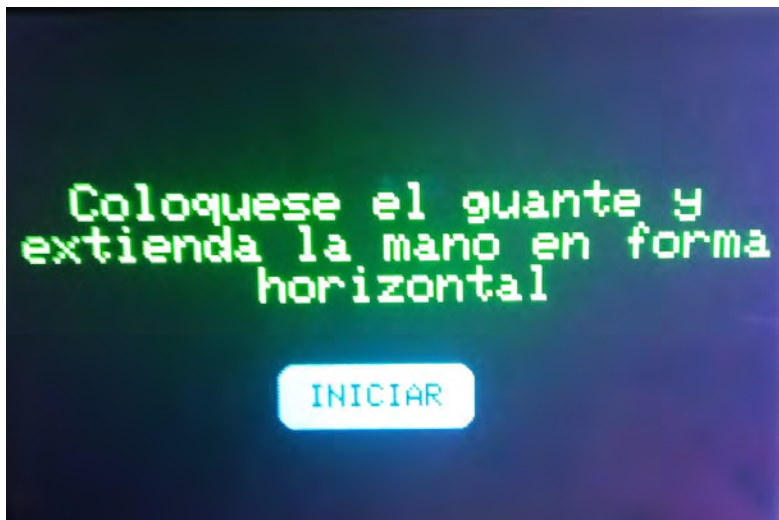


Figura 3.14. Pantalla principal

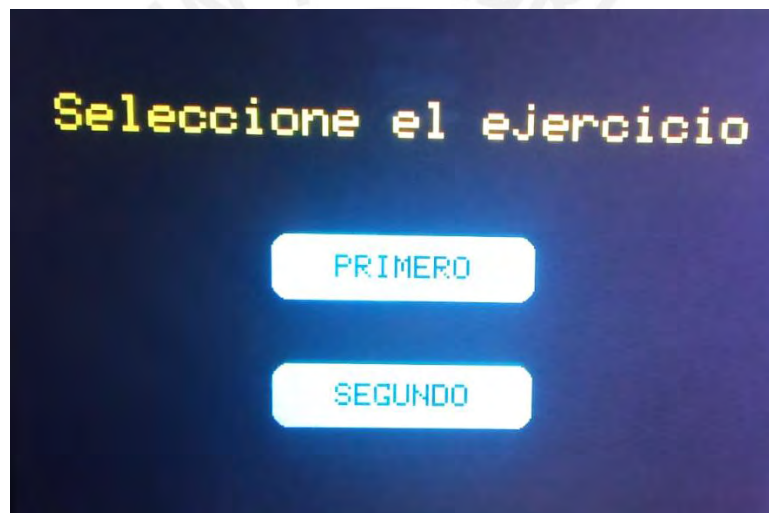


Figura 3.15. Pantalla de selección de ejercicio

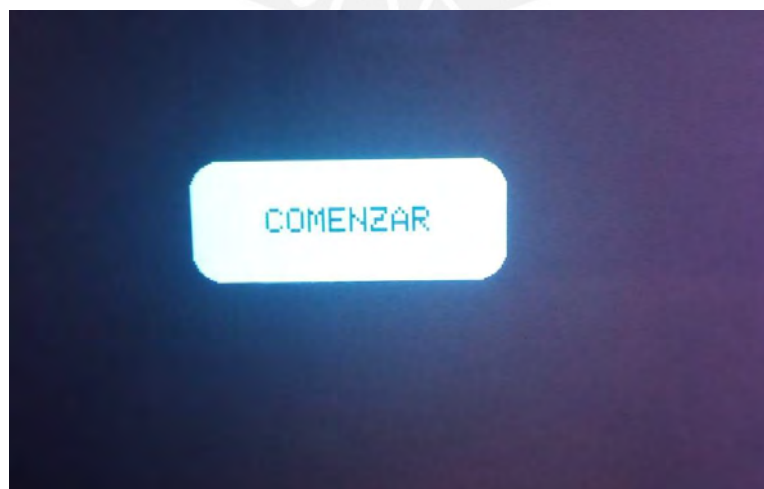


Figura 3.16. Pantalla de comienzo

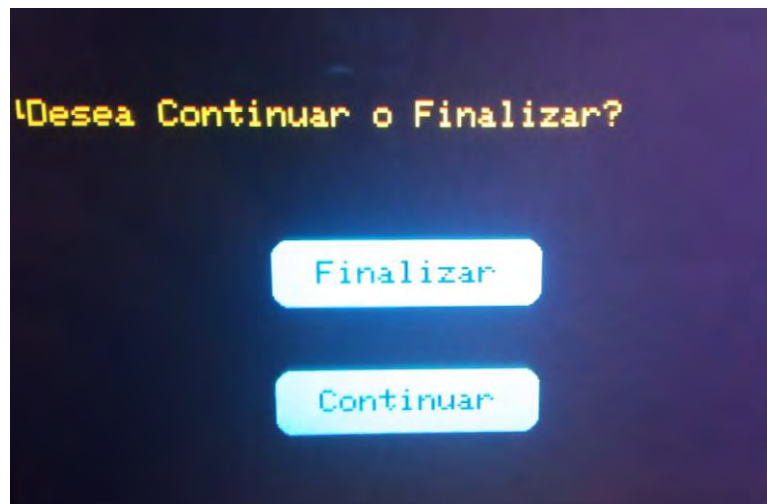


Figura 3.17. Pantalla de selección de continuar o terminar

3.5. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

Se debe implementar un controlador que permita controlar la posición de los dedos medido en ángulo sexagesimal, para ello se espera diseñar un controlador PID como se muestra en la Figura 3.18. Este controlador será obtenido mediante la app pidTuner de MATLAB a partir de la función de transferencia del actuador obtenida mediante identificación de sistemas. Este proceso será detallado en el capítulo 5.

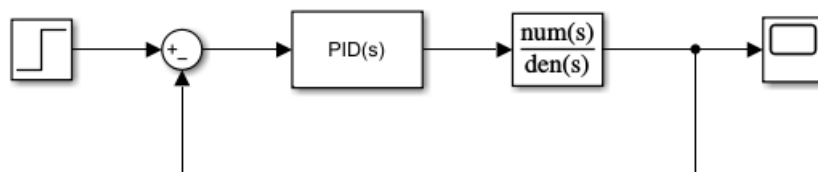


Figura 3.18. Sistema de control realimentado

CAPÍTULO 4

4. PLANOS Y ESTIMACIÓN DE COSTOS

En este capítulo, se procederán a mostrar los planos de los moldes realizados, así como un cálculo estimado del costo de las piezas necesarias.

4.1. LISTA DE PLANOS

En total, se cuentan con 11 planos de despiece, que abarcarían los planos mecánicos del diseño. Además, se tiene un plano neumático. Los planos mecánicos de despiece seguirán la siguiente nomenclatura: PZ – 0XX – AY, a continuación, se explica el significado del código a emplear:

- PZ: Plano de despiece (PD), Plano de ensamble (PE), o Plano neumático (PN)
- 0XX: Plano N° 0XX
- AY: Tamaño de hoja

En la Tabla 4.1, se puede ver la lista de planos del presente trabajo. Estos planos también se pueden ver en el Anexo B.

Tabla 4.1. Lista de planos

CÓDIGO DEL PLANO	DESCRIPCIÓN
PD – 001 – A3	Molde dedo pulgar fondo
PD – 002 – A3	Molde dedo pulgar tapa
PD – 003 – A3	Molde dedo índice fondo
PD – 004 – A3	Molde dedo índice tapa
PD – 005 – A3	Molde dedo medio fondo
PD – 006 – A3	Molde dedo medio tapa
PD – 007 – A3	Molde dedo anular fondo
PD – 008 – A3	Molde dedo anular tapa
PD – 009 – A3	Molde dedo meñique fondo
PD – 010 – A3	Molde dedo meñique tapa
PD – 011 – A3	Molde base del actuador
PD – 012 – A1	Estructura de la caja
PD – 013 – A3	Primer nivel
PD – 014 – A3	Segundo nivel
PD – 015 – A3	Tapa de la caja
PE – 001 – A3	Molde dedo pulgar
PE – 002 – A3	Molde dedo índice
PE – 003 – A3	Molde dedo medio
PE – 004 – A3	Molde dedo anular
PE – 005 – A3	Molde dedo meñique
PE – 006 – A2	Caja contenedora
PN – 001 – A3	Guante Soft Robotics

4.2. ESTIMACIÓN DE COSTOS

En esta parte, se estimarán los costos para el desarrollo e implementación del guante soft robotics. Para realizar el cálculo de gastos, se separará en partes: la primera, de piezas comerciales adquiridas; la segunda, de gastos de fabricación, en este caso el gasto de impresión 3D.

4.2.1. Costos por componentes comerciales y materiales.

Se procederá a presentar los precios de los componentes a emplear en el trabajo, estos precios son de productos presentes en el mercado nacional por lo que no abarca precios de importación; además, en el precio de cada uno, se incluye el IGV. En la Tabla 4.2, se presenta el detalle de los costos de los componentes en soles, mientras que en la Tabla 4.3, se detallan los precios de los componentes adquiridos en dólares.

Tabla 4.2. Detalles de precio y precio total de componentes en soles

COMPONENTE	CANT.	PRECIO UNITARIO (S/.)	PRECIO TOTAL (S/.)
Arduino Mega	1	90.00	90.00
MiCompresor	5	199.90	999.50
Shield TFT LCD	1	110.00	110.00
Fuente de poder	1	28.00	28.00
Sensor de fuerza	5	35.00	140.00
Flex sensor	5	47.00	235.00
Válvula solenoide	10	20.00	200.00
Jumpers	2 pack	6.00	12.00
Resistencia	20	0.10	2.00
Cables	8 m	0.40	3.20
TOTAL			1819.70

Tabla 4.3. Detalles de precio y precio total de componentes en dólares

COMPONENTE	CANT.	PRECIO UNITARIO (\$)	PRECIO TOTAL (\$)
Manguera	5 m	1.51	7.55
Conector Hembra	15	2.70	40.5
Conector TEE	5	1.56	7.8
TOTAL			55.85

Considerando una tasa de cambio para el dólar de S/.4.00, el total de los componentes sería de S/.223.40. Esto, sumado a lo detallado en la Tabla 4.2, da un subtotal de S/.2043.10. En la Tabla 4.4, se presenta una estimación del precio de los materiales a emplear para la fabricación de los moldes y de los actuadores.

Tabla 4.4. Costos de los materiales a emplear para la fabricación de piezas

MATERIAL	CANT.	PRECIO UNITARIO (S/.)	PRECIO TOTAL (S/.)
Silicona A-20	1 kg	80.00	80.00
TOTAL			80.00

4.2.2. Costos por fabricación.

Como se menciona en el capítulo anterior, se emplearán moldes para la fabricación de los actuadores, estos moldes se obtendrán por medio de impresión 3D. Entonces, se debe estimar el costo de la impresión de cada una de las 11 piezas que se necesitan para tener listo el actuador. Enviando a cotizar, con la empresa MasterCrafter, se tiene que el precio por la impresión de los moldes, es de S/. 70.00, como se muestra en la Figura 4.1.

Cotización	
Cliente:	Anders Lopez Junchaya
Material	PLA
Parámetros:	Layer 0.25mm, Bottom x3, Top x4, Perim x3
Totización Total:	S/. 70.




Figura 4.1. Cotización de los moldes del actuador

En la Tabla 4.5, se muestran los detalles generales de los costos, y su valor total, sumando esos valores, se obtiene el costo total del proyecto. El valor total del proyecto es de S/. 2193.10.

Tabla 4.5. Costo total del proyecto

DETALLE	COSTO (S/.)
Componentes comerciales soles	1819.70
Componentes comerciales dólares	223.40
Materiales	80.00
Fabricación	70.00
Subtotal	2193.10
Imprevistos (10%)	219.30
Total	2412.40

También, se está considerando el costo por diseño del prototipo, este se calcula considerando el precio por hora de diseño equivalente a S/. 50.00, se considera que se ha diseñado el prototipo en 30 horas. Por esto, el costo por diseño vendría a ser un total de S/. 1500.00.

CAPÍTULO 5

5. EXPERIMENTACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS DEL GUANTE DE REHABILITACIÓN

En el presente capítulo se presentarán los resultados de experimentación de materiales para el actuador, así como las pruebas del guante de rehabilitación.

5.1. EXPERIMENTACIÓN DE MATERIALES

Los materiales a emplear en esta parte son los siguientes:

- TPU flexible dureza 95-A en escala Shore
- Silicona de dureza 20-A en escala Shore

La diferencia de dureza entre estos materiales se puede ver en la Figura 5.1.

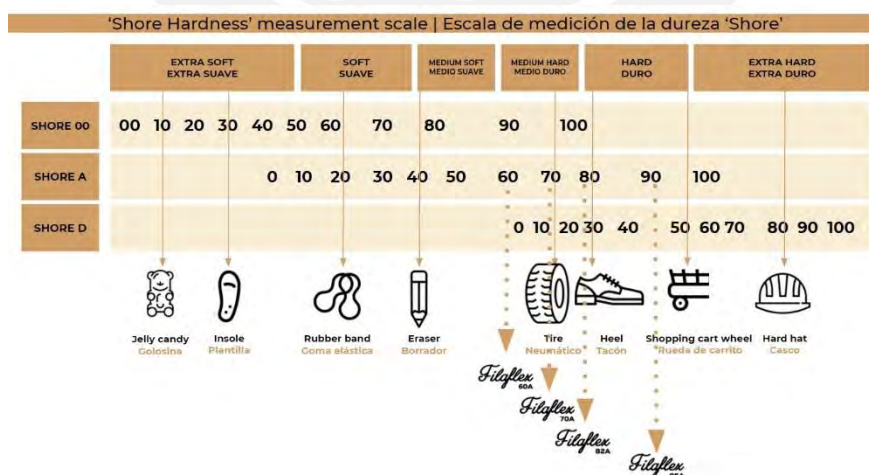


Figura 5.1. Escala de dureza Shore

Se tienen ambos materiales de diferente dureza y nivel de flexibilidad, entonces se tiene que seleccionar la forma de fabricación de piezas por cada material. Para el TPU, se creará la pieza mediante impresión 3D; y para la silicona, se creará un molde mediante impresión 3D en PLA para luego crear la pieza con silicona líquida hasta que esta solidifique en el molde.

Se diseñó un modelo de actuador basado en uno realizado por Cappello y otros (2018) como se muestra en la Figura 5.2. Este actuador, tiene forma cilíndrica con especie de anillos a lo largo, con el fin de que, al ser sometidos al aire comprimido, este se curva de forma circular, generando así el movimiento de flexión en los dedos.

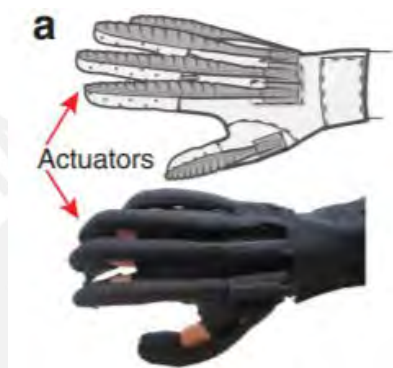


Figura 5.2. Actuador Soft Robotics (Cappello, y otros, 2018)

- **TPU:**

Se obtuvo un modelo como el que se presenta en la Figura 5.3.

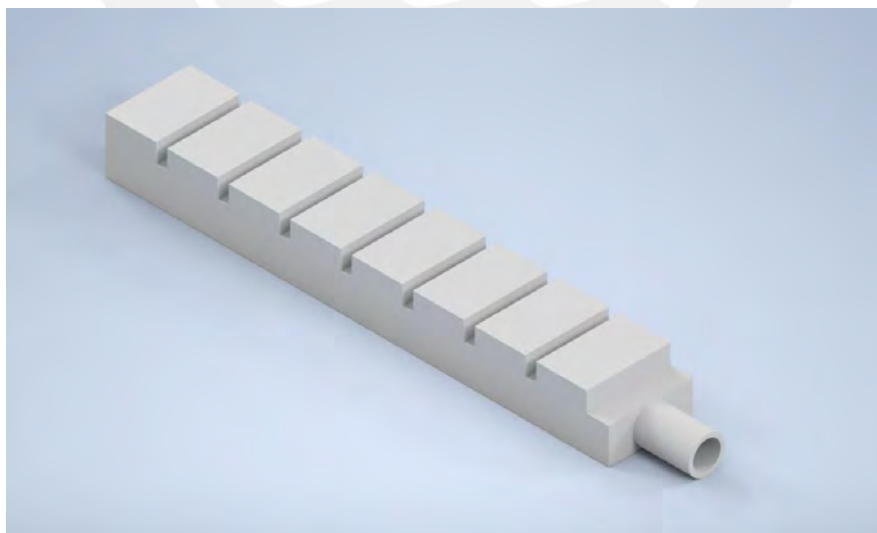


Figura 5.3. Modelado del actuador PneuNet

Luego, se procedió a la impresión 3D, para esto se emplearon los siguientes parámetros de impresión:

- Velocidad de impresión: 20 mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 200 mm/s
- Flujo de impresión: 102%
- Relleno: 20%
- Velocidad de retracción: 20 mm/s
- Temperatura de impresión: 210°C

Una vez terminada la impresión, se obtuvo el prototipo del actuador físico, tal y como se aprecia en la Figura 5.4. Sin embargo, al momento de probar el actuador, se presentaron dos problemas: primero, el material era muy duro para generar el movimiento deseado, por lo que se tenía que aumentar la presión; segundo, al aumentar la presión, esta causaba que se abrieran pequeños agujeros entre capa y capa de impresión, por lo que se filtraba el aire al exterior y se iba perdiendo presión dentro del actuador. En conclusión, este material no es favorable para ser trabajado en este proyecto.



Figura 5.4. Actuador impreso en TPU

- **Silicona:**

Al igual que con el TPU, el prototipo del actuador se basó en el propuesto por Cappello y otros (2018), pero a diferencia del material anterior, lo que se diseñó fue el molde para crear el actuador mediante silicona líquida que al solidificarse generaría la pieza deseada. Entonces, se generó el molde para un dedo como se ve en la Figura 5.5, en esta figura se puede ver el molde ya completo y cerrado.



Figura 5.5. Molde del actuador

Luego se procedió a imprimir el molde en PLA, usando los siguientes parámetros de impresión:

- Velocidad de impresión: 50 mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 150 mm/s
- Flujo de impresión: 95%
- Relleno: 20%
- Velocidad de retracción: 50 mm/s
- Temperatura de impresión: 205°C

Con esto se obtuvo el molde físico y se pasó a verter la silicona líquida en él y después de dejar secar y pegar con la base, se obtuvo el prototipo del actuador mostrado en la Figura 5.6. Después de realizar las pruebas, el actuador realiza el movimiento deseado, y no hay fuga de aire por ningún lado de este, la presión dentro del actuador se mantiene constante. Por lo que se procederá a trabajar con este material.

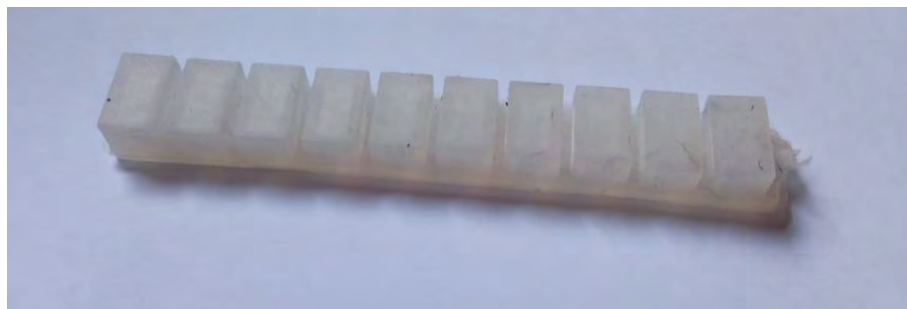


Figura 5.6. Actuador obtenido a partir del molde preliminar

5.2. IMPLEMENTACIÓN DEL GUANTE DE REHABILITACIÓN

Una vez que se tienen todos los componentes que se seleccionó anteriormente, se procede a la implementación del prototipo. Se debe realizar la conexión neumática y electrónica entre las partes.

En la Figura 5.7, se presenta la válvula solenoide con los conectores rectos hembras para la conexión con las mangueras. En la Figura 5.8, se puede ver la conexión del compresor con la válvula y esta, se conecta con la unión TEE que conecta con la válvula para la salida de aire y la manguera que va al actuador en el guante.



Figura 5.7. Conexión de válvula solenoide

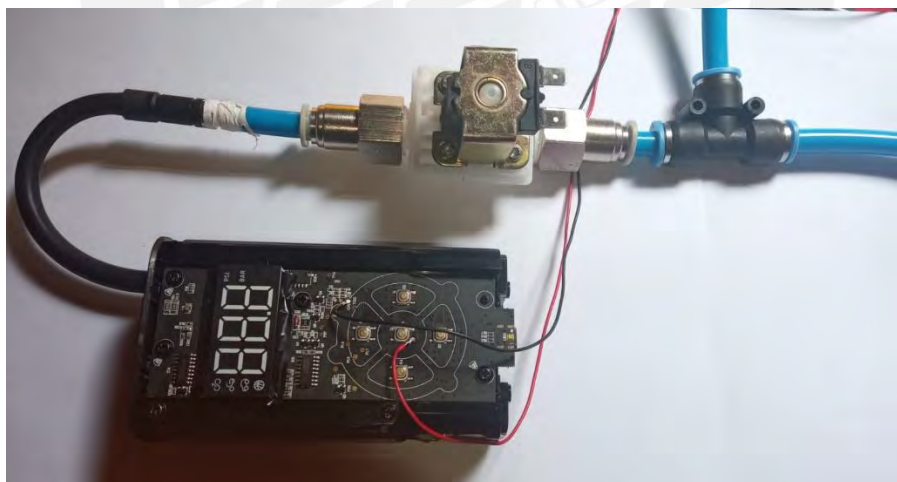


Figura 5.8. Conexión entre componentes neumáticos para un dedo

Con las conexiones realizadas, se procede a implementar el guante, en la Figura 5.9, se aprecia el ensamble del guante, la posición de los sensores de fuerza y de un actuador. En la Figura 5.10, se muestra la posición de los sensores flex. En la Figura 5.11, se aprecia una capa de tela cubriendo los actuadores para evita su desplazamiento y los actuadores encima de ellos. En la Figura 5.12, se muestra el prototipo del guante completamente implementado. Al usarlo, se

puede notar cierta rigidez y un poco de dificultad al mover el brazo a otra posición debido a las mangueras de poliuretano.



Figura 5.9. Vista superior del guante con los sensores de fuerza y un actuador



Figura 5.10. Vista inferior del guante, con los sensores flex



Figura 5.11. Capa de tela sobre los sensores y lugar de los actuadores en el guante



Figura 5.12. Prototipo del guante de rehabilitación completo

5.3. PRUEBAS CON EL GUANTE

Se realizaron pruebas con un actuador y un compresor para determinar la curva estática del actuador. Esto se hizo con la finalidad de realizar la identificación de sistemas y, a través de ese procedimiento, obtener la función de transferencia del actuador; una vez determinada la función, se diseñó un controlador PID para el prototipo. Se tomó una serie de datos para obtener los ángulos a los que se mueve el dedo a partir de la presión generada por el aire comprimido, se realizó la medición de los ángulos con un periodo de muestreo iguala $T = 0.2$ s, lo que

vendría a ser una frecuencia de muestreo $f = 5$ Hz, se consideró un sistema continuo debido a que el muestreo debe realizarse de forma continua por si el ángulo sobrepasa por mucho al deseado, el sistema debe detenerse para evitar lesionar al usuario. Con los datos obtenidos, se grafica la curva estática utilizando el ángulo en el que se estabiliza el dedo, como se muestra en la Figura 5.13, la curva estática es casi lineal por lo que, para efectos del presente trabajo, se aproximará a un sistema lineal.

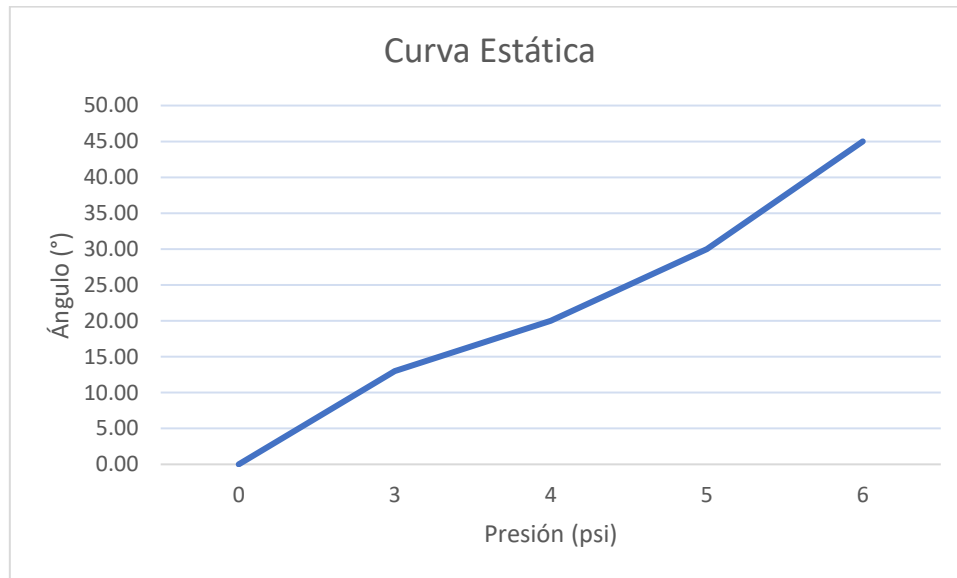


Figura 5.13. Curva estática del actuador

Con los datos obtenidos, se procedió a emplear el add-on System Identification del programa MATLAB, con este se procedió a determinar la función de transferencia de la planta. Primero, se importan los datos; luego, se remueven los offsets de los datos y se dividen en dos partes, una para el proceso y la otra para la validación; finalmente, se estiman los modelos lineales, en este caso, se emplea la opción “Función de transferencia”. Es así como se obtuvo la siguiente función de transferencia del actuador:

$$G(s) = \frac{8.306 * s + 4.628}{s^2 + 2.03 * s + 0.9953}$$

Con esta función, se procederá a elaborar un sistema de control PID. Se tendría que obtener un sistema de lazo cerrado como el mostrado en la Figura 5.14.

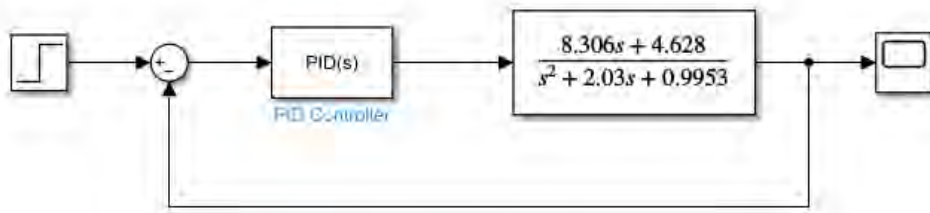


Figura 5.14. Sistema de control

Usando la aplicación de MATLAB, pidTuner, se definió un tiempo de estabilización de aproximadamente 4 segundos y un sobre impulso menor al 20%, y un error aceptable de un 2%. En la Figura 5.15 se muestra la respuesta al escalón de la planta, y en la Figura 5.16, se muestra la respuesta al escalón de la planta implementando el controlador, ambas simulaciones mostradas en las figuras se realizaron con un escalón de amplitud 1.

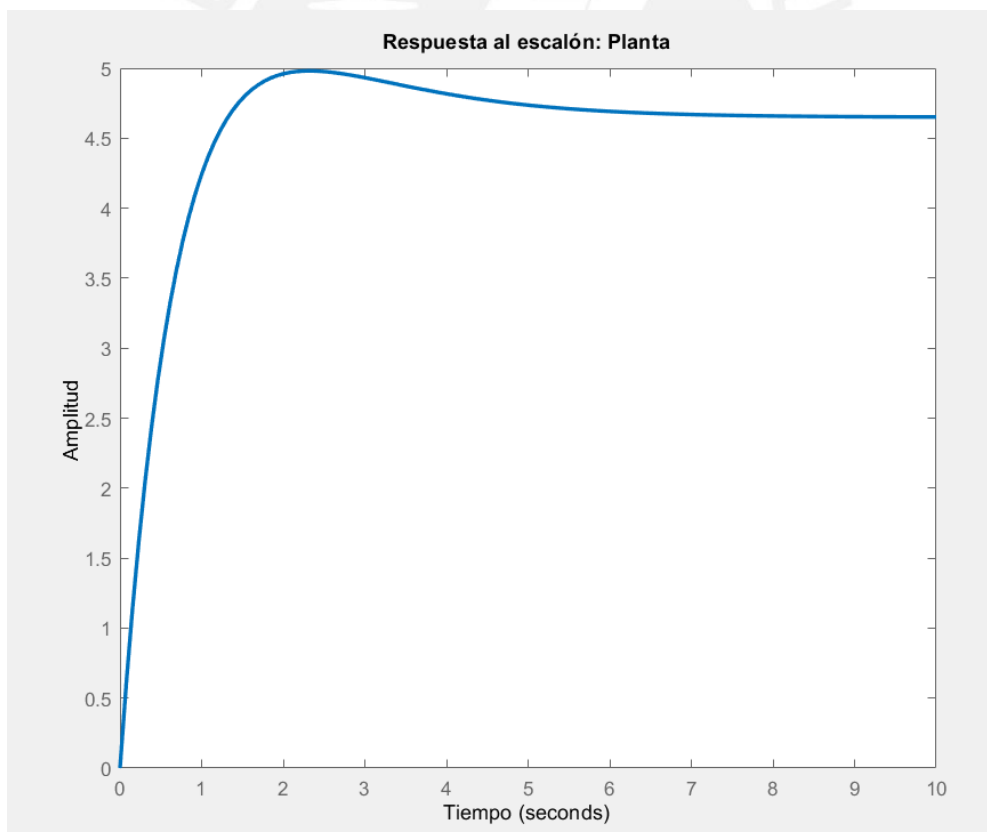


Figura 5.15. Respuesta al escalón de la planta

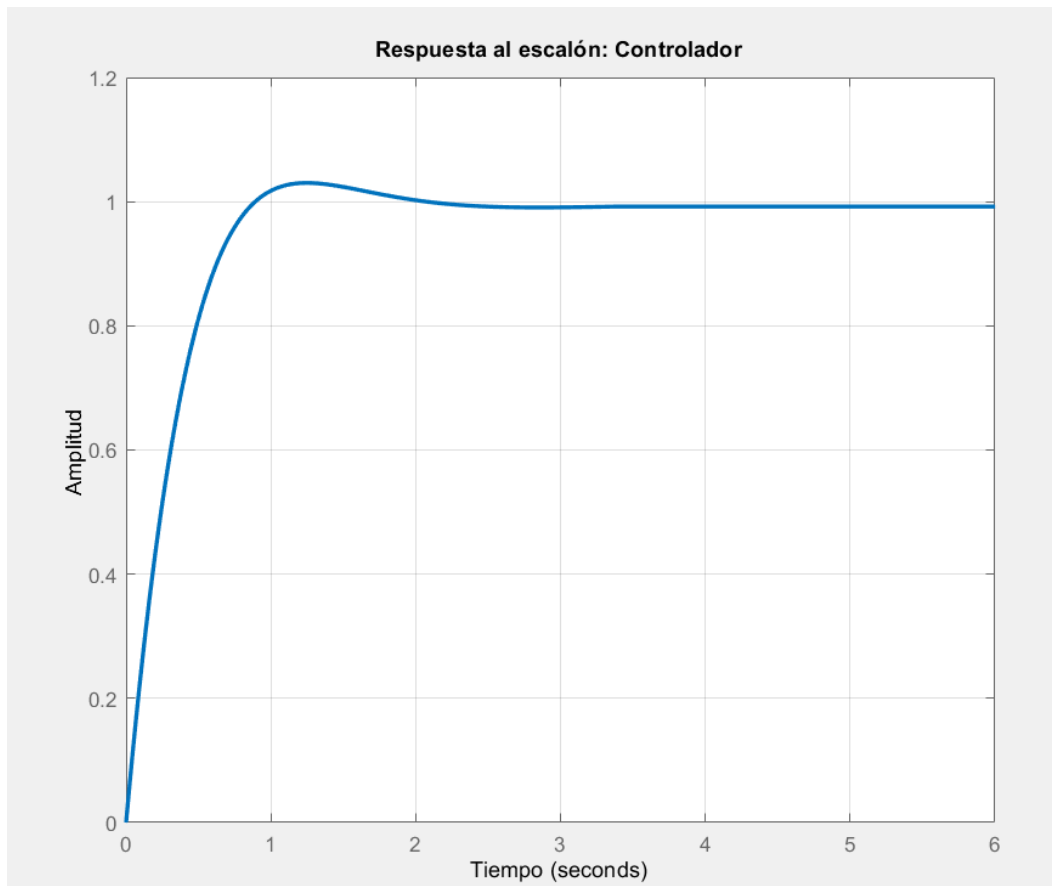


Figura 5.16. Respuesta al escalón de la planta controlada

Como la respuesta al escalón de la planta controlada, va de acuerdo a lo que se esperaba, se empleará el controlador obtenido, para ello, las constantes son:

$$K_p = 0.309$$

$$K_i = 0.7353$$

$$K_d = 0$$

Mediante las constantes obtenidas, se puede confirmar que un controlador PID no será necesario para el sistema, sino que uno PI bastará para obtener la respuesta deseada. Como forma de verificación, se realizó la simulación en Simulink del sistema realimentado, la respuesta obtenida se muestra en la Figura 5.17, esta simulación se realizó con un escalón de amplitud 6 y como se ve, tiene un sobre impulso de 16% y un tiempo de estabilización de aproximadamente 4 segundos.

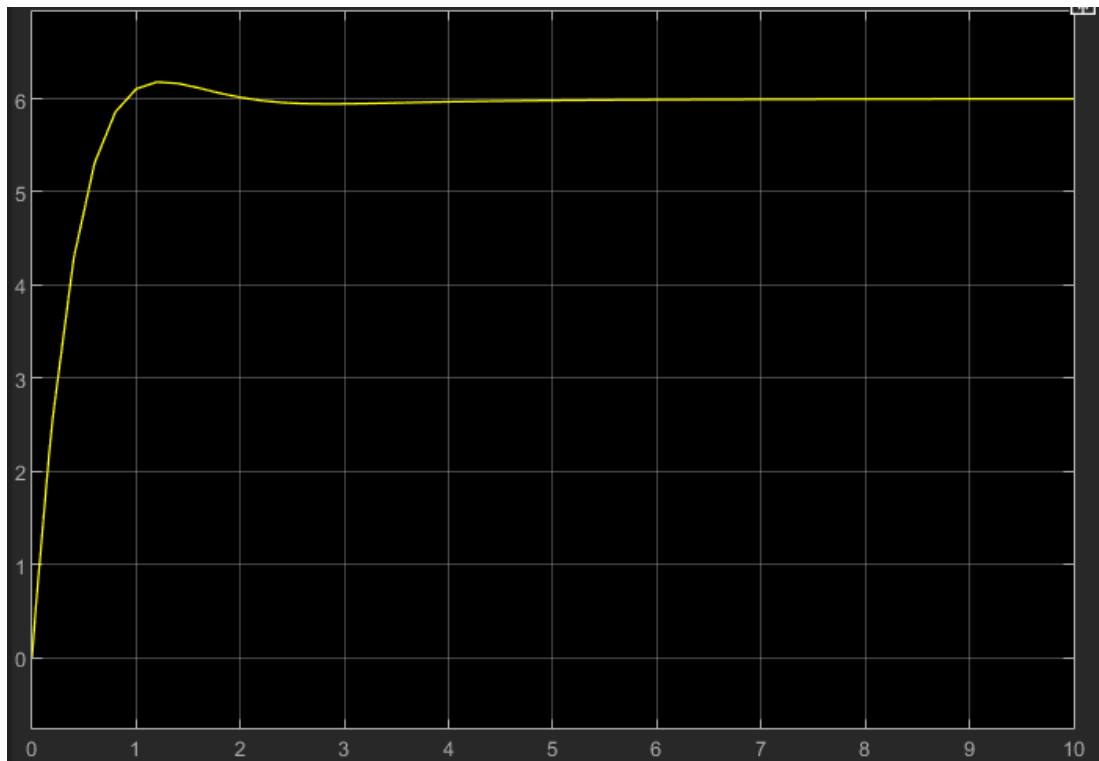


Figura 5.17. Simulación del sistema realimentado

Posteriormente, se realizó la implementación de los ejercicios y el controlador en el Arduino Mega, y se probó para verificar los resultados. En la Figura 5.18, se muestra la gráfica del ángulo medido y el setpoint (ángulo deseado) para dicho ejercicio.

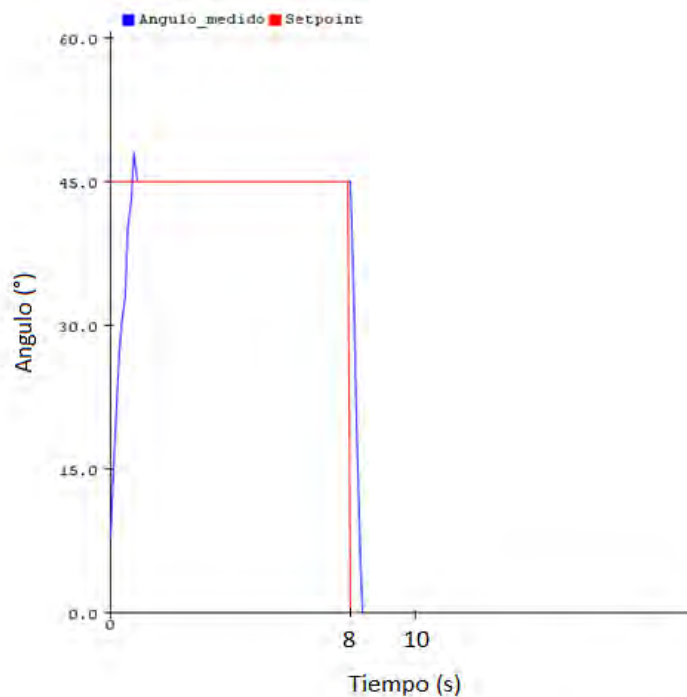


Figura 5.18. Gráfica obtenida del ángulo medido y el ángulo deseado

Como se puede observar en la gráfica, en la respuesta del actuador ante el escalón, hay un pequeño sobreimpulso que también se había visto en las simulaciones, luego se estabiliza en $\beta = 45^\circ$, que es el ángulo al que el dedo debía llegar. Después, el ángulo debería ser 0, pues el aire se deja salir del actuador, pero demora en salir, por lo que hay un pequeño periodo de tiempo donde el ángulo medido va descendiendo poco a poco hasta llegar a 0° .



OBSERVACIONES

- Se podrían implementar más ejercicios en la programación, debido a que el movimiento de cada dedo es independiente.
- En caso se quiera hacer un movimiento más complejo en los dedos, o un movimiento conjunto entre estos, se podría modificar el diseño del actuador para obtener el movimiento deseado, e implementar un control no lineal.
- Se podría emplear mangueras de menor diámetro y de menor grosor, con el fin de facilitar el movimiento del brazo para moverlo a una posición más cómoda y que la manguera no impida debido a la rigidez que tiene.
- Para un modelo definitivo, se debería usar un conector en la muñeca, ya sea de tipo HDMI (por la cantidad de señales analógicas y el voltaje de alimentación, que darían un total de 12 pines) o un conector flat, con la finalidad de evitar un enredo entre los cables y facilitar el montaje o desmontaje de los sensores.
- Para implementar un controlador basado en la fuerza, se podrían usar sensores de fuerza de hasta 10kgf, para así dar posibilidad de implementar ejercicios más avanzados y que incluyan mayor presión en los dedos.
- Para realizar la implementación de ejercicios mencionados en el punto anterior, se debe aumentar el espesor del actuador.

CONCLUSIONES

- El prototipo del guante presentado en este proyecto trabaja con movimientos independientes de los dedos de la mano con la finalidad de realizar ejercicios que promuevan la recuperación y rehabilitación de los músculos de la mano
- Se diseñó el actuador basado en tecnología soft robotics para cumplir la función de generar el movimiento de los dedos, basándose en investigaciones previas y adaptándolas al movimiento que se quería realizar.
- Se diseñaron e implementaron los subsistemas necesarios para el accionamiento del prototipo: el subsistema neumático, electrónico, y de control. Al unir estos subsistemas, se probó que el prototipo cumplía con lo requerido y con los objetivos planteados.
- No se implementó una variación de la intensidad de los ejercicios (haciendo referencia a la fuerza ejercida por los actuadores sobre los dedos), debido a que se está trabajando con valores de presión bajos y los mínimos necesarios para generar el movimiento de flexión de los dedos.
- La metodología que se siguió, permitió llegar a el diseño conceptual de un sistema compuesto por elementos que interactúan entre ellos de manera que puedan realizar ejercicios de rehabilitación para la mano con movimientos diferentes en cada dedo, de ser necesario para el ejercicio. Con esto se cumple el objetivo principal del presente trabajo.
- Con respecto a los alcances, se puede concluir que también se cumplieron, el sistema no está diseñado para realizar movimientos de muñeca como se restringió al inicio del documento.
- Dados los resultados obtenidos experimentalmente, se puede concluir que el dispositivo podría ser empleado en el proceso de rehabilitación para manos. El sistema está planteado de manera que pueda ser usado por cualquier persona sin necesidad de ser experta en el tema de rehabilitación e incluso por personas que difícilmente puedan mover los dedos, ya para que realizar los ejercicios sin emplear el dispositivo, se necesitaría la ayuda de otra persona. Y usando el dispositivo, solo bastaría con colocárselo en la mano e iniciar los ejercicios.

BIBLIOGRAFÍA

- Aquino, J. (2014). *MODELADO NUMERICO DEL COMPORTAMIENTO MECANICO*. Morelos: INSTITUTO TECNOLOGICO DE TUXTLA GUTIERREZ. Recuperado el 24 de abril de 2021, de http://repositoriodigital.tuxtla.tecnm.mx/xmlui/bitstream/handle/123456789/1795/MD_RPIM2014057.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Arduino Store. (s.f.). Recuperado el 15 de Mayo de 2021, de <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>
- Binvignat, O., Almagià, A., Lizana, P., & Olave, E. (2012). Aspectos Biométricos de la Mano de Individuos Chilenos. *Int. J. Morphol.*, 599-606. Recuperado el 08 de Junio de 2021, de <https://www.scielo.cl/pdf/ijmorphol/v30n2/art40.pdf>
- Cantero, R. (2020). *Terapia de mano basada en el razonamiento y la práctica clínica*. Andalucía: Universidad Internacional de Andalucía. Recuperado el 24 de abril de 2021, de https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&act=8&ved=2ahUKEwiS1OWpxpfwAhWgq5UCHSZiCHYQFjAAegQIAxAD&url=https%3A%2F%2Fdspace.unia.es%2Fbitstream%2Fhandle%2F10334%2F5442%2FTerapiaDeMano-ebook_978-84-7993-361-6.pdf&usg=AOvVaw2jiV
- Cappello, L., Meyer, J., Galloway, K., Peisner, J., Granberry, R., Wagner, D., . . . Walsh, C. (2018). Assisting hand function after spinal cord injury with a fabric-based soft robotic glove. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 15(59), 1-11. doi:10.1186/s12984-018-0391-x
- Chavarría, G. (s.f.). Anatomía de mano. México. Recuperado el 24 de Abril de 2021, de <http://medicos.cr/web/documentos/EMC%202015/charlasplastica/Anatomía%20y%20cirugía%20de%20mano.pdf>
- De Negri, V., Muñoz, K., & Vigolo, V. (2021). *Design Methodology for Mechatronic Systems: An Approach Using Function/Means Tree and Channel/Agency Net*. Florianopolis: Federal University of Santa Catarina. Recuperado el 12 de Mayo de 2021, de <http://laship.ufsc.br/site/wp-content/uploads/2021/05/Mechatronic-design-methodology-Digital-Ebook.pdf>
- Electronica Completa*. (s.f.). Recuperado el 15 de Mayo de 2021, de <https://electroniacompleta.com/fuentes-conmutadas/>
- Ferrer, V. (s.f.). *Vicent Ferrer*. Recuperado el 15 de Mayo de 2021, de <https://vicentferrer.com/pilas-recargables/>
- Gómez, M., & Gómez, E. (2020). Abordaje de las fracturas de escafoides. En R. Cantero, *Terapia de mano basada en el razonamiento y en la práctica clínica* (págs. 135-145). Andalucía: Universidad Internacional de Andalucía. Recuperado el 24 de abril de 2021, de https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&act=8&ved=2ahUKEwiS1OWpxpfwAhWgq5UCHSZiCHYQFjAAegQIAxAD&url=https%3A%2F%2Fdspace.unia.es%2Fbitstream%2Fhandle%2F10334%2F5442%2FTerapiaDeMano-ebook_978-84-7993-361-6.pdf&usg=AOvVaw2jiV
- Hasegawa, Y., Mikami, Y., Watanabe, K., & Sankai, Y. (19-23 de Mayo de 2008). Five-Fingered Assistive Hand with Mechanical Compliance of Human Finger. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 718-724. Recuperado el 06 de

- mayo de 2021, de <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4543290>
- HBM. (s.f.). Recuperado el 15 de Mayo de 2021, de <https://www.hbm.com/es/7646/que-es-un-sensor-de-presion/>
- Ibarra, I. (2021). *TIPOS DE COMPRESORES*. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CADEREYTA, NUEVO LEÓN. Recuperado el 15 de Mayo de 2021, de <https://www.coursehero.com/file/108798653/Act6-ILIM-SAdocx/>
- Instituto Nacional de Rehabilitación. (2017). *Indicadores Hospitalarios*. Lima. Recuperado el 18 de abril de 2021, de https://www.inr.gob.pe/transparencia/Estadistica/información%20estadística/2017/hospitalarios/Ind_Hosp-17.pdf
- Instituto Nacional de Rehabilitación. (s.f.). Calificación de la discapacidad, según la Clasificación Internacional de Deficiencia, Discapacidades y Minusvalías –CIDDM: Limitaciones (Discapacidades). Lima, Peru. Recuperado el 18 de abril de 2020, de https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj8xYK_1ZHwAhW5qJUCHdErB9IQFjADegQIDRAD&url=http%3A%2F%2Fwww.inr.gob.pe%2Ftransparencia%2Fprevencion%2Fcontenido%2F2016%2F4%2520ponencias%2F2016%2Fnorma_tecnica_de_sal
- Kadowaki, Y., Noritsugu, T., Takaiwa, M., Sasaki, D., & Kato, M. (2011). *Development of Soft Power-Assist Glove and Control Based on Human Intent*. Okayama: Okayama University. Recuperado el 06 de mayo de 2021, de https://www.fujipress.jp/main/wp-content/themes/Fujipress/pdf_subscribed.php
- Koiva, R., Hilsenbeck, B., & Castellini, C. (2012). FFLS: An accurate linear device for measuring synergistic finger contractions. *2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (págs. 531-534). San Diego: IEEE. doi:10.1109/EMBC.2012.6345985
- López, A. (2013). Muñeca y mano. Recuperado el 24 de abril de 2021, de <http://www.delgadotrauma.com/wp-content/uploads/2015/03/Ejercicios-muñeca-mano.pdf>
- Mecatronica Uno*. (s.f.). Recuperado el 15 de Mayo de 2021, de <https://mecatronicauno.com/comprar/asus-tinker-board-1-8-ghz-2gb-ram/>
- Medina, J., & Vélez, P. (2014). "Soft Robotics": Una nueva generación de robots. *I+D+ingeniería*, 109-118. Recuperado el 09 de Abril de 2021, de https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/21391/1/IEE_11_Medina%20%26%20Vélez.pdf
- Mosquera, W., Benavides, P., Ojeda, D., & Ortiz, D. (2018). Implementación de un sistema de control para rehabilitador pasivo de dedos de la mano. *INGENIERÍA UC*, 25(1). Recuperado el 24 de abril de 2021, de <https://www.redalyc.org/jatsRepo/707/70757668009/html/index.html>
- MUNDO HVACR*. (Setiembre de 2007). Obtenido de <https://www.mundohvacr.com.mx/2007/09/reguladores-de-presion/>
- Muñoz, L., De La Vega, E., Lopez, F., Ortiz, B., & Lucero, K. (2009). FUERZA MÁXIMA DE AGARRE CON MANO DOMINANTE Y NO. *XV CONGRESO INTERNACIONAL DE ERGONOMÍA SEMAC*. Recuperado el 24 de abril de 2021, de <http://www.semec.org.mx/archivos/congreso11/BIOM01.pdf>
- Nvidia Developer*. (s.f.). Recuperado el 15 de Mayo de 2021, de <https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-nano-developer-kit>
- Organización Mundial de la Salud*. (26 de Junio de 2020). Recuperado el 07 de Abril de 2021, de Organización Mundial de la Salud: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/rehabilitation>

- Peña, E. (2020). *GUANTE CON SENSORES FLEX*. Querétaro. Recuperado el 15 de Mayo de 2021, de <https://www.coursehero.com/file/69298334/ERIKA-THALIA-PEÑA-MIRANDA-REPORTEpdf/>
- Pineda, J. (2018). *El abandono de la rehabilitación física*. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana. Recuperado el 09 de Abril de 2021, de http://evaluacion.azc.uam.mx/assets/abandono_rehabilitacion_fisica.pdf
- REMOTEMEDIA. (s.f.). Recuperado el 15 de Mayo de 2021, de <https://remotemedia.cl/venta-e-instalacion-de-pantallas-led/>
- Reymundo, A. (2016). *DISEÑO, FABRICACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO ROBÓTICO BASADO EN ACTUADORES BLANDOS PARA REHABILITACIÓN DE LA MANO*. Lima: UTEC. Recuperado el 06 de mayo de 2021, de <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjLm4Cnr77wAhXNE7kGHb5FB-gQFjACegQIEBAD&url=https%3A%2F%2Fwww.conadisperu.gob.pe%2Fobservatorio%2Fwp-content%2Fuploads%2F2020%2F11%2FDiseno-fabricacion-e-implementacio>
- Rocha, E., Lara, J., & Gómez, P. (2012). Morfología de manos y pies. En *Estetica de manos y pies* (Primera ed., págs. 7-28). McGraw Hill. Recuperado el 24 de Abril de 2021, de <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448180747.pdf>
- Rodriguez, E. (18 de Setiembre de 2018). *Xataka*. Recuperado el 15 de Mayo de 2021, de <https://www.xataka.com/makers/cero-maker-todo-necesario-para-empezar-raspberry-pi>
- Rodríguez, S. (2020). La mano en enfermedades neurodegenerativas. En R. Cantero, *Terapia de mano basada en el razonamiento y la práctica clínica* (págs. 253-262). Andalucía: Universidad Internacional de Andalucía. Recuperado el 24 de abril de 2021, de https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiS1OWpxpfwAhWgq5UCHSZiCHYQFjAAegQIAxAD&url=https%3A%2F%2Fdspace.unia.es%2Fbitstream%2Fhandle%2F10334%2F5442%2FTerapiaDeMano-ebook_978-84-7993-361-6.pdf&usg=AOvVaw2jiV
- ROME CO INDUSTRIAL. (25 de Abril de 2018). Recuperado el 15 de Mayo de 2021, de <https://www.romecoindustrial.com/2018/04/25/manguera-neumatica-tubing-neumatico/>
- Secretaría de la salud. (2017). *26 POR CIENTO DE ACCIDENTES LABORALES, SON EN MUÑECAS Y MANOS: ARMANDO AHUED*. Ciudad de México. Recuperado el 09 de Abril de 2021, de <https://www.salud.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/26-por-ciento-de-accidentes-laborales-son-en-munecas-y-manos-armando-ahued>
- Sensing sensores de medida*. (s.f.). Recuperado el 15 de mayo de 2021, de <https://sensores-de-medida.es/medicion/sensores-y-transductores/sensores-de-angulo-y-rotacion/sensores-de-angulo-inductivos-rvdt/>
- TME Electronic Components. (09 de Octubre de 2020). Recuperado el 15 de Mayo de 2021, de <https://www.tme.eu/es/news/library-articles/page/22568/Como-funciona-y-que-hace-el-acelerometro/>
- VIRTUALEXPO GROUP. (s.f.). *MEDICAL EXPO*. Recuperado el 24 de abril de 2021, de <https://pdf.medicaexpo.es/pdf/idrogenet-74722.html>

ANEXO A

En este anexo se muestra el árbol de descomposición de funciones en la Figura A.1.

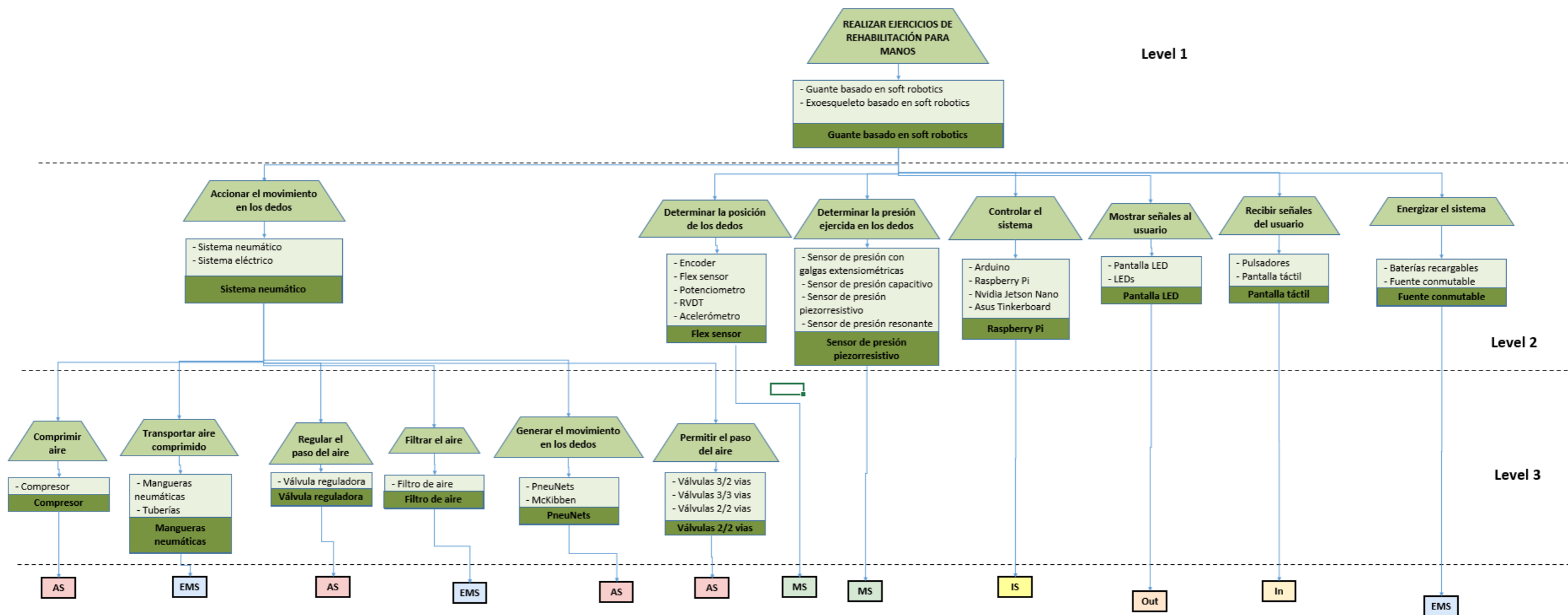


Figura A.0.1. Functions and means tree

En la tabla A.1, se presenta la comparación entre medios del segundo nivel. Se debe considerar as soluciones mostradas en la figura A.2.

	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4	Solution 5	Solution 6	Solution 7	Solution 8
	Sistema electrónico	Sistema electrónico	Sistema electrónico	Sistema electrónico	Sistema neumático	Sistema neumático	Sistema neumático	Sistema neumático
	Potenciómetro	Potenciómetro	Flex sensor	Flex sensor	Potenciómetro	Potenciómetro	Flex sensor	Flex sensor
	Sensor de presión capacitivo	Sensor de presión piezorresistivo	Sensor de presión capacitivo	Sensor de presión piezorresistivo	Sensor de presión capacitivo	Sensor de presión piezorresistivo	Sensor de presión capacitivo	Sensor de presión piezorresistivo
Posible soluciones								
	Raspberry Pi	Raspberry Pi	Raspberry Pi	Raspberry Pi	Raspberry Pi	Raspberry Pi	Raspberry Pi	Raspberry Pi
	Pantalla LED	Pantalla LED	Pantalla LED	Pantalla LED	Pantalla LED	Pantalla LED	Pantalla LED	Pantalla LED
	Pantalla táctil	Pantalla táctil	Pantalla táctil	Pantalla táctil	Pantalla táctil	Pantalla táctil	Pantalla táctil	Pantalla táctil
Fuente conmutable	Fuente conmutable	Fuente conmutable	Fuente conmutable	Fuente conmutable	Fuente conmutable	Fuente conmutable	Fuente conmutable	

Figura A.0.2. Posibles soluciones analizadas para el nivel dos

Tabla A.0.1. Comparación de soluciones del segundo nivel

Evaluation Chart																				
Design Criteria	j=	1		2		3		4		5		6		7		8		o		
		Solution 1		Solution 2		Solution 3		Solution 4		Solution 5		Solution 6		Solution 7		Solution 8		Optimal		
		W _{r1}	W _{r1} ·W _r	W _{r2}	W _{r2} ·W _r	W _{r3}	W _{r3} ·W _r	W _{r4}	W _{r4} ·W _r	W _{r5}	W _{r5} ·W _r	W _{r6}	W _{r6} ·W _r	W _{r7}	W _{r7} ·W _r	W _{r8}	W _{r8} ·W _r	W _o	W _o ·W _r	
Technical analysis																				
ii																				
⊗	Empleo de material antideslizante	2	2	4	2	4	2	4	2	4	3	6	3	6	3	6	3	6	4	8
⊗	Limitar el costo de máquina	4	1	4	1	4	1	4	1	4	3	12	3	12	3	12	3	12	4	16
⊗	Controlar la presión	2	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	4	8
⊗	Emplear actuadores eficientes	3	3	9	3	9	3	9	3	9	1	3	1	3	1	3	3	9	4	12
o	Limitar las dimensiones del sistema	1	3	3	4	4	3	3	4	4	1	1	2	2	1	1	2	2	4	4
⊗	Emplear filtros en la entrada del sistema	3	2	6	2	6	2	6	2	6	4	12	3	9	4	12	4	12	4	12
⊗	Usar componentes que no requieran mantenimiento seguido	2	1	2	3	6	2	4	4	8	1	2	3	6	2	4	4	8	4	8
⊗	Emplear repuestos comerciales	1	2	2	4	4	2	2	3	3	2	2	3	3	2	2	4	4	4	4
⊗	Emplear materiales con modulo de esfuerzo cortante adecuado	2	2	4	2	4	2	4	2	4	3	6	3	6	3	6	3	6	4	8
⊗	Realizar una apropiada instalación de las tuberías	3	2	6	2	6	2	6	2	6	4	12	3	9	3	9	2	6	4	12
⊗	Limitar el ruido	1	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	4	4
Total technical value			T_{s1}	47	T_{s2}	54	T_{s3}	49	T_{s4}	55	T_{s5}	62	T_{s6}	62	T_{s7}	61	T_{s8}	71	T_{so}	96
Relative technical value			R_{t1}	0.49	R_{t2}	0.56	R_{t3}	0.51	R_{t4}	0.57	R_{t5}	0.65	R_{t6}	0.65	R_{t7}	0.64	R_{t8}	0.74	R_{to}	1.00
Economical analysis																				
ii																				
⊗	Empleo de material antideslizante	2	3	6	3	6	3	6	3	6	2	4	2	4	2	4	2	4	4	8
⊗	Limitar el costo de máquina	4	1	4	2	8	1	4	2	8	3	12	4	16	3	12	4	16	4	16
⊗	Emplear actuadores eficientes	3	2	6	2	6	2	6	2	6	3	9	3	9	3	9	3	9	4	12
⊗	Emplear filtros en la entrada del sistema	3	3	9	3	9	3	9	3	9	2	6	2	6	2	6	2	6	4	12
⊗	Emplear repuestos comerciales	1	2	2	4	4	1	1	3	3	2	2	4	4	1	1	3	3	4	4
⊗	Emplear actuadores de bajo consumo	2	3	6	3	6	3	6	3	6	1	2	1	2	1	2	1	2	4	8
Total economical value			T_{e1}	33	T_{e2}	39	T_{e3}	32	T_{e4}	38	T_{e5}	35	T_{e6}	41	T_{e7}	34	T_{e8}	40	T_{eo}	60
Relative economical value			R_{e1}	0.55	R_{e2}	0.65	R_{e3}	0.53	R_{e4}	0.63	R_{e5}	0.58	R_{e6}	0.68	R_{e7}	0.57	R_{e8}	0.67	R_{eo}	1.00
Hyperbolic rating			H_{r1}	0.52	H_{r2}	0.60	H_{r3}	0.52	H_{r4}	0.60	H_{r5}	0.61	H_{r6}	0.66	H_{r7}	0.60	H_{r8}	0.70	H_{ro}	1.00

En la figura A.3, se muestran las soluciones posibles para el nivel tres del árbol de descomposición de funciones. En la tabla A.2, se muestra la comparación de las soluciones.

	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4	Solution 5	Solution 6	Solution 7	Solution 8	Solution 9	Solution 10	Solution 11	Solution 12
Possible solutions												
	Compresor	Compresor	Compresor	Compresor	Compresor	Compresor	Compresor	Compresor	Compresor	Compresor	Compresor	Compresor
												
	Mangueras neumáticas	Mangueras neumáticas	Mangueras neumáticas	Mangueras neumáticas	Mangueras neumáticas	Mangueras neumáticas	Tuberías neumáticas	Tuberías neumáticas	Tuberías neumáticas	Tuberías neumáticas	Tuberías neumáticas	Tuberías neumáticas
												
	Válvula reguladora de presión	Válvula reguladora de presión	Válvula reguladora de presión	Válvula reguladora de presión	Válvula reguladora de presión	Válvula reguladora de presión	Válvula reguladora de presión	Válvula reguladora de presión	Válvula reguladora de presión	Válvula reguladora de presión	Válvula reguladora de presión	Válvula reguladora de presión
												
Filtro de aire	Filtro de aire	Filtro de aire	Filtro de aire	Filtro de aire	Filtro de aire	Filtro de aire	Filtro de aire	Filtro de aire	Filtro de aire	Filtro de aire	Filtro de aire	
												
PneuNets	PneuNets	PneuNets	McKibben	McKibben	McKibben	McKibben	PneuNets	PneuNets	PneuNets	McKibben	McKibben	
												
Válvulas 3/2 vias	Válvulas 3/3 vias	Válvulas 2/2 vias	Válvulas 3/2 vias	Válvulas 3/3 vias	Válvulas 2/2 vias	Válvulas 3/2 vias	Válvulas 3/3 vias	Válvulas 2/2 vias	Válvulas 3/2 vias	Válvulas 3/3 vias	Válvulas 2/2 vias	

Figura A.0.3. Posibles soluciones para el nivel tres del árbol de funciones

Tabla A. 0.2. Comparación de soluciones del nivel tres del árbol de funciones

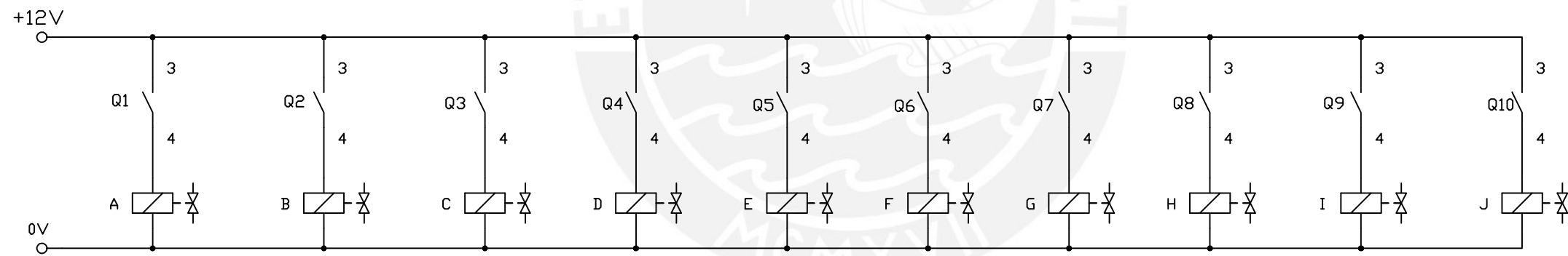
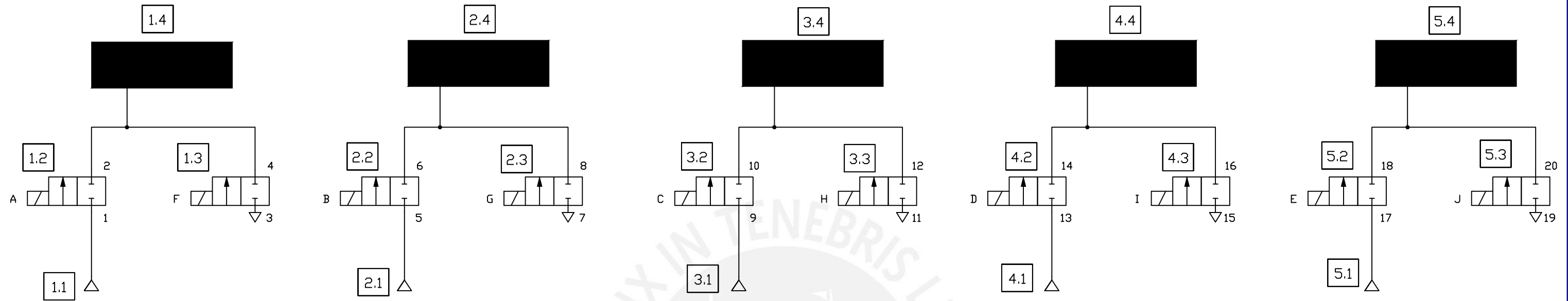
Design Criteria		Evaluation Chart																											
		1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		o			
		Solution 1		Solution 2		Solution 3		Solution 4		Solution 5		Solution 6		Solution 7		Solution 8		Solution 9		Solution 10		Solution 11		Solution 12		Optimal			
W _r		W _{1,1}	W _{1,1} W _r	W _{2,2}	W _{2,2} W _r	W _{3,3}	W _{3,3} W _r	W _{4,4}	W _{4,4} W _r	W _{5,5}	W _{5,5} W _r	W _{6,6}	W _{6,6} W _r	W _{7,7}	W _{7,7} W _r	W _{8,8}	W _{8,8} W _r	W _{9,9}	W _{9,9} W _r	W _{10,10}	W _{10,10} W _r	W _{11,11}	W _{11,11} W _r	W _{12,12}	W _{12,12} W _r	W _o	W _o W _r		
		Technical analysis																											
ii	Empleo de material antideslizante	2	3	6	3	6	3	6	2	4	2	4	2	4	3	6	3	6	3	6	2	4	2	4	2	4	4	8	
iv	Emplear actuadores eficientes	3	3	9	4	12	2	6	2	6	3	9	1	3	2	6	3	9	1	3	1	3	2	6	0	0	4	12	
v	Limitar las dimensiones del sistema	1	4	4	4	4	3	3	2	2	2	2	1	1	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	1	1	4	4	
vi	Diseñar el sistema con bordes redondeados	1	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	4	4	
vii	Emplear filtros en la entrada del sistema	3	3	9	3	9	4	12	3	9	3	9	4	12	3	9	3	9	4	12	3	9	3	9	4	12	4	12	
viii	Usar componentes que no requieran mantenimiento seguido	2	3	6	3	6	4	8	2	4	2	4	3	6	3	6	3	6	4	8	2	4	2	4	3	6	4	8	
ix	Contar con acceso a todas las superficies	2	4	8	4	8	4	8	3	6	3	6	3	6	4	8	4	8	4	8	3	6	3	6	3	6	4	8	
x	Emplear repuestos comerciales	1	3	3	3	3	4	4	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	2	2	2	2	3	3	4	4	
xi	Emplear materiales con modulo de esfuerzo cortante adecuado	2	4	8	4	8	4	8	3	6	3	6	3	6	4	8	4	8	4	8	3	6	3	6	3	6	4	8	
xii	Usar un material suave	2	4	8	4	8	4	8	3	6	3	6	3	6	4	8	4	8	4	8	3	6	3	6	3	6	4	8	
xiii	Limitar el ruido	1	4	4	4	4	2	2	3	3	3	3	1	1	3	3	3	3	1	1	2	2	2	2	0	0	4	4	
Total technical value		T₁₁	69	T₁₂	72	T₁₃	69	T₁₄	50	T₁₅	53	T₁₆	50	T₁₇	63	T₁₈	66	T₁₉	63	T₂₀	46	T₂₁	49	T₂₂	46	T₂₃	80		
Relative technical value		R₁₁	0.86	R₁₂	0.90	R₁₃	0.86	R₁₄	0.63	R₁₅	0.66	R₁₆	0.63	R₁₇	0.79	R₁₈	0.83	R₁₉	0.79	R₂₀	0.58	R₂₁	0.61	R₂₂	0.58	R₂₃	1.00		
		Economical analysis																											
ii	Empleo de material antideslizante	2	3	6	3	6	3	6	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	1	2	1	2	1	2	4	8	
iii	Limitar el costo de máquina	4	1	4	1	4	4	16	1	4	1	4	3	12	0	0	0	0	2	8	0	0	0	0	1	4	4	16	
iv	Emplear actuadores eficientes	3	3	9	3	9	2	6	2	6	2	6	1	3	3	9	2	6	2	6	2	6	2	6	1	3	4	12	
v	Emplear filtros en la entrada del sistema	3	3	9	3	9	2	6	3	9	3	9	2	6	3	9	3	9	2	6	3	9	3	9	2	6	4	12	
vi	Usar componentes que no requieran mantenimiento seguido	2	2	4	2	4	3	6	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	3	6	1	2	1	2	2	4	4	8	
vii	Emplear repuestos comerciales	1	1	1	1	1	3	3	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	3	3	1	1	1	1	1	1	1	4	4
viii	Emplear actuadores de bajo consumo	2	3	6	3	6	1	2	3	6	3	6	1	2	3	6	3	6	1	2	3	6	3	6	1	2	4	8	
Total economical value		T_{e1}	39	T_{e2}	39	T_{e3}	45	T_{e4}	34	T_{e5}	34	T_{e6}	33	T_{e7}	33	T_{e8}	30	T_{e9}	35	T_{e10}	26	T_{e11}	26	T_{e12}	22	T_{e23}	68		
Relative economical value		R_{e1}	0.57	R_{e2}	0.57	R_{e3}	0.66	R_{e4}	0.50	R_{e5}	0.50	R_{e6}	0.49	R_{e7}	0.49	R_{e8}	0.44	R_{e9}	0.51	R_{e10}	0.38	R_{e11}	0.38	R_{e12}	0.32	R_{e23}	1.00		
Hyperbolic rating		H₁₁	0.70	H₁₂	0.72	H₁₃	0.76	H₁₄	0.56	H₁₅	0.58	H₁₆	0.55	H₁₇	0.62	H₁₈	0.60	H₁₉	0.64	H₂₀	0.47	H₂₁	0.48	H₂₂	0.43	H₂₃	1.00		



ANEXO B

En este anexo se presentarán los planos presentados en la Tabla 4.1; además, se presenta el diagrama electrónico del proyecto.





Cantidad	Denominacion de componentes
1	Fuente de tensión (12V)
5	Actuador Soft Robotic
5	Fuente de aire comprimido
10	MOSFET
10	Solenoides de válvula
10	Válvula de 2/2 vías

NORMA

ISO 1219-2:2012-09

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
 FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA – ESPECIALIDAD: ING. MECATRÓNICA

GUANTE SOFT ROBOTICS

FECHA:

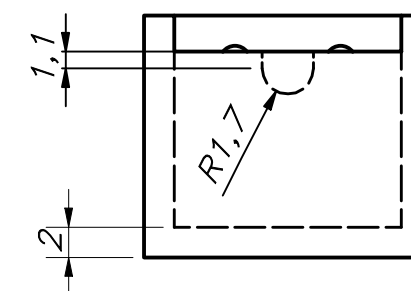
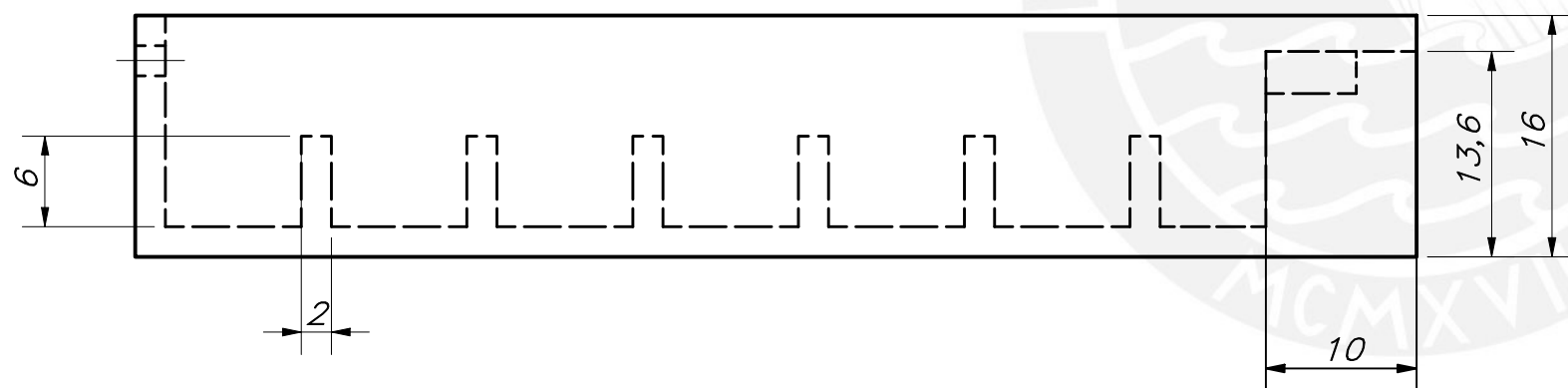
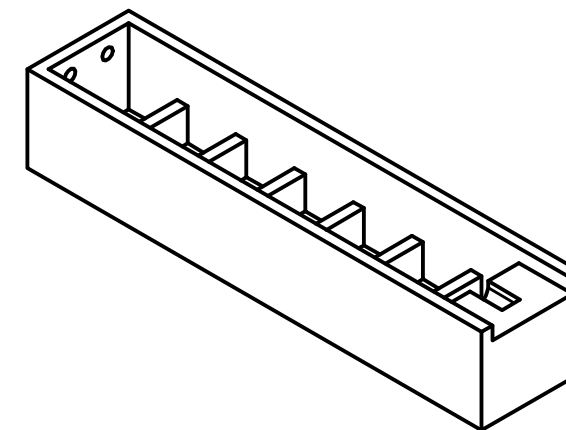
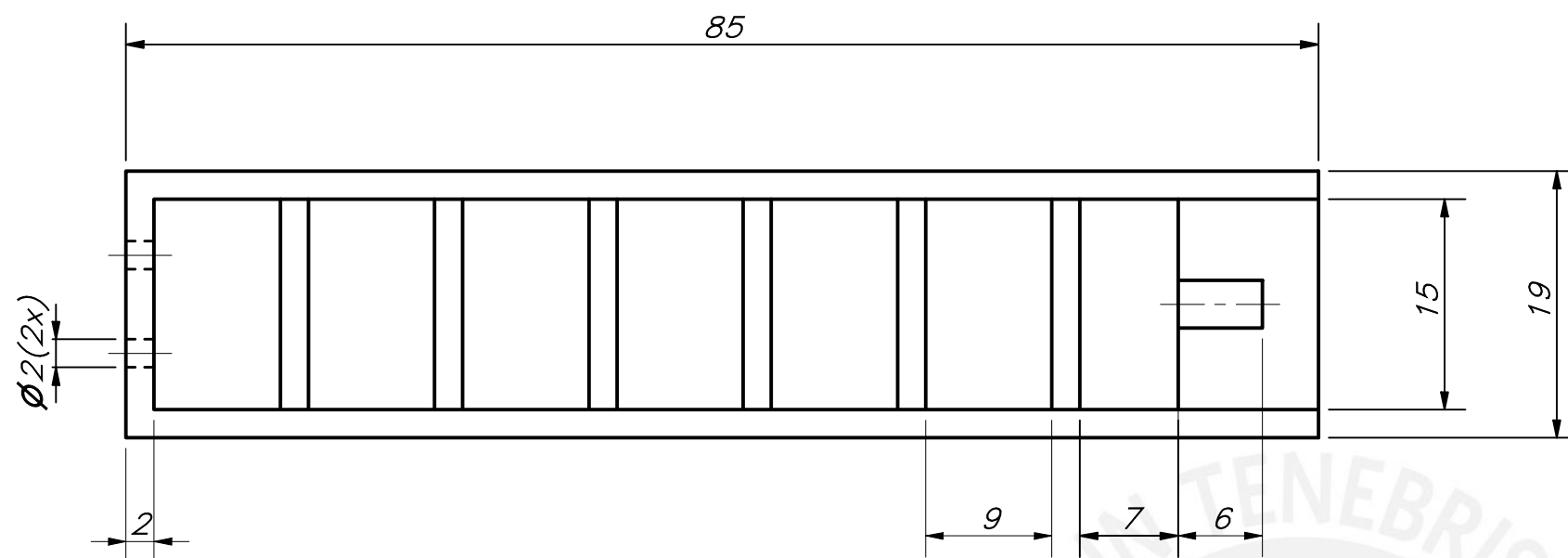
2021.10.15

20166256

LÓPEZ JUNCHAYA, ANDERS JEANPIERRE

LAMINA:

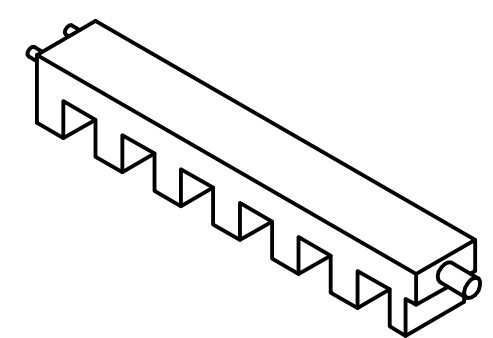
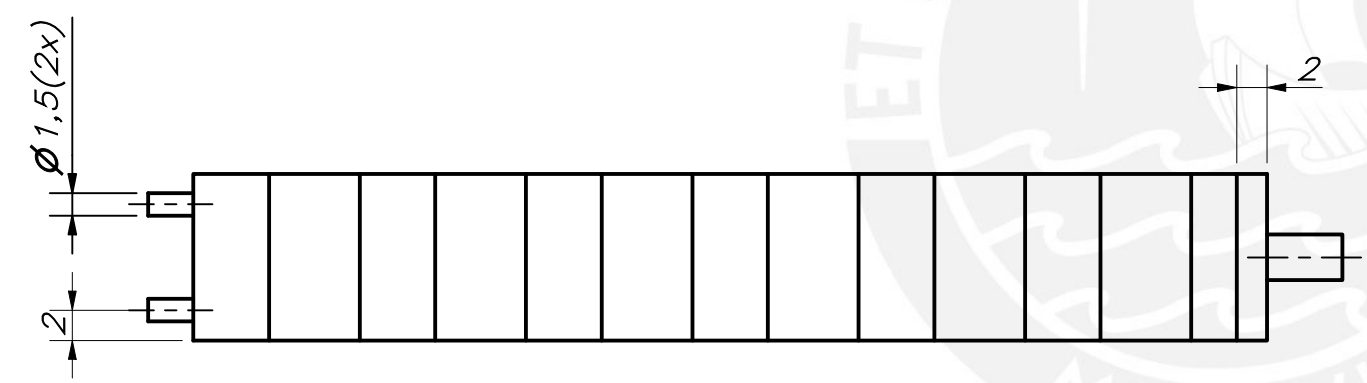
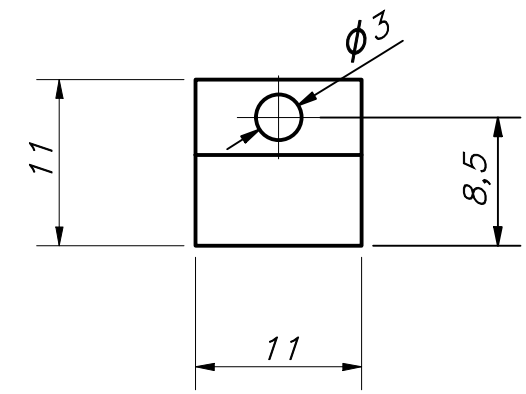
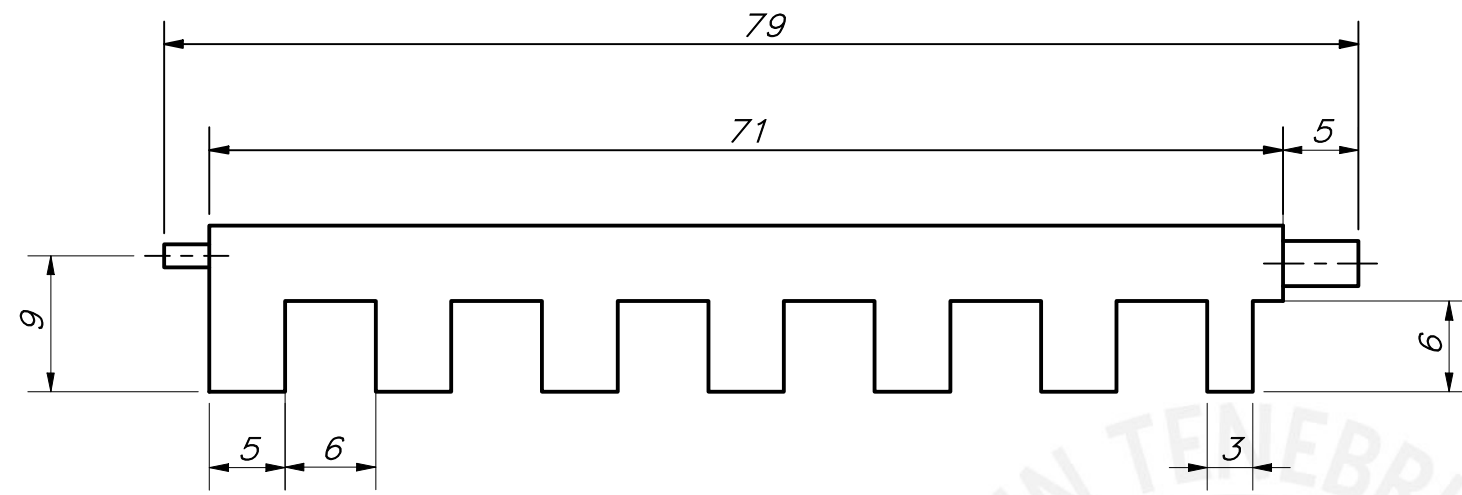
PN - 001 -A3



- Velocidad de impresión: 50 mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 150 mm/s
- Flujo de impresión: 95%
- Relleno: 20%
- Velocidad de retracción: 50 mm/s
- Temperatura de impresión: 205°C

TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN ISO 2768-1							
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
BASTO	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±3

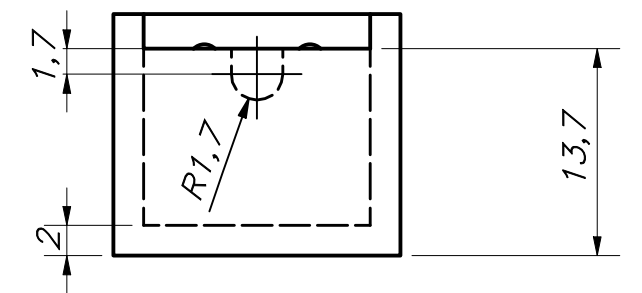
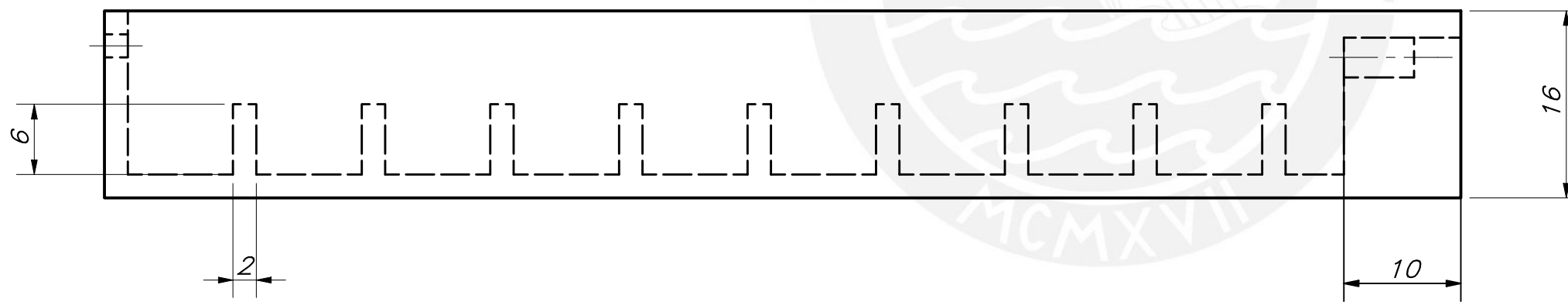
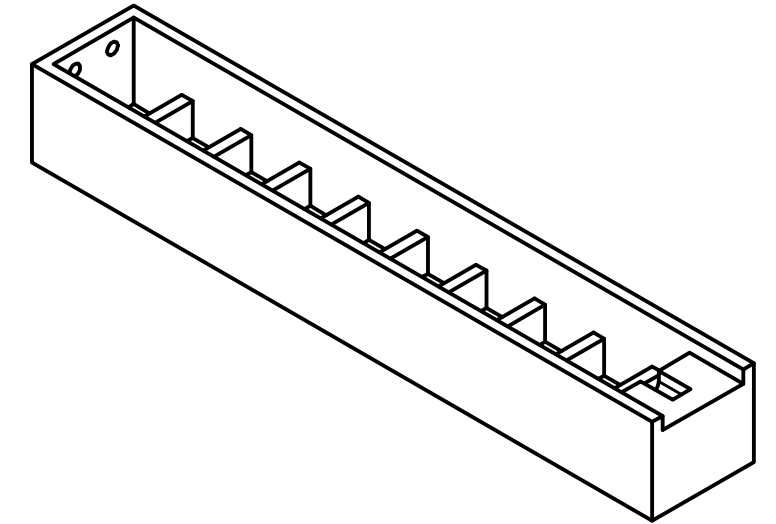
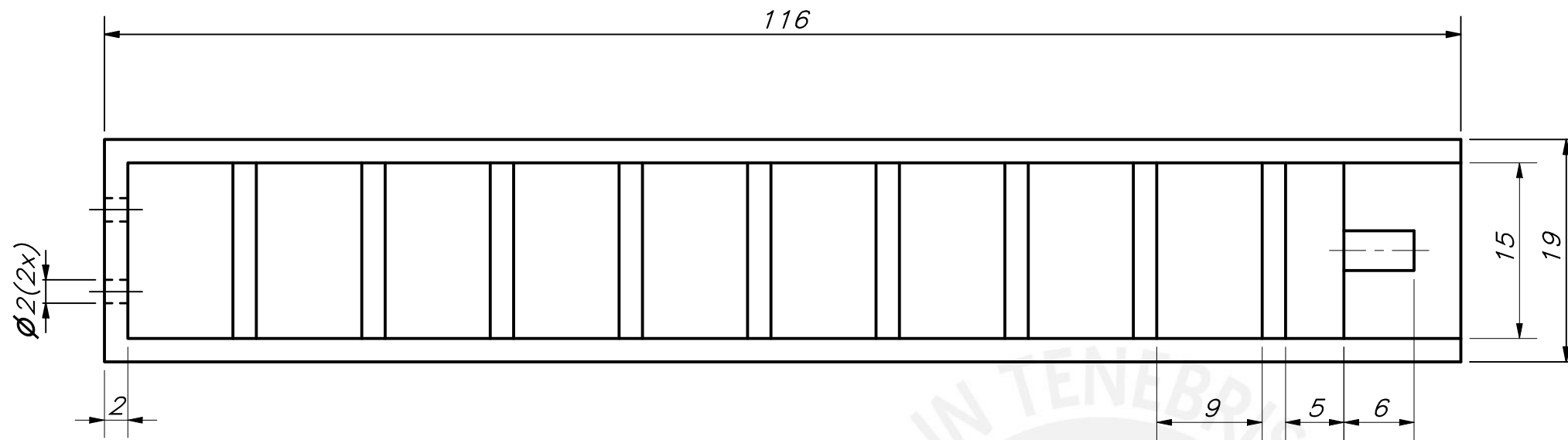
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL ISO 2768 BASTO	MATERIAL PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	MOLDE DEDO PULGAR FONDO	ESCALA 2:1
20166256	LÓPEZ JUNCHAYA, ANDERS JEANPIERRE	FECHA: 2021.09.30
		LÁMINA: PD-001-A3



- Velocidad de impresión: 50 mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 150 mm/s
- Flujo de impresión: 95%
- Relleno: 20%
- Velocidad de retracción: 50 mm/s
- Temperatura de impresión: 205°C

TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN ISO 2768-1							
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
BASTO	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±3

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL ISO 2768 BASTO	MATERIAL PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERIA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	MOLDE DEDO PULGAR TAPA	ESCALA 2:1
20166256	LÓPEZ JUNCHAYA, ANDERS JEANPIERRE	FECHA: 2021.09.30
		LÁMINA: PD-002-A3

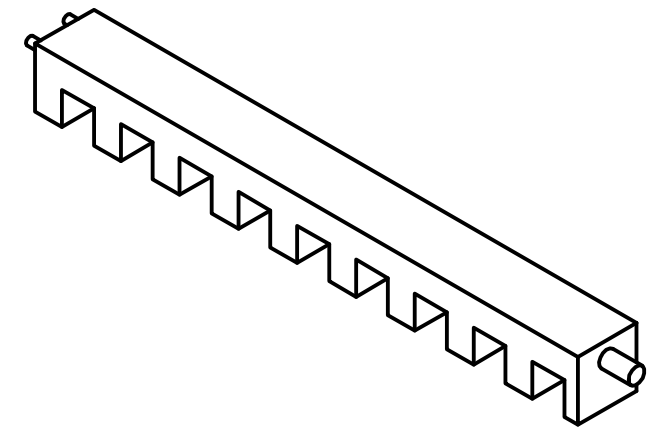
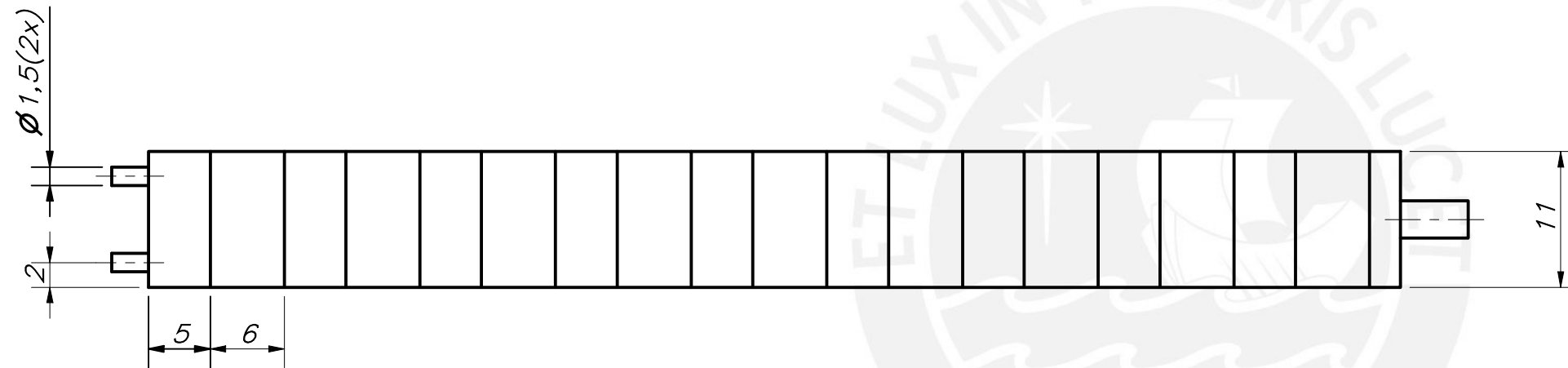
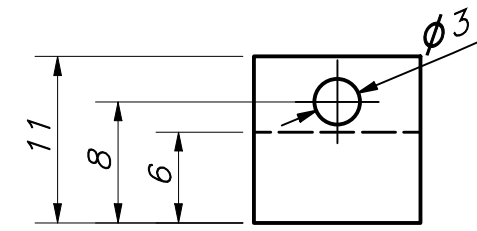
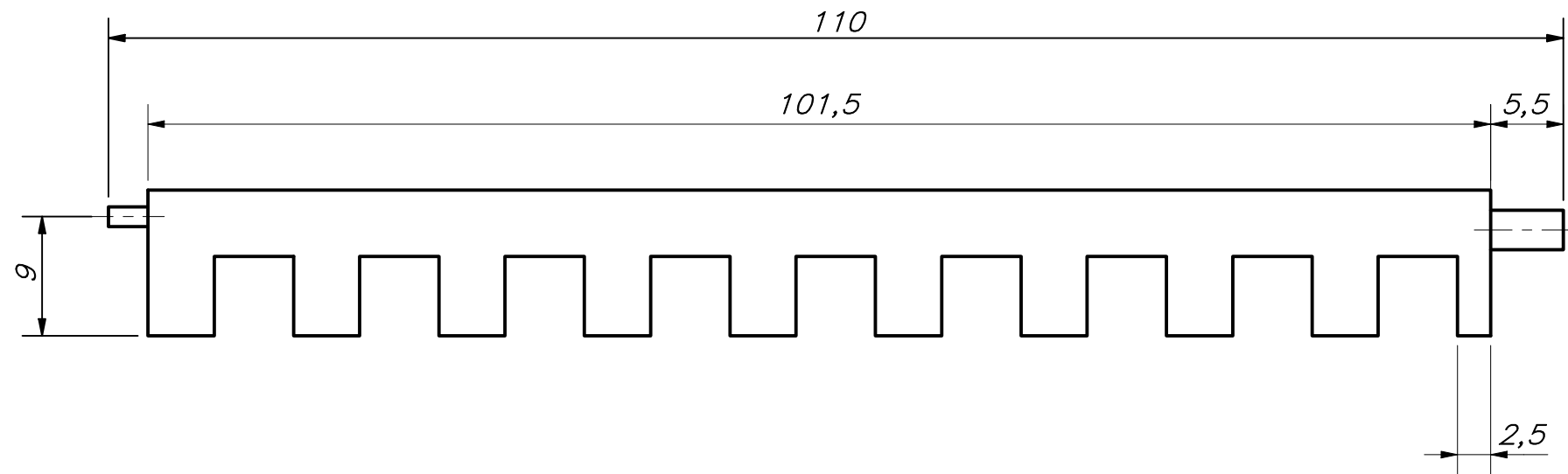


- Velocidad de impresión: 50 mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 150 mm/s
- Flujo de impresión: 95%
- Relleno: 20%
- Velocidad de retracción: 50 mm/s
- Temperatura de impresión: 205°C

TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
BASTO	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±3

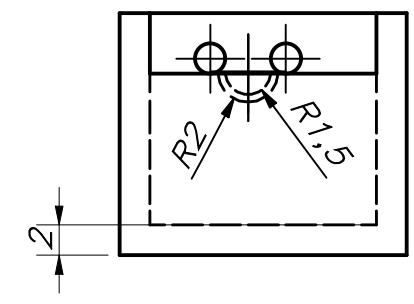
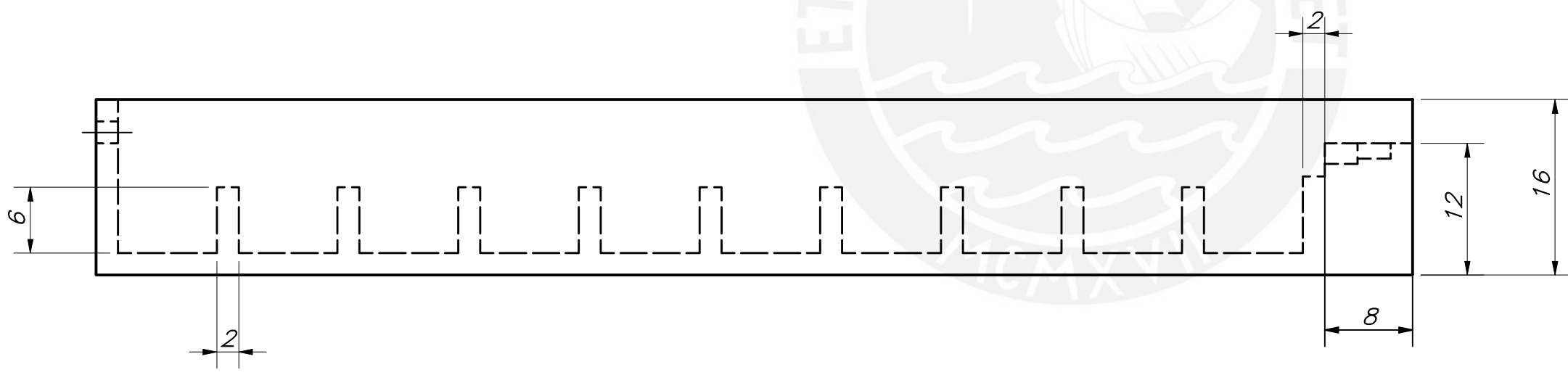
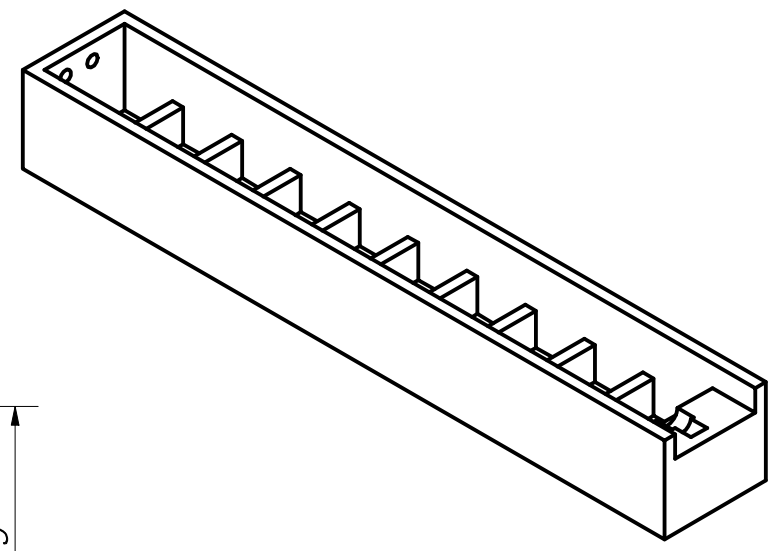
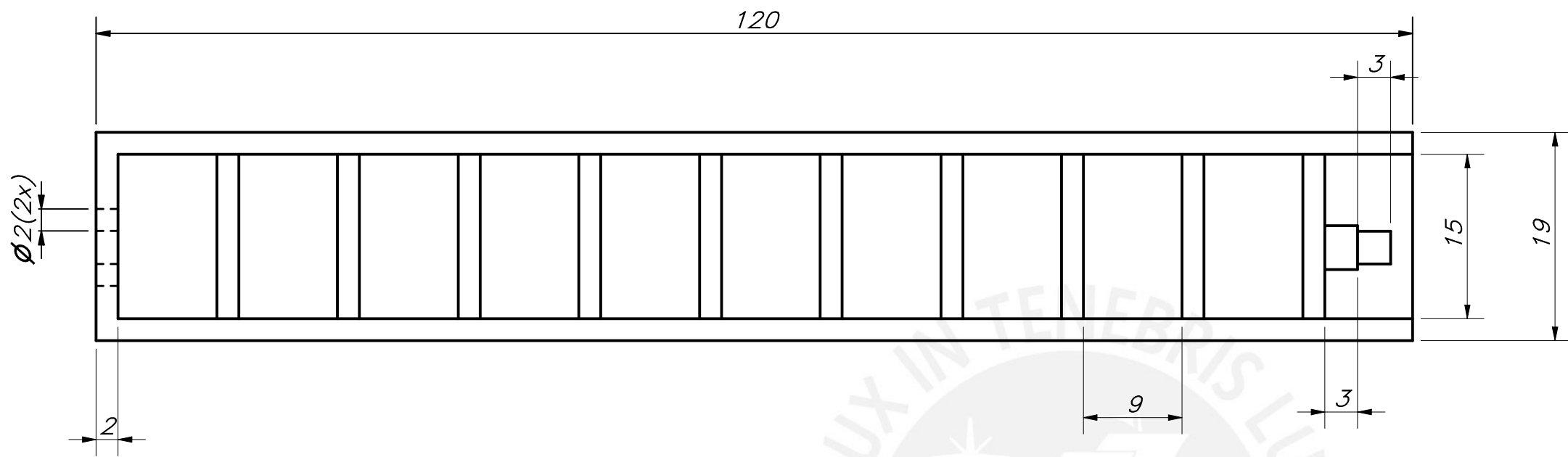
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL ISO 2768 BASTO	MATERIAL PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	MOLDE DEDO INDICE FONDO	ESCALA 2:1
20166256	LÓPEZ JUNCHAYA, ANDERS JEANPIERRE	FECHA: 2021.10.11
		LÁMINA: PD-003-A3



- Velocidad de impresión: 50 mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 150 mm/s
- Flujo de impresión: 95%
- Relleno: 20%
- Velocidad de retracción: 50 mm/s
- Temperatura de impresión: 205°C

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL ISO 2768 BASTO	MATERIAL PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	MOLDE DEDO INDICE TAPA	ESCALA 2:1
20166256	LÓPEZ JUNCHAYA, ANDERS JEANPIERRE	FECHA: 2021.10.11
		LÁMINA: PD-004-A3

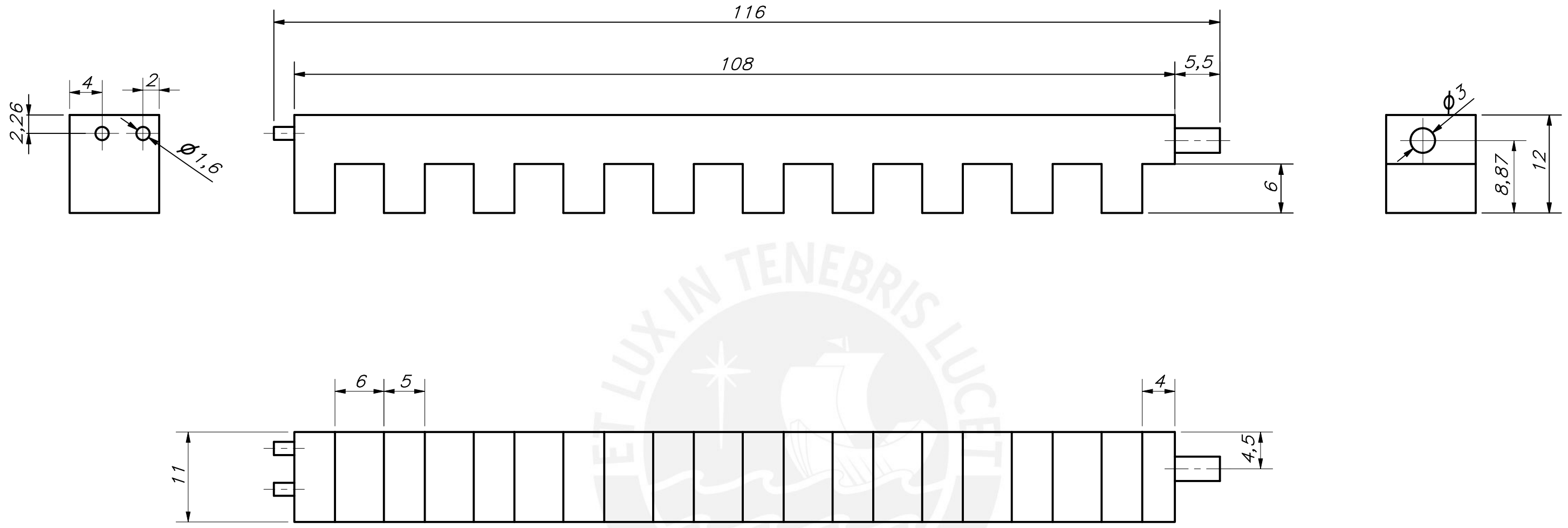
TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN ISO 2768-1							
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
BASTO	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±3



- Velocidad de impresión: 50 mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 150 mm/s
- Flujo de impresión: 95%
- Relleno: 20%
- Velocidad de retracción: 50 mm/s
- Temperatura de impresión: 205°C

TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN ISO 2768-1							
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
BASTO	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±3

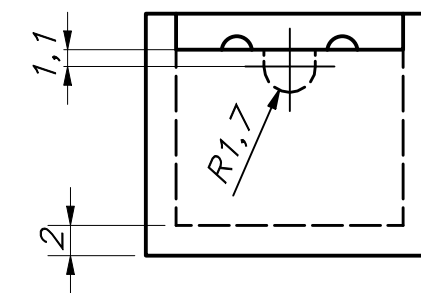
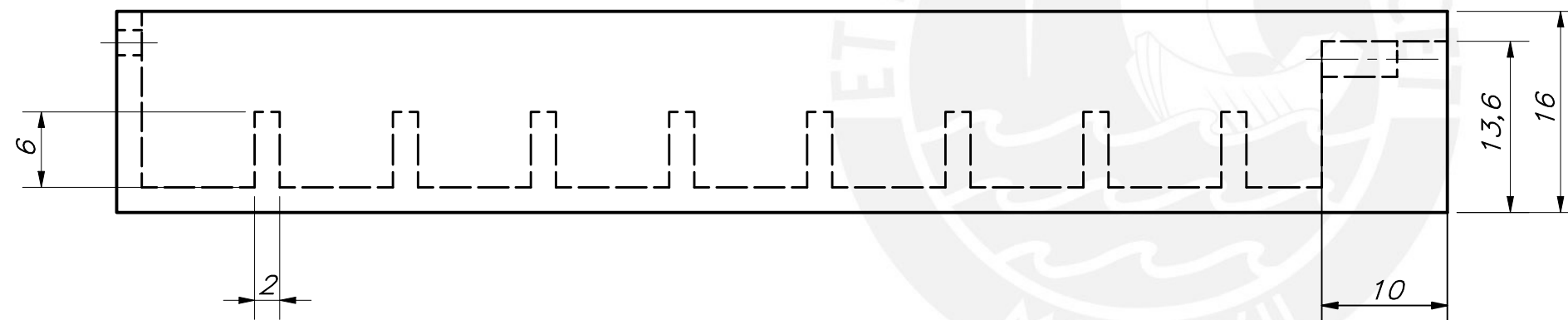
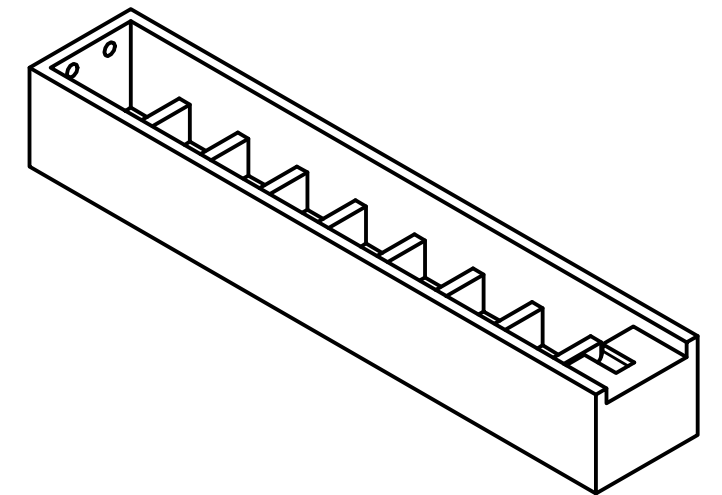
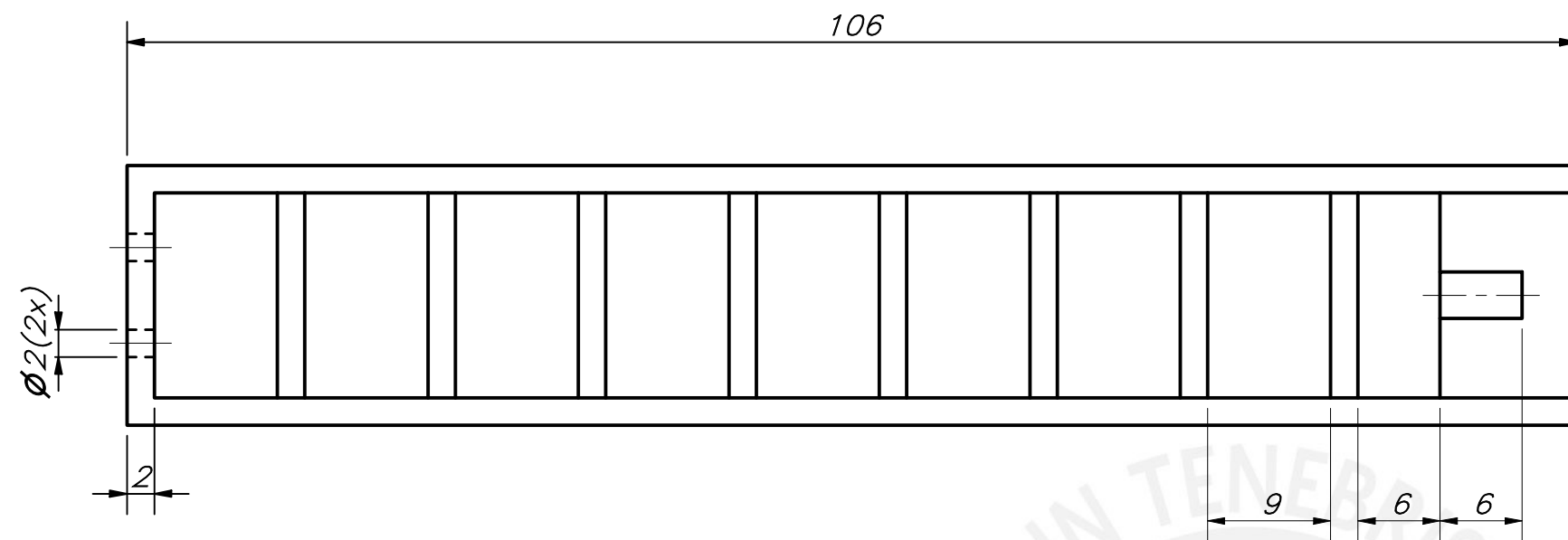
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL ISO 2768 BASTO	MATERIAL PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	MOLDE DEDO MEDIO FONDO	ESCALA 2:1
20166256	LÓPEZ JUNCHAYA, ANDERS JEANPIERRE	FECHA: 2021.10.11
		LÁMINA: PD-005-A3



- Velocidad de impresión: 50 mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 150 mm/s
- Flujo de impresión: 95%
- Relleno: 20%
- Velocidad de retracción: 50 mm/s
- Temperatura de impresión: 205°C

TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN ISO 2768-1							
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
BASTO	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±3

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL ISO 2768 BASTO	MATERIAL PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	MOLDE DEDO MEDIO TAPA	ESCALA 2:1
20166256	LÓPEZ JUNCHAYA, ANDERS JEANPIERRE	FECHA: 2021.10.12
		LÁMINA: PD-006-A3

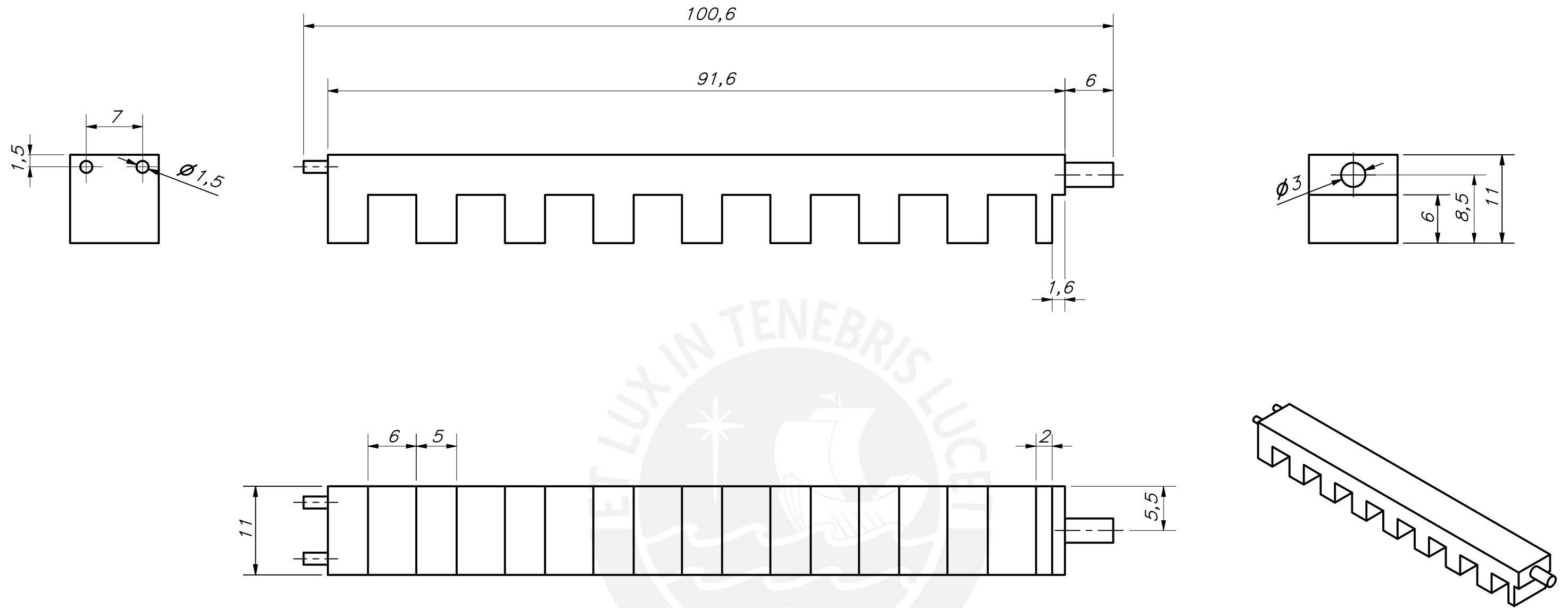


- Velocidad de impresión: 50 mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 150 mm/s
- Flujo de impresión: 95%
- Relleno: 20%
- Velocidad de retracción: 50 mm/s
- Temperatura de impresión: 205°C

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL ISO 2768 BASTO	MATERIAL PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	MOLDE DEDO ANULAR FONDO	ESCALA 2:1
20166256	LÓPEZ JUNCHAYA, ANDERS JEANPIERRE	FECHA: 2021.10.11
		LÁMINA: PD-007-A3

**TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1**

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
BASTO	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±3

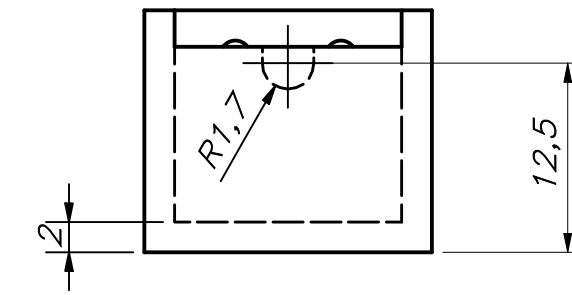
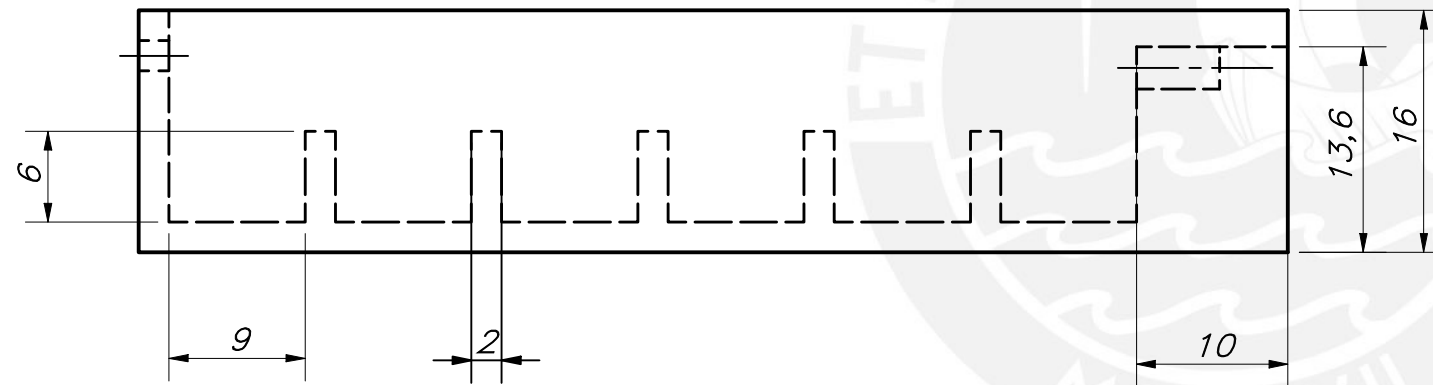
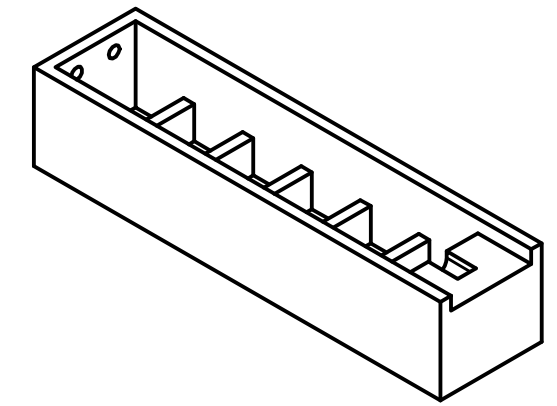
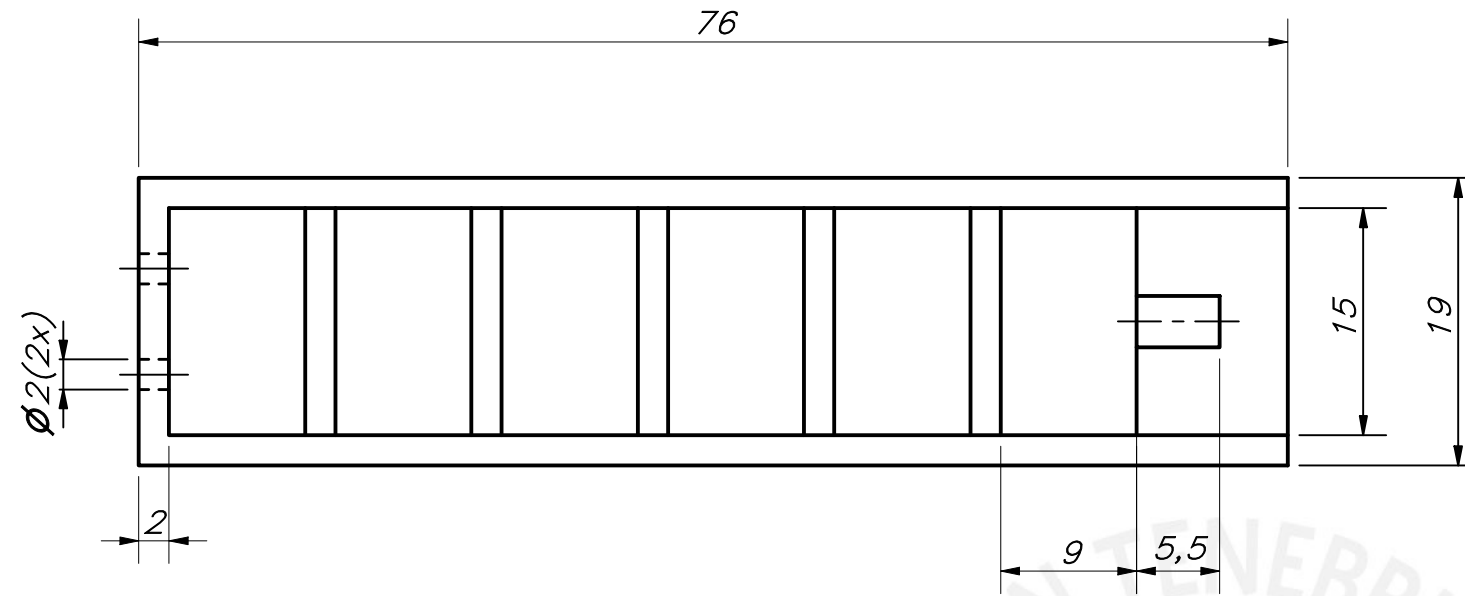


- Velocidad de impresión: 50 mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 150 mm/s
- Flujo de impresión: 95%
- Relleno: 20%
- Velocidad de retracción: 50 mm/s
- Temperatura de impresión: 205°C

TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
BASTO	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±3

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL ISO 2768 BASTO	MATERIAL PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	MOLDE DEDO ANULAR TAPA	ESCALA 2:1
20166256	LÓPEZ JUNCHAYA, ANDERS JEANPIERRE	FECHA: 2021.10.12
		LÁMINA: PD-008-A3

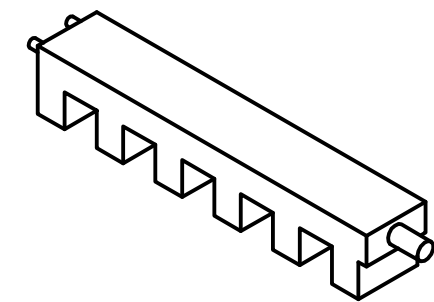
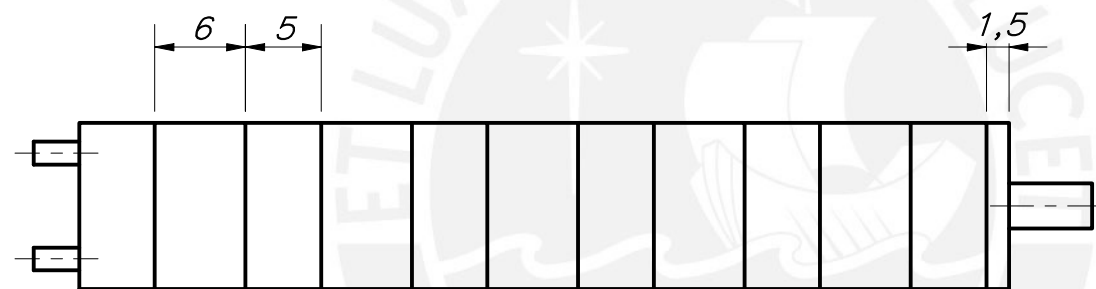
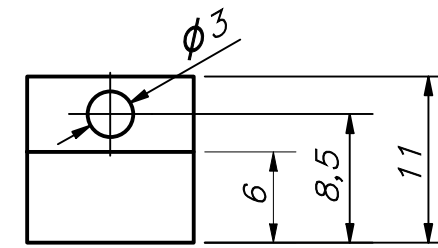
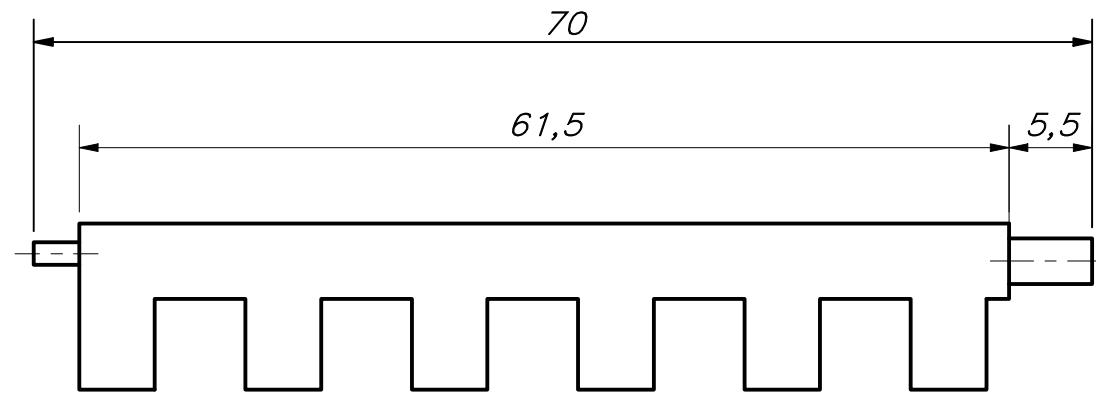
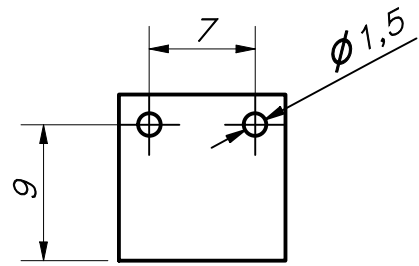


- Velocidad de impresión: 50 mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 150 mm/s
- Flujo de impresión: 95%
- Relleno: 20%
- Velocidad de retracción: 50 mm/s
- Temperatura de impresión: 205°C

TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
BASTO	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±3

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL ISO 2768 BASTO	MATERIAL PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	MOLDE DEDO MEÑIQUE FONDO	ESCALA 2:1
20166256	LÓPEZ JUNCHAYA, ANDERS JEANPIERRE	FECHA: 2021.10.12
		LÁMINA: PD-009-A3

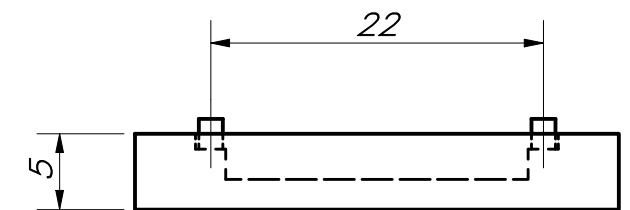
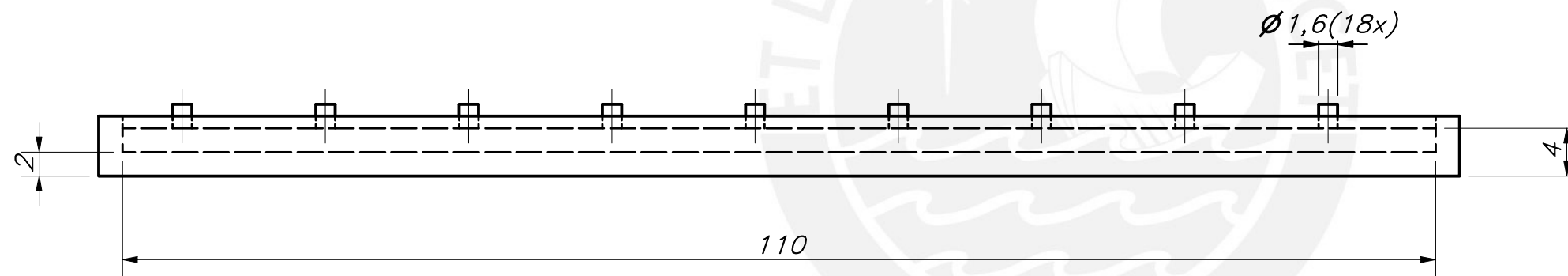
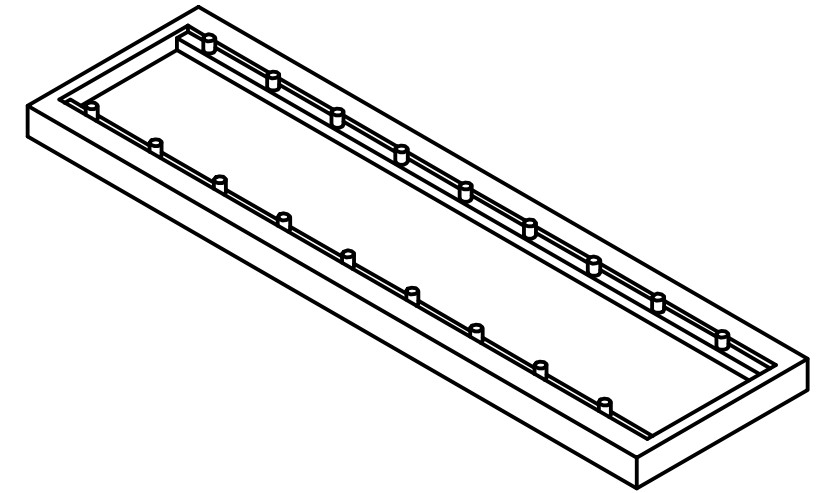
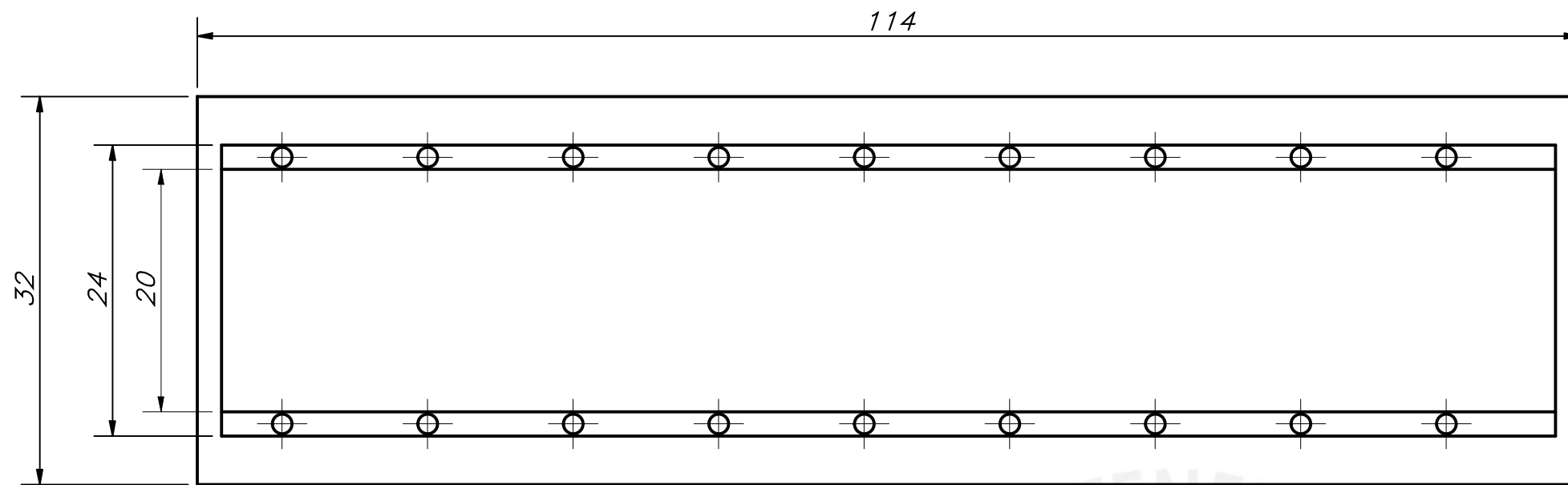


- Velocidad de impresión: 50 mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 150 mm/s
- Flujo de impresión: 95%
- Relleno: 20%
- Velocidad de retracción: 50 mm/s
- Temperatura de impresión: 205°C

TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
BASTO	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±3

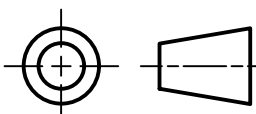
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL ISO 2768 BASTO	MATERIAL PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	MOLDE DEDO MEÑIQUE TAPA	ESCALA 2:1
20166256	LÓPEZ JUNCHAYA, ANDERS JEANPIERRE	FECHA: 2021.10.12
		LÁMINA: PD-010-A3

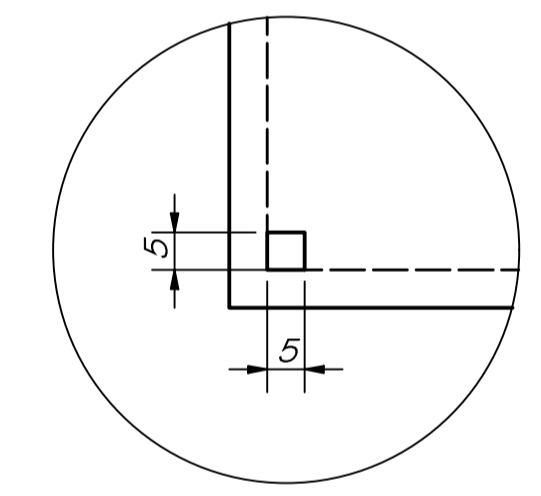
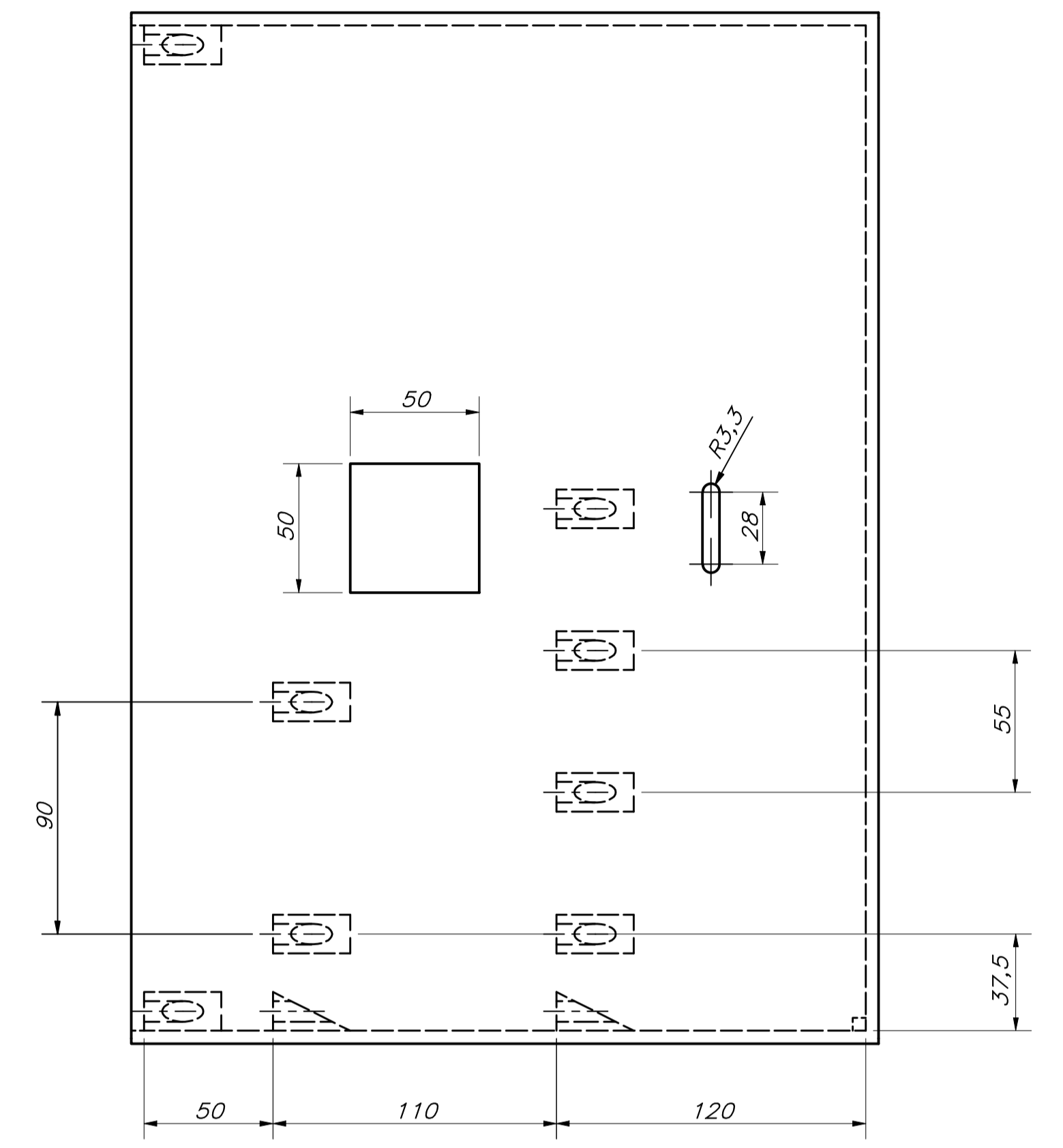
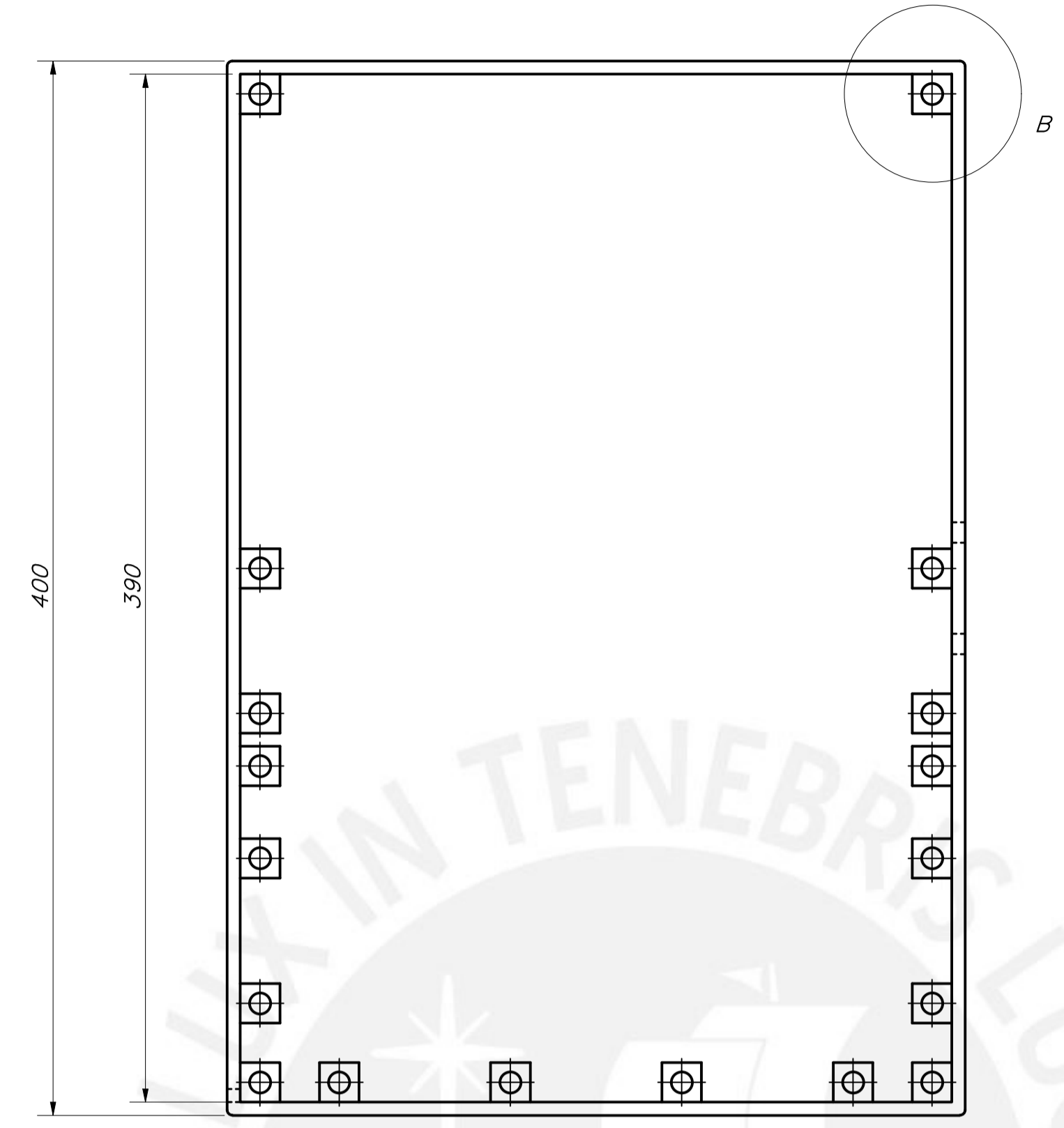
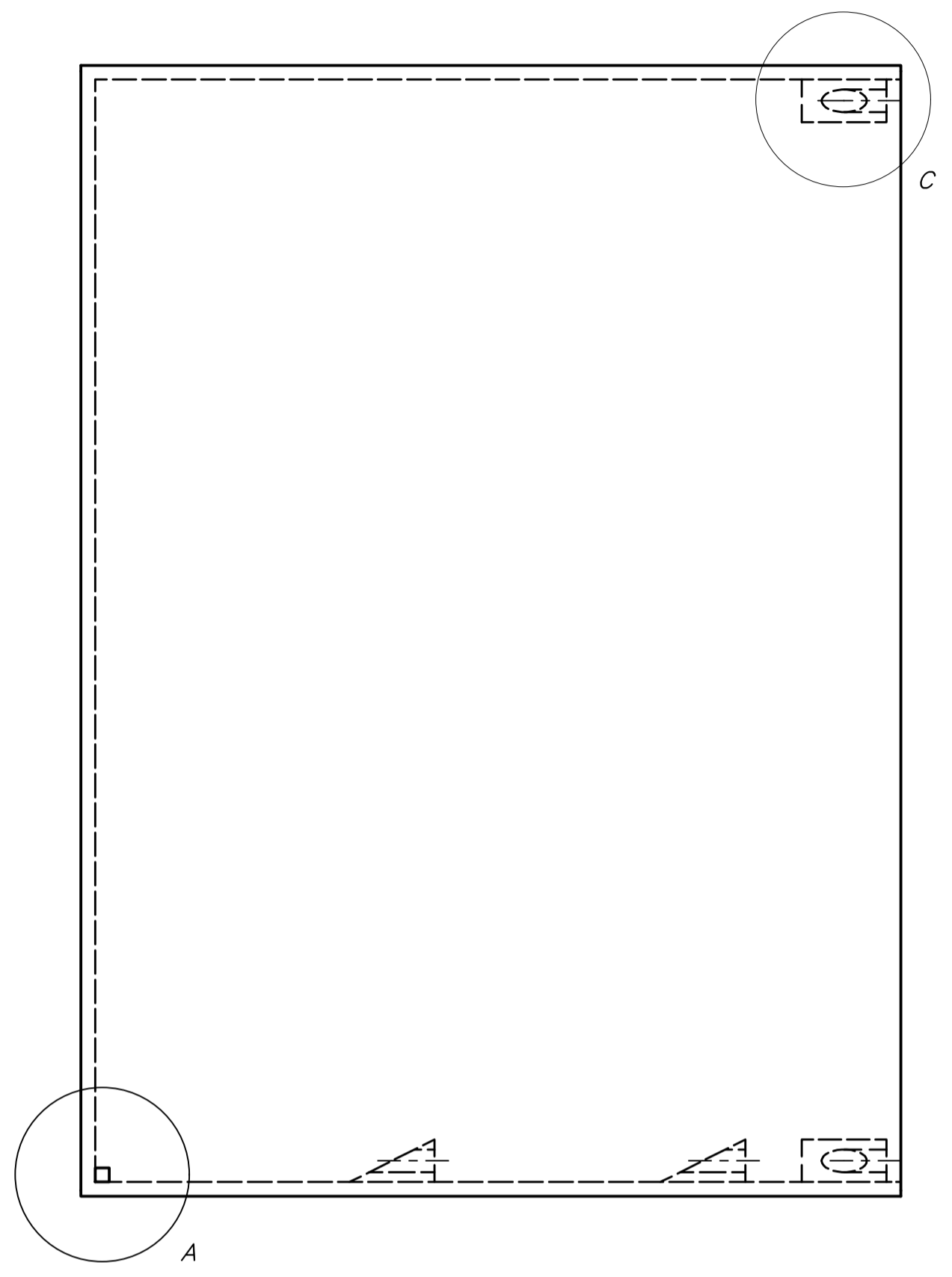


- Velocidad de impresión: 50 mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 150 mm/s
- Flujo de impresión: 95%
- Relleno: 20%
- Velocidad de retracción: 50 mm/s
- Temperatura de impresión: 205°C

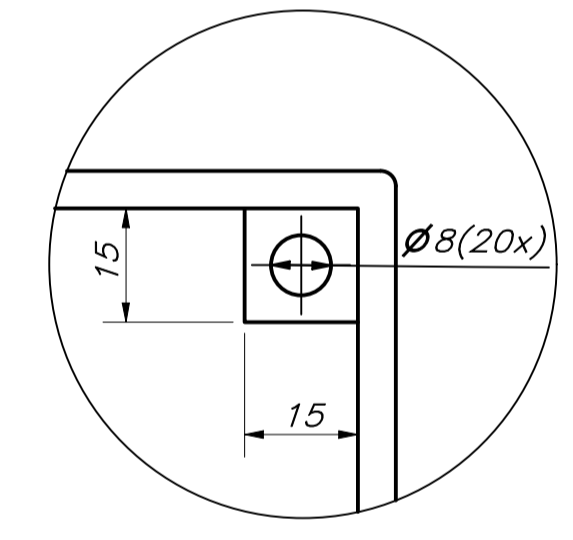
TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
BASTO	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±3

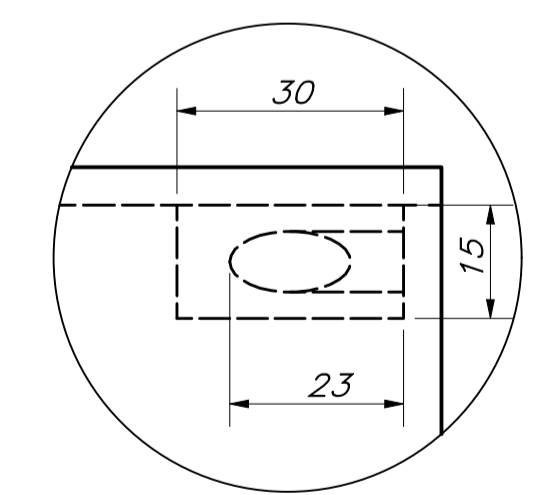
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL ISO 2768 BASTO	MATERIAL PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	MOLDE BASE ACTUADOR	ESCALA 2:1
20166256	LÓPEZ JUNCHAYA, ANDERS JEANPIERRE	FECHA: 2021.10.12
		LÁMINA: PD-011-A3



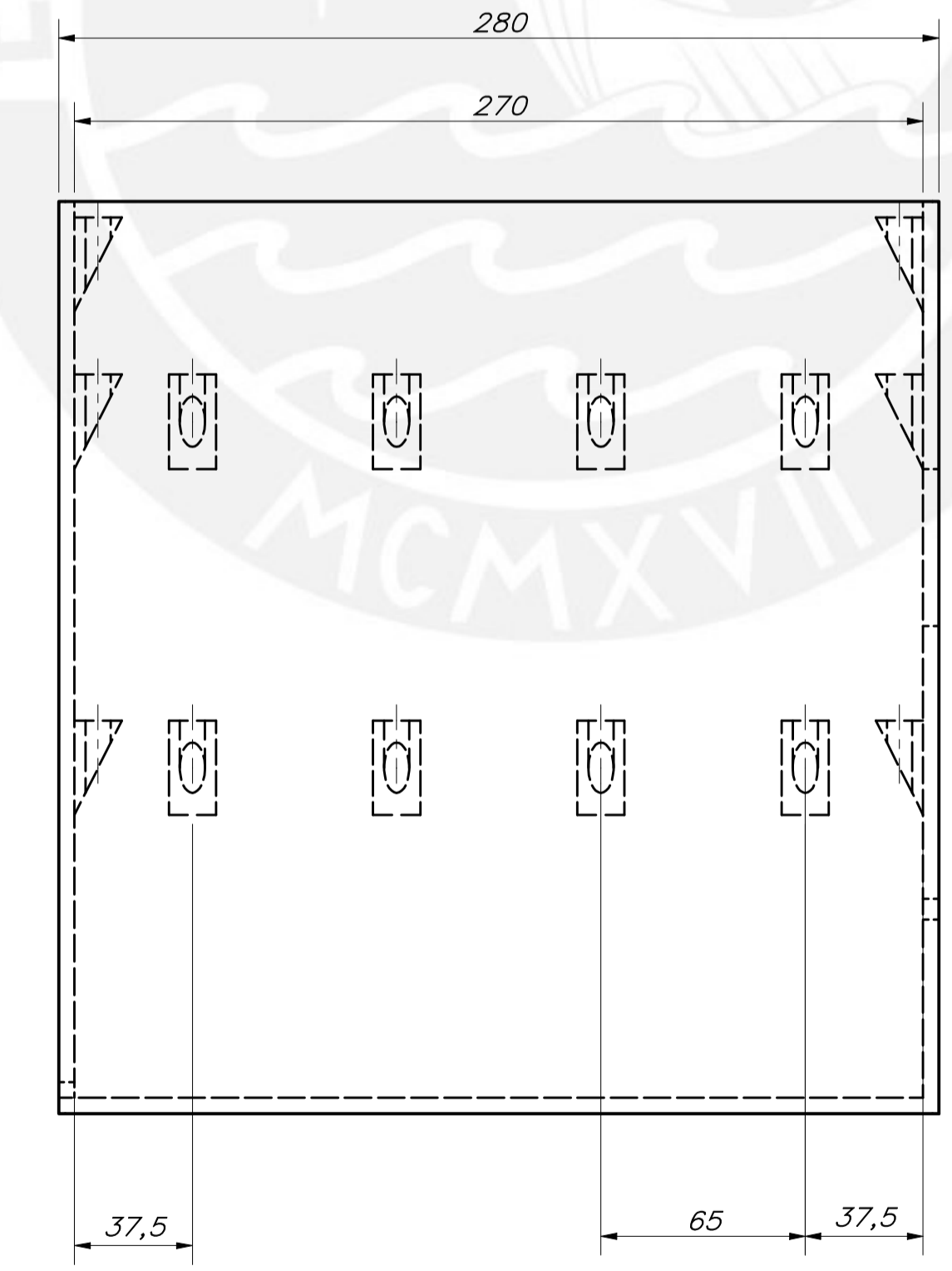
DETALLE A
ESCALA 1 : 1



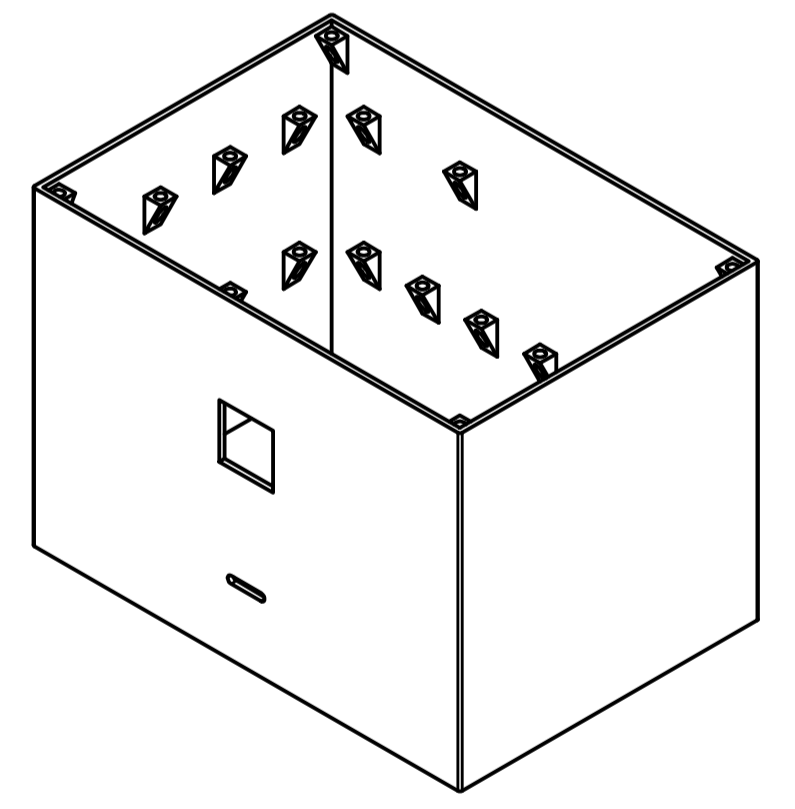
DETALLE B
ESCALA 1 : 1



DETALLE C
ESCALA 1 : 1



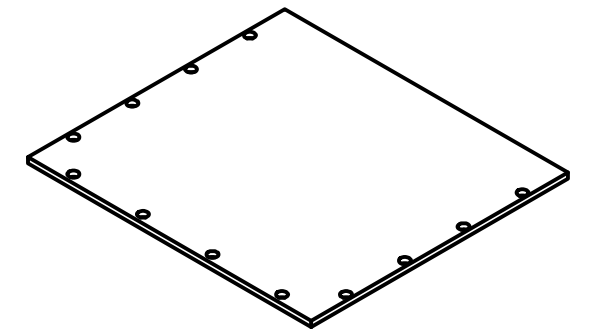
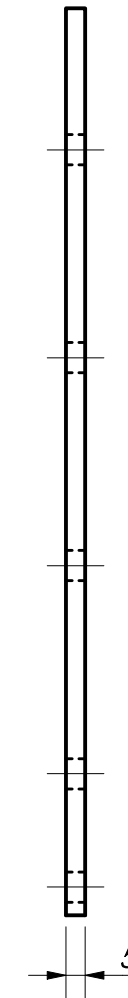
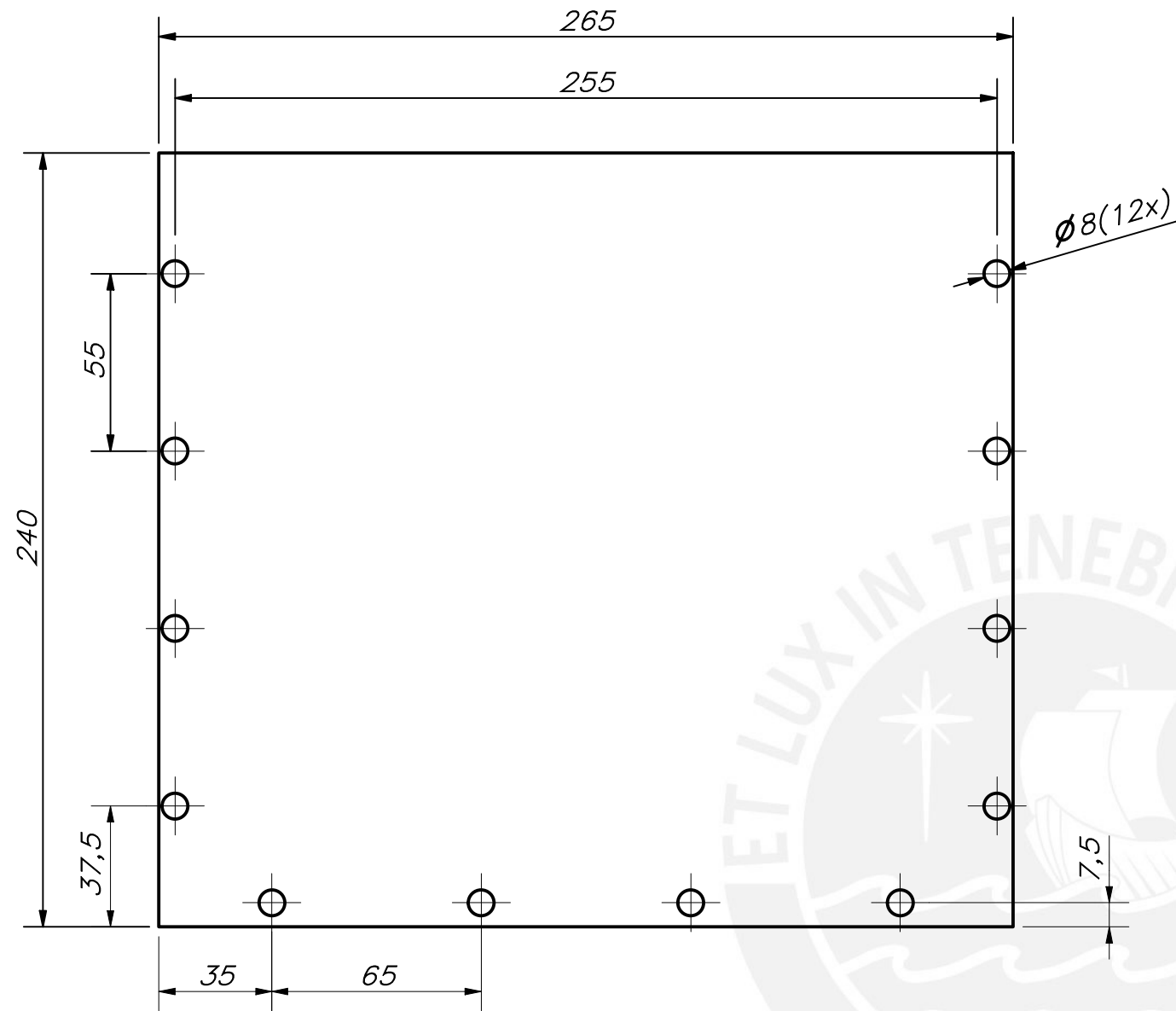
REDONDEADO NO ESPECIFICADO: 2 mm



- Velocidad de impresión: 50 mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 150 mm/s
- Flujo de impresión: 95%
- Relleno: 20%
- Velocidad de retracción: 50 mm/s
- Temperatura de impresión: 205°C

TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN ISO 2768-1						
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 1	Más de 1 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400
BASTO	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL ISO 2768 BASTO	MATERIAL PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 ESTRUCTURA DE LA CAJA	ESCALA 1:2
20166256	LÓPEZ JUNCHAYA, ANDERS JEANPIERRE	FECHA: 2021.11.26
		LÁMINA: PD-012-A1

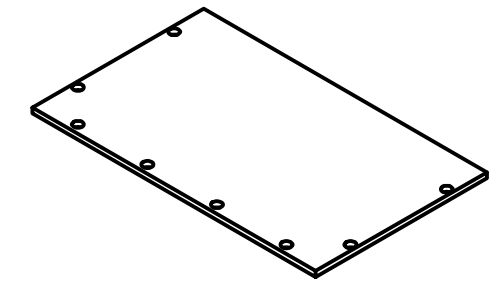
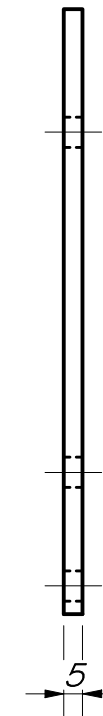
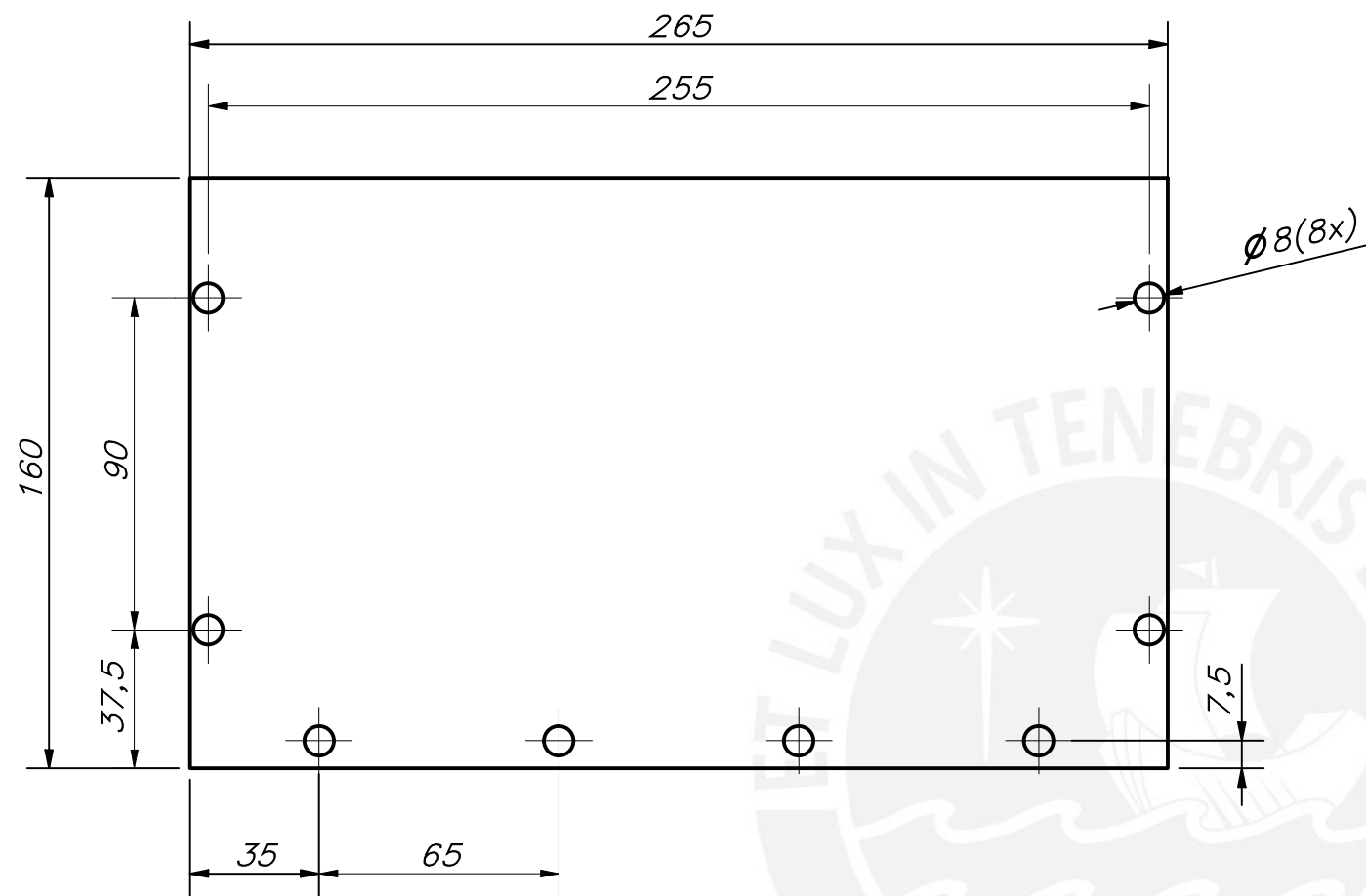


- Velocidad de impresión: 50 mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 150 mm/s
- Flujo de impresión: 95%
- Relleno: 20%
- Velocidad de retracción: 50 mm/s
- Temperatura de impresión: 205°C

TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
BASTO	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±3

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL ISO 2768 BASTO	MATERIAL PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	PRIMER NIVEL	ESCALA 1:2
20166256	LÓPEZ JUNCHAYA, ANDERS JEANPIERRE	FECHA: 2021.11.26
		LÁMINA: PD-013-A3

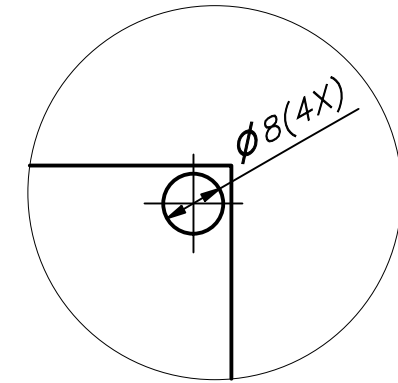
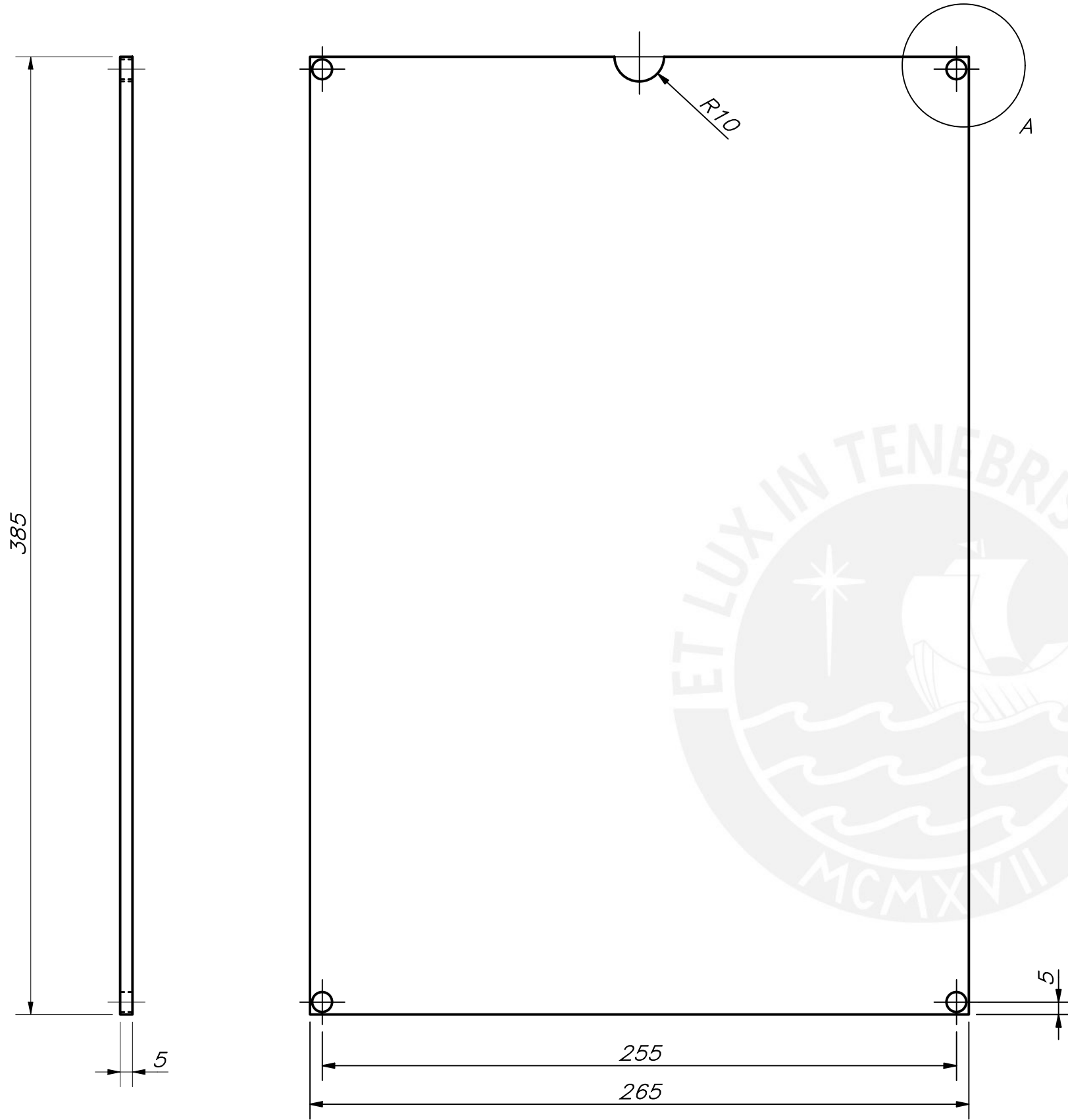


- Velocidad de impresión: 50 mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 150 mm/s
- Flujo de impresión: 95%
- Relleno: 20%
- Velocidad de retracción: 50 mm/s
- Temperatura de impresión: 205°C

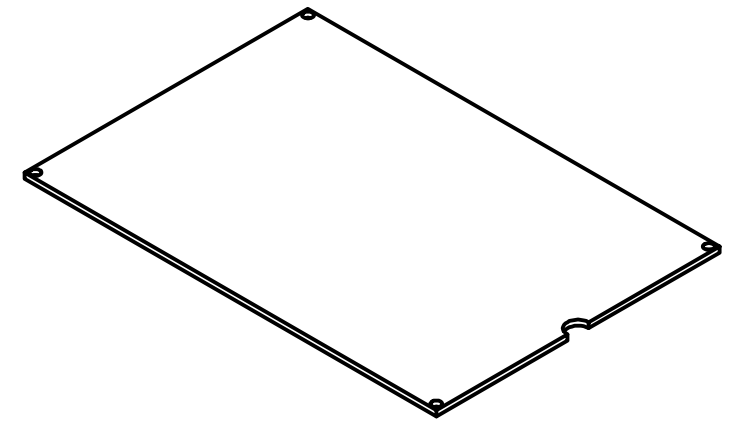
TOLERANCIAS DIMENSIONALES
SEGÚN DIN ISO 2768-1

GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
BASTO	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±3

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL ISO 2768 BASTO	MATERIAL PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	SEGUNDO NIVEL	ESCALA 1:2
20166256	LÓPEZ JUNCHAYA, ANDERS JEANPIERRE	FECHA: 2021.11.26
		LÁMINA: PD-014-A3



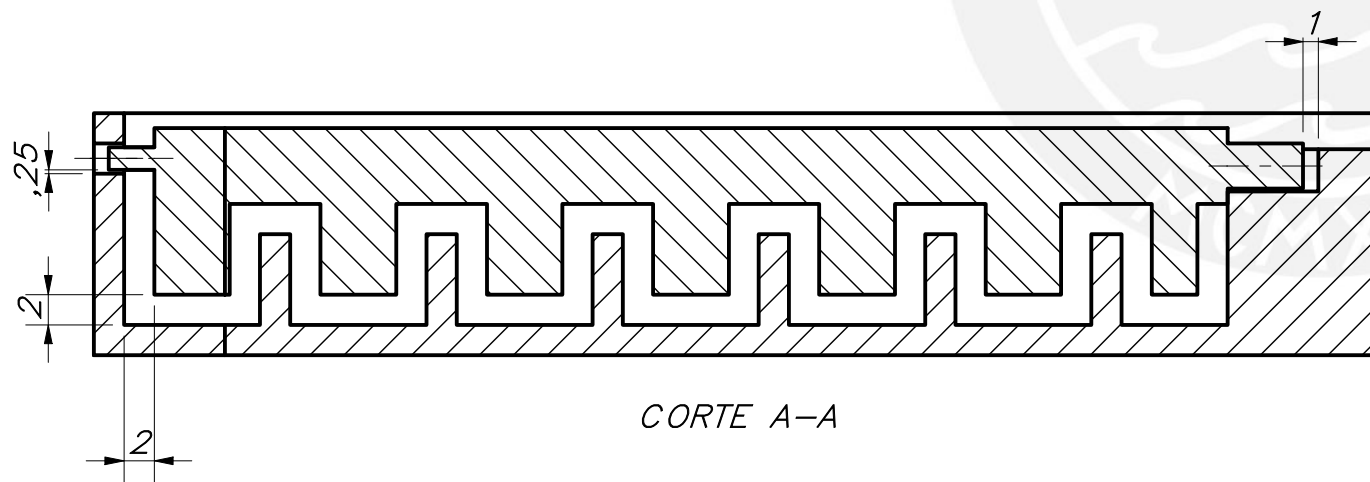
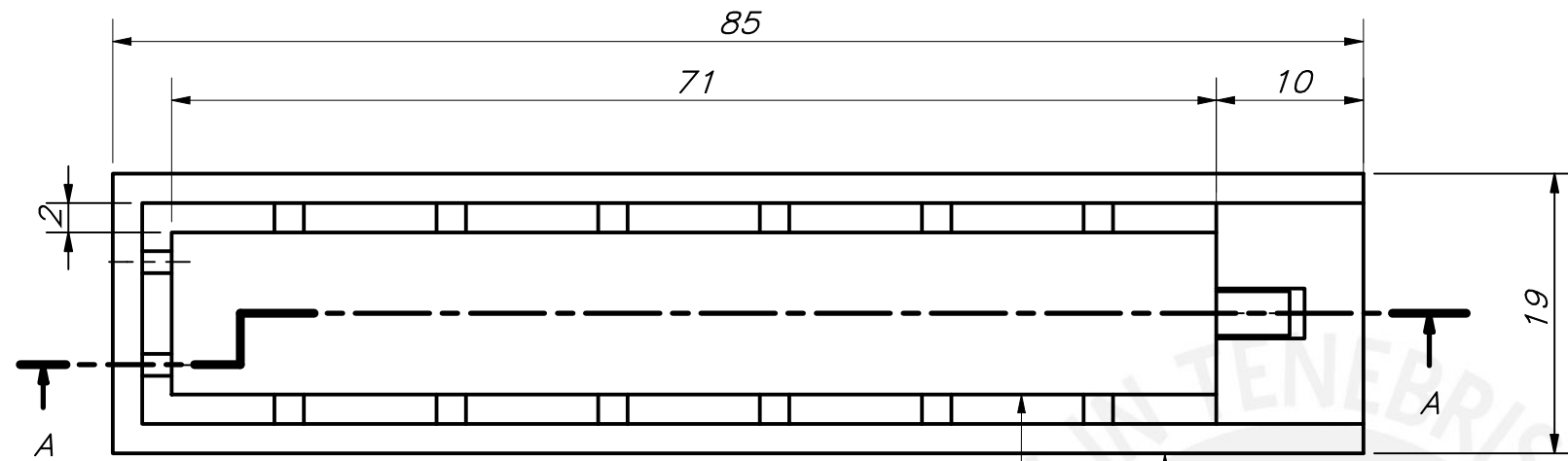
DETALLE A
ESCALA 1 : 1



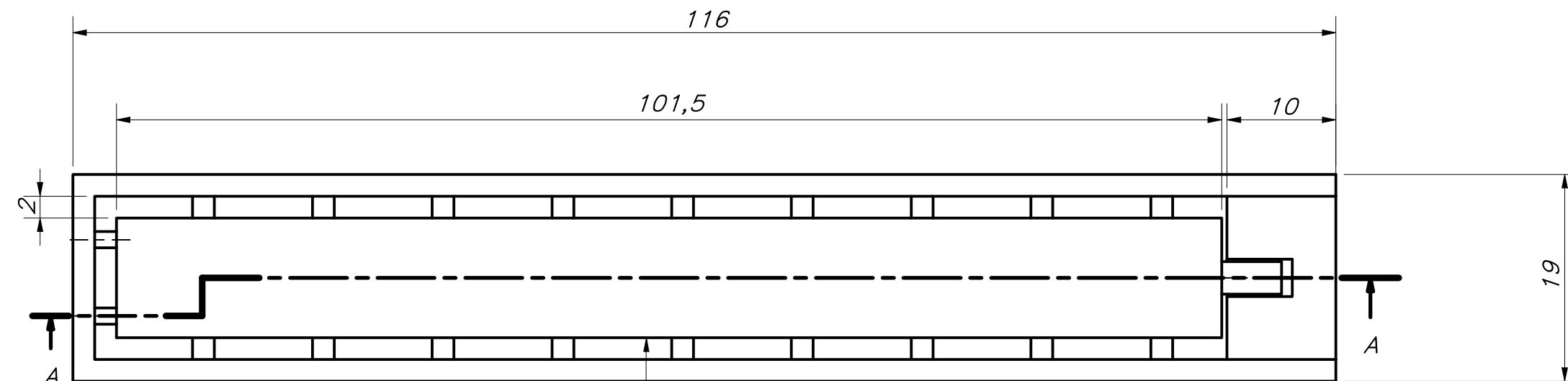
- Velocidad de impresión: 50 mm/s
- Velocidad de desplazamiento: 150 mm/s
- Flujo de impresión: 95%
- Relleno: 20%
- Velocidad de retracción: 50 mm/s
- Temperatura de impresión: 205°C

TOLERANCIAS DIMENSIONALES SEGÚN DIN ISO 2768-1							
GRADO DE EXACTITUD	Más de 0,5 hasta 3	Más de 3 hasta 6	Más de 6 hasta 30	Más de 30 hasta 120	Más de 120 hasta 400	Más de 400 hasta 1000	Más de 1000 hasta 2000
BASTO	±0,2	±0,3	±0,5	±0,8	±1,2	±2	±3

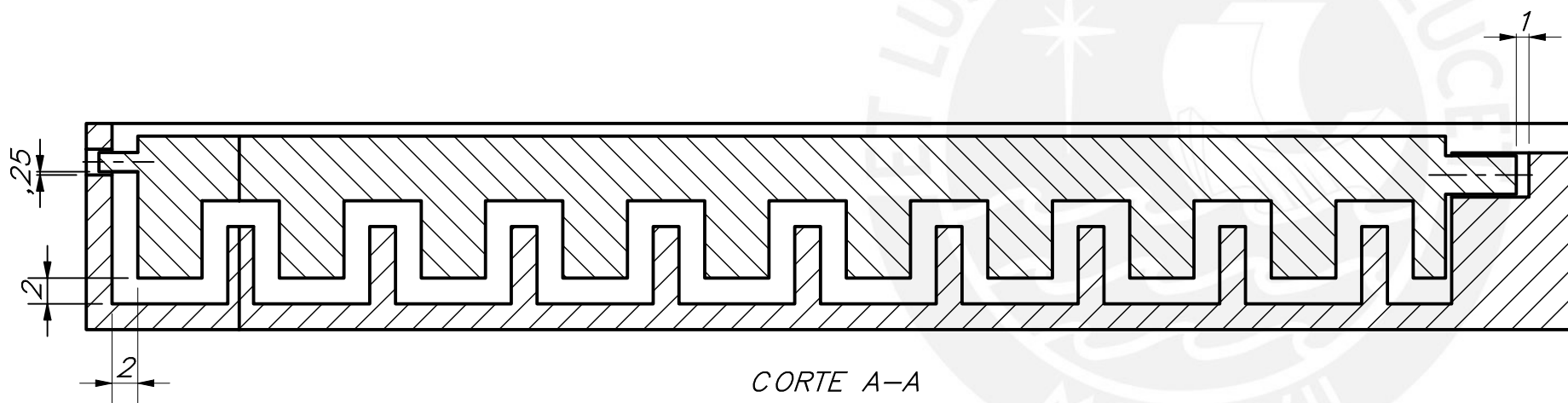
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL ISO 2768 BASTO	MATERIAL PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TAPA DE LA CAJA	ESCALA 1:2
20166256	LÓPEZ JUNCHAYA, ANDERS JEANPIERRE	FECHA: 2021.11.27
		LÁMINA: PD-015-A3



PARTS LIST					
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
2	1	MOLDE DEDO PULGAR TAPA	ISO 2768	PLA	PD - 002 - A3
1	1	MOLDE DEDO PULGAR FONDO	ISO 2768	PLA	PD - 001 - A3
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA					
MÉTODO DE PROYECCIÓN					ESCALA
		MOLDE DEDO PULGAR			2:1
20166256		LÓPEZ JUNCHAYA, ANDERS JEANPIERRE			FECHA: 2021.10.15
					LÁMINA: PE-001-A3

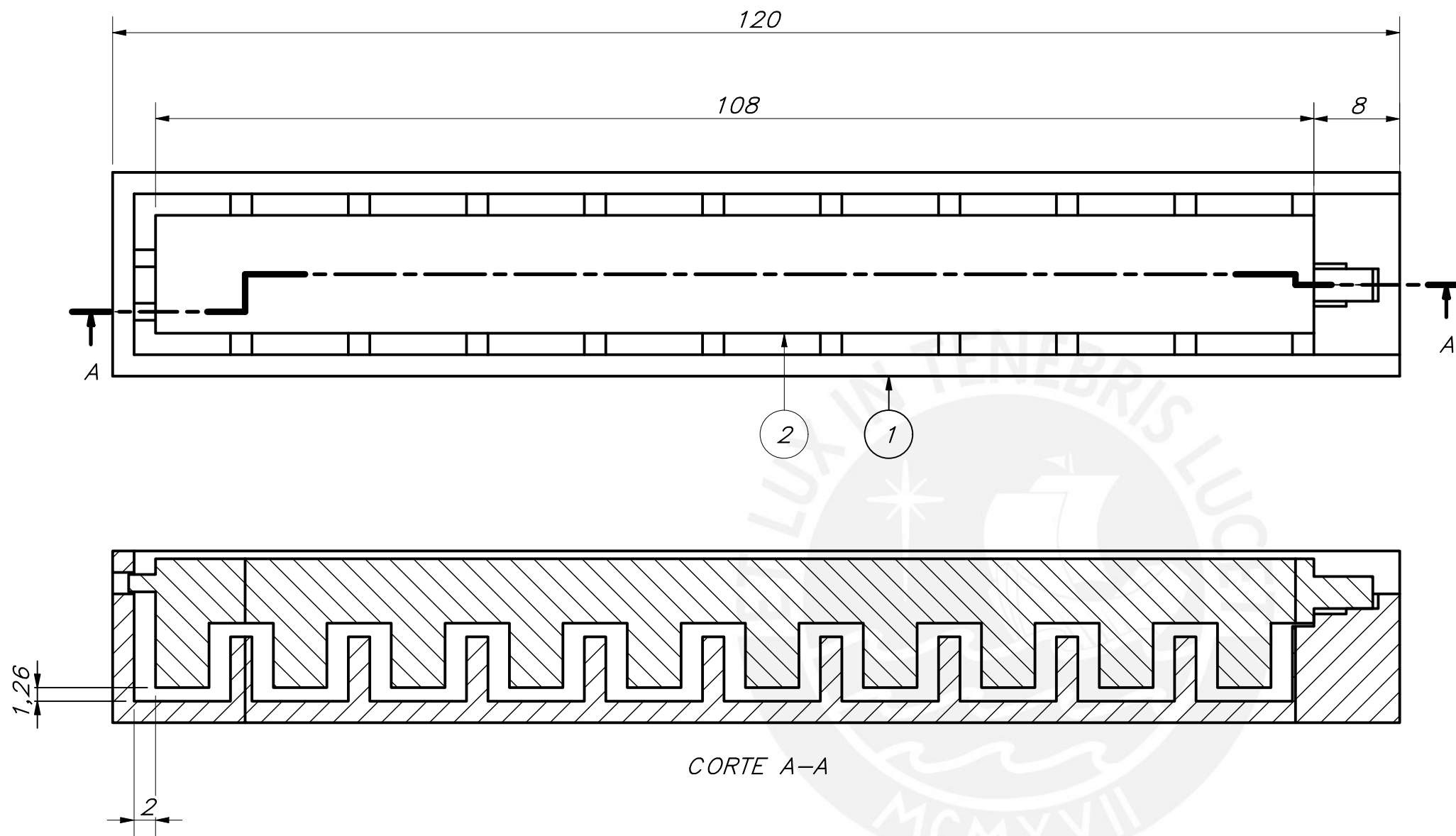


2 1

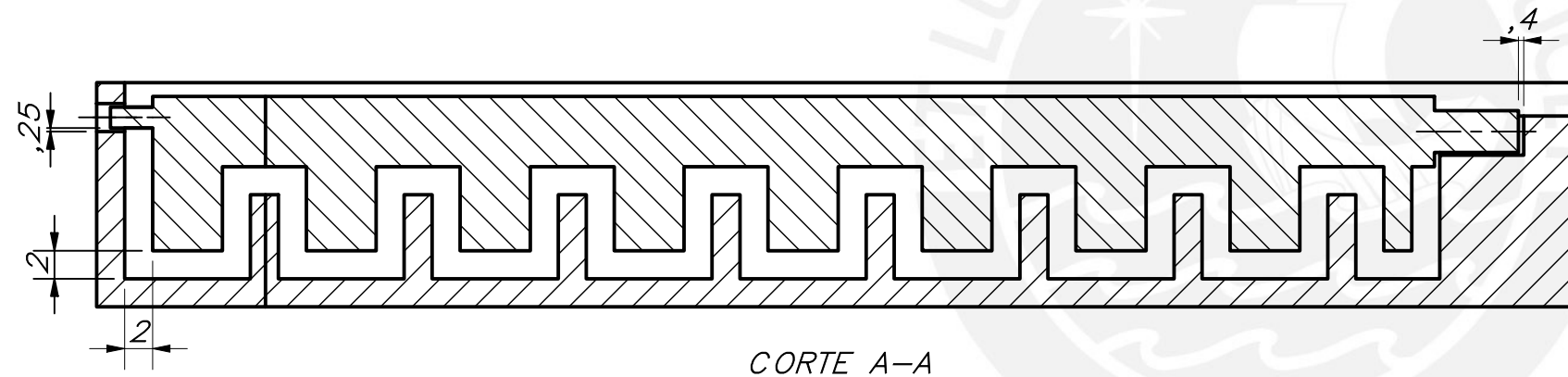
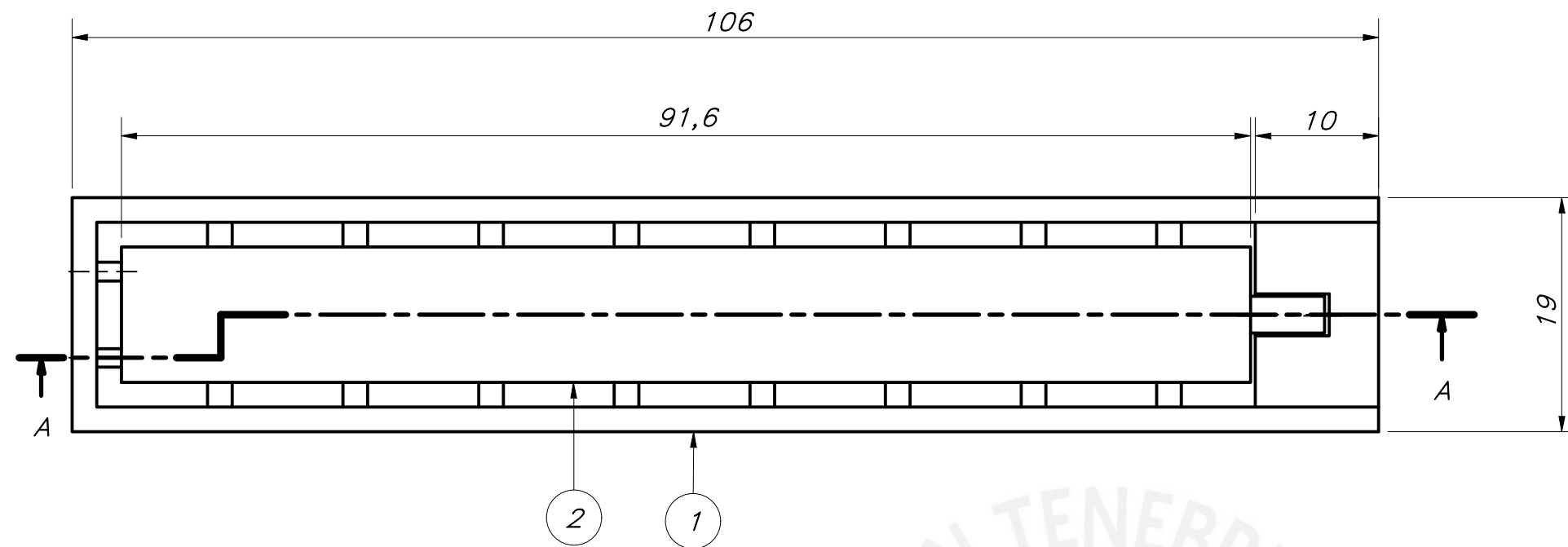


CORTE A-A

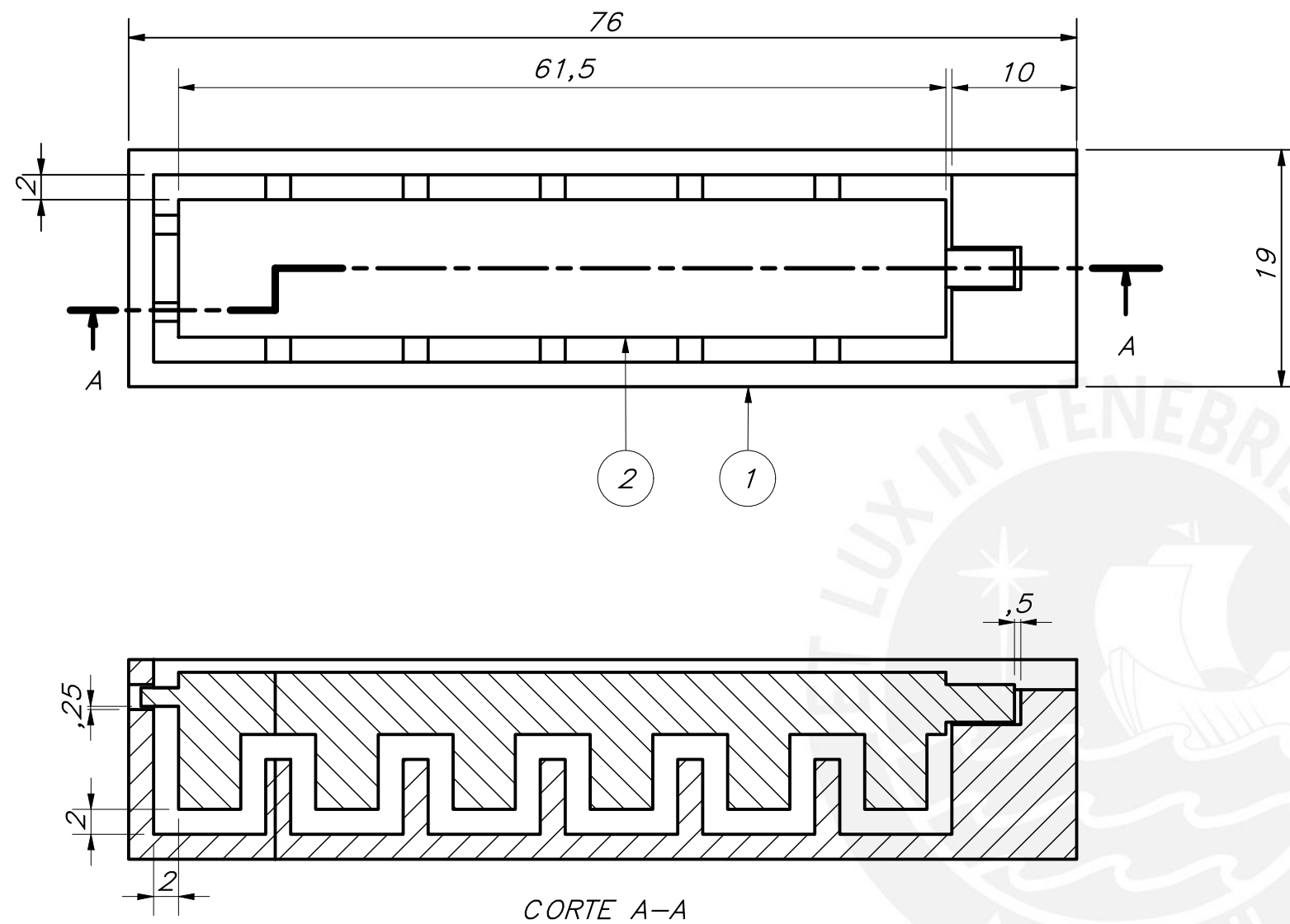
PARTS LIST					
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
2	1	MOLDE DEDO INDICE TAPA	ISO 2768	PLA	PD - 004 -A3
1	1	MOLDE DEDO INDICE FONDO	ISO 2768	PLA	PD - 003 -A3
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA					
MÉTODO DE PROYECCIÓN					ESCALA
		MOLDE DEDO ÍNDICE			2:1
20166256		LÓPEZ JUNCHAYA, ANDERS JEANPIERRE			FECHA: 2021.10.15
					LÁMINA: PE-002-A3



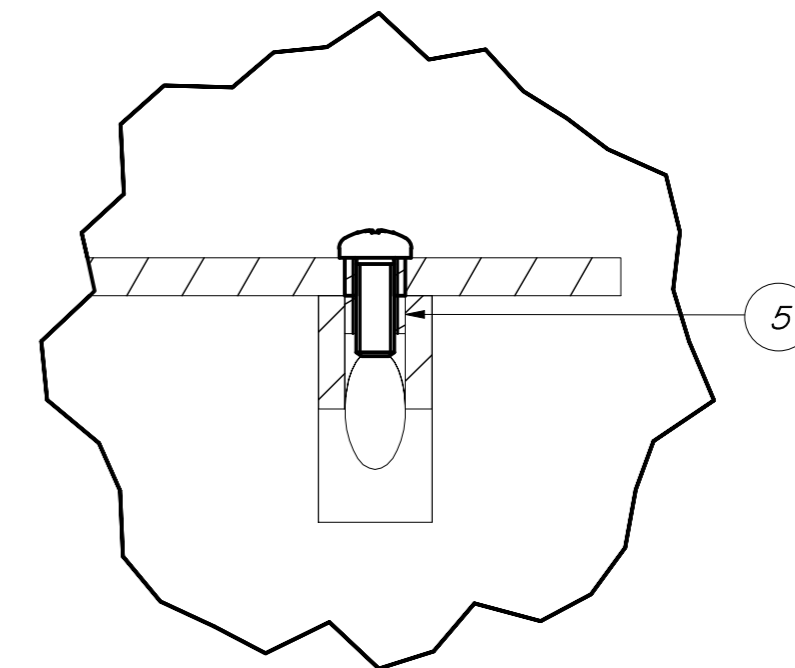
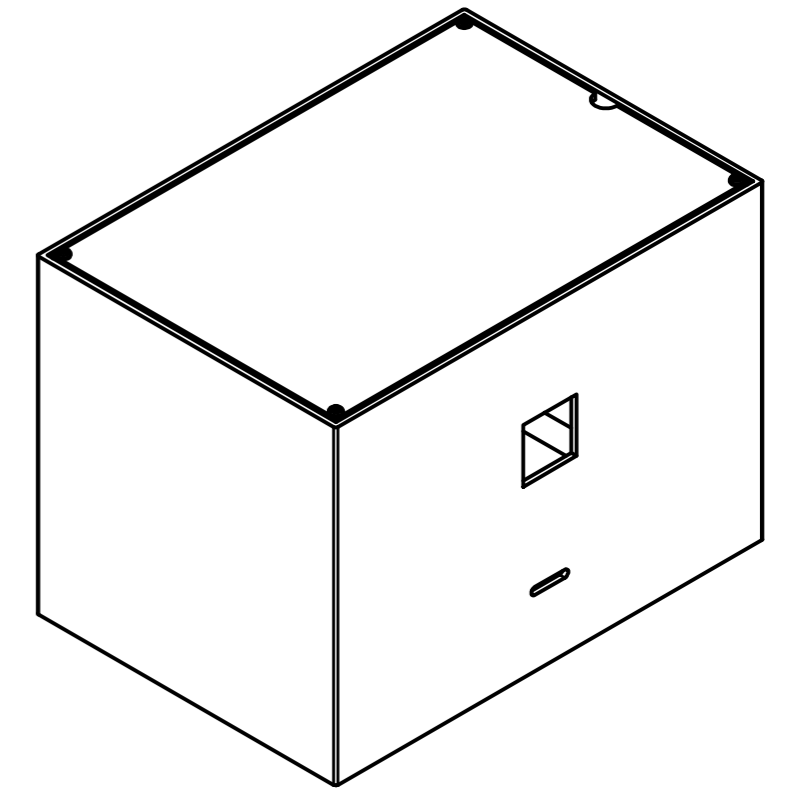
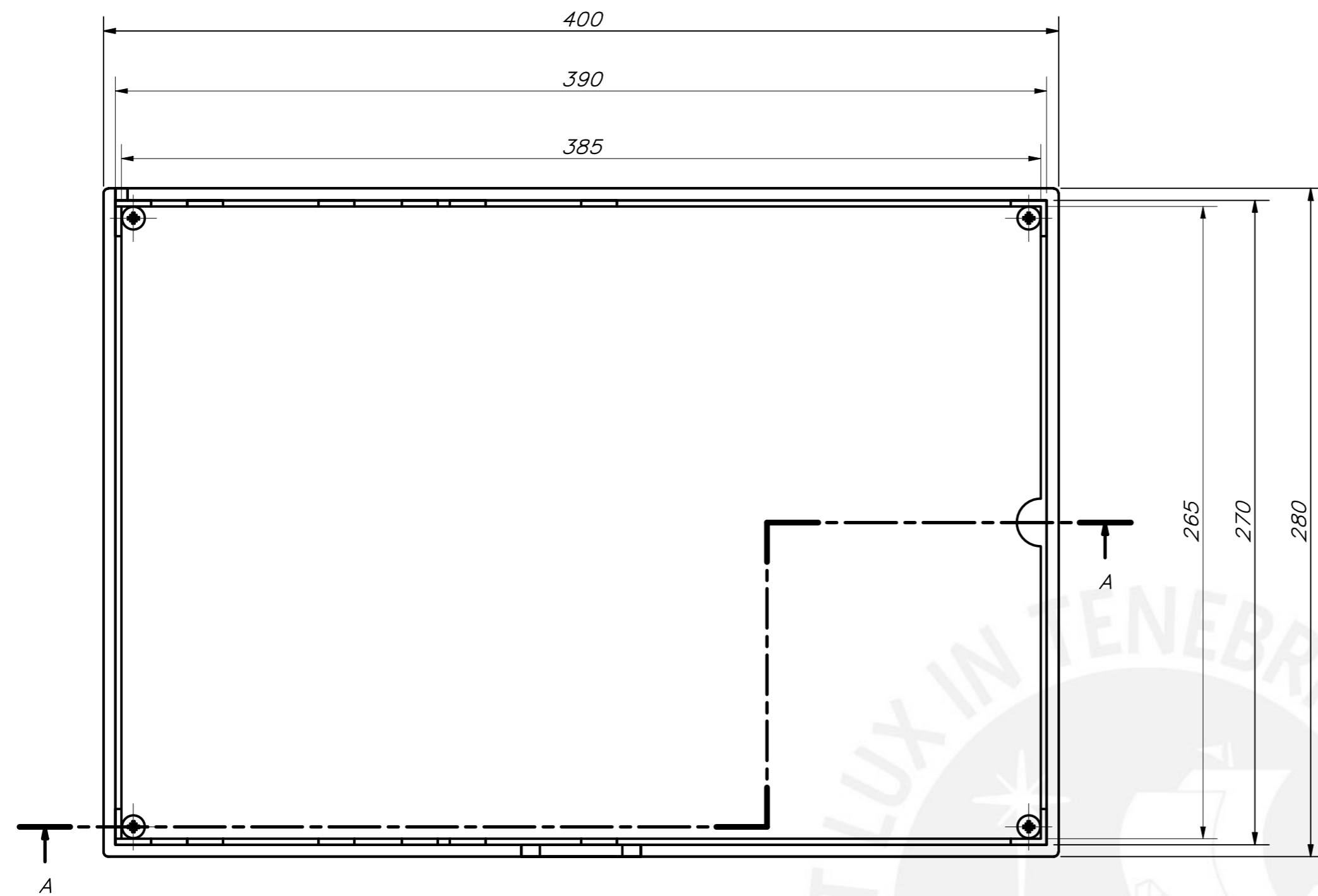
PARTS LIST					
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
2	1	MOLDE DEDO MEDIO TAPA	ISO 2768	PLA	PD - 006 - A3
1	1	MOLDE DEDO MEDIO FONDO	ISO 2768	PLA	PD - 005 - A3
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA					
MÉTODO DE PROYECCIÓN					ESCALA
		MOLDE DEDO MEDIO			2:1
20166256		LÓPEZ JUNCHAYA, ANDERS JEANPIERRE			FECHA: 2021.10.15
					LÁMINA: PE-003-A3



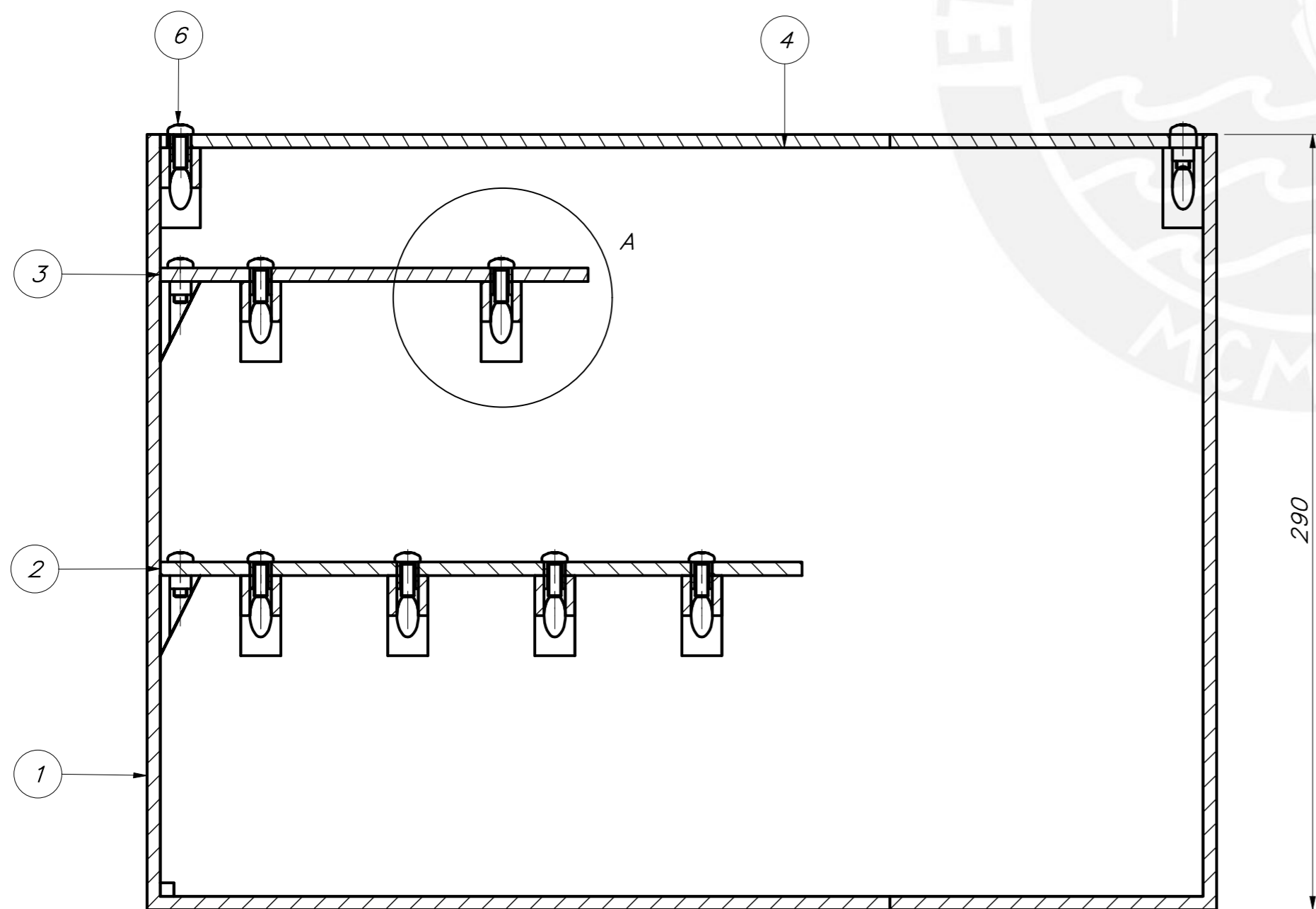
PARTS LIST					
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
2	1	MOLDE DEDO ANULAR TAPA	ISO 2768	PLA	PD - 008 - A3
1	1	MOLDE DEDO ANULAR FONDO	ISO 2768	PLA	PD - 007 - A3
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA					
MÉTODO DE PROYECCIÓN					ESCALA
		MOLDE DEDO ANULAR			2:1
20166256		LÓPEZ JUNCHAYA, ANDERS JEANPIERRE			FECHA: 2021.10.15
					LÁMINA: PE-004-A3



PARTS LIST					
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
2	1	MOLDE DEDO MEÑIQUE TAPA	ISO 2768	PLA	PD - 009 - A3
1	1	MOLDE DEDO MEÑIQUE FONDO	ISO 2768	PLA	PD - 010 - A3
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA					
MÉTODO DE PROYECCIÓN					ESCALA
		MOLDE DEDO MEÑIQUE			2:1
20166256		LÓPEZ JUNCHAYA, ANDERS JEANPIERRE			FECHA: 2021.10.15
					LÁMINA: PE-005-A3



DETALLE A
ESCALA 1 : 1

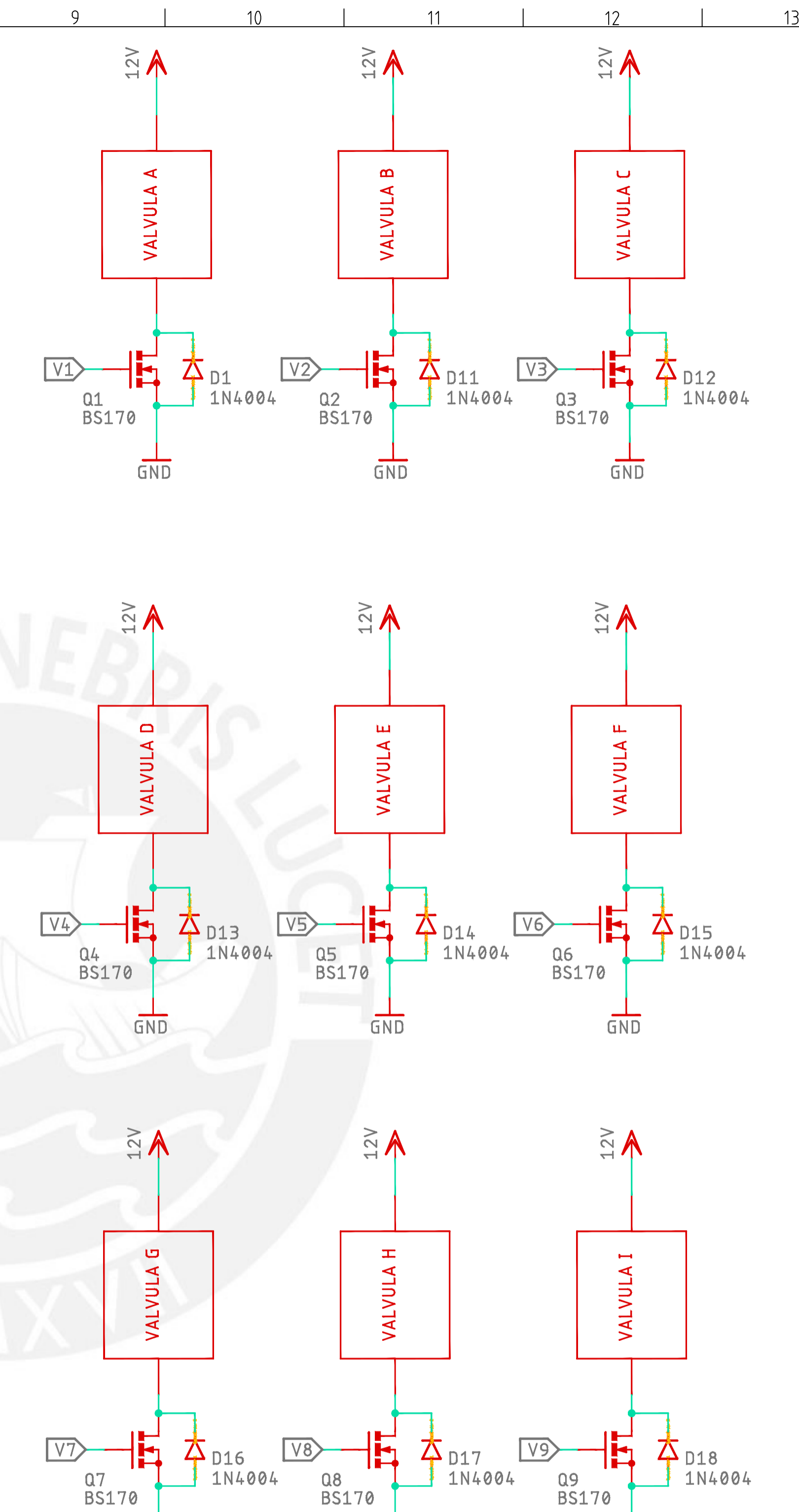
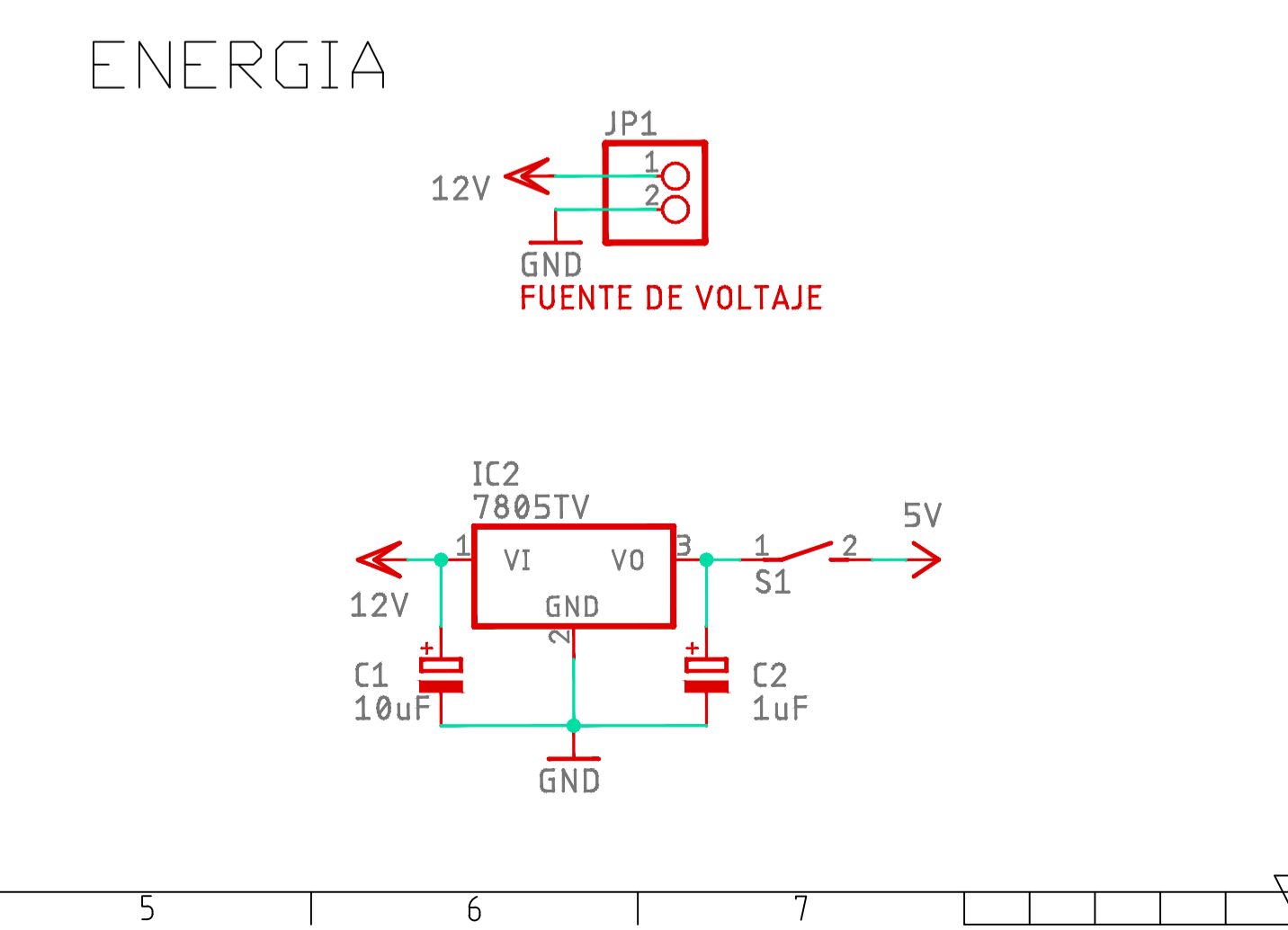
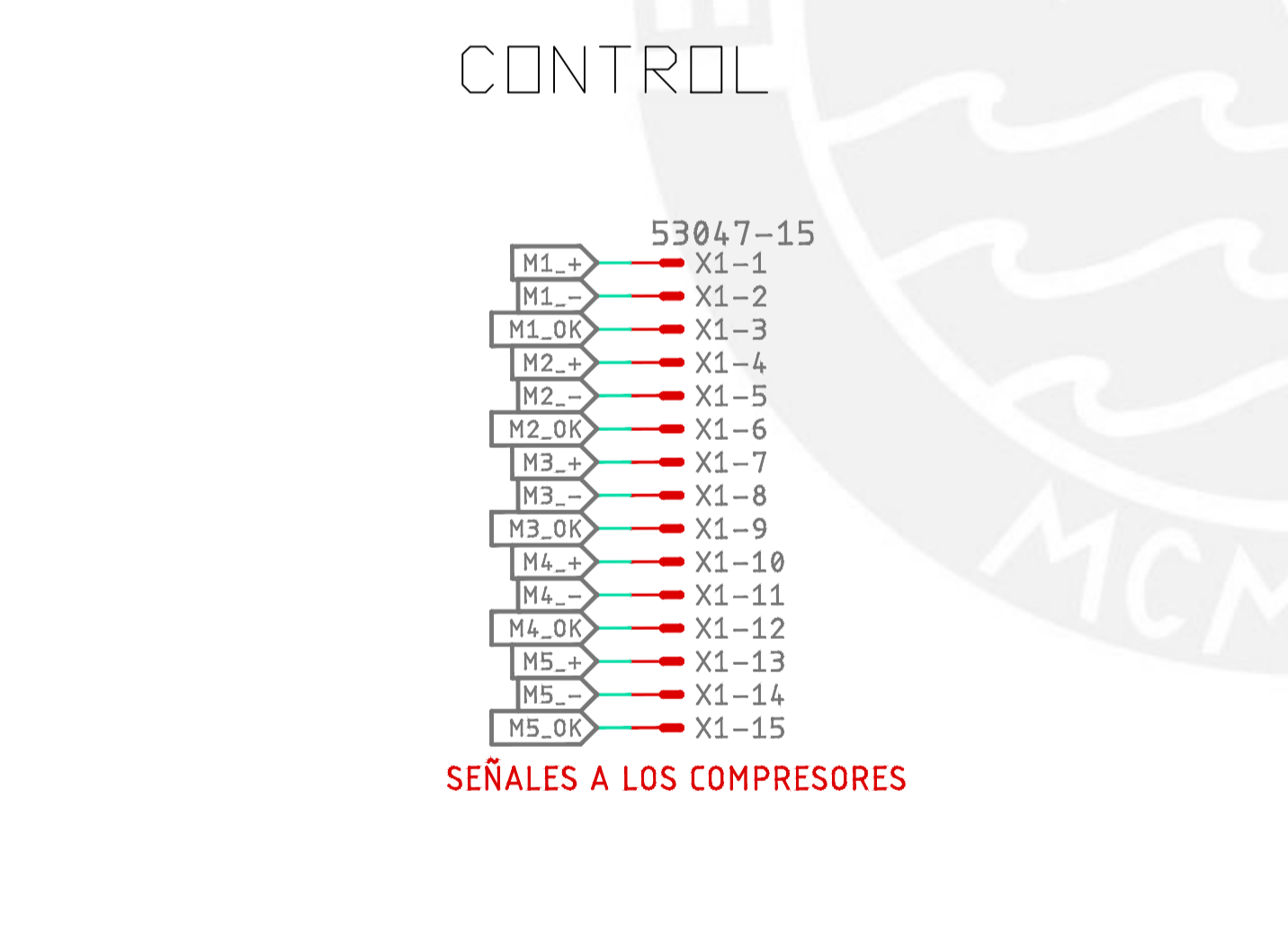
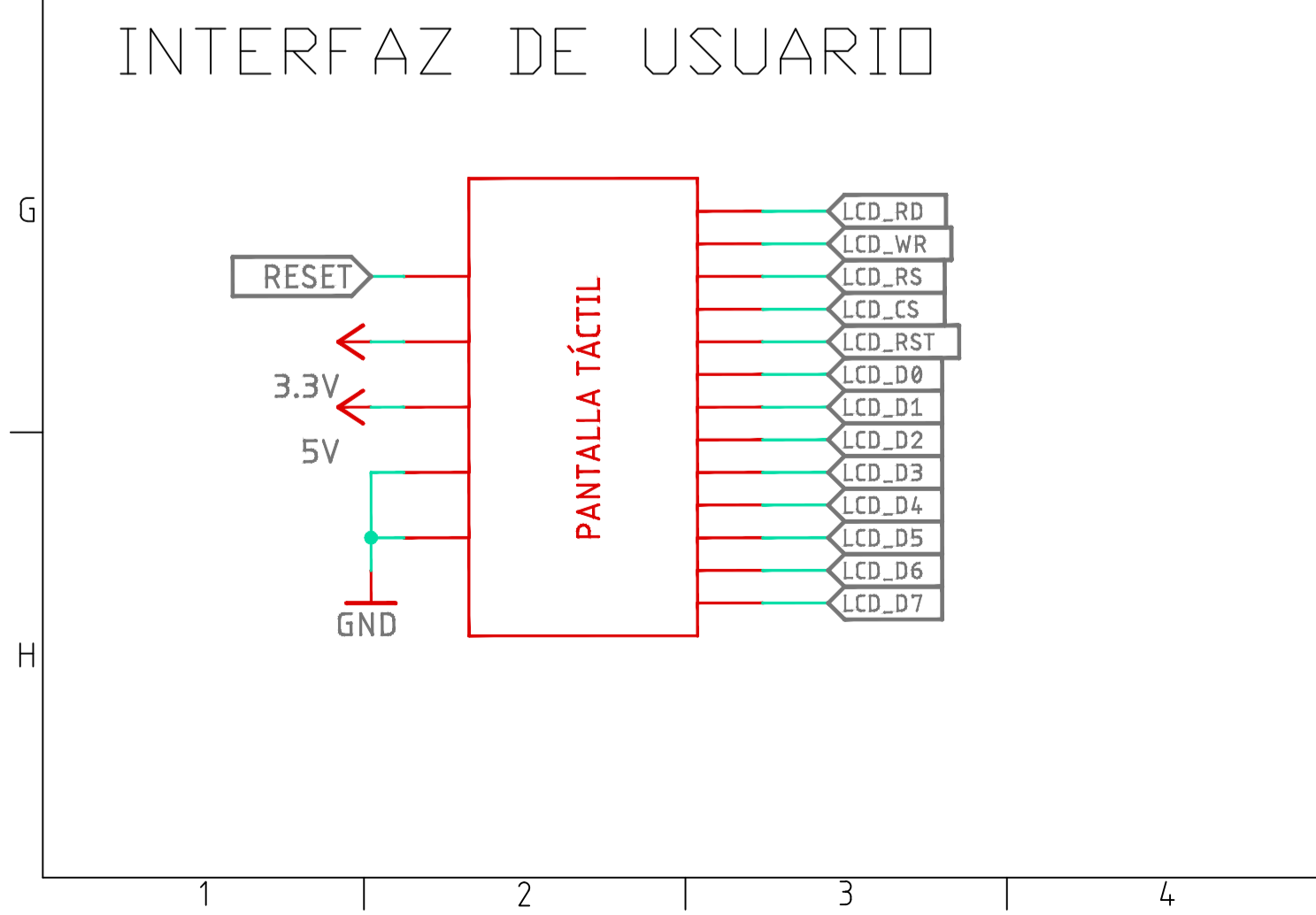
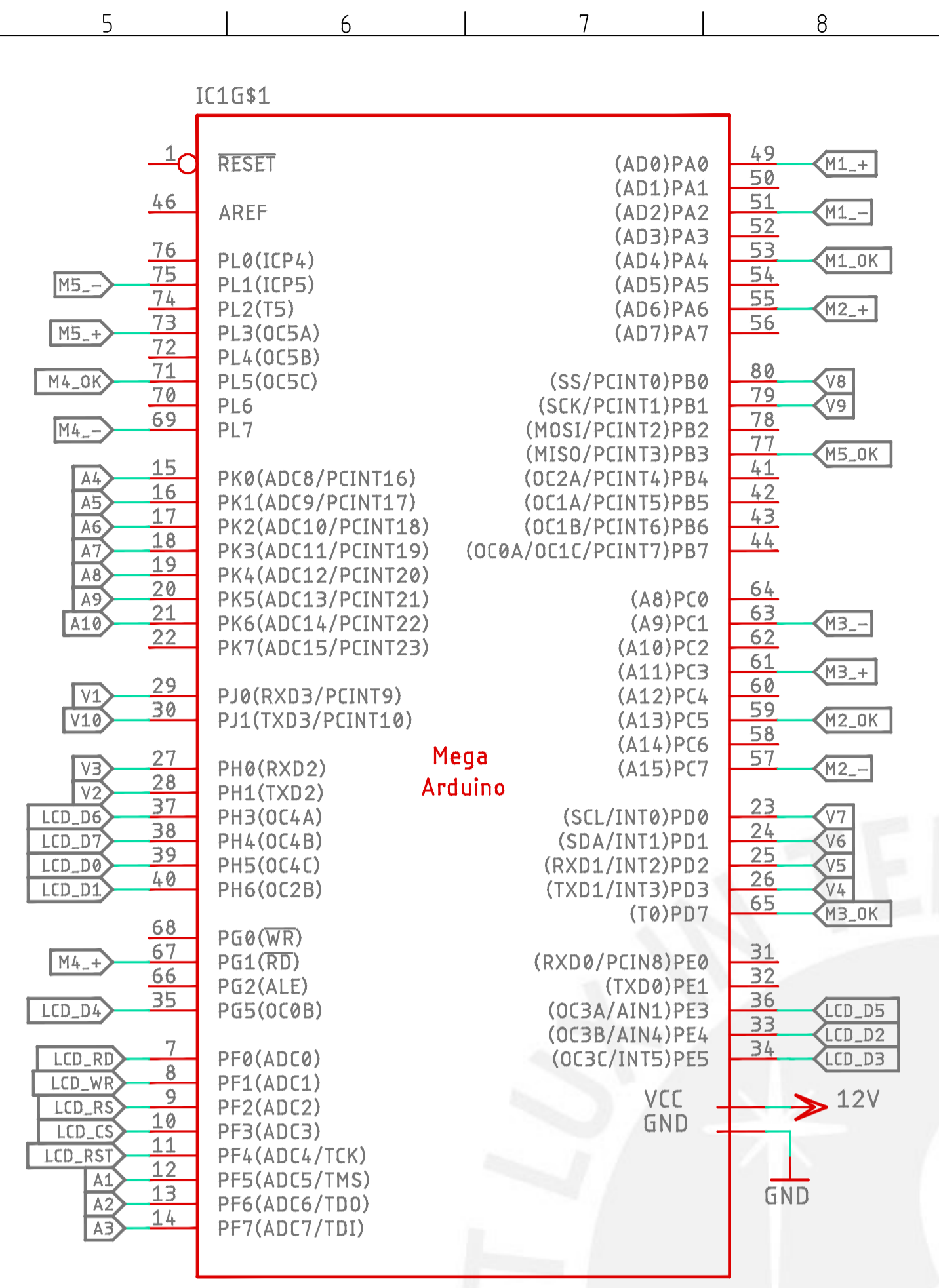
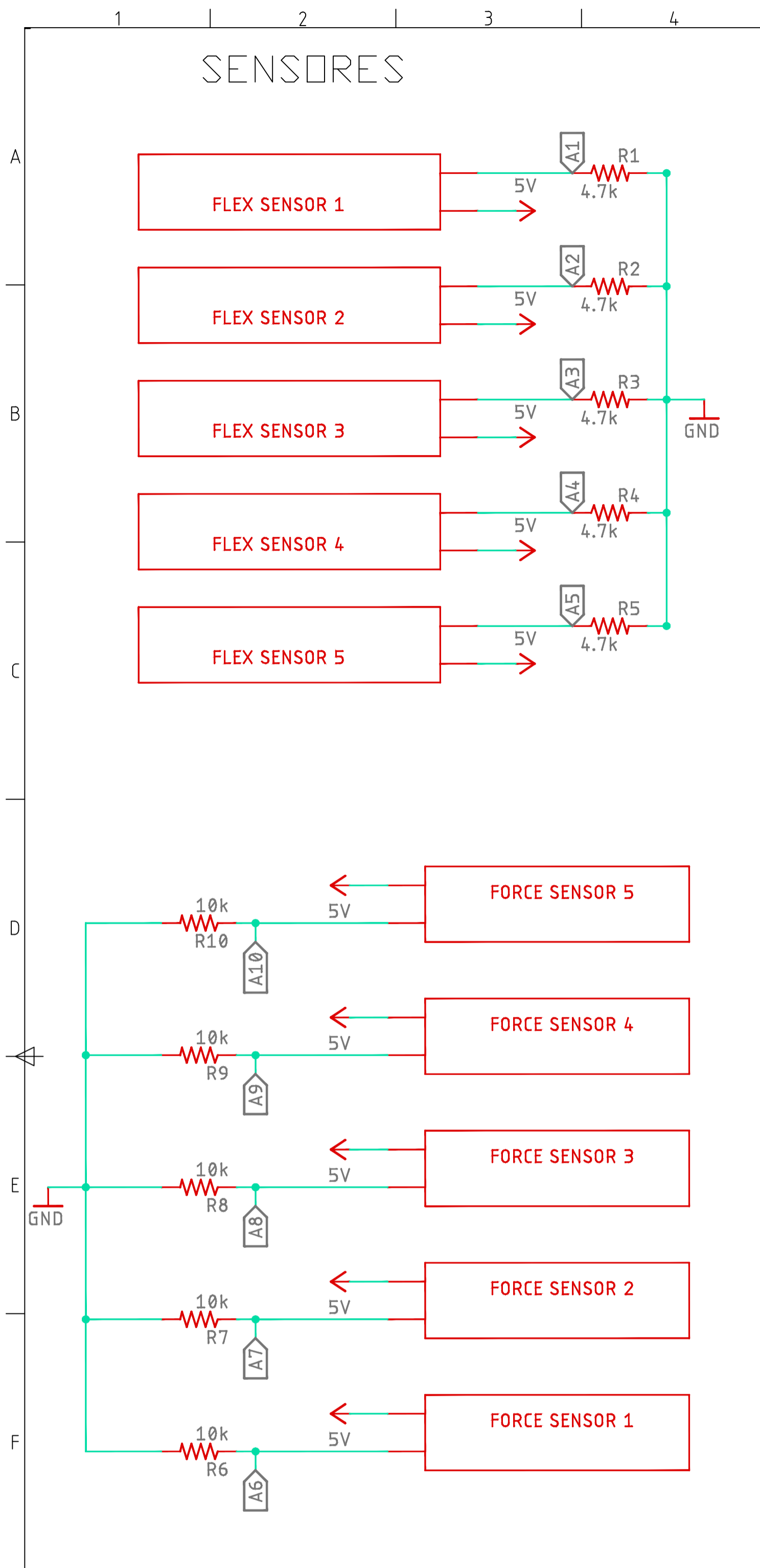


CORTE A-A

PARTS LIST					
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
6	24	ANSI B18.6.7M - M5x0.8 x 13, CRPHMSTIM	ANSI B18.6.7M	Steel, Mild	
5	48	ROSCA HEMBRA MOLETEADA		Latón	
4	1	TAPA DE LA CAJA	ISO 2768	PLA	PD-015-A3
3	1	SEGUNDO NIVEL	ISO 2768	PLA	PD-014-A3
2	1	PRIMER NIVEL	ISO 2768	PLA	PD-013-A3
1	1	ESTRUCTURA DE LA CAJA	ISO 2768	PLA	PD-012-A1

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
CIENCIAS E INGENIERIA - INGENIERIA MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN	ESCALA
	ESCALA 1:2
20166256	LÓPEZ JUNCHAYA, ANDERS JEANPIERRE
	FECHA: 2021.11.27 LÁMINA: PE-006-A2



CANTIDAD	COMPONENTE	UBICACION
10	Diodo 1N4004	A9 - H13
10	MOSFET BS170	A9 - H13
10	Valvula Solenoide 12V	A9 - H13
1	Fuente de voltaje conmutable 12V 5A	G6 - G7
5	Resistencia 10k	D1 - F4
5	Sensor de fuerza FSR402	D1 - F4
1	Arduino Mega	A5 - D8
1	Pinheader 15 pines	E6 - F7
1	Regulador de voltaje LM7805	H6 - H7
1	Switch	H6 - H7
1	Capacitor 10 uF	H6 - H7
1	Capacitor 1 uF	H6 - H7
5	Resistencia 4k7	A1 - C4
5	Flex Sensor 2.2"	A1 - C4
1	Shield TFT LCD 3.5"	G1 - H4