

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO DE EXTREMIDADES MÓVILES PARA ROBOT DE
TELEPRESENCIA EN HOSPITALES**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniera Mecatrónica

AUTORA:

Fiorella Adrianna Urbina Garro

ASESOR:

Diego Martín Arce Cigüeñas

Lima, Marzo, 2022

Informe de Similitud

Yo, Diego Martin Arce Cigüeñas, 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 EXTREMIDADES MÓVILES PARA ROBOT DE TELEPRESENCIA EN HOSPITALES", del autor Fiorella Adrianna Urbina Garro, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 10%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 22/12/2023.
- 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, 16 de Febrero del 2023

Apellidos y nombres del asesor: Arce Cigüeñas, Diego Martin	
DNI: 46726472	Firma 
ORCID: 0000-0002-7350-1709	

RESUMEN

Las características de interacción de un robot social son de gran importancia, en especial cuando su desempeño depende de generar confianza con el usuario; este es el caso de un robot de telepresencia para diagnóstico psicológico en hospitales. Sabiendo que muchas alternativas actuales no cuentan con rasgos atractivos o familiares que incentiven su uso, este trabajo de tesis tiene como objetivo desarrollar el diseño de un sistema de brazos y cabeza móviles de un robot de telepresencia para diagnosticar y tratar afecciones mentales en hospitales de Perú, como parte de la investigación del Proyecto Concytec 160-2020. Dicho diseño tendrá como fin incrementar la aceptabilidad del robot brindándole expresividad a través de rasgos y movimientos semejantes al humano.

El diseño final consta de cuatro grados de libertad en el brazo y dos grados de libertad en la cabeza actuados por servomotores de disco que transmiten de forma directa y por correas dentadas. Las articulaciones están unidas por planchas y piezas impresas para otorgar una forma antropomórfica, con medidas de una persona peruana de estatura promedio de 1.65 m (hombro-codo de 33 cm, codo-muñeca de 25 cm y una cabeza proporcional a la altura de 20 cm). Además, se agregaron otros aspectos de expresividad como iluminación de los ojos por matrices led y señales de audio a través de parlantes. Finalmente, se realizaron pruebas de funcionamiento mediante la implementación del prototipo de un brazo con piezas fabricadas mediante impresión 3D.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a todos los que, con sus conocimientos, consejos o arte, me han motivado a seguir esforzándome en mi desarrollo personal y profesional. En especial, agradezco infinitamente a mis padres, por su confianza, comprensión, cariño y apoyo incondicional desde siempre. A mi abuela, por todo el esfuerzo entregado a mantener el bienestar de la familia, y quien es mi principal ejemplo de constancia y dedicación. A mi hermana, mi mejor amiga, por acompañarme en tantos momentos especiales y divertidos. A los amigos que he hecho durante este tiempo de estudio, de quienes he aprendido mucho y he compartido momentos inolvidables de la vida universitaria. A mis profesores que, transmitiendo sus conocimientos y consejos, nos brindan grandes oportunidades y aportan al desarrollo de la investigación y tecnología en el país.

A CONCYTEC y su programa PROCIENCIA por brindar los fondos para el desarrollo de esta tesis, que forma parte del proyecto 160-2020 - Robot Móvil Teleoperado para Manejo de Afecciones de Salud Mental en Pacientes con Enfermedades Infecciosas.



INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE CONTENIDO.....	4
INDÍCE DE TABLAS	7
INDICE DE FIGURAS.....	9
INTRODUCCIÓN	14
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES AL DISEÑO.....	16
1.1 Problemática	16
1.2 Presentación de la propuesta.....	19
1.3 Objetivos.....	19
1.4 Alcance	20
1.5 Metodología.....	20
CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE.....	22
2.1 Interacción humano robot	22
2.1.1 Efecto de las características estéticas	22
2.1.2 Concepto de Valle Inquietante	23
2.1.3 Datos antropométricos en Perú.....	24
2.2 Cabeza robótica.....	26
2.2.1 iCub	27
2.2.2 Romeo.....	27
2.2.3 Reachy	28
2.2.4 Inmoov.....	29
2.2.5 Tabla comparativa de cabezas robóticas	29
2.3 Brazos robóticos antropomórficos	30
2.3.1 Reachy	31
2.3.2 LIMS2-AMBIDEX.....	32
2.3.3 Modular Prosthetic Limb.....	33
2.3.4 Tabla comparativa de brazos robóticos antropomórficos.....	34
2.4 Sistemas comerciales de robots con extremidades.....	34
2.4.1 ARI	34
2.4.2 Quori.....	35
2.4.3 Pepper	36
2.4.4 Tabla comparativa de sistemas comerciales.....	37
CAPÍTULO 3 DISEÑO CONCEPTUAL.....	38
3.1 Requerimientos del sistema.....	38
3.2 Definición de entradas y salidas:.....	40

3.3 Estructura de funciones	41
3.4 Matriz morfológica.....	48
3.5 Concepto solución óptimo.....	50
CAPÍTULO 4 DISEÑO MECATRÓNICO	55
4.1 Descripción del sistema integrado	55
4.2 Subsistema de brazos	57
4.2.1 Elementos de transmisión y movimiento.....	58
4.2.2 Modelo cinemático	65
4.2.3 Diseño externo de brazos.....	68
4.3 Subsistema de cabeza.....	69
4.3.1 Elementos de movimiento	70
4.3.2 Sistema de luz y sonido	72
4.3.3 Diseño externo de cabeza móvil.....	75
4.4 Subsistema de energía.....	76
4.4.1 Selección de baterías	77
4.4.2 PCB de alimentación	78
4.5 Subsistema de control y comunicación	79
4.5.1 Interfaz de desarrollador.....	79
4.5.2 Microcontrolador	80
4.5.3 Módulos de comunicación.....	81
4.5.4 Protocolos de comunicación.....	82
4.5.5 Software de sistema embebido	88
4.5.6 PCB de control.....	95
4.6 Planos mecánicos y electrónicos.....	99
CAPÍTULO 5 IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO Y PRUEBAS DE VALIDACIÓN	101
5.1 Prueba de control de motores.....	101
5.2 Prueba de consumo de corriente	102
5.3 Prueba ejecución de comandos para el brazo.....	104
CAPÍTULO 6 PRESUPUESTO	107
6.1 Costo de Materiales.....	107
6.2 Costo de Componentes.....	110
6.3 Presupuesto total	111
CONCLUSIONES	112
RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	114
BIBLIOGRAFÍA	115
ANEXOS	120

ANEXO A: Lista de requerimientos.....	120
ANEXO B: Matriz morfológica	123
ANEXO C: Conceptos Solución	128
ANEXO D: Evaluación Técnico-Económica	133
ANEXO E: Motores GYEMS	141
ANEXO F: Cálculo de torques requeridos en motores del brazo.....	143
ANEXO G: Simulación de resistencia de piezas estructurales del brazo.....	145
ANEXO H: Tablas de selección de correas.....	149
ANEXO I: Cálculo del diámetro del eje del codo y verificación por fatiga...	151
ANEXO J: Presupuesto	155
ANEXO K: Planos Mecánicos	162
ANEXO L: Planos Electrónicos	211



INDÍCE DE TABLAS

Tabla 2.1 Perfil antropométrico de la población peruana	25
Tabla 2.2 Dimensiones antropométricas proporcionales a 165 cm.	26
Tabla 2.3 Rangos de movimiento del cuello humano	27
Tabla 2.4 Comparación de 4 sistemas de cabeza robótica	30
Tabla 2.5 Rangos de movimiento del brazo humano	30
Tabla 2.6 Comparación de características de 3 sistemas de brazos	34
Tabla 2.7 Comparación de características de 3 sistemas comerciales	37
Tabla 3.1 Conceptos solución Subsistema Brazos.	48
Tabla 3.2 Conceptos solución Subsistema Cabeza.	48
Tabla 3.3 Conceptos solución Subsistema General.	49
Tabla 4.1 Tabla comparativa de motores para articulaciones del brazo	59
Tabla 4.2 Resultados de simulación de esfuerzos de piezas estructurales	60
Tabla 4.3 Valores de esfuerzo flector y torsor en el eje	64
Tabla 4.4 Parámetros Denavit-Hatemberg	66
Tabla 4.5 Especificaciones de motor RMD S9015	70
Tabla 4.6 Comparativa entre matrices Led.	73
Tabla 4.7 Tabla comparativa de parlantes.	73
Tabla 4.8 Tabla comparativa de módulos mp3.	74
Tabla 4.9 Tabla comparativa de amplificadores de audio.	75
Tabla 4.10 Resultados de pruebas de consumo de corriente de cada motor en reposo, movimiento y posición crítica.	77
Tabla 4.11 Cálculo del consumo total estimado por componente del sistema.	77
Tabla 4.12 Comparación de tarjetas de desarrollo con microcontrolador	80
Tabla 4.13 Comparación de Módulos de comunicación CAN.	81
Tabla 4.14 Comparación de Módulos de comunicación USB a TTL.	82
Tabla 4.15 comandos enviados por la computadora principal	83
Tabla 4.16 comandos enviados por el controlador del sistema	84
Tabla 4.17 Formato de trama serial para DFPlayer	84
Tabla 4.18 Comandos DFPlayer empleados	85
Tabla 4.19 Comando para mover a determinado ángulo	86
Tabla 4.20 Comando para solicitar lectura de ángulo	86
Tabla 4.21 Respuesta de servomotor para el comando 0x92	86
Tabla 4.22 Comando para solicitar estado del motor	87
Tabla 4.23 Respuesta de servomotor para el comando 0x92	87

Tabla 4.24 Formato de trama serial para MAX7219	87
Tabla 4.25 Códigos hexadecimales para cada dirección	88
Tabla 4.26 Lista de Planos Mecánicos.	99
Tabla 4.27 Lista de Planos Electrónicos.	100
Tabla 5.1 Corriente total consumida en posiciones críticas del brazo	104
Tabla 6.1 Datos empleados para el cálculo de costo de impresión.....	108
Tabla 6.2 Costo estimado de impresión de piezas en PLA	109
Tabla 6.3 Precios de componentes electrónicos	110
Tabla 6.4 Precios de componentes mecánicos	111
Tabla 6.5 Presupuesto total	111



INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Robots de interacción con adultos mayores	18
Figura 1.2 Robot ARI	19
Figura 2.1 Gráfico del Valle Inquietante	24
Figura 2.2 Proporciones de la cabeza	25
Figura 2.3 Mecanismo de Cabeza de iCub	27
Figura 2.4 Configuración de cabeza y ojos de Romeo	28
Figura 2.5 Cabeza de robot Reachy	29
Figura 2.6 Cabeza de robot InMoov	29
Figura 2.7 Velocidad y aceleración angulares de cada GDL del brazo humano.	31
Figura 2.8 Brazo y visualización en interfaz de Reachy	32
Figura 2.9 Sistema IMS2-Ambidex	33
Figura 2.10 Modular Prosthetic Limb	33
Figura 2.11 Robot ARI	35
Figura 2.12 Robot Quori	36
Figura 2.13 Robot Pepper	37
Figura 3.1 Black box.	41
Figura 3.2 Dominio Energía.	41
Figura 3.3 Dominio Mecánico.	42
Figura 3.4 Dominio Actuadores.	43
Figura 3.5 Dominio Sensores.	44
Figura 3.6 Dominio Control.	44
Figura 3.7 Dominio Comunicación.	45
Figura 3.8 Dominio Interfaz.	45
Figura 3.9 Estructura de funciones del sistema	47
Figura 3.10 Diagrama de operaciones para la instalación.	51
Figura 3.11 Diagrama de operaciones para el uso.	52
Figura 3.12 Diagrama de bloques del sistema.	53
Figura 3.13 Diagrama de flujo del sistema.	54
Figura 4.1 Sistema integrado	56
Figura 4.2 Secuencias de movimientos con brazos	56
Figura 4.3 Secuencias de movimientos y expresiones de la cabeza	57
Figura 4.4 Subsistema de brazos	57
Figura 4.5 Esquema de brazo extendido con sus 4 motores	58

Figura 4.6 Casos a evaluar para diseño del eje	62
Figura 4.7 DCL caso 1	63
Figura 4.8 Especificaciones rodamiento de bolas SKF 16802	65
Figura 4.9 Diagrama cinemático del brazo	66
Figura 4.10 Vista explotada	69
Figura 4.11 Carcasas del brazo y hombro ensambladas.	69
Figura 4.12 Subsistema de Cabeza.	70
Figura 4.13 Mecanismo de 2 GDL de la cabeza	71
Figura 4.14 Especificaciones del rodamiento SKF 51109	72
Figura 4.15 Diseño externo de cabeza móvil.	76
Figura 4.16 Diagrama de conexiones de subsistema de energía.	76
Figura 4.17 Circuito impreso de alimentación.	79
Figura 4.18 Interfaz gráfica de usuario	80
Figura 4.19 Esquema de comunicación entre microcontrolador, computadora y periféricos.	82
Figura 4.20 Diagrama de flujo: Programa principal	89
Figura 4.21 Diagrama de flujo: Inicialización de variables	90
Figura 4.22 Diagrama de flujo: Función de interrupción	91
Figura 4.23 Diagrama de flujo: Decodificación de comandos	92
Figura 4.24 Diagrama de flujo: Selección de modo de control de motores	93
Figura 4.25 Diagrama de flujo: Selección de audio y figura en matrices	94
Figura 4.26 Diagrama de flujo: Comandos para control de motores vía CAN	94
Figura 4.27 Diagrama de flujo: Grabación de posición.	95
Figura 4.28 Diagrama de conexiones sistema de audio	96
Figura 4.29 Diagrama de conexiones de comunicación CAN Comunicación	96
Figura 4.30 Diagrama de conexiones de matrices LED en cascada	97
Figura 4.31 Capas inferior y superior del circuito impreso de Control y Comunicación	97
Figura 4.32 Vista general del circuito impreso de Control y Comunicación	98
Figura 4.33 Modelo 3D de PCB de Control y Comunicación para tarjeta Nucleo ...	98
Figura 4.34 Distribución de componentes electrónicos en el Sistema.	99
Figura 5.1 Prueba de comunicación con dos motores.	102
Figura 5.2 Motor de GDL 4 a 90°	103
Figura 5.3 Motor de GDL 2 a 90°	103
Figura 5.4 Motor de GDL 1 a 90°	103
Figura 5.5 Medición de consumo de corriente de matrices LED.	104

Figura 5.6 Sección de Comandos en Interfaz de desarrollo	105
Figura 5.7 Brazo ejecutando secuencia de saludo.....	105
Figura 5.8 Brazo ejecutando secuencia de Señalar Pantalla	106
Figura 6.1 Interfaz de programa Prusa Slicer.....	108



GLOSARIO DE ABREVIATURAS

3D	:	Tridimensional
CAN	:	Controller Area Network (Bus CAN, Red de área controlada)
CMD	:	Comando
Concytec:		Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica
COVID-19:		Coronavirus disease 2019 (Enfermedad por coronavirus 2019)
DC	:	Direct Current (Corriente Directa)
FAA	:	Federal Aviation Administration (Administración Federal de Aviación de Estados Unidos)
GDL	:	Grados de Libertad
GPIO	:	General Purpose Input/Output (Entrada/Salida de propósito general)
ID	:	Identificador
INEI	:	Instituto Nacional de Estadística e Informática
IPC	:	Institute of Printed Circuits (ahora IPC International Inc)
LAeq	:	Nivel de sonido continuo equivalente
LCD	:	Liquid-Crystal Display (Pantalla de cristal líquido)
LED	:	Light-Emitting Diode (Diodo emisor de luz)
MINSA:		Ministerio de Salud del Perú
MP3	:	MPEG-1 Audio Layer III (formato de compresión de audio)
PCB	:	Printed Circuit Board (Placa de circuito impreso)
PID	:	Control Proporcional, integral y derivativo
PLA	:	Polylactic acid (Ácido poliláctido)
RGB	:	Red-Green-Blue (Rojo, verde y azul)
SD	:	Secure Digital (Tarjeta SD)
SPI	:	Serial Peripheral Interface (Bus SPI, Interfaz periférica serial)

- TTL : Transistor-Transistor Logic (Lógica transistor a transistor)
- UART : Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (Transmisor-receptor asíncrono universal)
- USART: Universal Synchronous/Asynchronous Receiver-Transmitter (Transmisor-receptor síncrono/asíncrono universal)
- USB : Universal Serial Bus (Bus Universal en Serie)
- VDI : Verein Deutscher Ingenieure (Asociación de Ingenieros Alemanes)



INTRODUCCIÓN

La pandemia de COVID-19 ha puesto en evidencia el impacto del aislamiento en la salud mental de los pacientes con enfermedades infecciosas. Debido al acceso restringido en hospitales, una de las soluciones para el diagnóstico y tratamiento psicológico de forma remota son los robots de telepresencia; sin embargo, se sabe que existe un bajo grado de familiarización con los modelos convencionales (Isabet et al., 2021). En este trabajo de tesis se lleva a cabo el diseño de brazos y cabeza móviles para brindar expresividad a un robot de telepresencia para hospitales de Perú, a fin de mejorar la interacción con el usuario. La investigación realizada forma parte del Proyecto Concytec 160-2020.

En el primer capítulo se describe la problemática general y específica brindando ejemplos y referencias sobre la aceptabilidad de robots de telepresencia actuales, por las cuales se llega a la propuesta de implementar un sistema de extremidades humanoides. Así mismo, se presentan los objetivos generales y específicos en base a la metodología VDI 2206 para el diseño de sistemas mecatrónicos. Además, se limita el alcance del presente trabajo, el cual se extenderá hasta la obtención de un concepto de solución óptimo.

En el segundo capítulo se presentan criterios de diseño sobre la interacción humano-robot, específicamente de robots humanoides. Para asemejar las dimensiones a las de una persona de 1.65 m también se investiga sobre los datos antropométricos de los peruanos. Posteriormente se desarrolla el estado del arte describiendo los aspectos técnicos y sociales de tres tecnologías representativas por cada subsistema (brazos y cabezas robóticas), y del sistema en general. Además, se mencionan sus características anatómicas, de las cuales se determinan los grados de libertad mínimos para el movimiento y la configuración de las extremidades.

En el tercer capítulo se definen las especificaciones y se desarrolla el diseño conceptual del sistema, comenzando por la definición de sus funciones y listado de tecnologías convenientes en una matriz morfológica. Posteriormente se evalúan tres alternativas

de solución para llegar al concepto óptimo, que consta de 4 Grados de libertad (GDL) en los brazos y 2 en la cabeza, expresividad en los ojos por medio de matrices led y uniones basadas en planchas y piezas impresas en 3D. También se realizan diagramas de bloques, de operación, y de flujo para describir su funcionamiento.

En el cuarto capítulo se realiza el diseño mecatrónico de cada subsistema, especificando los cálculos y consideraciones tomadas, la selección de componentes y una descripción detallada del funcionamiento del software. Luego, en el capítulo cinco se muestra la implementación de un prototipo del brazo, así como las pruebas realizadas en cuanto a los comandos, la secuencia de movimientos y consumo de energía. En el sexto capítulo se elabora un presupuesto de los costos de materiales y componentes del sistema. Finalmente, en la última sección se presentan las conclusiones del trabajo, recomendaciones y trabajo futuro.



CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES AL DISEÑO

En este capítulo se presentará la problemática general y específica que abarca la tesis y se presentará la propuesta de solución que será desarrollada más adelante. Así mismo se mencionan los objetivos generales y específicos del trabajo y su alcance. Finalmente se describirá la metodología empleada y los pasos para seguirla.

1.1 Problemática

Problemática general

La atención de enfermedades infecciosas en hospitales es un tema de vital importancia dentro del sistema de salud nacional. Esto se ha evidenciado aún más con la llegada de la pandemia de COVID-19. Los pacientes que son detectados como casos positivos son trasladados a espacios separados y restringidos, donde el personal de salud debe seguir estrictos protocolos de seguridad y salubridad para evitar la propagación de la enfermedad. De ser casos moderados o severos, tienen que ser internados en una sala de aislamiento hospitalario (MINSA, 2020).

Un gran problema del aislamiento físico de los pacientes es la afectación de este entorno a su salud mental. Según un artículo de Mushtaq et al. en 2014, la ausencia de

relaciones sociales puede ocasionar en los pacientes un sentimiento de soledad. Ello sumado al ambiente de emergencia y la consciencia del riesgo que representa esta enfermedad para su salud, puede desembocar en serios problemas cognitivos, físicos, y sobre todo mentales.

La necesidad de minimizar el contacto físico entre pacientes y médicos para reducir el contagio también ha acelerado el desarrollo de tecnología de atención y asistencia remota en este sector. Sin embargo, la cuestión de la salud mental y el impacto de estas nuevas herramientas en la misma no se suele abordar con frecuencia. En este sentido, en la Pontificia Universidad Católica del Perú, se ha planteado un proyecto enfocado en el manejo de afecciones de salud mental en pacientes con enfermedades infecciosas, a través del desarrollo de un robot de telepresencia especial para esta función.

Problemática específica

Uno de los grupos con mayor incidencia de hospitalización por COVID-19 son personas de la tercera edad, motivo por el cual es relevante conocer el impacto que han tenido este tipo de tecnologías en ellas. Se han realizado diversos estudios de aceptabilidad para robots de telepresencia orientados a resolver problemas de aislamiento y monitoreo de salud en esta población, obteniendo diferentes resultados.

Por ejemplo, Park (2013) demostró que la actitud, motivación y percepción de los participantes tiene mayor efecto en su intención de uso. Estos factores también se vieron disminuidos en el estudio de Wu et al. (2014), donde los participantes no percibían el dispositivo como útil para ellos. Por otro lado, también existen referencias positivas, como el robot Giraff (figura 1.1 a). Este robot fue estudiado en Australia por Moyle et al. (2014), y mostró un *engagement* (interacción o compromiso) del 93% al hacer posible la comunicación entre un grupo de pacientes con demencia y sus familias.

Sobre este último robot, también se realizó una exploración sobre las actitudes de profesionales de salud respecto al uso de dicha tecnología. En él se recopiló opiniones positivas con relación a la facilidad de comunicación remota, pero hubo preocupaciones respecto a la impersonalidad y falta de familiaridad con el dispositivo (Kristoffersson et al., 2011). Así mismo, se empleó a Giraff en un estudio que demostró

que incluso discapacidades psicosociales leves en adultos mayores afectan la aceptación de robots sociales complejos, pese a que en teoría están diseñados para suplir la necesidad de interacción social a distancia (Baisch et al., 2017).



a)

b)

Figura 1.1 Robots de interacción con adultos mayores a) Robot Giraff (New Atlas, 2013) b) Sistema Robot-Era (Cavallo et al., 2018)

Por lo general, los robots de telepresencia más utilizados, como Giraff, consisten en diseños relativamente simples: una pantalla colocada en un parante móvil, a través del cual es posible realizar videollamadas. Sin embargo, en un estudio con robots asistenciales, se resalta la importancia de las características antropomórficas y el tamaño de los robots para una buena familiarización de los usuarios. En este, 40 de los 45 adultos mayores entrevistados mencionaron que la presencia de la cabeza en los robots del sistema Robot-Era (figura 1.1 b) promovía la interacción con ellos (Cavallo et al., 2018).

Con relación a esto, un reporte técnico de la Universidad de Georgia menciona sobre la aceptabilidad de robots, que la apariencia juega un papel muy importante a la hora de presentar un nuevo dispositivo. Esto debido a que, ante la falta de datos más específicos, el aspecto puede proporcionar información que una persona evaluará dependiendo de su edad, personalidad o cultura. Asimismo, indica el impacto de las

diferentes características humanas en un robot (como la altura, la existencia de rasgos o extremidades, etc), dependiendo de factores como la edad o el género (Beer et al., 2011).

1.2 Presentación de la propuesta

Teniendo en cuenta la problemática anteriormente descrita, y los factores que pueden ayudar o restar a la aceptabilidad de un robot de telepresencia, este trabajo se enfocará en el diseño de extremidades móviles a nivel electromecánico para el robot. Ello le permitirá demostrar cierto grado de expresividad para lograr una mejor familiarización con los pacientes y mayor confianza del personal médico. En la Figura 1.2 se puede apreciar un modelo comercial como referencia de la integración del sistema planteado al proyecto general.



Figura 1.2 Robot ARI (Pal Robotics, s/f)

1.3 Objetivos

Objetivo general

Desarrollar e implementar un sistema de cabeza y brazos móviles para un robot de telepresencia de atención en hospitales de Perú. El sistema se ubicará en la parte superior del robot, por lo que el diseño debe ser liviano. Este debe ser capaz de realizar ciertos gestos semejantes a los de una persona, con el fin de mejorar la interacción humano-robot de pacientes con afecciones mentales.

Objetivos específicos

- Realizar una revisión del estado del arte de sistemas de extremidades robóticas y su aceptabilidad.
- Obtener el concepto de solución óptimo a partir de la evaluación de tres alternativas, diseñadas en función de una lista de exigencias y funciones requeridas para el sistema.
- Realizar el diseño mecánico y electrónico del sistema de extremidades a partir de cálculos de resistencia y energía. Como parte del diseño, se debe elaborar las secuencias para al menos 3 poses o expresiones en cada extremidad.
- Diseñar una interfaz de control para desarrolladores que permita seleccionar expresiones, controlar los actuadores manualmente y grabar nuevos movimientos.
- Realizar la estimación de costos de la implementación del sistema.
- Validar el diseño a través de la elaboración de un prototipo.

1.4 Alcance

En esta tesis se estudiará el estado del arte observando tanto las tecnologías empleadas, como las características que afectan su impacto social. Posteriormente se realizará una evaluación técnica económica de tres conceptos de solución propuestos en base a las funciones y componentes necesarios. Como resultado de la evaluación, se presentará el concepto de solución óptimo.

Una vez definido, en la segunda parte de este trabajo se realizarán los cálculos de dinámica y resistencia para el diseño mecánico, y cálculos de energía para verificar los requerimientos electrónicos. Con estos resultados se diseñará el sistema mecánico-eléctrico final. Luego se realizará el control mediante la estrategia seleccionada, y se diseñará la interfaz de control para desarrolladores. Finalmente, se realizará la evaluación de costos y validación de funcionamiento a través de un prototipo

1.5 Metodología

Se empleará una metodología basada en las normas VDI 2206 y VDI 2221, las cuales fueron ideadas para el diseño de sistemas mecatrónicos. Consiste en una serie de pasos

y herramientas que serán útiles para el diseño, su verificación y validación (Gausemeier & Moehringer, 2002). El primer paso para el desarrollo de la solución es elaborar un análisis de la problemática basado en los usuarios y personas involucradas en ella. Con esta información se definirán las tareas a realizar a través de una lista de requerimientos mínimos para el sistema.

El paso siguiente es determinar las funciones y subfunciones que necesita el sistema para cumplir con los requerimientos, las cuales se relacionan con los dominios del sistema mecatrónico en una estructura de funciones. Luego se buscan tecnologías que puedan cumplir con dichas funciones, para posteriormente integrarlas en diferentes combinaciones que resultarán en los conceptos de solución.

Cada alternativa propuesta se somete a una evaluación técnica-económica de acuerdo con el nivel de satisfacción de los requerimientos de cada una, entre otros criterios de diseño. Como resultado, se obtendrá el concepto de solución óptimo, cuyo desempeño deberá ser finalmente validado para llegar al producto final.

El diseño mecatrónico comenzará por el cálculo de las fuerzas y energía necesarias para efectuar el movimiento de los brazos, además del diseño y verificación ante la falla teórica de otros elementos mecánicos como ejes o pernos. Posteriormente, se seleccionarán la fuente de alimentación y otros componentes electrónicos; se diseñará una placa impresa y el cableado del robot. Una vez definidas las características mecánicas y electrónicas, se presentará el modelo 3D del sistema y se elaborará el modelo cinemático de los brazos. Luego se elaborará el programa de control de las extremidades e interfaz de control para desarrolladores. Finalmente, la validación se llevará a cabo a través de pruebas con los componentes en físico e implementación de un prototipo. Cabe resaltar, que este es un proceso iterativo, en el cual es posible regresar a módulos previos para modificar, ampliar o mejorar ciertos aspectos con nueva información adquirida a medida que se desarrolla el diseño.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se hará una revisión del estado actual del uso de extremidades en robots de interacción humana, abarcando tanto los aspectos sociales como técnicos que puedan contribuir al diseño. Estos servirán para definir de manera efectiva los requerimientos del sistema. En primer lugar, se recopilará información sobre las consideraciones estéticas empleadas habitualmente para robots orientados a la interacción humana. En segundo lugar, se mostrarán los sistemas por separado (cabeza y brazos) encontrados en artículos o investigaciones recientes y se realizará una comparación por cada uno. Finalmente, se presentarán algunos sistemas comerciales donde se integren ambos tipos de extremidades.

2.1 Interacción humano robot

2.1.1 Efecto de las características estéticas

El diseño debe ser tal que el usuario se sienta cómodo iniciando y manteniendo interacciones con el robot. El reporte de Beer et al. de 2011 para la Universidad de Georgia busca demostrar la importancia de las características físicas de un robot social. En este se menciona que las preferencias en la apariencia de un robot pueden variar dependiendo de la edad, salud, personalidad o cultura del usuario. A continuación, se mencionan algunos de los datos más relevantes:

- Los jóvenes (adultos) tienen preferencia por robots con apariencia humana

- Individuos introvertidos y con baja estabilidad emocional son más propensos a preferir robots de apariencia mecánica
- Para niños entre los 9 y 11 años los robots con una apariencia híbrida, humano-robot, resultan más amigables que robots de aspecto completamente mecánico.
- Los robots de aspecto humano puro son considerados los más agresivos entre los demás robots.
- La apariencia de un robot puede influir en la forma en que los adultos interactúan con él cuando desempeña un rol de compañero de trabajo. Por ejemplo, si el robot tiene un aspecto de máquina, las personas pueden sentirse más responsables al trabajar con él que si tuviera un aspecto humano.
- La percepción del 62% indica que “lograr un aspecto humano” en el diseño de cabezas robóticas se debe a los rasgos faciales.
- La consistencia en la estructura del robot tiene un efecto en la apariencia y, por ende, influye en la aceptación del usuario. A esto se le llama “Unidad del diseño”
- Algunos estudios indican que se trata de asumir un género para el robot incluso cuando no tiene uno.
- Cuando el género de un robot es evidente, este tiene una influencia en la percepción de los usuarios. Usualmente se percibe a un robot del género opuesto como más creíble y confiable.

2.1.2 Concepto de Valle Inquietante

Como se ha detallado, los usuarios suelen preferir interactuar con robots con características semejantes a ellos, por lo tanto, lograr una imitación perfecta del cuerpo humano puede sonar atractivo y retador para los desarrolladores. Sin embargo, según Masahiro Mori, a medida que los robots se vuelven cada vez más similares a los humanos en su apariencia, la aceptación del usuario aumenta solo hasta cierto punto. En la ___ se puede cómo la relación entre familiaridad y similitud humana cae drásticamente hasta resultar incómodo. Es por ello que este concepto es conocido como la teoría del “Valle inquietante” (Beer et al., 2011). Por este motivo, los diseños deben enfocarse en tener rasgos similares al del humano, pero sin buscar una imitación perfecta, pues se corre el riesgo de caer en la incomodidad.

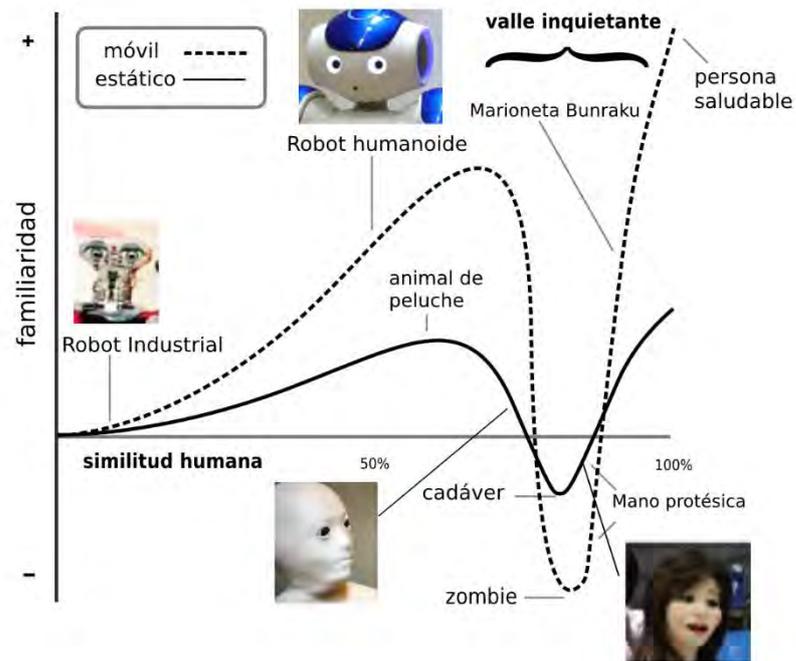


Figura 2.1 Gráfico del Valle Inquietante (Adaptado de Tian L, 2019)

2.1.3 Datos antropométricos en Perú

Con el fin de diseñar extremidades acordes a las características de preferencia de los usuarios, se tendrán en cuenta las medidas promedio de los brazos y cabeza de la población peruana. Estos datos estadísticos se pueden encontrar en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Perfil antropométrico de la población peruana (Escobar, 2020)

N°	Dimensión antropométrica	Población Masculina				Población Femenina			
		M	DS	P5	P95	M	DS	P5	P95
1	Estatura*	165.3	9.2	150.2	180.4	152.9	8.6	138.8	167.0
2	Altura al ojo	154.4	9.0	139.6	169.2	142.8	8.3	129.1	156.4
3	Altura del hombro	136.1	8.3	122.4	149.8	125.9	7.6	113.4	138.3
4	Altura del codo	103.1	7.0	91.6	114.7	95.0	6.1	85.0	105.0
5	Altura al nudillo	72.7	6.0	62.9	82.5	68.2	3.8	62.0	74.4
6	Altura sentado	87.3	4.7	79.5	95.1	82.1	4.4	74.9	89.4
7	Altura al ojo sentado	77.5	5.0	69.3	85.7	72.9	4.5	65.5	80.4
8	Altura al hombro sentado	58.4	4.3	51.4	65.4	55.1	3.8	48.9	61.4
9	Altura subescapular sentado	44.0	3.9	37.6	50.5	41.9	4.0	35.4	48.5
10	Alcance funcional	72.2	5.3	63.4	80.9	66.0	5.0	57.8	74.2
11	Alcance mínimo funcional	37.1	2.9	32.3	41.9	35.8	3.6	29.9	41.6
12	Altura al codo sentado	24.0	4.1	17.2	30.8	23.4	3.6	17.5	29.3
13	Profundidad de abdomen	25.4	5.5	16.4	34.5	23.8	6.2	13.6	34.0
14	Espesor del muslo	14.8	2.2	11.2	18.5	14.4	2.3	10.6	18.2
15	Longitud glúteo-poplítea	46.4	3.8	40.2	52.7	45.1	4.1	38.3	51.9
16	Longitud glúteo-rotular	56.6	4.3	49.6	63.7	54.4	4.0	47.8	61.1
17	Altura a la rodilla	51.7	3.6	45.8	57.7	46.6	3.4	41.0	52.2
18	Altura poplítea	40.9	3.5	35.1	46.7	37.0	3.2	31.7	42.2
19	Ancho entre codos	47.2	7.2	35.5	59.0	45.5	7.2	33.7	57.3
20	Ancho de caderas	34.9	4.0	28.4	41.5	37.4	4.8	29.5	45.3
21	Largo de mano	17.5	1.3	15.3	19.7	16.3	1.2	14.3	18.3
22	Largo del carpo	8.0	0.6	7.0	9.0	7.3	0.5	6.4	8.1
23	Largo del pie	24.1	1.7	21.3	27.0	22.4	1.2	20.4	24.4
24	Ancho del pie	9.3	0.8	8.1	10.6	6.5	0.8	5.3	7.7

Por otro lado, se tiene la división proporcional de la cabeza según Andrew Loomis, mostrada en la figura 2.2, la cual se usará para dimensionar la cabeza del robot.

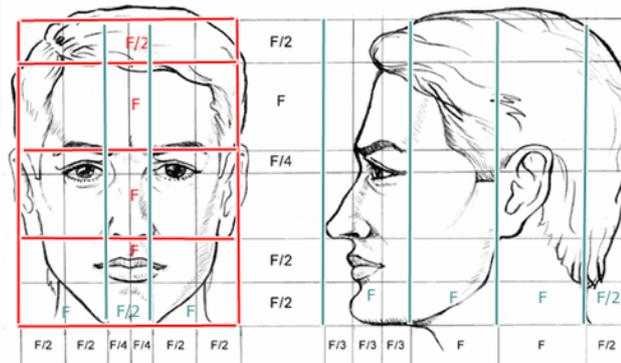


Figura 2.2 Proporciones de la cabeza (Quirrell, 2020)

En la tabla 2.2 se presentan las dimensiones calculadas para cada segmento de las extremidades y la distancia entre ellas a partir de la información anterior. Para ello se escalan los valores respecto a una mujer de 1.65 m.

Tabla 2.2 Dimensiones antropométricas proporcionales a 165 cm. (Elaboración propia)

Dimensión	Valor (cm)
Estatura	165
Hombro-codo	33.3
Codo-nudillo	29.1
Largo de la mano	17.6
Ojo - cabeza	10.9
Ojo - mentón	10.9
Distancia entre ojos	3.1
Hombro - mentón	7.3

2.2 Cabeza robótica

La movilidad de la cabeza humana está dada por los 7 discos de las vértebras cervicales. Cada articulación formada por un par de discos posee la capacidad de realizar movimientos en 3 grados de libertad (GDL): flexión/extensión, flexión lateral y rotación (Muthugala et al, 2013). Gracias a la cantidad de articulaciones y los diferentes rangos angulares de cada uno, el cuello representa un sistema de gran complejidad mecánica.

Usualmente, las cabezas robóticas se centran en efectuar los movimientos principales a nivel general, tomando el cuello como una sola articulación de 3 GDL. Estos son suficientes para generar posturas expresivas semejantes a las de un humano. Para estudiar e imitar este movimiento en un mecanismo robótico, Muthugala et al resume datos estadísticos del estándar de diseño de factores humanos (FAA, 2003) como se ve en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Rangos de movimiento del cuello humano (Muthugala et al, 2013)

Movement		Male		Female	
		5 th percentile	95 th percentile	5 th percentile	95 th percentile
Rotation	Right	73.3°	99.6°	74.6°	108.8°
	Left	74.3°	99.1°	72.2°	109.0°
Flexion		34.5°	71.0°	46.0°	84.4°
Extension		65.4°	103°	64.9°	103°
Lateral flexion	Right	34.9°	63.5°	37.0°	63.2°
	Left	35.5°	63.5°	29.1°	77.2°

2.2.1 iCub

El robot iCub es parte de un proyecto de 2006 cuyo objetivo fue crear una plataforma humanoide libre para realizar investigaciones sobre cognición incorporada. En el estudio de Beira et al (2006), se analizan tres posibles soluciones de mecanismos para el movimiento de la cabeza: un cuello-resorte actuado por cables, un mecanismo paralelo con extremidades UPS (uniones de tipo universal, prismática y esféricas) y actuadores lineales de diseño propio; y finalmente una configuración serial de tres micromotores DC (figura 2.3). Se eligió la última opción debido a su simplicidad y robustez ante posibles impactos. Así mismo, cuenta con 3 GDL para los ojos (Beira et al, 2006).

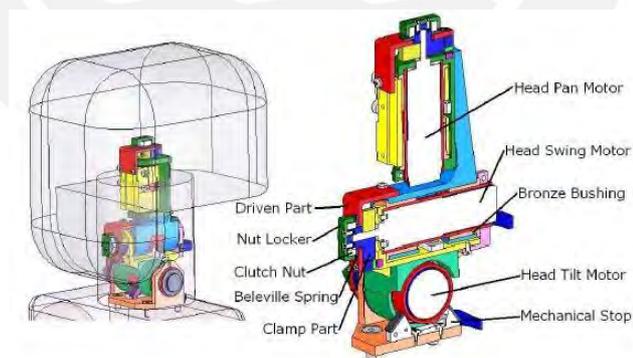


Figura 2.3 Mecanismo de Cabeza de iCub (Beira et al, 2006)

2.2.2 Romeo

Romeo es un robot de asistencia para personas que han perdido la movilidad. Para mejorar la interacción con los usuarios, se implementó el sistema mostrado en la figura 2.3. En este caso, se hace una diferenciación clara entre los movimientos del cuello

(yaw y pitch) y la cabeza (pitch y roll), incorporando dos grados de libertad cada uno. Además, el movimiento de los ojos está definido por 4 grados de libertad a diferencia de los mecanismos habituales que emplean 3 (Pateromichelakis et al., 2014).

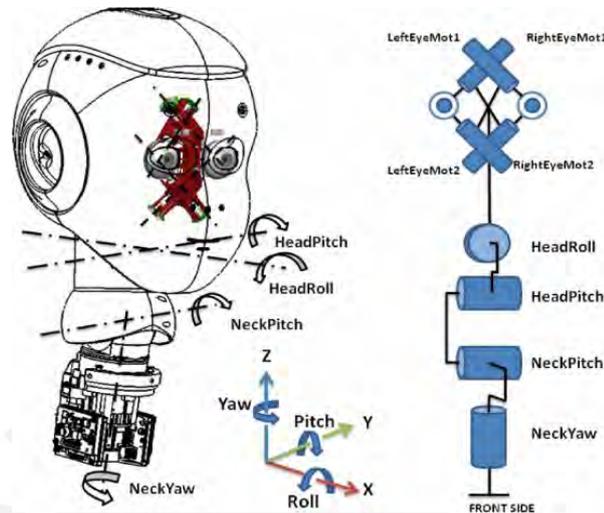


Figura 2.4 Configuración de cabeza y ojos de Romeo (Pateromichelakis et al., 2014)

El mecanismo serial empleado tanto en iCub y Romeo es el más habitual entre las cabezas de robot existentes. No obstante, en investigaciones con mayor interés en lograr una imitación convincente de las articulaciones humanas, se han desarrollado mecanismos diferentes que permiten movimientos más fluidos.

2.2.3 Reachy

En este robot la forma de la cabeza no es del todo antropomórfica, sin embargo, la configuración del cuello ha sido diseñado con características similares. Emplea un mecanismo propio, Orbita, que integra 3 grados de libertad de forma compacta como se muestra en la figura 2.5. Los motores están colocados en vertical y el movimiento se da a través de la disposición de disco de las uniones superiores. Otra característica resaltante es que este robot emplea el movimiento de sus dos antenas para generar expresividad. (Pollen Robotics, 2016)

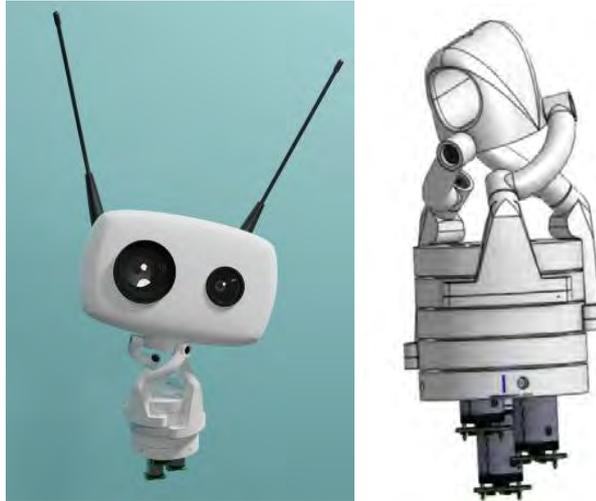


Figura 2.5 Cabeza de robot Reachy (Pollen Robotics, 2016)

2.2.4 Inmoov

Inmoov es un robot humanoide de código abierto, cuyas piezas pueden ser fabricadas con una impresora 3D. Gracias a esta facilidad, el diseño ha sido mejorado por su comunidad de usuarios desde 2012. La última versión de su cuello, diseñada por Bob Huston en 2015 e implementada al diseño oficial en 2018, añade el grado de flexión lateral. Esta se puede ver en la figura 2.6. Cuenta con un mecanismo de 3 tornillos sin fin unidos a la base del cráneo, los cuales le permiten girar alrededor de su unión esférica y demostrar mayor fluidez en el movimiento. Dentro de sus funciones también cuenta con movimiento de ojos (2 GDL) y mandíbula (1 GDL) (Langevin, 2018).



Figura 2.6 Cabeza de robot InMoov (Huston, 2018)

2.2.5 Tabla comparativa de cabezas robóticas

En la tabla 2.4 se puede ver la comparación de las principales características de los sistemas antes descritos. Se encuentra que como mínimo cuentan con 2 grados de

libertad, y todos cuentan con un rasgo de expresión o movimiento adicional. Además, todos los modelos observados emplean motores sin escobillas (brushless), los cuales tienen la ventaja de ser más eficientes y precisos al momento de controlarlos.

Tabla 2.4 Comparación de 4 sistemas de cabeza robótica (Elaboración Propia)

	GDL	Peso	Dimensiones	Motores	Transmisión /reducción adicional	Velocidad	Otros movimientos
iCub	3	1.5 kg (total)	13.16x17x17.3 cm	Micromotores DC	-	90°/s, 73.6°/s y 65.5°/s	Ojos y párpados
Romeo	4	1.9 kg	16x20x23 cm	Maxon RE-max24	-		Ojos
Reachy	3	-	17.5x10.7x10.3 cm	Maxon DC motor	Orbita joint	-	Antenas (1 GDL c/u)
Inmoov	2	-	-	Servomotor HK15298 o MG995	Tornillo sin fin	-	Quijada, ojos

2.3 Brazos robóticos antropomórficos

Los brazos humanos poseen 7 grados de libertad. En el hombro se encuentran 3 que permiten hacer los movimientos de abducción, rotación y flexión/extensión. El cuarto GDL es la flexión del codo, y el quinto la rotación del antebrazo (pronación y supinación), aunque a veces es considerado parte de la muñeca. En esta última se encuentran los últimos dos grados de flexión/extensión y abducción (Federal Aviation Administration, 2016). Tal como en la sección anterior, se presentarán los rangos de movimiento de los GDL según la Federal Aviation Administration (FAA), en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Rangos de movimiento del brazo humano (Adaptado de FAA, 2016)

		Hombres		Mujeres	
		Percentil 5	Percentil 95	Percentil 5	Percentil 95
Hombro	Abducción	173.2°	188.7°	172.6°	192.9°
	Rotación lateral	46.3°	96.7°	53.8°	85.8°
	Rotación Media	90.5°	126.6°	95.8°	130.9°
	Flexión	164.4°	210.9°	152.0°	217.0°
	Extensión	39.6°	83.3°	33.7°	87.9°
Codo	Flexión	140.5°	159.0°	144.9°	165.9°
Antebrazo	Pronación	78.2°	116.1°	82.3°	118.9°
	Supinación	83.4°	125.8°	90.4°	139.5°
Muñeca	Abd. Radial	16.9°	36.7°	16.1°	36.1°
	Abd. Cubital	18.6°	47.9°	21.5°	43.0°
	Flexión	61.5°	94.8°	68.3°	98.1°
	Extensión	40.1°	78.0°	42.3°	74.7°

Así mismo, la velocidad y aceleración de cada GDL al realizar actividades cotidianas ha sido medida en estudios experimentales como los de Rosen et al, cuyos resultados estadísticos se muestran en la figura 2.7. En líneas generales, se observa que el rango más frecuente de velocidades angulares se encuentra entre los -50 deg/s y 50 deg/s , y alcanza hasta -150 deg/s y 180 deg/s aproximadamente.

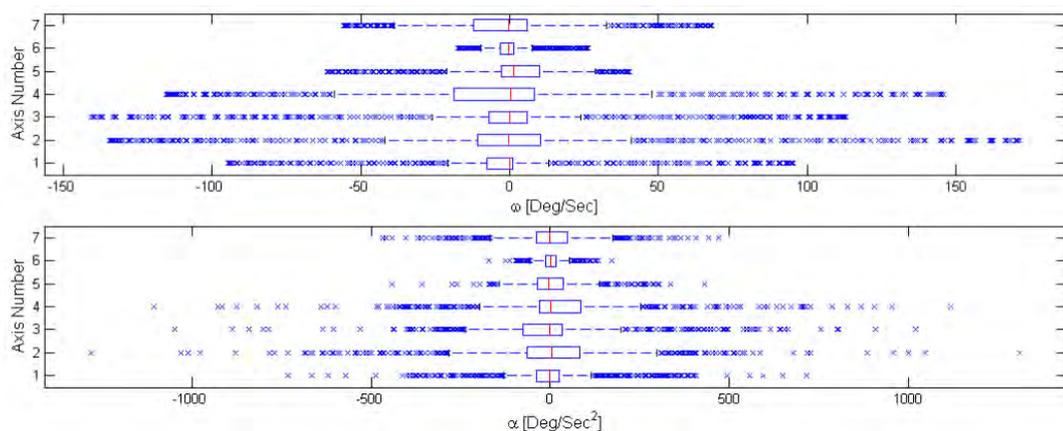


Figura 2.7 Velocidad y aceleración angulares de cada GDL del brazo humano. (Rosen et al., 2005)

Para imitar la forma humana, los grados de libertad en los brazos robóticos antropomórficos también consisten en 7 GDL. Frecuentemente se varían las distancias en las que se efectúan los movimientos del hombro o la muñeca, ya que con actuadores y mecanismos convencionales es difícil tener más de un grado de libertad en el mismo punto conservando el factor de forma. Otro punto que se considera en los diseños es la redundancia del mecanismo, ya que solo se requieren 6 GDL para ubicar la palma de la mano en cualquier punto y orientación. Debido a esto los algoritmos de control deben optimizarse para evitar singularidades.

2.3.1 Reachy

Este brazo robótico fue diseñado como plataforma de pruebas biométricas para un piloto; sin embargo, su diseño modular y arquitectura de código abierto le permite ser personalizado para múltiples aplicaciones. La programación de su interfaz Pypot es enteramente en Python, lo cual le permite trabajar con una gran cantidad de librerías. Se compone de los tres segmentos propios de un brazo humano. El efector final es intercambiable y ha sido probado con distintos modelos (Mick et al., 2019).

Tiene 7 GDL, cada uno controlado por un motor Dynamixel. Estos le permiten operación continua de 10 minutos, y de hasta un día entero realizando movimientos cortos seguidos de periodos de descanso automatizados mediante sensores de carga y temperatura que previenen riesgos de sobrecalentamiento. El efector final se puede mover con una velocidad de hasta 2 m/s y aceleración de 10 m/s^2 , y puede llevar una carga de hasta 500 g (Mick et al., 2019).

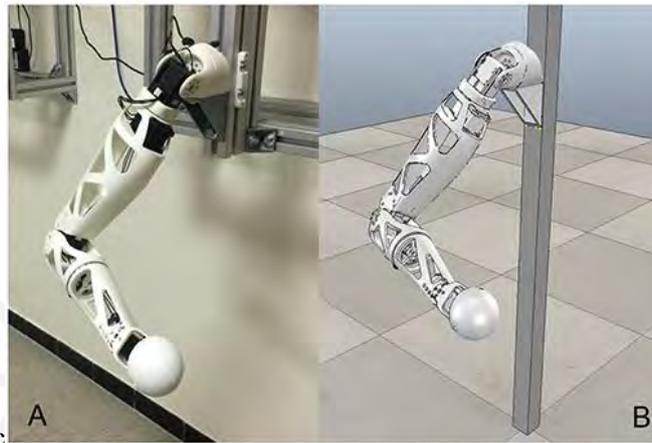


Figura 2.8 Brazo y visualización en interfaz de Reachy (Mick et al., 2019)

2.3.2 LIMS2-AMBIDEX

Este robot fue construido para competir en el IROS2018 Robotic Challenge y manipular un abanico doblado en el menor tiempo posible. Es por ese motivo que sus principales características son velocidad y precisión en el control. Sus principales actuadores, que concentran la mayor masa, están ubicados en el hombro, lo cual le permite reducir el peso del resto de la extremidad y alcanzar altas velocidades (Song et al., 2018).

El uso de actuadores y mecanismos convencionales dificulta la tarea de minimizar el peso y mejorar el control en tiempo real. Por ello cuenta con actuadores personalizados y un mecanismo propio para la transmisión en la muñeca por medio de cables. En ese mecanismo se encuentran 3 de los 7 grados de libertad que tiene desde el hombro hasta la muñeca. Otra peculiaridad del diseño se encuentra en la unión entre el primer y segundo grado, que está inclinada 35° para evitar singularidades en ciertas configuraciones (Song et al., 2018).

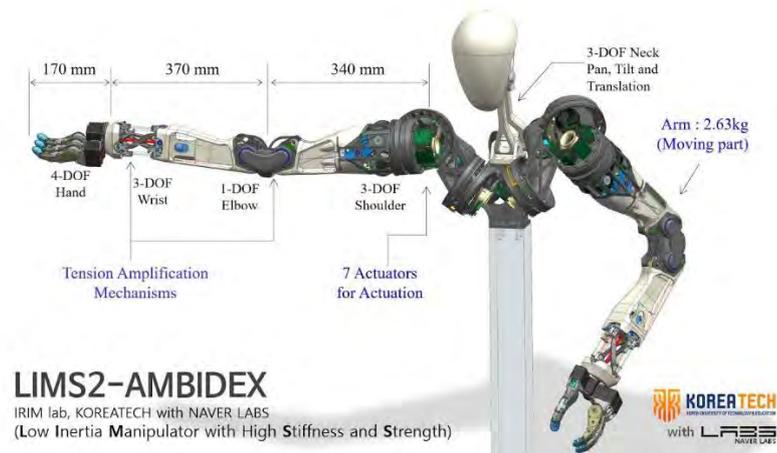


Figura 2.9 Sistema IMS2-Ambidex (Song et al., 2018)

2.3.3 Modular Prosthetic Limb

En la figura 2.10 se puede ver la versión 3 del Modular Prosthetic Limb, un brazo protésico diseñado con el fin de igualar las características de forma, destreza, velocidad, fuerza y sensibilidad del brazo humano. Ya que sus partes son modulares y robustas, puede adaptarse a amputaciones a distintos niveles e incluso emplearse en otras aplicaciones (Johannes et al., 2020).

Cuenta con 7 grados de libertad desde el hombro hasta la muñeca, y una mano con 10 grados de libertad (2 para 4 dedos juntos, 1 por cada dedo y 3 adicionales en el pulgar) y puede cargar hasta 6 kg. La batería se encuentra en la sección superior del brazo y le permite ser usado por hasta 18h. Al ser un diseño compacto y con alta exigencia en los requerimientos, fue necesario desarrollar hardware personalizado y emplear materiales y componentes de alto costo, llegando a un costo de producción final de \$50000 (Johannes et al., 2020).

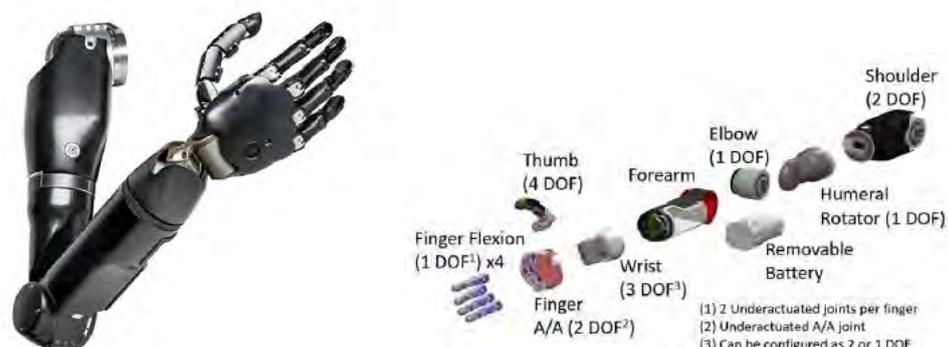


Figura 2.10 Modular Prosthetic Limb (Johannes et al., 2020)

2.3.4 Tabla comparativa de brazos robóticos antropomórficos

En la siguiente tabla se muestra una comparación de los sistemas mencionados. En esta se puede notar que los diseños más sofisticados permiten mejorar la velocidad en sus articulaciones.

Tabla 2.6 Comparación de características de 3 sistemas de brazos (Elaboración propia)

	GDL brazo y muñeca	Masa [kg]	Longitud [cm]	Material	Motores	Transmisión /reducción adicional	Velocidad de articulaciones [deg/s]	Interfaz de desarrollo
Reachy	7	1.4	60	PLA	Dynamixel MX-106, MX-64, AX-18	Ninguno	170 aprox	Pypot (Python)
LIMS2-Ambidex	7	H: 4.17 M: 2.63	74.8		Personalizados con engranajes planetarios	Mecanismo capstan, cables antagonistas	H: roll 499, pitch 749 C: raw 590 M: roll 1179 pitch 1634	ROS (C, Python)
Modular Prosthetic Limb	7	Brazo: 3.36 Muñeca y mano: 1.32		Nylon, fibra de carbono, acero	Brushless DC	Engranajes planetarios y cicloidales	120	VulcanX (C, C++, Python)

Otra característica para resaltar de la comparación es que efectivamente se representan los 7 GDL con 3 en el hombro, 1 en el codo y 3 en la muñeca. Por otro lado, se observa que la masa del brazo del robot Reachy es la menor debido al material empleado y sus dimensiones.

2.4 Sistemas comerciales de robots con extremidades

2.4.1 ARI

Es un robot humanoide de servicio diseñado por Pal Robotics. Está orientado a la atención al público y también está siendo implementado en centros médicos. Mide 165 cm y cuenta con dos brazos de 4 grados de libertad y 1 grado de libertad opcional en la muñeca (PAL Robotics, s/f). Gracias al proyecto SPRING de la Unión Europea también se ha implementado en hospitales para atención al público, guía y entretenimiento en salas de espera (Robotics, 2020).



Figura 2.11 Robot ARI (PAL Robotics, s/f)

2.4.2 Quori

Es un robot social de bajo costo (menor a \$5000) con partes modulares y diseñadas para ser expresivas. Surge como solución al alto gasto económico que implica iniciar la investigación en el tema de interacción humano-robot. Es por ello que distintos grupos de universidades estadounidenses han adoptado esta plataforma para sus proyectos (Mead et al., s/f).

Como se ve en la figura 2.11, sus brazos son de dos GDL, por lo que no tienen una forma del todo humana. Un rasgo interesante es que la expresividad del robot se da principalmente a través de la proyección de la cara por dentro de la cabeza (Mead et al., s/f).



Figura 2.12 Robot Quori (Mead et al., s/f)

2.4.3 Pepper

El robot Pepper de la empresa Softbank robotics es uno de los más conocidos y empleados comercialmente para interacción humano-robot. Debido a su gran alcance incluso ya ha sido probado en el sector salud y en aplicaciones relacionadas a la COVID-19, entre ellas, telepresencia. Es capaz de mantener conversaciones de forma fluida y amigable empleando como complemento sus brazos, manos y cabeza (SoftBank Robotics, s/f).

Los brazos pueden sostener una carga máxima de 500g, y tienen 5 grados de libertad (hombro: 2, brazo/codo: 2, muñeca: 1). Su cabeza es de 2 grados de libertad y pese a no tener rasgos faciales móviles, el espacio alrededor de sus ojos y sus “orejas” (parlantes) es iluminado de diferentes colores, lo cual lo hace atractivo a los usuarios (SoftBank Robotics, s/f). Las características mencionadas pueden verse en la figura 2.12.



Figura 2.13 Robot Pepper (SoftBank Robotics, s/f)

2.4.4 Tabla comparativa de sistemas comerciales

En la tabla a continuación se muestra una comparación de los sistemas anteriores. En esta se puede notar variedad en cuanto a los grados de libertad considerados para los brazos (2 a 5) y que en dos casos se emplean 2 GDL para la cabeza. Además, diferentes formas en las que muestran expresividad y distintas aplicaciones de interacción con usuarios.

Tabla 2.7 Comparación de características de 3 sistemas comerciales (Elaboración propia)

Robot	GDL Brazos	GDL Cabeza	Altura	Expresiones faciales	Aplicación
ARI	4 o 5	2	165 cm	Voz, ojos móviles	Atención al público
Quori	2	0	132 cm (aprox)	Voz, cara retro-proyectada, 1 gdl en cadera	Investigación robótica social
Pepper	5	2	120 cm	Luz en ojos y orejas, voz	Telepresencia, atención al público, guía, tratamiento hospitalario

CAPÍTULO 3

DISEÑO CONCEPTUAL

En este capítulo se desarrollará el diseño del concepto óptimo para el sistema de brazos y cabeza. En primer lugar, se definen las entradas y salidas de señales, energía y materia del sistema y se elabora una estructura de funciones. Posteriormente se diseñarán tres alternativas con los distintos componentes encontrados, y finalmente se realizará un análisis técnico-económico de las mismas.

3.1 Requerimientos del sistema

Las exigencias y deseos considerados para el sistema se presentan en el Anexo A. En esta sección se explicarán las más importantes:

Función principal

Esta es brindar expresividad a la plataforma robótica (robot de telepresencia) mediante movimiento y apariencia visual para mejorar la interacción con pacientes en centros de salud. También se tiene como deseo establecer tres movimientos predeterminados para cada extremidad.

Geometría

Con el fin de conservar similitudes con el usuario y generar mayor empatía, el robot móvil tendrá una altura máxima de 1.65 m, altura promedio en población peruana como se vio en el capítulo 2. Por lo tanto, las extremidades deben guardar una relación proporcional a una persona de esta altura.

Cinemática

Los brazos tendrán 4 grados de libertad y la cabeza 2 grados de libertad. Además, basado en las referencias del estado del arte, la velocidad angular de los motores deberá ser regulable y por lo menos de 120 deg/s tal como se emplea para una prótesis de brazo de alta gama.

Señales

Deberá contar con señales de entrada de instrucciones de movimiento independiente por cada motor y selección de un gesto predefinido. Las señales de salida serán la posición medida de los motores, señales de audio y luz en la zona de los ojos.

Electrónica

Los componentes electrónicos que debe incluir son: motores, sensores de velocidad angular, parlantes y leds para el movimiento de los ojos. Además, se debe poder realizar un control preciso del giro de los motores para lograr movimientos continuos y que se asemejen al del humano.

Fabricación

Se deberán considerar técnicas de prototipado rápido, principalmente manufactura aditiva, además de mecanizado en CNC, corte láser y corte y doblado.

Uso

El robot de telepresencia será usado en salas de aislamiento en hospitales en Lima y Cusco, por ello se consideran las siguientes condiciones climáticas: Temperatura de -2°C a 29°C , humedad relativa entre 68% y 98% y presión atmosférica de 0.69 atm a 1 atm (INEI, 2018).

3.2 Definición de entradas y salidas:

Para iniciar con el desarrollo de la solución es necesario identificar las entradas y salidas que se espera que tenga el sistema, para luego definir las funciones por las cuales estará compuesta para llegar a dicho resultado. A continuación, se presentan las entradas y salidas en un diagrama de *Black Box* o Caja Negra, el cual permite visualizar los tipos de datos considerados independientemente el funcionamiento interno del sistema.

ENTRADAS

- Posición de extremidades: Señal en la que se permite ingresar individualmente la posición angular de cada grado de libertad en las extremidades.
- Gesto predefinido: Señal de selección entre 3 gestos predefinidos para la cabeza (asentir, negar, confusión) y 3 para los brazos (saludo, a los lados, brazos extendidos).
- Parada de emergencia: Señal que desconecta la energía del sistema
- Energía eléctrica: Alimentación del sistema
- Plataforma robótica móvil: El robot de telepresencia acondicionado para acoplar el sistema de extremidades

SALIDAS

- Posición de extremidades: Señal que muestra al operador la posición angular de las extremidades
- Velocidad de las extremidades: Señal que muestra al operador la velocidad angular de las extremidades
- Consumo de energía del sistema: Señal que muestra al operador información de corriente por cada extremidad y consumo total de energía del sistema.
- Operación actual: Señal que muestra información de la operación que está siendo ejecutada.
- Luz: Producida por indicadores luminosos en los ojos para generar expresividad.
- Sonido: Señal emitida desde el robot para comunicarse con los usuarios en el hospital.
- Vibraciones: Producidas por el sistema al realizar los movimientos

- **Plataforma robótica con extremidades:** El sistema de extremidades completamente integrado al robot de telepresencia.



Figura 3.1 Black box. (Elaboración Propia)

3.3 Estructura de funciones

En esta sección se describirán las funciones del sistema según los dominios de energía, mecánica, sensores, actuadores, control e interfaz. En el diagrama de estructura de funciones mostrado en la figura 3.9 es posible visualizar las entradas y salidas que las relacionan.

Dominio energía

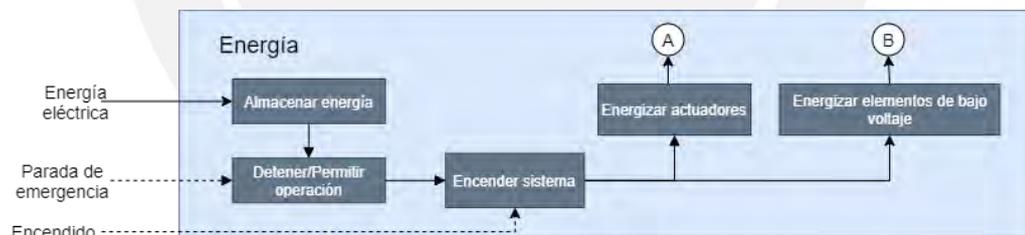


Figura 3.2 Dominio Energía. (Elaboración Propia)

A continuación, se explicará a detalle las funciones de la figura 3.2

- **Almacenar energía:** Abastecer de energía necesaria al sistema para su funcionamiento en el tiempo establecido
- **Detener/Permitir operación:** Habilitar y deshabilitar el paso de corriente en caso de mal funcionamiento o emergencia
- **Acondicionar energía:** Regular la energía para su uso en componentes que requieren menor voltaje

- **Energizar actuadores:** Permite proporcionar energía a los actuadores para poder activarlos y generar movimiento
- **Energizar sensores:** Proporciona energía a los sensores para que sea posible medir y leer las variables necesarias para el control
- **Energizar procesador:** Proporciona energía a la computadora o controlador encargado de procesar datos e interactuar con los demás componentes

Dominio mecánico:

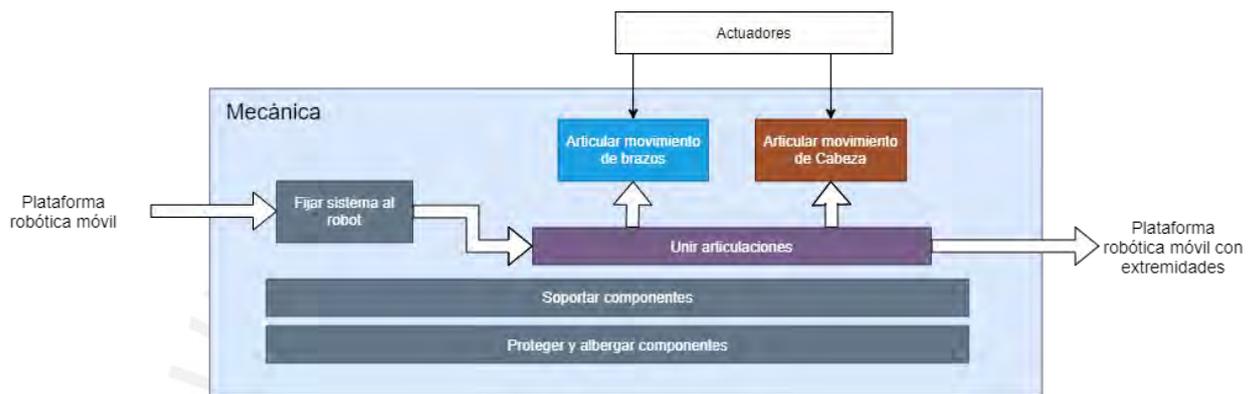


Figura 3.3 Dominio Mecánico. (Elaboración Propia)

A continuación, se explicará a detalle las funciones de la figura 3.3

- **Proteger y albergar componentes:** Se encarga de cubrir todos los componentes y evitar su daño o mal funcionamiento
- **Soportar componentes:** Se encarga de sostener de forma estable cada componente.
- **Fijar sistema al robot:** Permite poder acoplar los brazos y cabeza de forma estable al cuerpo del robot de telepresencia.
- **Unir articulaciones:** Permite establecer las distancias entre articulaciones y mantener enlazados los grados de libertad.
- **Articular movimiento de brazos:** Se encarga de transmitir el movimiento desde los actuadores del brazo hasta las articulaciones que le corresponden.
- **Articular movimiento de cabeza:** Se encarga de transmitir el movimiento desde los actuadores del cuello hasta su articulación correspondiente

Dominio actuadores:

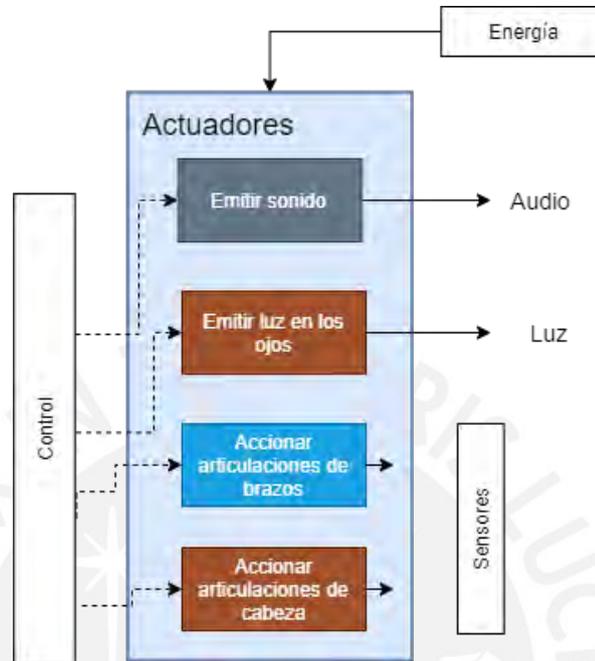


Figura 3.4 Dominio Actuadores. (Elaboración Propia).

A continuación, se explicará a detalle las funciones de la figura 3.4.

- **Accionar articulaciones del brazo:** Permite realizar un movimiento angular de cada articulación de los brazos hasta llegar a las posiciones deseadas
- **Accionar articulaciones del cuello:** Permite realizar un movimiento angular de cada articulación de la cabeza hasta llegar a la posición deseada
- **Emitir luz en los ojos:** Permite iluminar la zona de los ojos con patrones diferentes para brindar mayor expresividad
- **Emitir sonido:** Se encarga de transmitir señales de audio indicadas desde la interfaz

Dominio sensores:

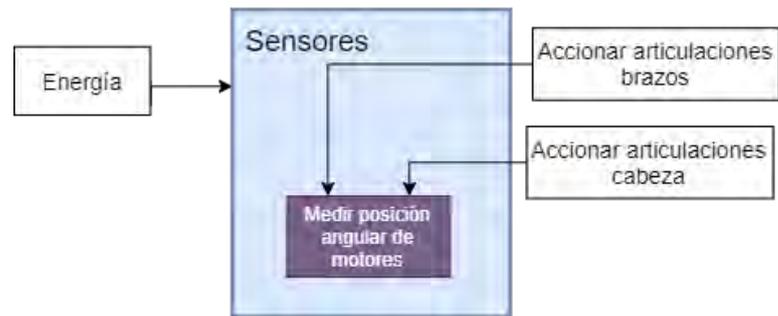


Figura 3.5 Dominio Sensores. (Elaboración Propia)

A continuación, se explicará a detalle las funciones de la figura 3.5.

- **Medir posición angular de motores:** Permite conocer la posición actual para luego compararla con la posición deseada en la etapa de control

Dominio control:

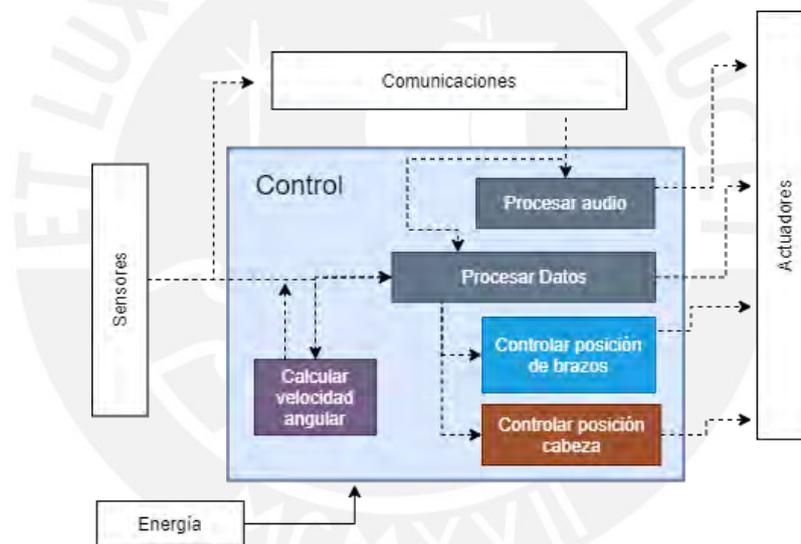


Figura 3.6 Dominio Control. (Elaboración Propia)

A continuación, se explicará a detalle las funciones de la figura 3.6.

- **Calcular velocidad angular:** Realizar el cálculo para estimar la velocidad a partir de la posición angular.
- **Procesar datos:** Procesar las instrucciones de usuario y datos de los sensores para generar las señales enviadas a los algoritmos de control.
- **Procesar audio:** Procesar la información de audios pregrabados en el sistema.
- **Controlar posición de la cabeza:** Envía la señal de funcionamiento necesaria a los actuadores de la cabeza.

- **Controlar posición de brazos:** Envía las señales de funcionamiento necesarias a los actuadores de los brazos.

Dominio comunicación:



Figura 3.7 Dominio Comunicación. (Elaboración Propia)

A continuación, se explicará a detalle las funciones de la figura 3.7

- **Recibir información:** Transmite los datos ingresados por el usuario desde la interfaz hasta el procesador del sistema.
- **Enviar información:** Transmite los datos del sistema hacia la interfaz para permitir la visualización del usuario.

Dominio interfaz:

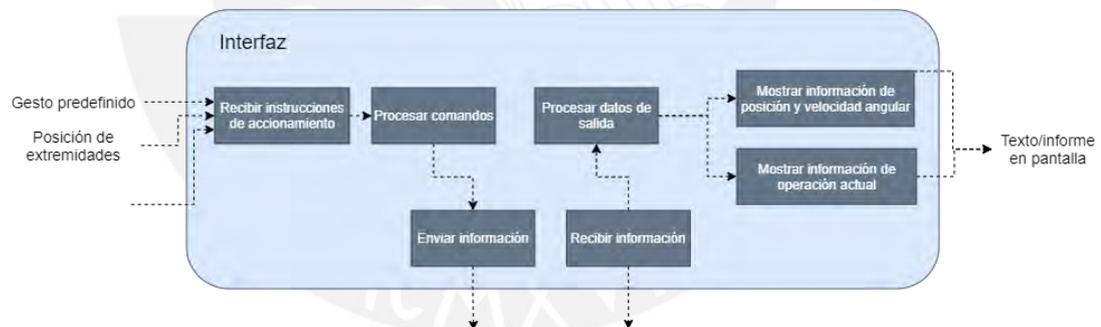


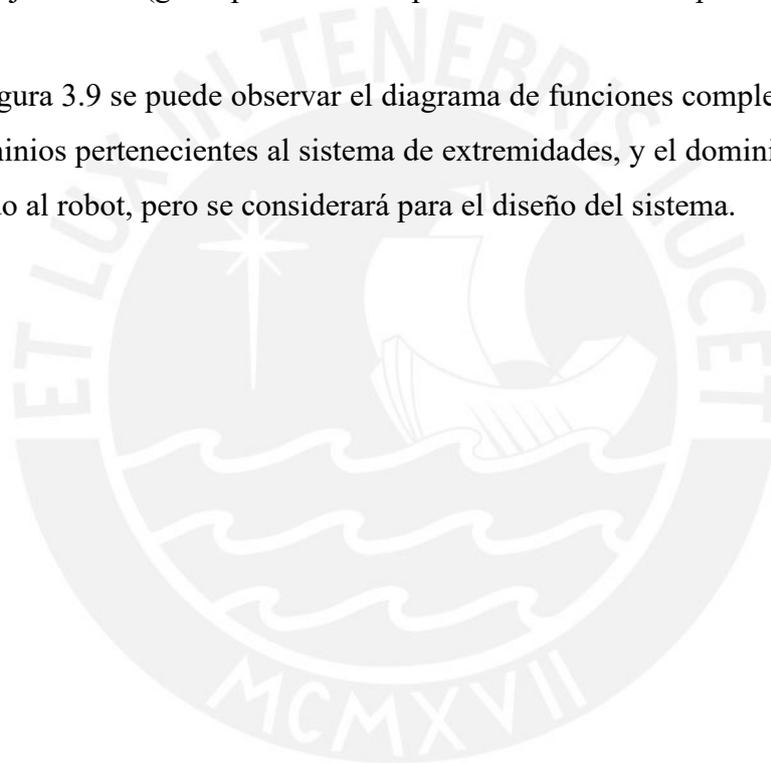
Figura 3.8 Dominio Interfaz. (Elaboración Propia)

A continuación, se explicará a detalle las funciones de la figura 3.8.

- **Recibir instrucciones de funcionamiento:** Permite al usuario ingresar un gesto predefinido o posiciones deseadas de las extremidades del robot.
- **Procesar comandos:** Determinar la serie de datos a transmitir según la selección del usuario
- **Enviar información:** Transmitir las instrucciones del usuario al controlador del sistema

- **Recibir información:** Transmitir los datos que provienen del sistema para su visualización
- **Procesar datos de salida:** Adecuar los datos de salida del sistema para presentarlos al usuario
- **Mostrar estado de energía:** Permite visualizar el voltaje, la corriente consumida y el tiempo de uso restante del sistema
- **Mostrar información de posición y velocidad angular:** Permite visualizar y verificar el movimiento actual de las extremidades.
- **Mostrar información de operación actual:** Muestra el comando que se está ejecutando (gesto predefinido o posición determinada por el usuario).

En la figura 3.9 se puede observar el diagrama de funciones completo. Este consta de los dominios pertenecientes al sistema de extremidades, y el dominio interfaz, que no irá fijado al robot, pero se considerará para el diseño del sistema.



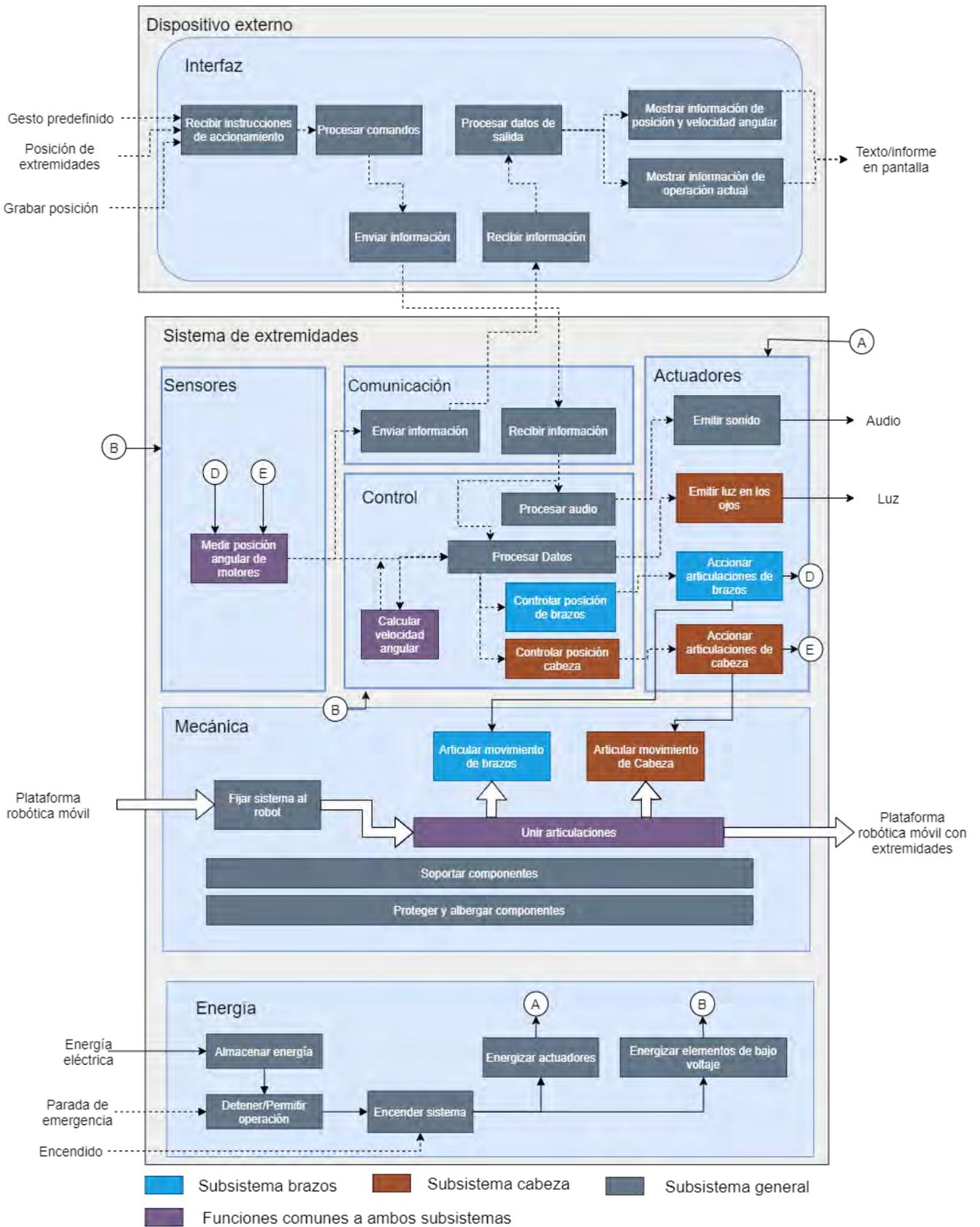


Figura 3.9 Estructura de funciones del sistema (Elaboración Propia).

3.4 Matriz morfológica

Tomando como base la estructura anterior, se han seleccionado diferentes tecnologías que cumplen cada función. Estas pueden apreciarse en la matriz morfológica del Anexo B, aquí se muestran divididas por dominios. Al combinarlas, se obtuvieron los 3 conceptos solución detallados en las tablas 3.1, 3.2 y 3.3, divididos por subsistemas.

Tabla 3.1 Conceptos solución Subsistema Brazos. (Elaboración Propia).

Subsistema Brazos					
Función		Solución 1	Solución 2	Solución 3	
Mecánica	Soportar componentes y unir articulaciones	Placas/Planchas	Tubos comerciales para brazos robóticos	Piezas impresas	
	Transmitir movimiento	Polea dentada	Conexión directa	Tren de engranajes	
Sensores	Medir posición angular motores	Encoder integrado	Encoder óptico	Encoder magnético	
Actuadores	Accionar articulaciones	Motor brushless con control integrado	Motor DC	Servomotor	
Control	Procesar datos, calcular posición y velocidad angular (hardware)	Módulo microcontrolador		Computadora	
	Procesar datos	Cinemática directa			
	Controlar posición	PID	Difuso	Adaptativo	
	Calcular velocidad angular	Observador			

Tabla 3.2 Conceptos solución Subsistema Cabeza. (Elaboración Propia).

Subsistema Cabeza					
Función		Solución 1	Solución 2	Solución 3	
Mecánica	Soportar componentes y unir articulaciones	Placas/Planchas	Piezas impresas		
	Transmitir movimiento	Conexión directa	Polea dentada	Engranajes cónicos	
Sensores	Medir posición angular motores	Encoder integrado	Encoder óptico	Encoder magnético	
Actuadores	Accionar articulaciones	Motor brushless con control integrado	Motor DC	Servomotor	
	Emitir sonido	Parlante / altavoz común		Parlante comercial con rejilla	
	Emitir Luz	Matriz de leds	Anillo led rgb	Micro proyector	

Control	Procesar datos, calcular posición y velocidad angular (hardware)	Módulo microcontrolador		Computadora
	Procesar datos	Cinemática directa		
	Controlar posición	PID	Difuso	Adaptativo
	Calcular velocidad angular	Observador		
	Almacenar audio	Tarjeta SD	Memoria USB	Memoria interna de parlante
	Procesar y reproducir audio	Módulo reproductor SD	Módulo reproductor USB	Reproductor del parlante

Tabla 3.3 Conceptos solución Subsistema General. (Elaboración Propia).

Subsistema General				
Función		Solución 1	Solución 2	Solución 3
Mecánica	Proteger y Albergar componentes	Caja impresa en 3D	Caja comercial de plástico	Caja fabricada
	Fijar sistema al robot	Unión atornillada	Pestillo	Unión por forma
Energía	Almacenar energía	Batería LiPo	Batería ácido plomo	Pack de baterías Lion
	Energizar actuadores			
	Detener operación	Botón de parada		Switch de emergencia
Comunicación	Enviar información	Módulo USB a UART	Módulo micro USB a UART	Puerto USB
	Recibir información			
Interfaz	Recibir instrucciones de accionamiento	Teclado/mouse	Pantalla táctil	Teclado/mouse
	Procesar comandos	Computadora	Procesador de dispositivo móvil	Microprocesador
	Procesar datos de salida			
	Mostrar estado de energía	Pantalla LCD	Pantalla táctil	Pantalla lcd
	Mostrar información de posición y velocidad angular			
Mostrar información de operación actual				

3.5 Concepto solución óptimo

Luego de describir y evaluar técnica y económicamente los tres conceptos solución planteados (ver Anexos C y D), se concluye que la solución 1 es la más adecuada. Con el fin de alcanzar un mejor cumplimiento de los requerimientos, es posible mejorarla para alcanzar la solución óptima. Los cambios realizados en los criterios de la evaluación son:

- Criterio C - Repetibilidad: El uso de la transmisión por faja es lo que le permite concentrar el peso en la parte superior del brazo, además de permitir reducir el tamaño del codo y antebrazo. Por ello, para mejorar la repetibilidad se propone la utilización de una estrategia de control más avanzada, como lo es la adaptativa. De esta forma, el puntaje sube a 3 puntos.
- Criterio F – Diseño Antropomórfico: Para incrementar este punto, es posible modificar la forma de las planchas y demás elementos empleados tal que sean compatibles con un diseño de piezas impresas como el de la tercera solución. De esta manera, el puntaje se incrementa a 3 puntos.
- Criterio L – Facilidad de montaje: Se puede incrementar la facilidad del montaje estandarizando las uniones entre piezas. De este modo, el puntaje incrementa a 3.

A continuación, se presentan los diferentes diagramas que describen el funcionamiento del sistema. En primer lugar, en el diagrama de operaciones se detalla la interacción del usuario (operador) con el sistema (figuras 3.10 y 3.11). Este se ha dividido en instalación y uso, debido a que parte de sus funciones están relacionadas a la incorporación de las extremidades a la plataforma robótica, acción que se realiza una sola vez antes de poder operar el sistema completo. Cabe mencionar que el sistema de brazos debe ser capaz de funcionar de forma independiente (haciendo uso de su interfaz), y también como parte integrada al robot de telepresencia (recibiendo instrucciones de la computadora principal del robot).

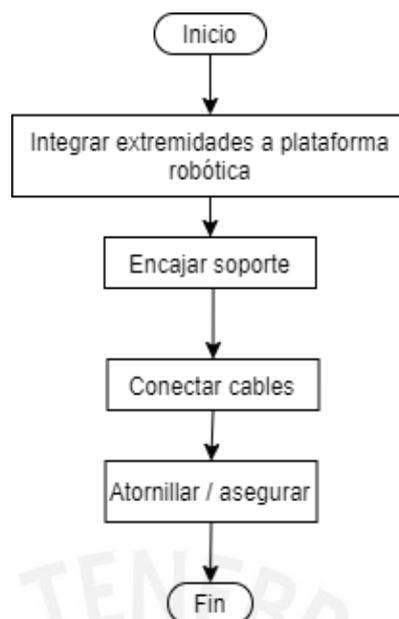


Figura 3.10 Diagrama de operaciones para la instalación. (Elaboración Propia)



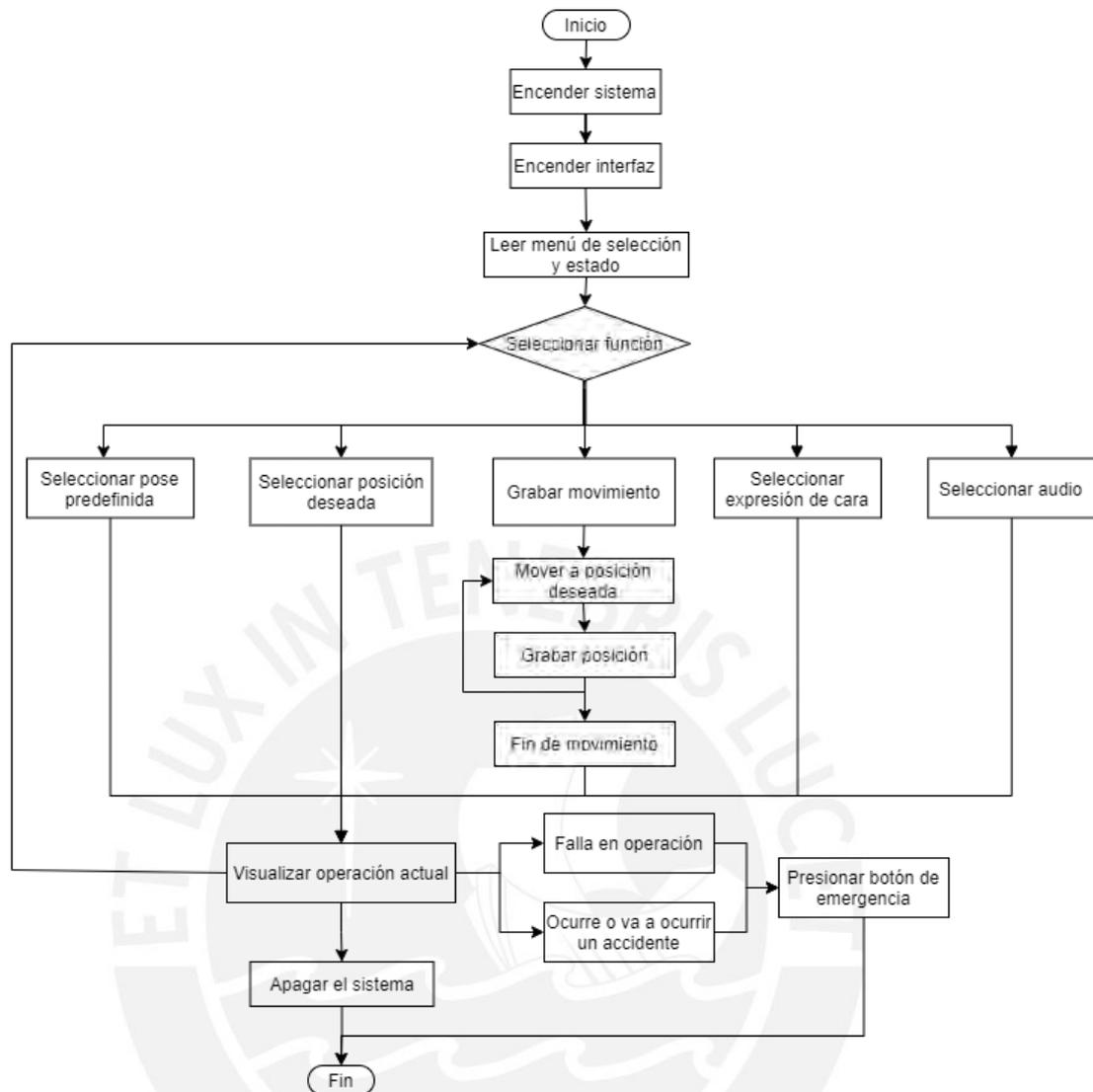


Figura 3.11 Diagrama de operaciones para el uso. (Elaboración Propia)

En segundo lugar, el diagrama de bloques se muestra en la figura 3.12 e indica la interacción y conexiones entre los distintos componentes.

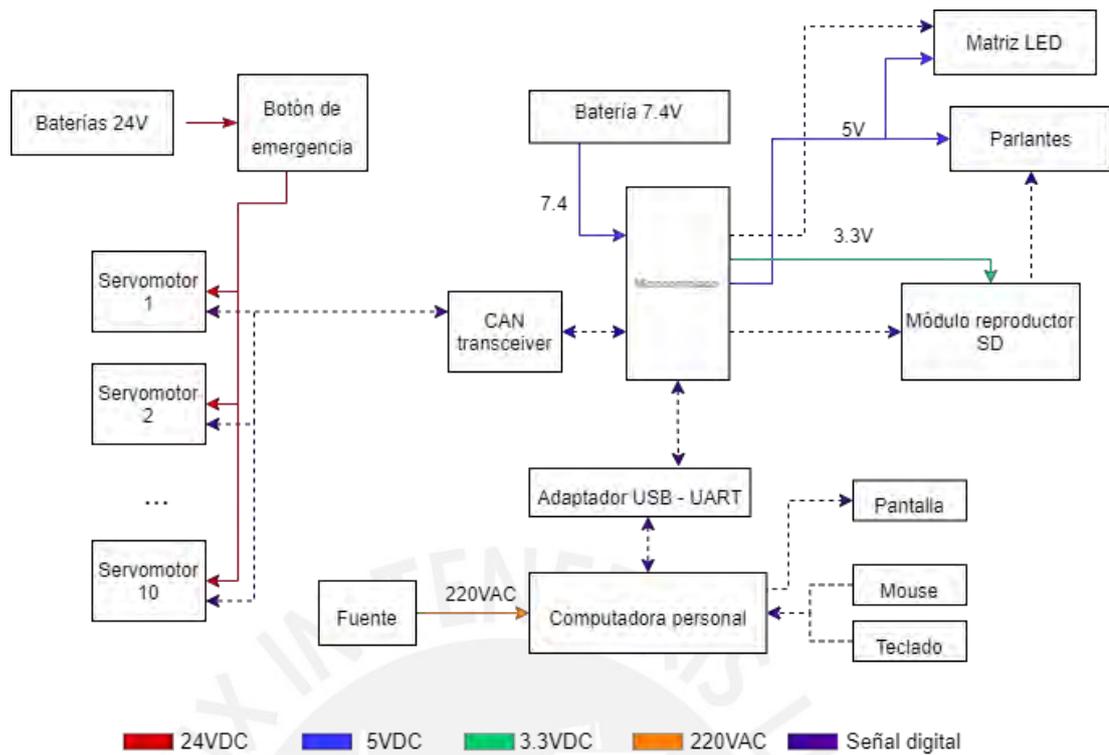


Figura 3.12 Diagrama de bloques del sistema. (Elaboración Propia)

Finalmente, se presenta el diagrama de flujo general para mostrar la lógica en el controlador del sistema en la figura 3.13. Se comienza con la iniciación de las variables en la posición de home de cada motor (posición inicial). Posteriormente se esperará un comando emitido desde la interfaz: Selección de pose predefinida, selección de pose deseada (del efector final), grabar movimiento (mediante la grabación de varias posiciones), seleccionar una expresión facial o seleccionar audio. En caso sea una acción que implique el movimiento de las extremidades, se ejecutará un lazo de control de posición con los motores. Luego de la selección, se recibirá el estado de los motores y se enviará a la interfaz.

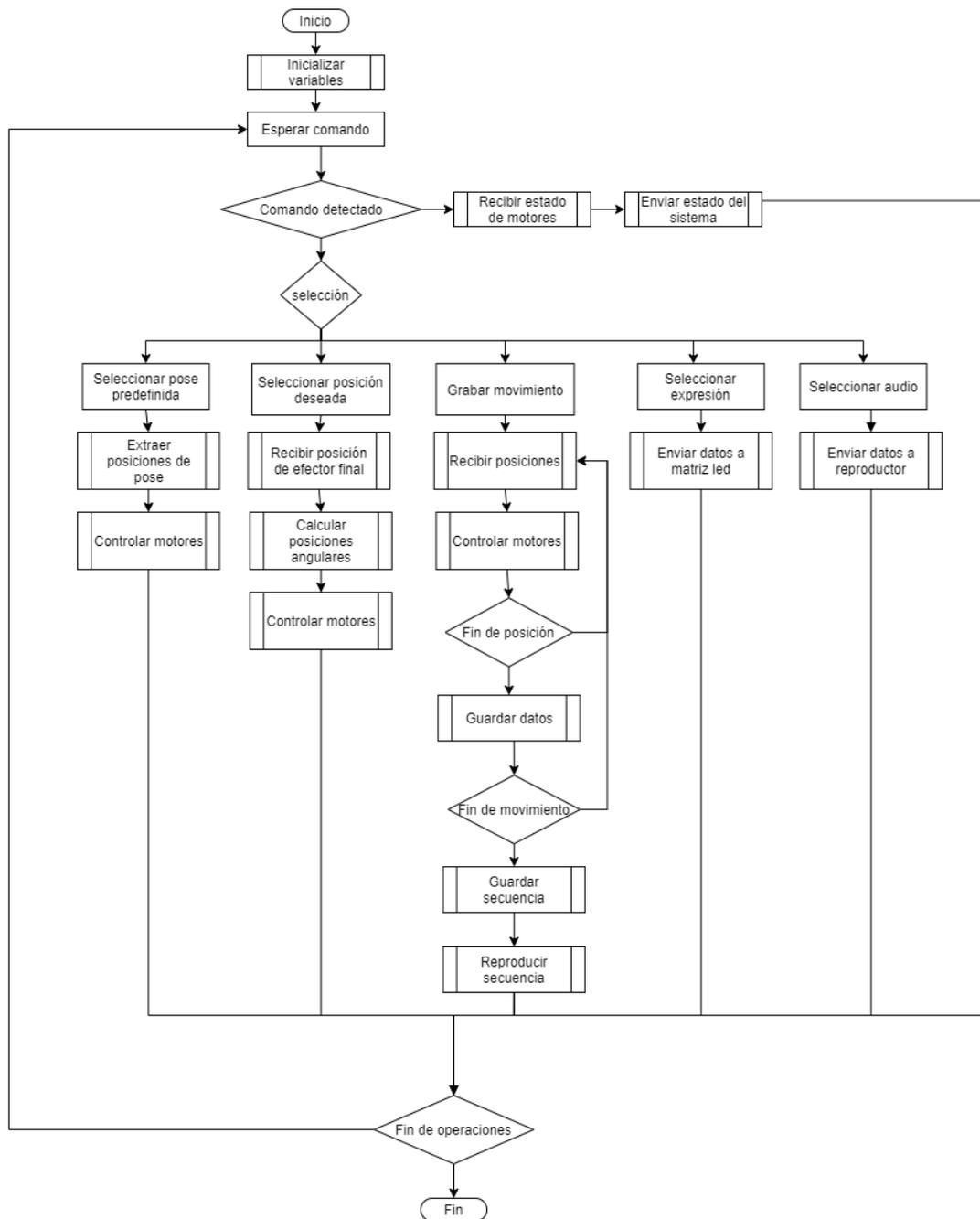


Figura 3.13 Diagrama de flujo del sistema. (Elaboración Propia)

CAPÍTULO 4

DISEÑO MECATRÓNICO

En el presente capítulo se desarrollará a detalle el diseño mecatrónico de la propuesta conceptual descrita en el capítulo anterior. En primer lugar, se explicará el sistema integrado y cada una de sus partes. Luego, se detalla el proceso de diseño de cada subsistema: brazos, cabeza, control y comunicación, y energía. Finalmente se presentan los planos de todas las piezas del sistema.

4.1 Descripción del sistema integrado

A continuación, se presentan imágenes del modelo 3D del sistema de extremidades móviles, el cual, como ya se mencionó, está dividido en subsistemas para una mejor comprensión de sus funciones. Cabe mencionar que el proceso de diseño se ha desarrollado de forma iterativa hasta llegar a la versión final.

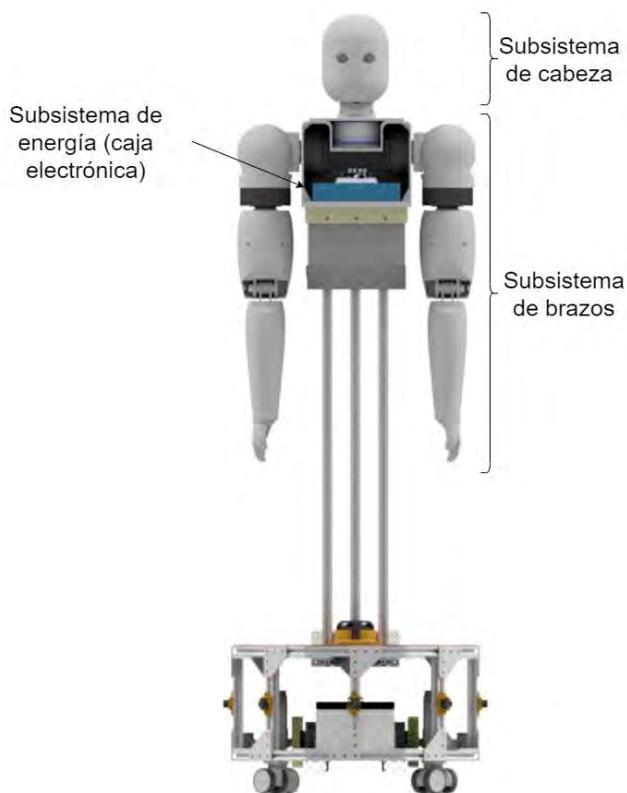
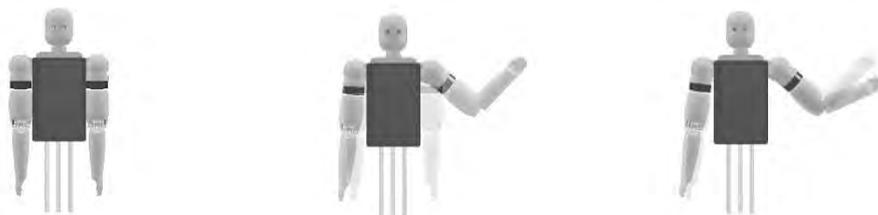


Figura 4.1 Sistema integrado (Elaboración propia)

Por otro lado, el sistema es capaz de realizar las siguientes secuencias de movimientos y expresiones con brazos (figura 4.2) y cabeza (figura 4.3):

Saludo



Señalar la pantalla



Gestos de explicación



Figura 4.2 Secuencias de movimientos con brazos (Elaboración Propia)

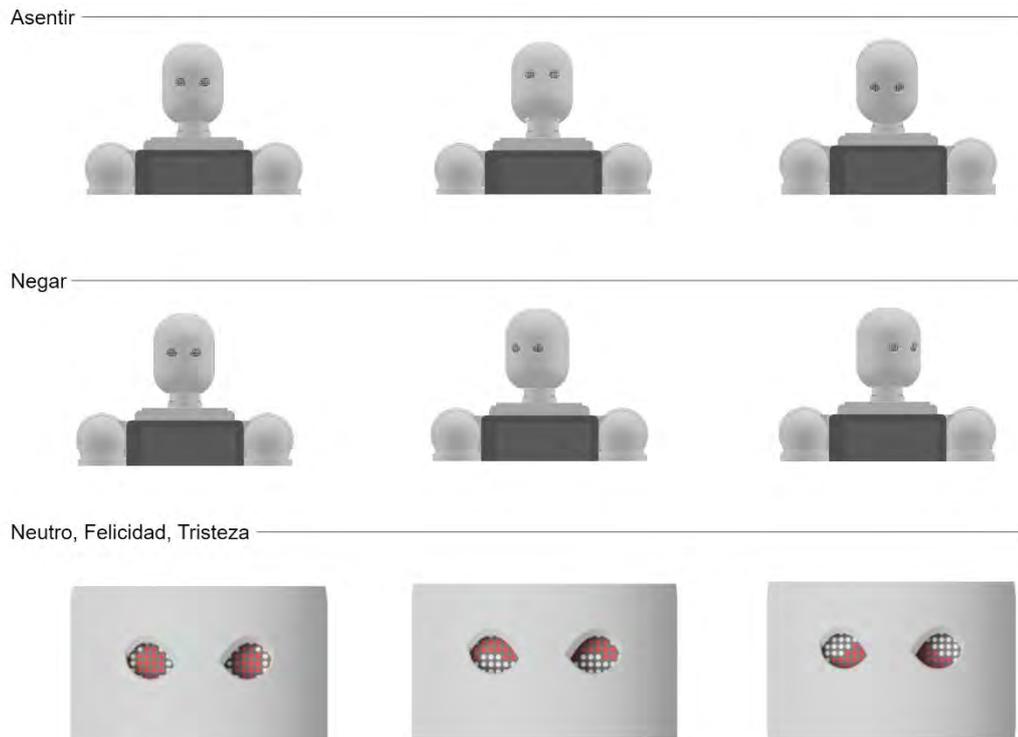


Figura 4.3 Secuencias de movimientos y expresiones de la cabeza (Elaboración Propia)

4.2 Subsistema de brazos

Este subsistema está conformado por los actuadores, piezas estructurales y mecanismos que componen los dos brazos, así como la base en la que se soportan. En la figura 4.4 se pueden observar las partes que lo conforman.

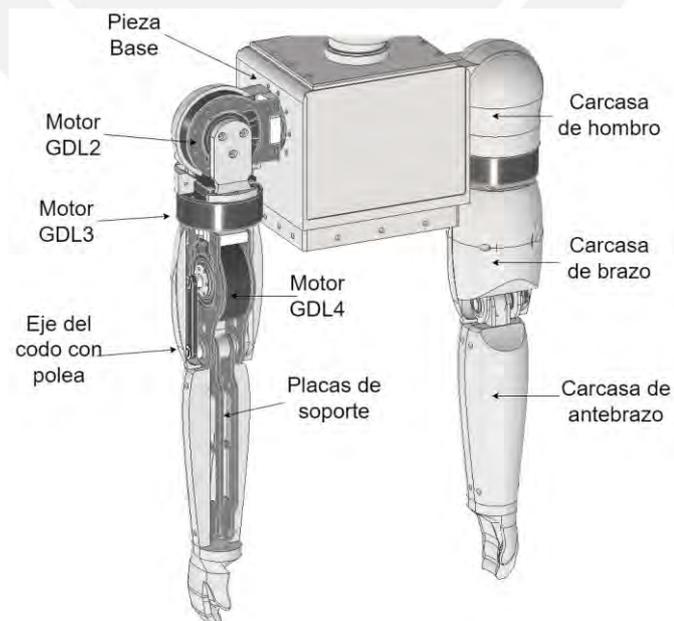


Figura 4.4 Subsistema de brazos (Elaboración propia)

4.2.1 Elementos de transmisión y movimiento

Actuadores

Para la selección del modelo de motor a utilizar para cada extremidad, se ha seguido un proceso iterativo del cálculo del torque requerido. En el caso de las articulaciones del brazo, se ha calculado el torque estático necesario para mantener su posición crítica (extendido) como se muestra en el esquema de la figura 4.5.

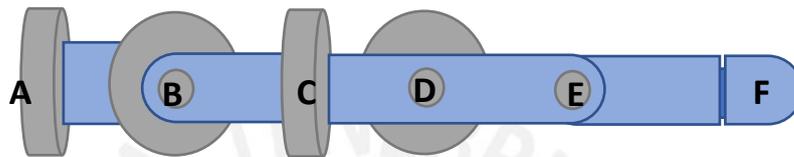


Figura 4.5 Esquema de brazo extendido con sus 4 motores (Elaboración Propia)

El resultado preliminar para el máximo torque en el punto A fue de 3 Nm, por lo que, aplicando un factor de seguridad de 2, se define el requerimiento de torque como 6 Nm. Se optó por buscar entre motores desarrollados a partir del modelo “Mini Cheetah” del MIT, ya que, a diferencia de otras opciones, el factor de forma es compacto, son de alto torque y poseen un controlador propio bastante robusto y de código abierto. Sobre este último punto, una de sus mayores ventajas es que facilitan la calibración de las constantes de control y el acceso a la lectura de sus encoders a través de una serie de comandos predefinidos enviados por bus CAN. En la tabla 4.1 se presentan las características de las alternativas encontradas.

Tabla 4.1 Tabla comparativa de motores para articulaciones del brazo (Elaboración Propia)

	Requisito			
Nombre/Modelo		RMD X8-Pro [1]	AK10-9 V1.1 [2]	GIM6010-36 [3]
Fabricante		Gyems	Cubemars	Brushless gimbal
Voltaje nominal		24/48V	24/48V	24V
Corriente nominal	-	6.5 A	18.5 A	4 A
Torque nominal	> 6 Nm	13 Nm	14 Nm	18 Nm
Velocidad max	>25rpm	200 rpm	500 rpm	90 rpm
Dimensiones	< ϕ 100 mm	ϕ 98 x 49 mm	ϕ 98 x 62 mm	Φ 68 x 61 mm
Comunicación		Bus CAN, 1Mbps	Bus CAN, 1Mbps Serial	Bus CAN, 1Mbps
Controlador interno		DRC20 – Control PD por posición, velocidad y torque	Control PD por posición, velocidad y torque	Control P D por posición, velocidad y torque
Encoder		Magnético 16 bit	Magnético 14 bit	Magnético 12 bit
Backlash		5 arc min	12 arc min	8 arc min
Peso	<1kg	710 g	650 g	574 g
Precio		\$439	\$498.9	\$315.99

[1] <http://www.gyems.cn/866757.html>

[2] <https://store.tmotor.com/goods.php?id=1148>

[3] <https://brushlessgimbal.ca/servo-motor-PM-list.pdf>

Tal como se observa, las tres opciones sobrepasan ampliamente los requerimientos de torque y velocidad, pero se diferencian en cuanto a la resolución del encoder y el *backlash* o juego. Dado que estas son características que impactan directamente en la robustez del sistema mecánico y la precisión del control de los movimientos, se selecciona el modelo RMD X8 – Pro.

Con el motor seleccionado se procede a hacer la verificación en el cálculo del torque. Las longitudes y masas finales para cada pieza fueron inicialmente estimadas y luego actualizadas a su valor final para el cálculo de los torques máximos de cada motor. Estos parámetros se encuentran detallados en el anexo F. Los valores finales obtenidos fueron:

$$T_{E_x} = 0.602 \text{ Nm}$$

$$T_{GDL3} = T_{B_x} = 3.173 \text{ Nm}$$

$$T_{GDL2} = T_{C_x} = 0.602 \text{ Nm}$$

$$T_{GDL1} = T_{A_x} = 3.173 \text{ Nm}$$

Además, con una polea de reducción 1:1 el torque en el motor GDL4: $T_{GDL4} = T_{D_x} = 0.602 \text{ Nm}$.

Con estos torques obtenidos para la posición estática más crítica, se verifica que el torque nominal de los motores RMD X8-Pro cumple para este requisito.

Piezas de unión y soporte

Las piezas estructurales son diseñadas para ser impresas mediante manufactura aditiva en material PLA. Se realizaron simulaciones por elementos finitos en el software Inventor 2021, para verificar la resistencia a los esfuerzos sometidos. Para ello se emplearon las propiedades mecánicas del PLA impreso a una densidad del 100% según Farah et al (2016).

Cabe resaltar que en la simulación el comportamiento del material es isotrópico, a diferencia de los valores reales, donde las piezas son fabricadas por capas y no es un sólido continuo. Sin embargo, una aproximación con un factor de seguridad alto permitirá estimar las piezas que luego serán validadas al fabricarse y probarse en el mecanismo completo. En la tabla 4.2 se muestran los resultados para cada pieza, mientras que el detalle de las simulaciones se encuentra en el Anexo G.

Tabla 4.2 Resultados de simulación de esfuerzos de piezas estructurales (Elaboración propia)

Pieza	Esfuerzo equivalente Von mises (MPa)		Deformación (mm)		Factor de seguridad	
	min	máx.	min	máx.	min	máx.
Base	0	1.78	0	1.48	15	15
Acople motor GDL1	0	0.319	0	0.0027	15	15
Placa soporte Hombro 1	0.04	16.66	0	3.3	4.2	15
Placa soporte Hombro 2	0.009	4.735	0	0.94	15	15
Acople motor GDL3	0.0005	0.1296	0	0.0003	15	15
Acople paralelo 1	0	0.331	0	0.01	15	15
Acople paralelo 2	0	0.421	0	0.2	15	15
Placa soporte Hombro 1	0.014	2.362	0	0.278	15	15
Placa soporte Hombro 2	0	3.056	0	0.488	15	15
Eje + antebrazo	0	14.2	0	0.2327	4.96	15

Mecanismo de Polea

El procedimiento de diseño del mecanismo de la polea se dividió en dos partes: la selección de la correa y poleas, y el diseño del mecanismo del eje.

a. Selección de correa y poleas

La selección de la correa dentada se realizó según el catálogo de correas, poleas y cadenas de SDP/SI (SDP/SI, s.f). Las tablas empleadas en este proceso se pueden apreciar en el Anexo H. Para iniciar, se escoge la serie GT2 por su tamaño y disponibilidad comercial.

El Torque máximo de carga según el análisis de la posición crítica es $T = 0.35$

$$T_{peak} = T \times 1.5 = 0.53 \quad (1)$$

También, según los requerimientos se espera que los motores tengan una velocidad no mayor a 150 deg/s. Observando el gráfico de selección, una correa de ancho 2 mm es suficiente.

La distancia mínima entre centros para una relación 1:1, y poleas comerciales de 20 dientes, es de 6.33 veces el paso: 12,732 mm. Para el diseño actual se establece una distancia entre centros de 84 mm, y empleando la herramienta web de SDP-SI (Stock Drive Products, 2021), se calcula un número de dientes de 104. Por lo tanto, la longitud de la correa será de 208 mm.

Finalmente se debe comprobar que el torque nominal para la correa no supere el torque pico, y que el número de dientes engranados sea el adecuado. Para el primer criterio se emplean la tabla 43 del catálogo SDP (Stock Drive Products, s.f.), del cual se obtiene un torque de 0.18 y factor de corrección por longitud de 0.95.

Como $0.18 \times 0.95 = 0.171 \text{ Nm} < T_{peak} = 0.53 \text{ Nm}$, el ancho es suficiente y podría usarse uno menor. En este caso se conserva debido a que es una medida comercial y accesible.

Por otro lado, el número de dientes engranados se calcula como:

$$\#Dientes \text{ engranados} = \frac{Arco \text{ de contacto} * n}{360} \quad (2)$$

$$\text{Arco de contacto} = 180 \frac{60(PD - pd)}{C} \quad (3)$$

n : número de dientes de polea menor

PD : Diámetro de polea mayor (pulg)

pd : Diámetro de polea menor (pulg)

C : distancia entre centros (pulg)

Con $PD = pd$, $C = 84$ y $n = 20$

$$\#Dientes engranados = 10 > 6$$

Por lo tanto, no requiere corrección de torque nominal. Los componentes seleccionados para el mecanismo son:

- Correa dentada GT2, paso 2 mm, 6mm de ancho y 208 mm de largo (104 dientes)
- Dos poleas metálicas dentadas GT2, paso 2mm, ancho 6mm, 20 dientes

b. Cálculo de diámetros del eje

Se evalúan dos posiciones críticas para el eje, que se muestran graficadas en la figura 4.6. Así, se conocerán los mayores esfuerzos a los que se somete la pieza y se podrá calcular un diámetro que permita obtener un factor de seguridad adecuado.

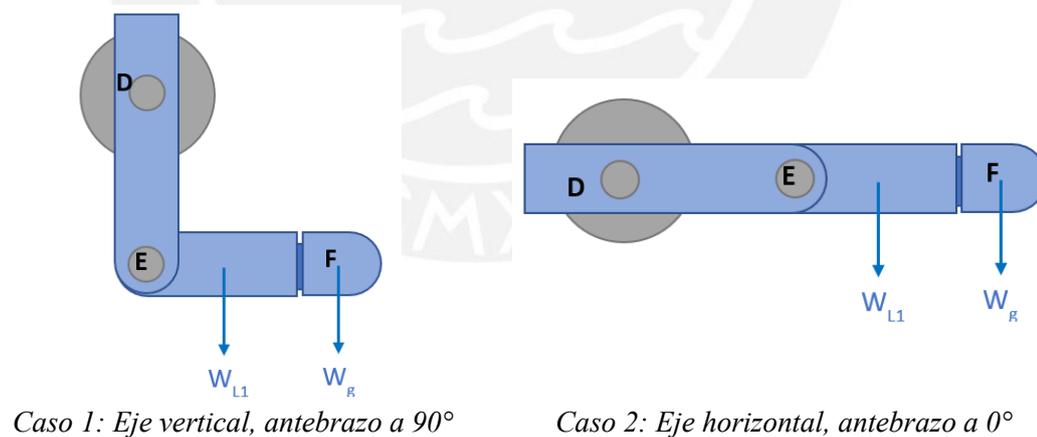


Figura 4.6 Casos a evaluar para diseño del eje (Elaboración Propia)

- Cálculo de diámetro previo

El diagrama de cuerpo libre en el caso 1 se muestra en la figura 4.7:

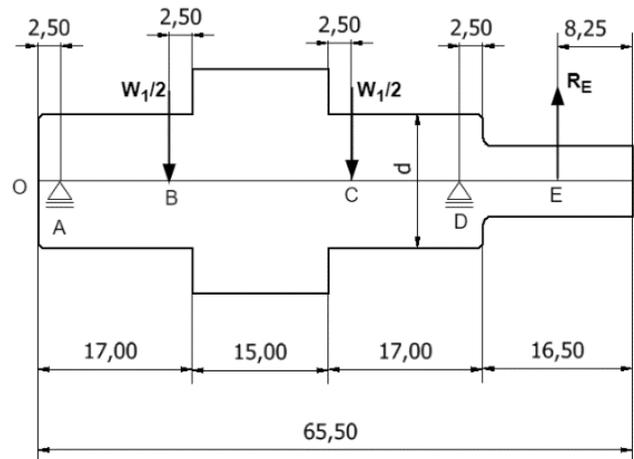


Figura 4.7 DCL caso 1 (Elaboración Propia)

Donde

W_1 : peso del antebrazo y mano soportado por el eje

R_E : reacción en eje de polea

$$R_E = T - W_p = \frac{T_E}{r} - W_p \quad (4)$$

T : tensión en la correa dentada

W_p : peso de la polea

T_E : Torque externo en la polea

r : radio de la polea

Se identifica la sección más cargada realizando los diagramas de fuerza cortante, momento flector y momento torsor (Anexo I), la cual se encuentra en el punto D. Se emplea el siguiente criterio para estimar el diámetro:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_f^2 + 3(\tau_t^2 + \tau_c^2)} < \sigma_{adm} = \frac{\sigma_F}{FS} \quad (5)$$

Se considera para PLA $\sigma_F = 70 \text{ MPa}$, y un factor de seguridad 5

Con $d=15$

$$\sigma_{eq} = 1.3 < 14$$

Luego, se calcula también los momentos y fuerzas en el caso 2, obteniéndose resultados semejantes (Anexo I).

- Verificación de resistencia a la fatiga

Se identifica que el momento flector es alternante, mientras que el momento torsor es pulsante. Se extraen los valores superior e inferior de los dos casos evaluados (tabla 4.3)

Tabla 4.3 Valores de esfuerzo flector y torsor en el eje (Elaboración Propia)

	superior	inferior	medio	alternante	σ_a'
Flexión	0.934	-0.934	0.000	0.934	1.147
Torsión	0.524	0.000	0.262	0.262	0.321

Se considera para el PLA:

$$\sigma_{Alt} = 4,9 Nmm^2 \quad \sigma_B = 38,7 Nmm^2$$

Así,

$$\sigma_{m_{eq}} = 0,37 Nmm^2$$

$$\sigma_{a'_{eq}} = 1,234 Nmm^2$$

$$FS = \frac{1}{\frac{\sigma_{a'_{eq}}}{\sigma_{Alt}} + \frac{\sigma_{m_{eq}}}{\sigma_B}}$$

Para el diámetro de 15 mm, el factor de seguridad $FS = 3,8$, que es un valor aceptable.

Se determina que diámetros menores a 11 tienen un factor de seguridad no admisible.

Finalmente, se mantiene este diámetro para esta sección del eje. Así mismo, de acuerdo a las dimensiones del eje y las placas de soporte, se escogen los rodamientos de bolas SKF 61802, cuyas especificaciones se muestran en la figura 4.8.

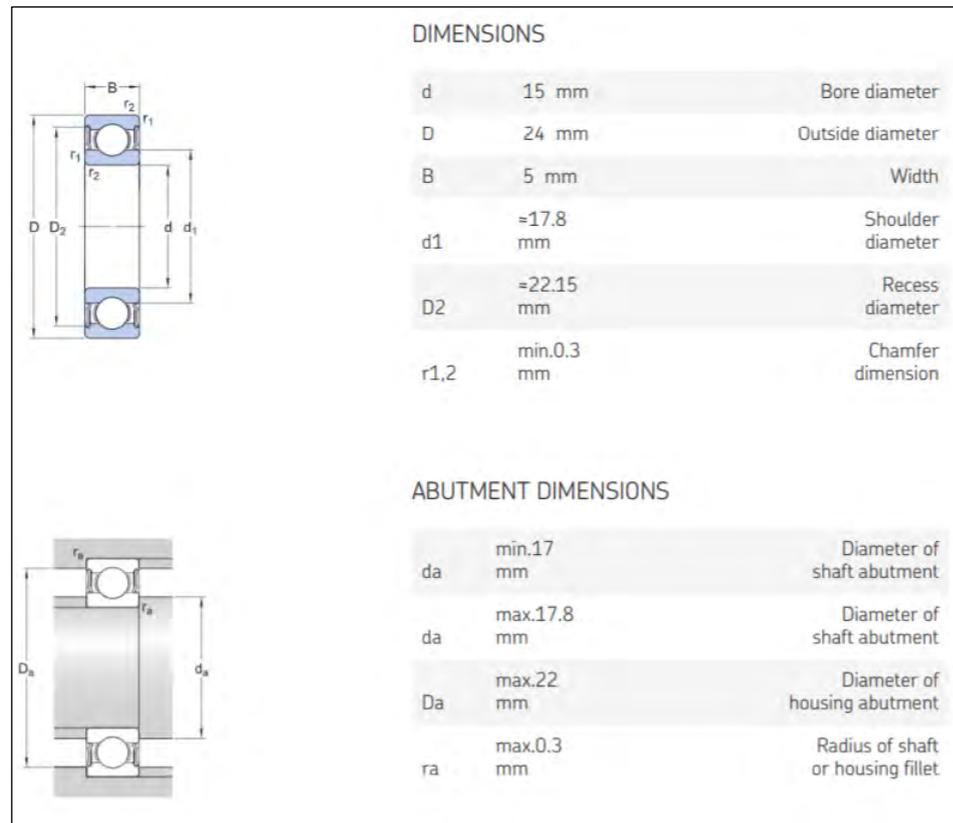


Figura 4.8 Especificaciones rodamiento de bolas SKF 16802 (SKF, 2021)

4.2.2 Modelo cinemático

En esta sección se buscará obtener el modelo para el cálculo de la posición del extremo del brazo (mano) mediante cinemática directa. Además, pese a que el control por velocidad del efector final no es parte del alcance de este trabajo, se definirá la matriz Jacobiana para conocer si se presentan singularidades y cómo resolverlas en un trabajo futuro.

En primer lugar, se definieron los siguientes sistemas de referencia para cada unión tal como se ve en la figura 4.9:

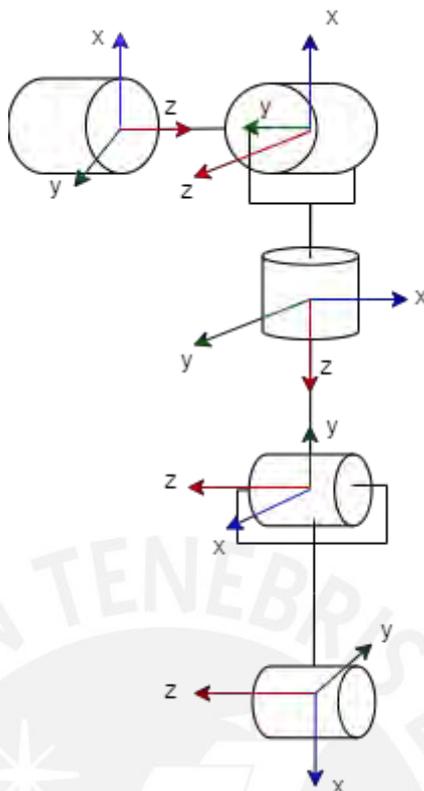


Figura 4.9 Diagrama cinemático del brazo (Elaboración Propia)

Cinemática Directa

Se hallaron los parámetros de Denavit-Hatemberg

Tabla 4.4 Parámetros Denavit-Hatemberg (Elaboración propia)

	a_i	α_i	d_i	θ_i
1		-90	L1	Q1
2		90	L2	Q2-90
3		-90	L3	Q3+90
4	L4			Q4-90

Las matrices de transformación son:

$$A_1 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & -s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & c_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} s_3 & 0 & -c_3 & 0 \\ -c_3 & 0 & -s_3 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & L_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} s_2 & 0 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & 0 & -s_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} s_4 & c_4 & 0 & L_4 s_4 \\ -c_4 & s_4 & 0 & -c_4 L_4 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde $c_i = \cos(\theta_i)$ y $s_i = \text{sen}(\theta_i)$

La matriz de transformación T_6^0 se obtiene de la multiplicación de las matrices anteriores:

$$T_4^0 = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \quad (6)$$

$$= \begin{bmatrix} -s_4(c_3s_1 + c_1s_2s_3) - c_1c_2c_4 & c_1c_2s_4 - c_4(c_3s_1 + c_1s_2s_3) & s_1s_3 - c_1c_3s_2 & -L_2s_1 - c_1c_2L_3 - L_4s_4(c_3s_1 + c_1s_2s_3) - c_1c_2c_4L_4 \\ s_4(c_1c_3 - s_1s_2s_3) - c_2c_4s_1 & c_4(c_1c_3 - s_1s_2s_3) + c_2s_1s_4 & -c_1s_3 - c_3s_1s_2 & c_1L_2 - c_2L_3s_1 + L_4s_4(c_1c_3 - s_1s_2s_3) - c_2c_4L_4s_1 \\ c_4s_2 - c_2s_3s_4 & -s_2s_4 - c_2c_4s_3 & -c_2c_3 & L_1 + L_3s_2 + c_4L_4s_2 - c_2L_4s_3s_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Por lo tanto, las coordenadas del efector final, en este caso la mano del robot, están dadas por:

$$x = -L_2s_1 - c_1c_2L_3 - L_4s_4(c_3s_1 + c_1s_2s_3) - c_1c_2c_4L_4 \quad (7)$$

$$y = c_1L_2 - c_2L_3s_1 + L_4s_4(c_1c_3 - s_1s_2s_3) - c_2c_4L_4s_1 \quad (8)$$

$$z = L_1 + L_3s_2 + c_4L_4s_2 - c_2L_4s_3s_4 \quad (9)$$

Luego, también es posible hallar el vector de velocidad de la mano, calculando la matriz Jacobiana (J). Se tiene:

$$\begin{bmatrix} v_n \\ \omega_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_v \\ J_\omega \end{bmatrix} \dot{\theta} = J \dot{\theta}$$

Se puede calcular la Jacobiana definiendo los vectores unitarios z_i y vectores de origen o_i , que se pueden hallar a partir de las matrices de transformación desde el origen a cada articulación. Estas son:

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & -s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & c_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2^0 = \begin{bmatrix} c_1s_2 & -s_1 & -c_1c_2 & -L_2s_1 \\ s_1s_2 & c_1 & -c_2s_1 & 0 \\ c_2 & 0 & s_2 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3^0 = \begin{bmatrix} -c_3s_1 - c_1s_2s_3 & c_1c_2 & s_1s_3 - c_1c_3c_2 & -L_2s_1 - c_1c_2L_3 \\ c_1c_3 - s_1s_2s_3 & c_2s_1 & -c_1s_3 - c_3s_1s_2 & c_1L_2 - c_2L_3s_1 \\ -c_2s_3 & -s_2 & -c_2c_3 & L_1 + L_3s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Así, se obtiene la Jacobiana:

$$J = [J_1 \quad J_2 \quad J_3 \quad J_4]$$

Donde

$$J_1 = \begin{bmatrix} c_2L_3s_1 - c_1L_2 - L_4s_4(c_1c_3 - s_1s_2s_3) + c_2c_4L_4s_1 \\ -L_2s_1 - c_1c_2L_3 - L_4s_4(c_3s_1 + c_1s_2s_3) - c_1c_2c_4L_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} c_1(L_3s_2 + c_4L_4s_2 - c_2L_4s_3s_4) \\ s_1(L_3s_2 + c_4L_4s_2 - c_2L_4s_3s_4) \\ (c_1^2 + c_1^2)(c_2L_3 + c_2c_4L_4 + L_4s_2s_3s_4) \\ -s_1 \\ c_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$J_3 = \begin{bmatrix} L_4s_4(s_1s_3c_2^2 + s_1s_3s_2^2 - c_1c_3s_2) \\ L_4s_4(c_1s_3c_2^2 + c_1s_3s_2^2 + c_3s_1s_2) \\ -c_2c_3L_4s_4(c_1^2s_1^2) \\ -c_1c_2 \\ -c_2s_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$J_4 = \begin{bmatrix} c_2c_3(L_4s_4(c_1c_3 - s_1s_2s_3) - c_2c_4L_4s_1) - (c_4L_4s_2 - c_2L_4s_3s_4)(c_1s_3 + c_3s_1s_2) \\ c_2c_3(L_4s_4(c_3s_1 + c_1s_2s_3) + c_1c_2c_4L_4 - (c_4L_4s_2 - c_2L_4s_3s_4)(s_1s_3 - c_1c_3s_2)) \\ -L_4(c_1^2 + s_1^2)(s_2s_4c_3^2 + s_2s_4s_3^2 + c_2c_4s_3) \\ s_1s_3 - c_1c_3s_2 \\ -c_1s_3 - c_3s_1s_2 \\ -c_2c_3 \end{bmatrix}$$

Dado que el brazo tiene 4 grados de Libertad, la matriz Jacobiana de 6x4 no es cuadrada, por lo cual no es posible usar $|J| = 0$ para calcular los puntos en los que se encuentran las singularidades. Sin embargo, si se requiere controlar la velocidad de la mano en función de las velocidades angulares de los motores (velocidad inversa), es posible usar la pseudoinversa de J, la cual no es afectada por los puntos singulares (Spong et al. 2020).

4.2.3 Diseño externo de brazos

La parte externa de los brazos constará de tapas atornilladas a las piezas estructurales o a los motores que tienen la función de cubrir los actuadores y el cableado interno, y de dar una forma antropomórfica a las extremidades. Para su diseño se ha tomado en cuenta factores del método de manufactura como el tamaño de la impresora, facilidad de impresión por capas, uso de material de soporte, etc. El resultado se muestra en las siguientes figuras:

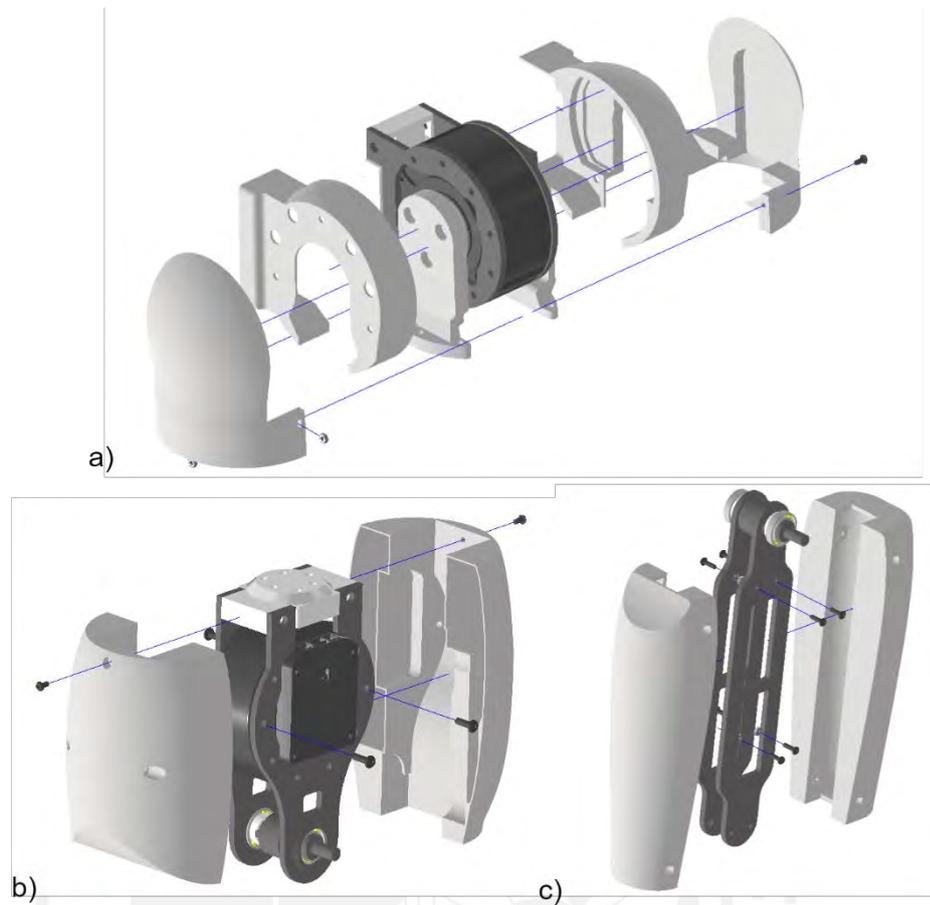


Figura 4.10 Vista explotada de a) hombro, b) brazo y c) antebrazo. (Elaboración Propia)

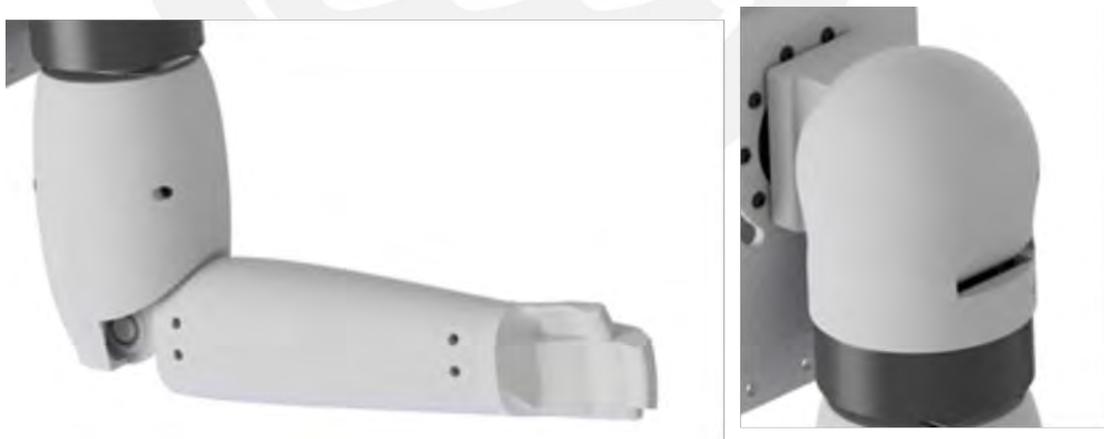


Figura 4.11 Carcasas del brazo y hombro ensambladas. (Elaboración Propia)

4.3 Subsistema de cabeza

El subsistema de la cabeza está conformado por los actuadores que le dan movimiento a la articulación del cuello, las piezas de soporte, y los módulos electrónicos que

permiten la emisión de luz y sonido para expresividad del robot (ojos y voz), tal como se puede ver en la figura 4.12.

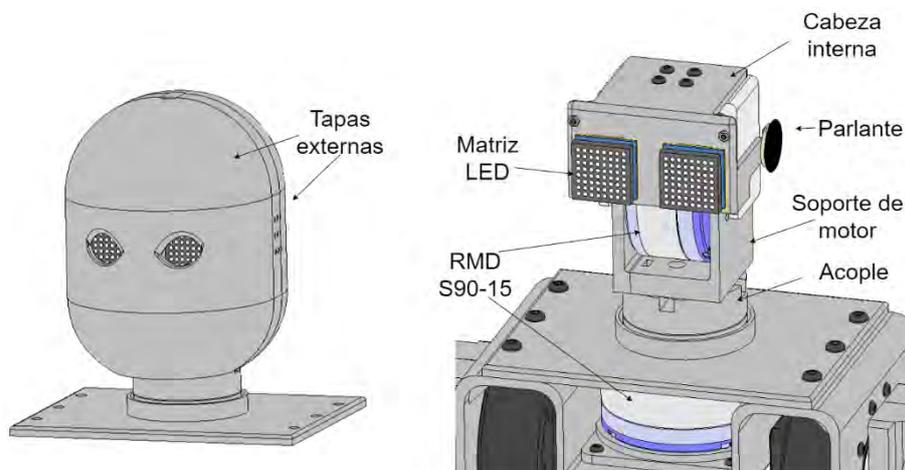


Figura 4.12 Subsistema de Cabeza. (Elaboración Propia)

4.3.1 Elementos de movimiento

Actuadores

Así como en el caso de los brazos, los motores brushless con control integrado de diferentes marcas son similares entre sí. Por fines prácticos, y para mantener uniformidad en el hardware y software de control, se selecciona un motor del mismo fabricante (GYEMS), pero de menores dimensiones y menor torque nominal. Las especificaciones se encuentran en el Anexo E. En la tabla a continuación se muestran las más importantes:

Tabla 4.5 Especificaciones de motor RMD S9015 (Elaboración propia)



Nombre/Modelo	RMD S9015
Voltaje nominal	24V
Corriente máxima	3.10 A
Torque nominal	1.55 Nm
Dimensiones	Φ89 x 42 mm
Comunicación	Bus CAN, 1Mbps
Controlador interno	DRC05 V2 – Control por posición, velocidad y torque
Encoder	12 bit

Al igual que los motores de los brazos, estos cuentan con un controlador interno, esta vez modelo DRC20, y se comunica mediante CAN. Ya que necesita soportar menores cargas, el torque de este servomotor es más reducido.

Piezas de unión y soporte

En la figura 4.13 puede verse de forma detallada el mecanismo de 2 grados de libertad que permite la articulación del cuello. Este consta de distintas piezas impresas (planos D-0027-A3 a D-0035-A3) que se unen mediante uniones atornilladas o geométricas para transmitir el movimiento de cada motor.

Dado que el peso de los componentes electrónicos en la pieza de soporte de cabeza interna es liviano, y además el segundo motor se encuentra alineado con el eje de rotación del primero, se espera que los torques y los esfuerzos no sean críticos para este subsistema. Por tanto, los rodamientos se seleccionan más bien por sus dimensiones y la practicidad del diseño.

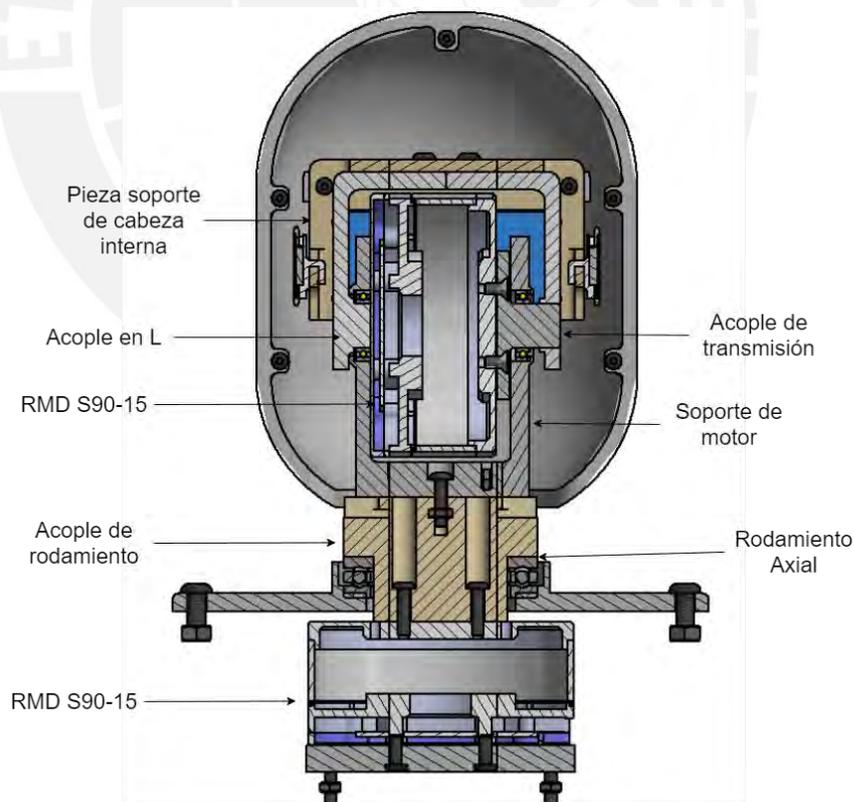


Figura 4.13 Mecanismo de 2 GDL de la cabeza (Elaboración Propia)

Para el rodamiento axial se tiene como restricción que el diámetro interno sea mayor o igual a 45 mm para poder insertar los pernos de unión al eje del motor en la pieza de acople. Así mismo se espera que el espesor o altura sea mínimo para poder adecuarse al diseño del cuello. De acuerdo con estos criterios y la disponibilidad del mercado local, se selecciona el rodamiento axial SKF 51109 cuyas especificaciones se muestran en la figura 4.14.

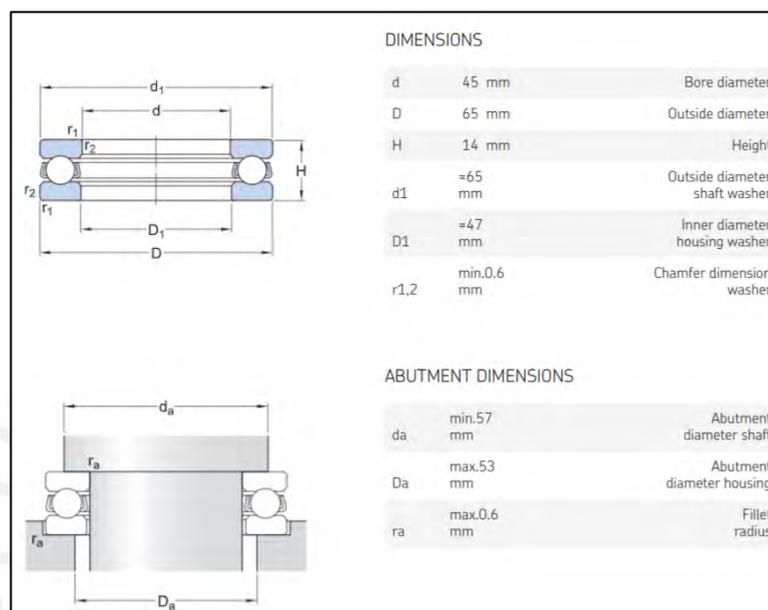


Figura 4.14 Especificaciones del rodamiento SKF 51109 (SKF, 2021)

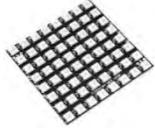
Por practicidad, y dado que se ajusta a las dimensiones requeridas, para los rodamientos radiales del GDL 2 se selecciona el rodamiento SKF 16802 mencionado en la sección 4.2.

4.3.2 Sistema de luz y sonido

Matrices Led

La matriz o marices led cumplirán la función de definir las formas de los ojos y simular movimiento y expresividad en el rostro del robot. Para la selección se consideran los modelos disponibles en el mercado local, se pueden ver en la tabla 4.6. Se seleccionan las matrices pequeñas (MAX7219) ya que tienen el tamaño y resolución más adecuadas para la caracterización de cada ojo.

Tabla 4.6 Comparativa entre matrices Led. (Elaboración Propia)

Imagen	Requisito		
Modelo	-	MAX7219 Matriz LED [1]	MATRIZ LED WS2812B [2]
Dimensiones	< 70x70 mm	32x32x13 mm	65x65 mm
Matriz	-	8x8	8x8
Color	-	Rojo	RGB
Corriente	-	320mA	60 mA cada led
Voltaje	5V o 3.3V	5V	5V
Comunicación / Control	-	SPI	Pin digital, control de cada led
Precio	-	S/ 11.50	S/ 50

[1] <https://www.hifisac.com/en/shop/product/max7219-pcb-max7219-led-8x8-dot-matrix-display-module-mcu-control-2657>

[2] <https://naylampmechatronics.com/led/406-matriz-led-ws2812b-8x8.html>

Sistema de audio

El sistema de audio se compone parlantes o altavoces pequeños ubicados en la cabeza del robot y un módulo reproductor de archivos MP3.

- Parlantes

La función de los parlantes es emitir el sonido procesado por el reproductor. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, los valores de referencia de sonido en hospitales se encuentran entre los 30 y 40 dB LAeq (OMS, 1999). Por tanto, será suficiente contar con parlantes de baja potencia (1W = 90dB), considerando además que es posible regular el volumen con el reproductor.

Tabla 4.7 Tabla comparativa de parlantes. (Elaboración Propia)

Imagen	Requisito			
Diámetro	< 60 mm	28 mm	26 mm	50 mm
Potencia Nominal	< 3 W	0.5 W	1 W	1 W
Impedancia	-	8 ohm	8 ohm	8 ohm
Precio	-	S/6	S/3.50	S/4

[1] <https://naylampmechatronics.com/sensores-luz-y-sonido/307-altavoz-05w.html>

[2] <https://hifisac.com/en/shop/product/sp-26mm-parlante-de-8-ohm-26mm-1w-wsc-42?search=parlante>

[3] <https://hifisac.com/en/shop/product/sp-50mm-parlante-de-8-ohm-diametro-50mm-1w-wsc-6690?search=parlante>

Se selecciona el de 26 mm debido al diámetro pequeño de 26 mm que permitirá ensamblarlo en la cabeza del robot.

- Reproductor MP3

La función del reproductor MP3 será la de procesar las pistas de audio pregrabadas para simular la voz del robot o emitir diferentes sonidos grabados por el usuario. Cuentan con control por comandos seriales para la comunicación con el microcontrolador. Según las opciones disponibles en el mercado local, se tienen los modelos descritos en la tabla 4.8.

Se selecciona el DF Player MINI ya que cuenta con una ranura para una tarjeta de memoria microSD, lo cual facilitará la grabación y el cambio de pistas según requiera el usuario, y en comparación a la segunda opción (YX5300) tiene un menor consumo de corriente y menor precio.

Tabla 4.8 Tabla comparativa de módulos mp3. (Elaboración Propia)

	Requisitos			
Modelo	-	DF Player MINI [1]	Serial MP3 Player YX5300 [2]	Módulo de sonido JQ6500 [3]
Fabricante	-	DFRobot	Catalex	Shenzhen Jiaqiang Electronic Technology
Comunicación	-	Serial, 9600 bps	Serial, 9600 bps	Serial, baudrate configurable
Voltaje de alimentación	3.3V o 5V	3.2 – 5.2 V	3.2 – 5.2 V	3.2-5V
Voltaje TTL	3.3V	3.3V TTL	3.3 / 5 V	3.3V TTL
Corriente	-	20mA	200 mA	20mA
Frecuencias de muestreo soportadas	16 - 44 kHz	8 - 48 kHz	8 - 48 kHz	8 - 44 kHz
Control de volumen	Sí	Sí	Sí	Sí
Potencia máxima de parlante	-	3 W	3 W	3 W
Memoria	≥ 2 Mb	Micro SD externa	MicroSD, micro SDHC externas	Flash interna 2Mb
Dimensiones	-	22 x 20 x 15 mm	49x24x8.5mm	22 × 18 × 4 mm
Precio	-	S/ 12.10	S/ 20	S/ 18

[1] <https://hifisac.com/en/shop/product/dfplayer-mini-dfplayer-mini-mp3-player-module-2573>

[2] <https://naylorpmechatronics.com/sensores-luz-y-sonido/389-modulo-mp3-yx5300.html>

[3] <https://www.makercreativo.com/store/producto/modulo-sonido-jq6500-mp3-usb/>

- Amplificador

El amplificador de audio es necesario para poder operar más de un parlante en modo estéreo, además de brindarle mayor volumen al sonido emitido. Para la selección se consideran los dos amplificadores disponibles en el mercado local que cumplen los requisitos para el caso de este sistema. Se selecciona el PAM8403 ya que es más adecuado según la potencia de los parlantes, y además se tiene referencias de su uso junto con el módulo DF Player anteriormente seleccionado.

Tabla 4.9 Tabla comparativa de amplificadores de audio. (Elaboración Propia)

Imagen	Requisitos		
Modelo		PAM8403 [1]	TDA2030-1PCB [2]
Voltaje	5V – 7.4V	2.5V - 5V	6V – 12V
Corriente salida	-	2.5 A	3A
Potencia máxima parlantes	2W	3W	18W
Impedancia parlantes	8 Ohm	4 -8 ohm	4 – 8 ohm
Precio		S/ 5	S/. 6.90

[1] <https://www.hifisac.com/shop/product/pam8403-amplificador-de-audio-3w-stereo-clase-d-2-5a-5v-6003>

[2] <https://www.hifisac.com/shop/product/tda2030-1pcb-amplificador-de-potencia-de-audio-18w-con-circuito-tda2030-6566>

4.3.3 Diseño externo de cabeza móvil

Para cubrir los componentes se diseña una tapa con forma de cabeza y agujeros para dejar ver las expresiones de los ojos dadas por los puntos de las matrices led. Para fijarla a la parte móvil, se une por uniones atornilladas con la pieza interna. También se une la pieza exterior por el lado posterior.

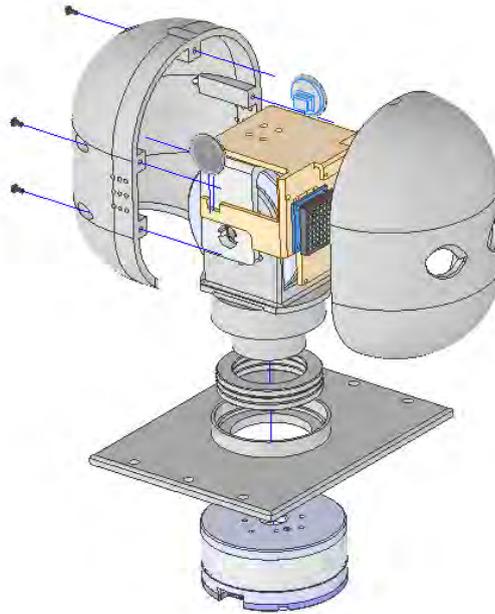


Figura 4.15 Diseño externo de cabeza móvil. (Elaboración Propia)

4.4 Subsistema de energía

El sistema de extremidades es alimentado por dos baterías, de modo que se mantiene aislado el circuito de potencia de 22.6 V con el cual se energizan los servomotores, del circuito de menor voltaje (7.4V) para el microcontrolador y demás componentes menores. Esto se puede ver en la figura 4.16, donde también se incluye la conexión del botón de parada de emergencia en conexión normalmente cerrada.

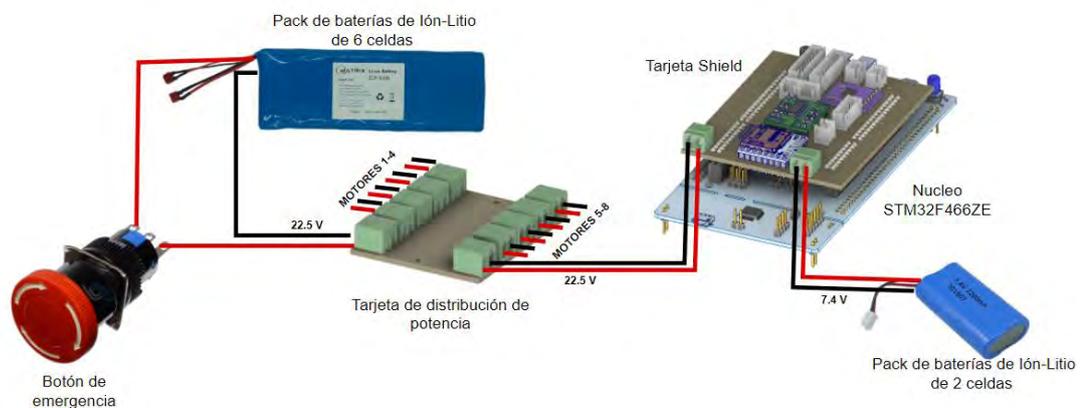


Figura 4.16 Diagrama de conexiones de subsistema de energía. (Elaboración Propia)

4.4.1 Selección de baterías

A continuación, se muestra una tabla de resultados de la corriente consumida por cada motor en cada tipo de acción (reposo, movimiento o estático en una posición crítica). Para ello se observa el consumo de corriente indicado en la fuente de alimentación al realizar cada movimiento en el prototipo ensamblado.

Tabla 4.10 Resultados de pruebas de consumo de corriente de cada motor en reposo, movimiento y posición crítica. (Elaboración Propia)

	Cant.	Componente	Corriente por unidad [A]			Corriente total [A]		
			Reposo	Mov.	Pos. Crítica	Reposo	Mov.	Pos. Crítica
Brazos	2	RMD X8 Pro - GDL1	0.044	0.072	0.09	0.088	0.144	0.18
	2	RMD X8 Pro - GDL2	0.044	0.057	0.073	0.088	0.114	0.146
	2	RMD X8 Pro - GDL3	0.03	0.06	0.08	0.06	0.12	0.16
	2	RMD X8 Pro - GDL4	0.03	0.06	0.18	0.06	0.12	0.36
Totales			0.148	0.249	0.423	0.296	0.498	0.846
Cabeza	1	RMD S 9015 - GDL 1	0.01	0.03	0.03	0.01	0.03	0.03
	1	RMD S 9015 - GDL 2	0.02	0.05	0.05	0.02	0.05	0.05
Totales			0.03	0.08	0.08	0.03	0.08	0.08

Con esta información se realiza una aproximación del consumo de corriente total del sistema para una autonomía de 1.5 horas. Dado que los brazos y cabeza no estarán en movimiento continuo, sino que se activarán en determinadas situaciones, se le asigna a cada caso un porcentaje de uso estimado dentro del total deseado. Para la alimentación se tendrá una batería de 6 celdas (22.4V) para la sección de potencia (servomotores) y otra para control o componentes de menor voltaje (7.4V).

Tabla 4.11 Cálculo del consumo total estimado por componente del sistema. (Elaboración Propia)

Componente	Corrientes [A]			Tiempos %			Consumo total [Ah]
	Uso en reposo	Uso normal	Uso crítico	Uso en reposo	Uso normal	Uso crítico	
Brazo 1	0.296	0.498	1.9	0.7	0.2	0.1	0.745
Brazo 2	0.296	0.498	1.9	0.7	0.2	0.1	0.745
Cabeza	0.03	0.08	0.08	0.7	0.2	0.1	0.0675
Total Batería 6S							1.5579
Matrices led	0.219	0.219	0.366	0.6	0.3	0.1	0.35
Microcontrolador	0	0.1	0.45	0	1	0	0.5
Módulo mp3	0.02	0.05	0	0.6	0.4	0	0.048
Amplificador	0.013	0.2	0.4	0.6	0.3	0.1	0.164
Módulo CAN	-	-	0.075	-	-	1	0.113
Total Batería 2S							0.825

Se estima que serán necesarias baterías de 1,6 Ah y 0.6 Ah aproximadamente. Dado que las celdas de Ion-Litio comerciales en el mercado local para la elaboración de bancos de baterías de litio recargables son de 2000 mAh, se obtendrá mayor capacidad de la deseada.

4.4.2 PCB de alimentación

En cuanto al hardware, debido a que la corriente máxima consumida por los motores no es excesiva, se plantea el uso de una placa de distribución de corriente en la cual se encuentran entradas para la batería de 24V, salidas para los 8 motores de los brazos y una salida hacia la placa de control que contiene los conectores de los motores de la cabeza.

Para comprobar la viabilidad de usar una PCB se calcula el ancho de pista necesario según la corriente máxima, en este caso 2A. Se emplean las siguientes ecuaciones basadas en la norma IPC 2221 para el diseño de circuitos impresos (Digikey Electronics, 2021):

$$\text{Ancho} = \text{Área} \times 1.378 \quad (10)$$

$$\text{Área} = \frac{I}{k_1 \Delta T k_2} \quad (11)$$

Donde I es la corriente máxima que circula por la pista y las constantes de cálculo para una pista externa, por ejemplo, para la inferior son las siguientes:

$$\begin{aligned} k_1 &= 0.0647 \\ k_2 &= 0.4281 \\ k_3 &= 0.6732 \end{aligned}$$

Considerando estos datos, una variación de temperatura de 10° y un espesor de cobre de 1 oz, se obtiene que el ancho de pista necesario es de 30,76 mills. Por tanto, es factible emplear una pcb para este caso. El valor hallado se multiplica por un factor de seguridad de 1.6, por lo que finalmente se emplean pistas de ancho 50 mills.

Los conectores a utilizar son del modelo WR-TBL 691322310002, que permiten una fácil conexión y desconexión, además de un ajuste seguro. En la figura 4.17 se muestra la vista de *board* del circuito impreso, mientras que el detalle de las conexiones se puede ver en el plano electrónico (Anexo K).

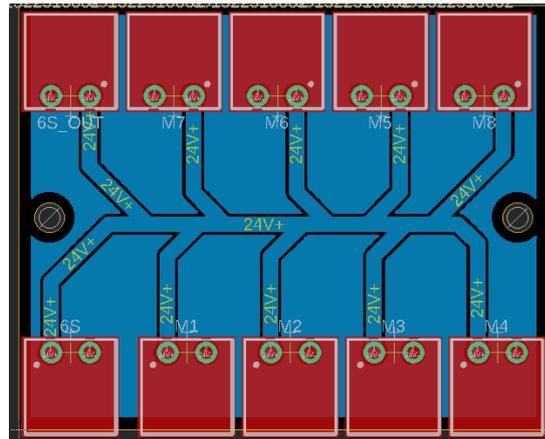


Figura 4.17 Circuito impreso de alimentación. (Elaboración Propia)

4.5 Subsistema de control y comunicación

En esta sección, se describirá el hardware y software correspondiente al subsistema de control y comunicación, compuesto principalmente por el microcontrolador, el transceptor CAN y la interfaz alojada en la computadora principal del robot.

4.5.1 Interfaz de desarrollador

La función de la interfaz es facilitar la realización de pruebas de las diferentes funcionalidades del sistema por parte de un desarrollador, previo a la integración en la plataforma móvil. Esta será ejecutada desde una computadora externa, empleando un programa en Python haciendo uso principalmente de las librerías Tkinter y Python Serial. Constará de una ventana con dos secciones principales, como se muestra en la figura 4.18:

- Visualización (1): Se encuentran los datos principales por cada motor (2) y el audio que se está reproduciendo (3)
- Control/Comandos (4): A través de un menú desplegable puede seleccionarse un motor de cualquier extremidad y moverlo hacia una posición deseada con un deslizador (5). Cuenta con seis botones para la selección de las posiciones predefinidas (6), un menú desplegable para seleccionar una pista de audio para reproducir (7), y un botón para grabar la posición actual seleccionando la secuencia a la que corresponde, número de pose y tiempo de ejecución (8).

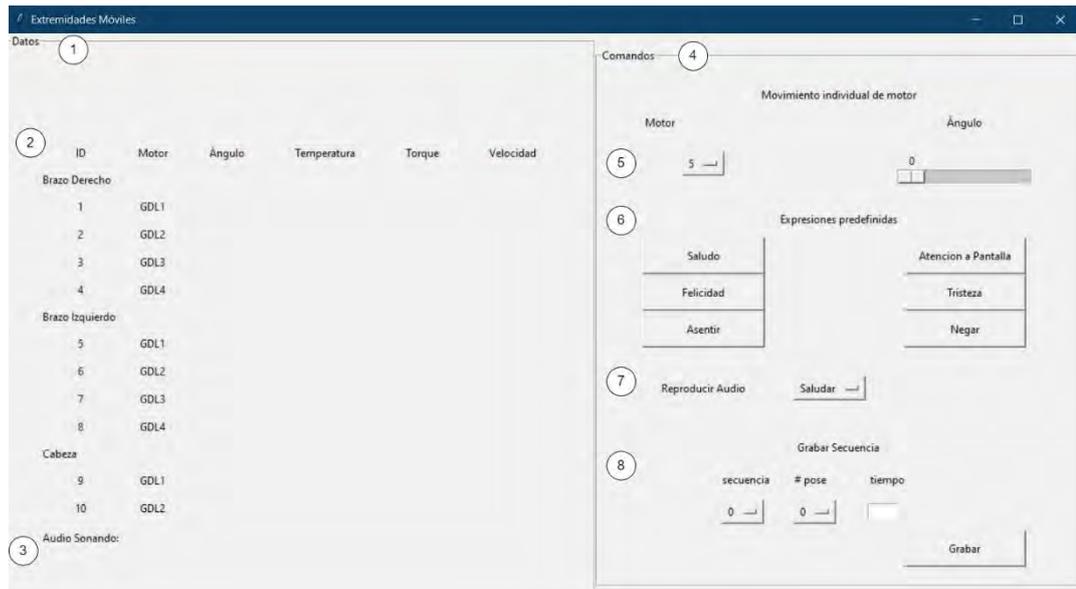


Figura 4.18 Interfaz gráfica de usuario (Elaboración propia)

4.5.2 Microcontrolador

La función del microcontrolador es la de realizar el control de los 10 servomotores para brazos y cabeza, y además de controlar los demás periféricos como matrices led o reproductor mp3. La tabla 4.12 muestra la comparación entre las principales tarjetas de desarrollo encontradas.

Tabla 4.12 Comparación de tarjetas de desarrollo con microcontrolador (Elaboración propia)

	Requisitos			
Modelo	-	MC6030 [1]	Nucleo STM32446ZE [2]	Tiva Launchpad [3]
Fabricante	-	GYEMS	STM Microelectronics	Texas Instruments
Microcontrolador	-	STM32F446RCT6	STM32F446ZE	TM4C123GH6PM
Voltaje de alimentación	-	10V-60V	3.3V, 5V, 7-12V	5V
Nivel de voltaje – lógica	-	3.3 V TTL	3.3 V TTL	3.3 V TTL
Voltaje de Salida	5V	5V	5V, 3.3V	5V, 3.3V
Comunicación	CAN x1 UARTx2	CAN x1, USART x2, SPI x1	CAN x2, UART x2, USART x4, SPI x4, USB 2.0	CAN x2, SPI x4, UART x8, USB 2.0
Frecuencia de operación	-	180 MHz	180 MHz	80 MHz
Puertos GPIO	-	7	144	43
Interfaz de programación/depurador incluido	-	No	Si	Si
Precio	-	S/ 529.93 *	S/ 174.90	S/ 165

*Cambio de dólar al 25 de septiembre: 1USD=4.11PEN

[1] <https://www.myactuator.com/product-page/mc6030>

[2] <https://joslinperu.com/product/nucleo-stm32f446ze/>

[3] <https://joslinperu.com/product/tiva-c-series-tm4c123gx1/>

Se requiere que la tarjeta de desarrollo cuente con comunicación CAN compatibles con los motores, puertos UART o USART para la comunicación con la computadora central y del módulo reproductor MP3, y puertos SPI para el control de las matrices LED. Finalmente, se escoge la tarjeta Nucleo STM32446ZE ya que, en comparación a otras opciones, es más accesible en el mercado local y también tiene una mayor frecuencia de operación lo cual le permite una respuesta más rápida.

4.5.3 Módulos de comunicación

Módulo de comunicación CAN

La función del módulo transceptor CAN es la de ejecutar el protocolo CAN y servir de interfaz para el bus de datos. Se consideran las opciones disponibles en el mercado local, mostradas en la tabla 4.13.

Tabla 4.13 Comparación de Módulos de comunicación CAN. (Elaboración Propia)

	Requisitos		
Modelo	-	MCP2515 [1]	MCP2551 [2]
Interfaz	CAN/SPI/UART	SPI	CAN
Transceptor	-	TJA1050	MCP2551
Tasa de bits	1Mbps	1Mbps	1Mbps
Voltaje	3.3V o 5V	5V	5V
Precio		S/ 14.10	S/ 10

[1] https://hifisac.com/en/sh_op/product/mcp2515-pcb-mcp2515-can-bus-module-board-2659

[2] <https://www.teslaelectronic.com.pe/producto/modulo-canbus-con-mcp2551/>

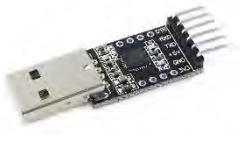
Se selecciona el MCP2551, ya que dispone una conexión directa a los puertos CAN. Ya que el microcontrolador si posee este puerto, no requiere una interfaz SPI intermedia como el MCP2515.

Módulo de USB a TTL

El convertor de USB a TTL se empleará para la comunicación mediante UART entre el microcontrolador y la computadora donde se encuentre la interfaz de desarrollo.

En la tabla 4.14 se muestran las opciones encontradas en el mercado local.

Tabla 4.14 Comparación de Módulos de comunicación USB a TTL. (Elaboración Propia)

	Requisitos		
Modelo	-	CP2102 [1]	FTDI-FT232RL [2]
Nivel lógico	TTL 3.3V	TTL 3.3V – 5V	TTL 3.3V – 5V
Conector USB	-	Tipo A	Mini USB
Versión USB	Mínimo 2.0	2.0	2.0
Precio		S/ 12	S/ 9.30

[1] <https://naylorlampmechatronics.com/conversores-ttl/79-modulo-cp2102-conversor-usb-a-serial-ttl.html>

[2] <https://joslinperu.com/product/ftdi-ft232rl/>

Se selecciona el CP2102 por su facilidad de conexión directa al puerto USB tipo A de una computadora sin la necesidad de cables adaptadores adicionales.

4.5.4 Protocolos de comunicación

En la figura 4.19 se puede observar un diagrama de las comunicaciones entre los componentes de control principales y sus correspondientes protocolos de comunicación. A continuación, se detalla cada uno de ellos y las tramas a utilizar.

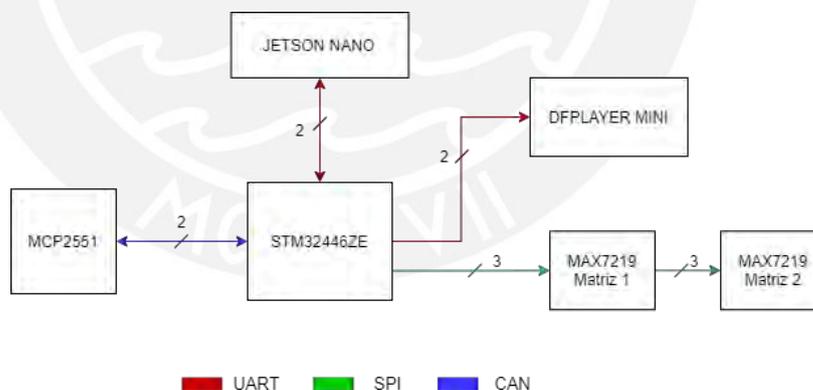


Figura 4.19 Esquema de comunicación entre microcontrolador, computadora y periféricos. (Elaboración Propia)

- UART – Jetson Nano

Este protocolo está configurado a 115200 bps, longitud de datos de 8 bits, sin paridad y con 1 bit de parada. Para las comunicaciones con la computadora principal, se ha definido que la trama debe iniciar con un caracter de identificación, seguido de la longitud de la trama, el comando y los datos asociados a este:

'\$' + longitud[1] + cmd[1] + data[n]

En la tabla 4.15 y la tabla 4.16 se resume la lista de comandos utilizados tanto para el envío como la recepción de datos y comandos.

Comandos enviados por la computadora principal

1. Solicitar datos de posición (ángulos) de los motores de una de las extremidades
2. Seleccionar una posición predefinida de una de las extremidades
3. Definir el ángulo de un motor en específico
4. Incrementar ángulo de motor
5. Seleccionar una secuencia predefinida (secuencia de movimientos, expresión de ojos y audio)
6. Seleccionar una pista de audio para reproducir
7. Seleccionar una expresión predefinida de los ojos
8. Grabar posición actual

Tabla 4.15 comandos enviados por la computadora principal (Elaboración propia)

Jetson Nano (tx) → STM32F446ZE (rx)				
N	CMD	D0	D1	D2
1	Req_data_pos	Brazo1/Brazo2/ Cabeza		
	'D'	1/2/3		
2	Sel_pos	Brazo1/Brazo2/ Cabeza	pos	
	'P'	1/2/3	0~255	
3	Set_ang	Num_motor	angle	
	'M'	1~10	0~255	
4	Inc_ang	Num_motor	increment	
	'I'	1~10	0~10	
5	Sel_secuencia	Num_tray		
	'X'	0~255		
6	Sel_audio	Num_audio		
	'A'	1~255		
7	Ojos_expr	Num_exp		
	'O'	0~255		
8	Grab_pos	num_sec	num_pos	t
	'G'	0~20	0~5	0~255

Comandos enviados por el controlador del sistema

1. Enviar datos de posición (ángulos) de los motores de una de las extremidades
2. Enviar el ángulo actual de un motor en específico
3. Enviar el número de pista de audio reproduciendo actualmente
4. Error al recibir un comando

Tabla 4.16 comandos enviados por el controlador del sistema (Elaboración propia)

STM32F446ZE (tx) → Jetson Nano (rx)									
N	CMD	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
1	Req_data_pos	Brazo1/Brazo2/ Cabeza	Ang1	Ang2	Ang3	Ang4	x	y	z
	'D'	1/2/3	0~255	0~255	0~255	0~255	0~255	0~255	0~255
2	Angle_mot	Num_motor	angle						
	'M'	1~10	0~255						
3	Audio_playing	Num_audio							
	'A'	1~255							
4	Error	Error_code							
	'E'	0~10							

- UART – DFPlayer Mini

De acuerdo con lo especificado en la hoja de datos del módulo DFPlayer, el protocolo está configurado a 9600 bps, longitud de datos de 8 bits, sin paridad y con 1 bit de parada. El formato de la trama se detalla en la tabla X:

\$\$ + VER + Len + CMD + Feedback + para1 + para2 + checksum + \$O

Tabla 4.17 Formato de trama serial para DFPlayer (DFRobot, s.f.)

Format:	SS	VER	Len	CMD	Feedback	para1	para2	checksum	\$O
	SS	Start byte 0x7E			Each command feedback begin with \$, that is 0x7E				
	VER	Version			Version Information				
	Len	the number of bytes after "Len"			Checksums are not counted				
	CMD	Commands			Indicate the specific operations, such as play / pause, etc.				
	Feedback	Command feedback			If need for feedback, 1: feedback, 0: no feedback				
	para1	Parameter 1			Query high data byte				
	para2	Parameter 2			Query low data byte				
	checksum	Checksum			Accumulation and verification [not include start bit \$]				
	\$O	End bit			End bit 0xEF				

El módulo cuenta con diferentes comandos de entrada y salida especificados en la hoja de datos. En la siguiente tabla se muestran los comandos a emplear en esta aplicación.

Tabla 4.18 Comandos DFPlayer empleados (DFRobot, s.f.)

CMD	Descripción	Parámetros (16 bits)
0x03	Especificar pista	0-2999
0x06	Especificar volumen	0-30
0x0A	Modo Standby	
0x0E	Pausa	
0x11	Play	

- CAN – MCP2551

De acuerdo con las especificaciones en la hoja de datos de los motores GYEMs (Anexo E), el protocolo CAN está configurado a 115200 bps y frecuencia de 1 Mbps. El formato de la trama de comandos es el siguiente:

CMD[1] + DATA[8]

Formato y secuencia de envío de comandos para motores

Las funciones principales que se requiere de cada motor son: establecer sus posiciones angulares, y solicitar información como lectura de encoders, torque o temperatura del controlador integrado en cada uno. A continuación, se muestra el formato de datos de cada uno de estos comandos según el manual de protocolo CAN proporcionado por el proveedor (Gyems, s.f.)

1. Definir posición de motor a velocidad determinada

Como se muestra en la tabla 4.19, el microcontrolador debe emitir el comando 0XA4 donde cada unidad de velocidad equivale a 1°/s y cada unidad de la variable del ángulo equivale a 0.01°:

Tabla 4.19 Comando para mover a determinado ángulo (Gyems, s.f.)

Data field	Description	Data
DATA[0]	Command byte	0xA4
DATA[1]	NULL	0x00
DATA[2]	speed limited low byte	DATA[3] = *(uint8_t *)&maxSpeed
DATA[3]	speed limited high byte	DATA[4] = *((uint8_t *)&maxSpeed)+1
DATA[4]	position control low byte	DATA[3] = *(uint8_t *)&angleControl
DATA[5]	position control	DATA[4] = *((uint8_t *)&angleControl)+1
DATA[6]	position control	DATA[5] = *((uint8_t *)&angleControl)+2
DATA[7]	position control high byte	DATA[6] = *((uint8_t *)&angleControl)+3

2. Solicitar lectura del encoder

El microcontrolador debe emitir el comando 0x92, que se observa en la tabla 4.20:

Tabla 4.20 Comando para solicitar lectura de ángulo (Gyems, s.f.)

Data field	Description	Data
DATA[0]	Command byte	0x92
DATA[1]	NULL	0x00
DATA[2]	NULL	0x00
DATA[3]	NULL	0x00
DATA[4]	NULL	0x00
DATA[5]	NULL	0x00
DATA[6]	NULL	0x00
DATA[7]	NULL	0x00

El servomotor responde con el siguiente formato (tabla 4.21) donde el tipo de dato recibido es un entero de 64 bits, y cada unidad corresponde a 0.01° :

Tabla 4.21 Respuesta de servomotor para el comando 0x92 (Gyems, s.f.)

Data field	Description	Data
DATA[0]	Command byte	0x92
DATA[1]	Angle low byte 1	DATA[1] = *(uint8_t *)&motorAngle
DATA[2]	Angle byte 2	DATA[2] = *((uint8_t *)& motorAngle)+1
DATA[3]	Angle byte 3	DATA[3] = *((uint8_t *)& motorAngle)+2
DATA[4]	Angle byte 4	DATA[4] = *((uint8_t *)& motorAngle)+3
DATA[5]	Angle byte 5	DATA[5] = *((uint8_t *)& motorAngle)+4
DATA[6]	Angle byte 6	DATA[6] = *((uint8_t *)& motorAngle)+5

3. Solicitar lectura de temperatura, torque, velocidad, encoder

El microcontrolador emite el comando 0x9C detallado en la tabla 4.22:

Tabla 4.22 Comando para solicitar estado del motor (Gyems, s.f.)

Data field	Description	Data
DATA[0]	Command byte	0x9C
DATA[1]	NULL	0x00
DATA[2]	NULL	0x00
DATA[3]	NULL	0x00
DATA[4]	NULL	0x00
DATA[5]	NULL	0x00
DATA[6]	NULL	0x00
DATA[7]	NULL	0x00

El servomotor responde con el siguiente formato (tabla 4.23) donde la temperatura es un entero de 8 bits, y cada unidad corresponde a 1°C; la corriente es de 16 bits y su rango es de 2048~2048 que corresponde a corrientes de -33A~33A; y la lectura del encoder es de 16 bits:

Tabla 4.23 Respuesta de servomotor para el comando 0x92 (Gyems, s.f.)

Data field	Description	Data
DATA[0]	Command byte	0x9C
DATA[1]	Motor temperature	DATA[1] = *((uint8_t *)&temperature)
DATA[2]	Torque current low byte	DATA[2] = *((uint8_t *)&iq)
DATA[3]	Torque current high byte	DATA[3] = *((uint8_t *)&iq)+1
DATA[4]	Speed low byte	DATA[4] = *((uint8_t *)&speed)
DATA[5]	Speed high byte	DATA[5] = *((uint8_t *)&speed)+1
DATA[6]	Encoder position low byte	DATA[6] = *((uint8_t *)&encoder)
DATA[7]	Encoder position high byte	DATA[7] = *((uint8_t *)&encoder)+1

- SPI – MAX7219

De acuerdo con la hoja de datos del controlador de matrices led MAX7219, la trama de datos serial es la que se muestra en la tabla 4.24:

Tabla 4.24 Formato de trama serial para MAX7219 (Maxim Integrated Products Inc, 2021)

D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	
X	X	X	X	ADDRESS				MSB				DATA				LSB

Las direcciones usadas para la configuración se muestran a continuación en la tabla 4.25:

Tabla 4.25 Códigos hexadecimales para cada dirección (Maxim Integrated Products Inc, 2021)

REGISTER	ADDRESS					HEX CODE
	D15-D12	D11	D10	D9	D8	
No-Op	X	0	0	0	0	0xX0
Digit 0	X	0	0	0	1	0xX1
Digit 1	X	0	0	1	0	0xX2
Digit 2	X	0	0	1	1	0xX3
Digit 3	X	0	1	0	0	0xX4
Digit 4	X	0	1	0	1	0xX5
Digit 5	X	0	1	1	0	0xX6
Digit 6	X	0	1	1	1	0xX7
Digit 7	X	1	0	0	0	0xX8
Decode Mode	X	1	0	0	1	0xX9
Intensity	X	1	0	1	0	0xXA
Scan Limit	X	1	0	1	1	0xXB
Shutdown	X	1	1	0	0	0xXC
Display Test	X	1	1	1	1	0xFF

Por otro lado, para generar las formas deseadas se debe enviar una serie de 8 datos de 8 bits cada uno, donde cada dato corresponde a una fila y cada bit corresponde al estado de encendido o apagado del led.

4.5.5 Software de sistema embebido

Como se ha mencionado anteriormente, el microcontrolador ejecutará el programa de control principal del sistema. Se emplea el entorno de desarrollo STM32CubeIDE, y se hace uso de las librerías HAL, las cuales permiten configurar los puertos y ejecutar sus funciones de manera más sencilla. Además, se hace uso de las librerías DFPLAYER_MINI y LedControl (controllerstech, 2021) y librerías propias para controlar los periféricos, establecer la comunicación y decodificar los comandos. El programa principal se puede ver de forma resumida en el diagrama de flujo de la figura 4.20.

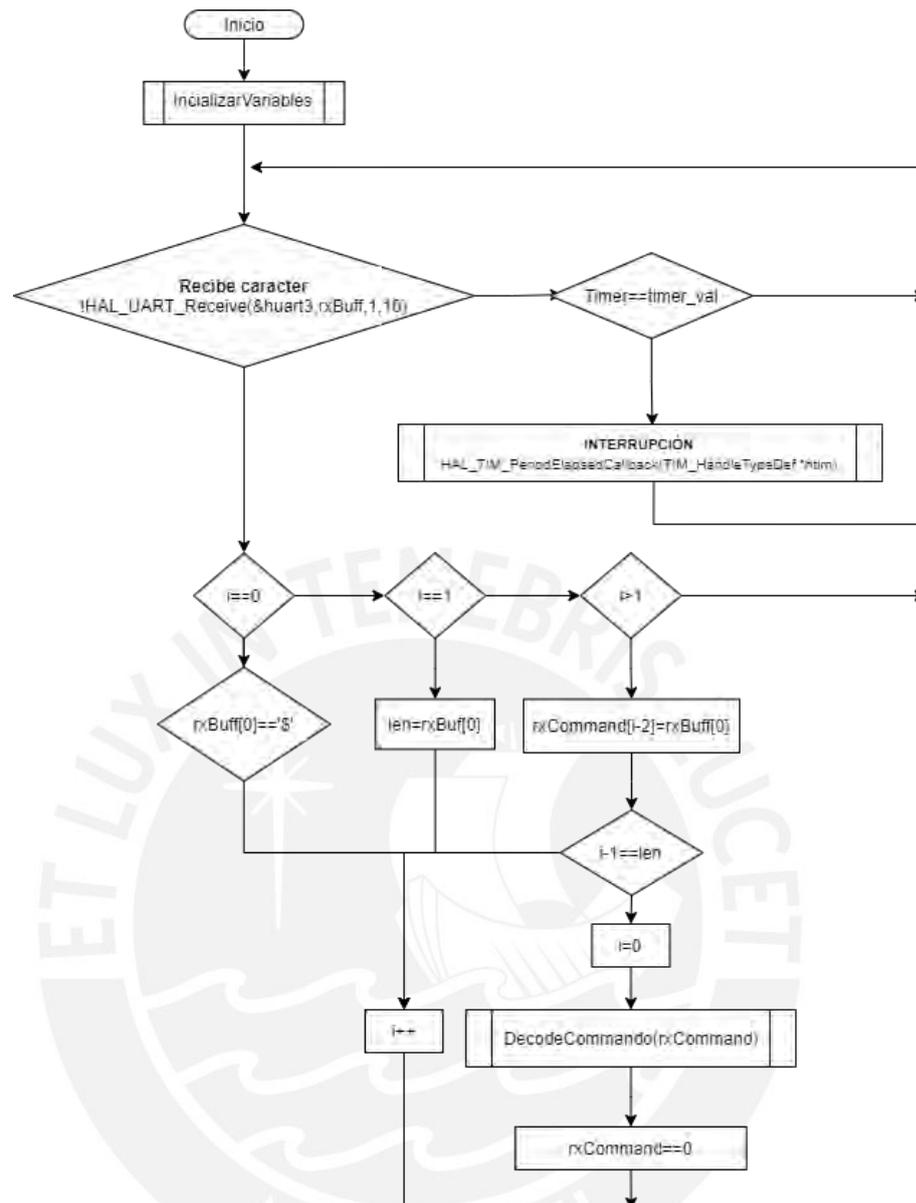


Figura 4.20 Diagrama de flujo: Programa principal (Elaboración Propia)

Aquí se emplea la variable `rxBuff` para almacenar cada carácter recepcionado en el puerto UART. Este se compara con el carácter '\$' para comprobar que se trata de un comando y continuar guardando la trama en otras variables y decodificar el comando. Además, se activa una interrupción con el fin de enviar los comandos correspondientes a los motores, que tienen prioridad.

En las siguientes imágenes, se detallan las funciones y subfunciones empleadas a través de sus diagramas de flujo. La figura 4.21 muestra la función de inicialización

de variables que contiene los límites de movimiento de cada motor, la secuencia de posiciones y tiempos que debe ser ejecutada y la bandera de fin de movimiento.

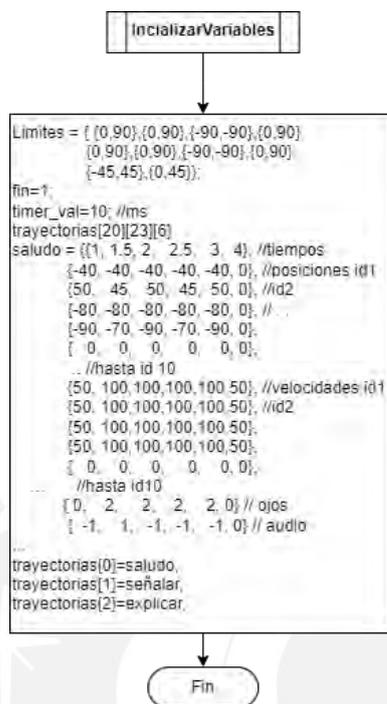


Figura 4.21 Diagrama de flujo: Inicialización de variables (Elaboración Propia)

La siguiente imagen (figura 4.22) muestra lo ejecutado al ocurrir una interrupción: Primero se enviará la posición requerida al motor, y en la siguiente se solicitará la lectura del encoder. Así, se realizan 20 interrupciones para enviar y recibir las posiciones de los 10 motores; a cada secuencia de estas se le ha denominado “paso”. Cuando se requiere realizar trayectorias, se cuentan los pasos para determinar en qué tiempo ejecutar cada instrucción

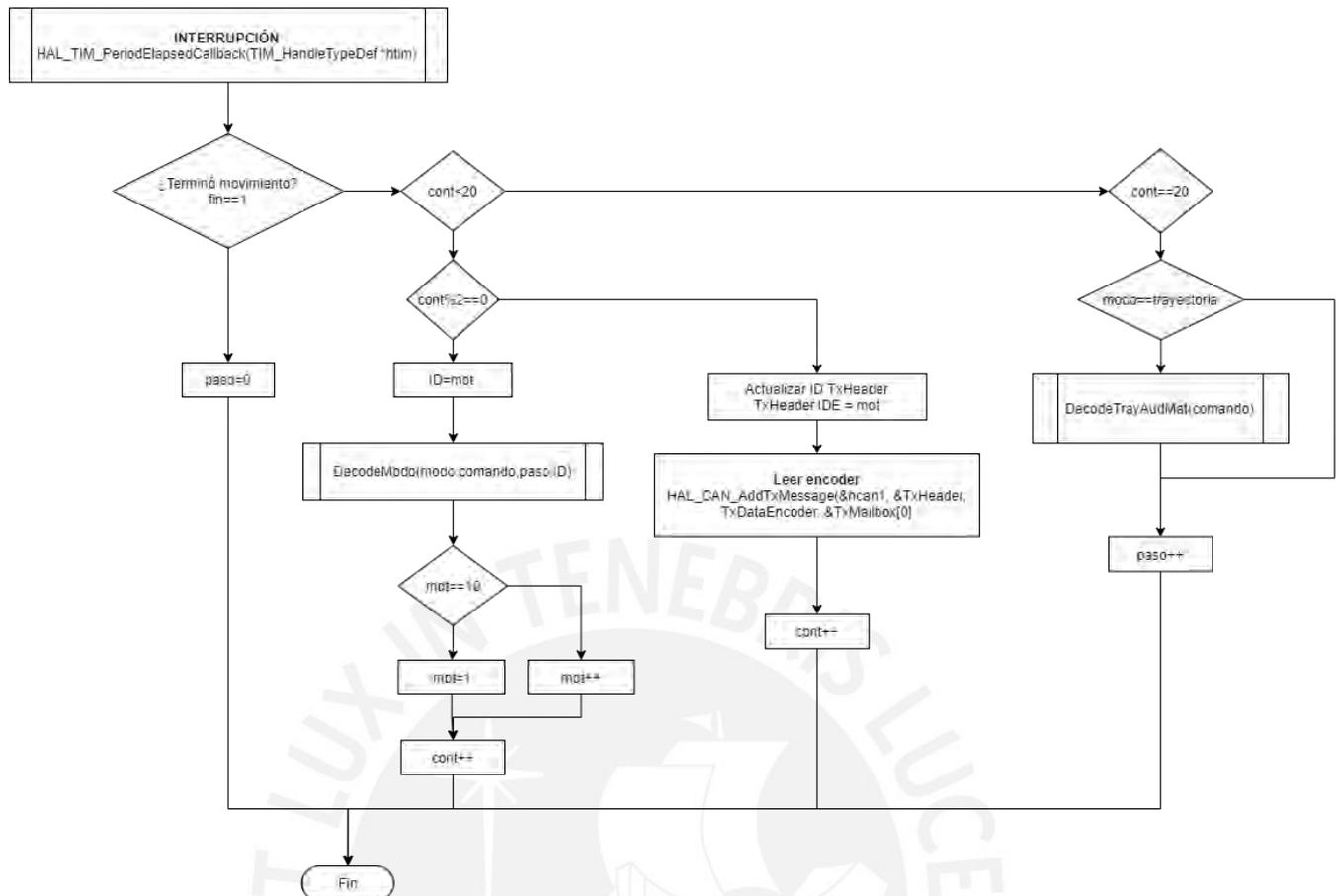


Figura 4.22 Diagrama de flujo: Función de interrupción (Elaboración Propia)

La figura 4.23 muestra la función para decodificar el comando según el carácter especificado anteriormente. Como algunos tienen funciones semejantes de movimiento de motores, se agrupan en modos “angulo” para posicionar un solo motor, “trayectoria” para ejecutar una secuencia de posiciones y “mult_pos” para mover varios motores en simultáneo hasta ciertas posiciones angulares.

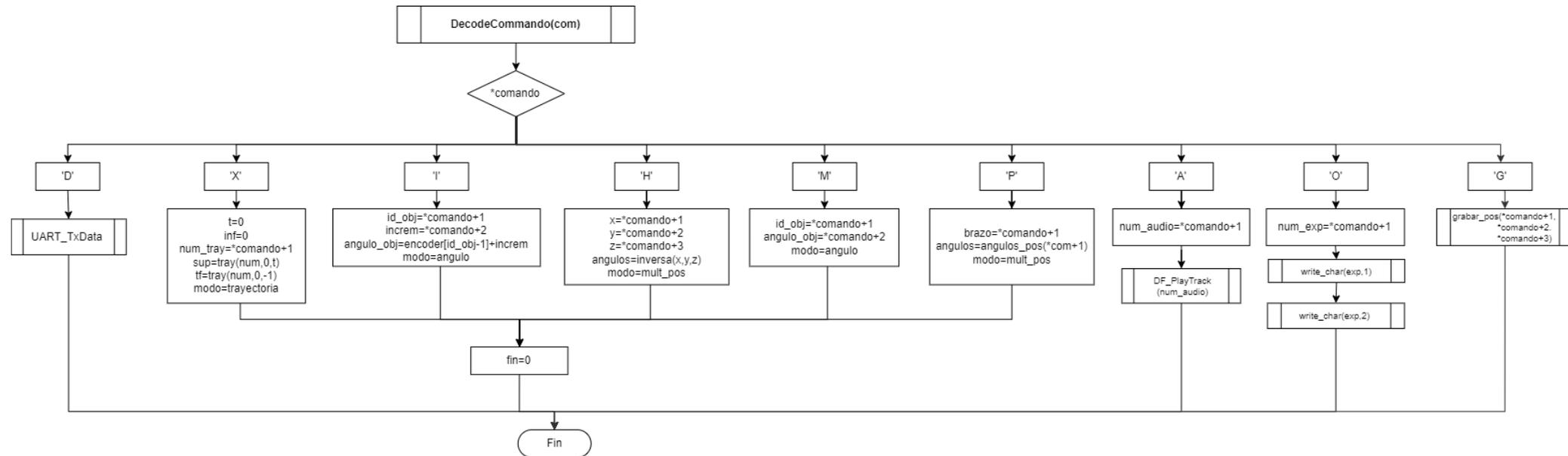


Figura 4.23 Diagrama de flujo: Decodificación de comandos (Elaboración Propia)

En el siguiente diagrama, se muestra la forma de asignar los parámetros correspondientes a la función SetAngulo según el comando previamente ingresado y el modo de movimiento. Por ejemplo, para el caso de posición de varios motores se iterará el ID a través de las interrupciones hasta colocar los 10 motores en posición, mientras que en el modo de trayectoria las iteraciones continuarán hasta ejecutar toda la secuencia.

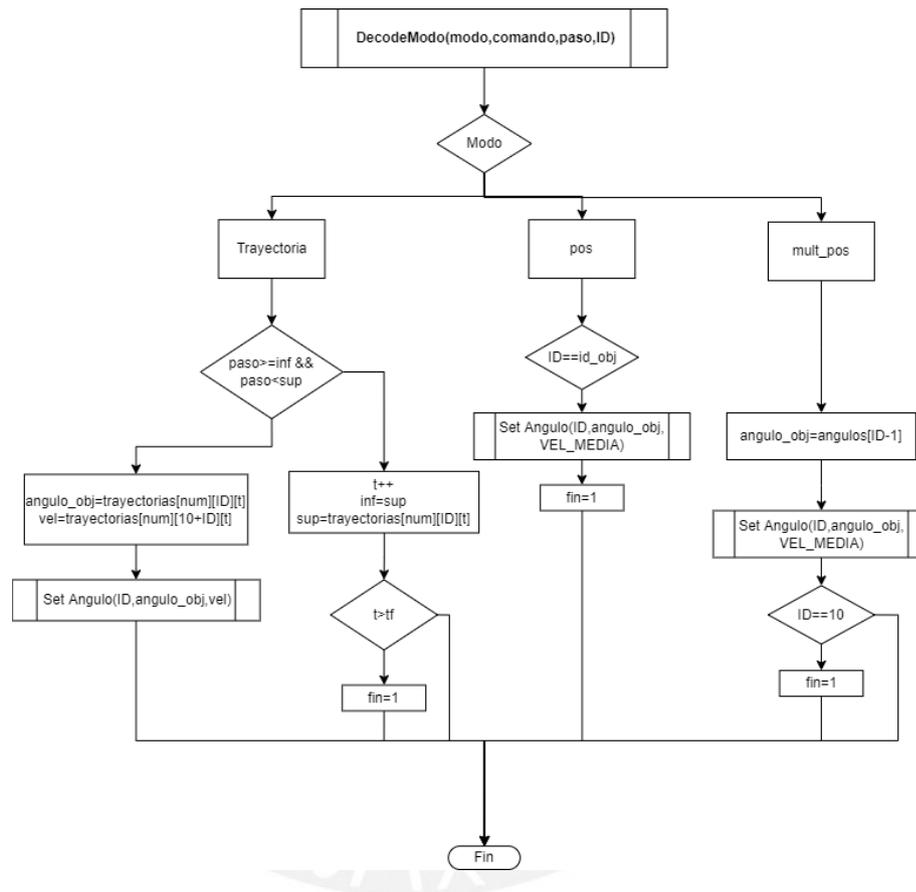


Figura 4.24 Diagrama de flujo: Selección de modo de control de motores (Elaboración Propia)

De manera similar, se establece una función para decodificar las expresiones y sonidos a emitir en determinada secuencia, mostrada en la figura 4.25.

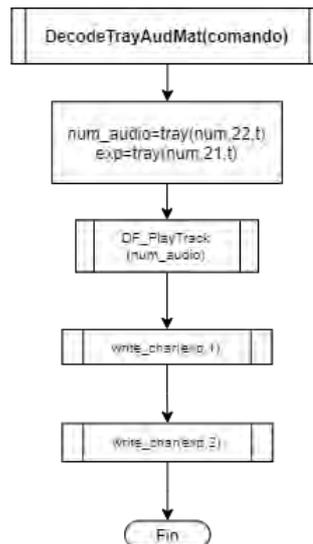


Figura 4.25 Diagrama de flujo: Selección de audio y figura en matrices (Elaboración Propia)

En la siguiente imagen, se muestran las funciones para el envío de comandos a los motores, en este caso de posición y lectura del encoder. Aquí se hace uso de las librerías HAL de stm32 para emplear los puertos CAN del microcontrolador.

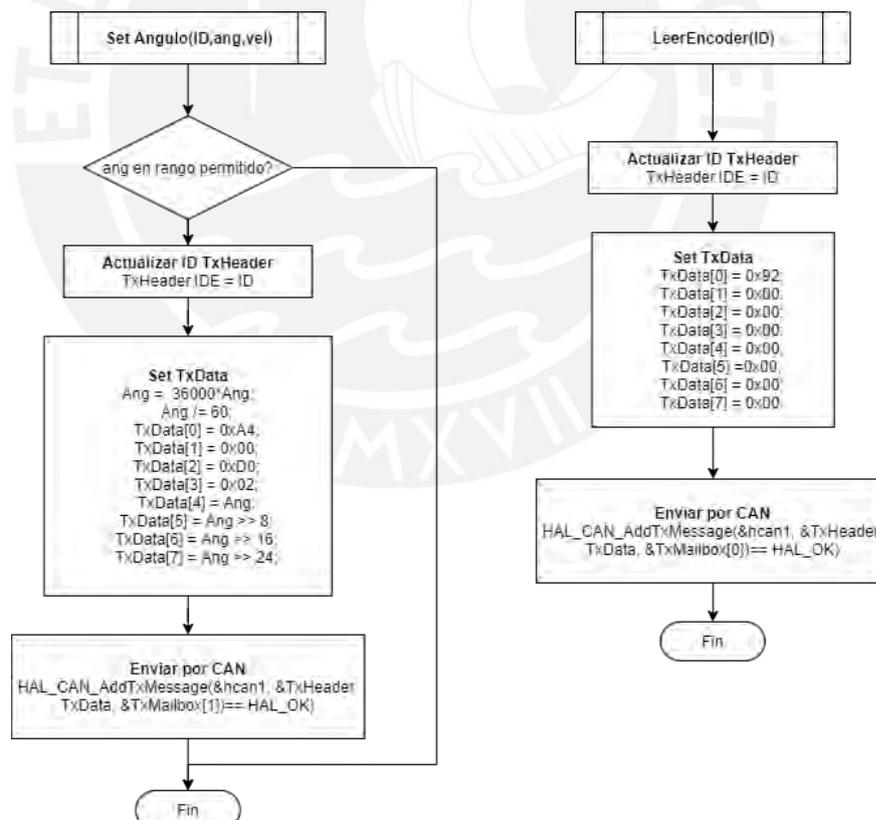


Figura 4.26 Diagrama de flujo: Comandos para control de motores vía CAN (Elaboración Propia)

Finalmente, se define la función de “grabar la posición actual” como parte de una secuencia de movimientos según el número de trayectoria, el motor y tiempo deseado.

Esto se realiza asignando las posiciones leídas por el encoder al arreglo de trayectorias tal como se muestra en la figura 4.27. Además, se asignan las velocidades angulares calculadas con el tiempo deseado del movimiento.

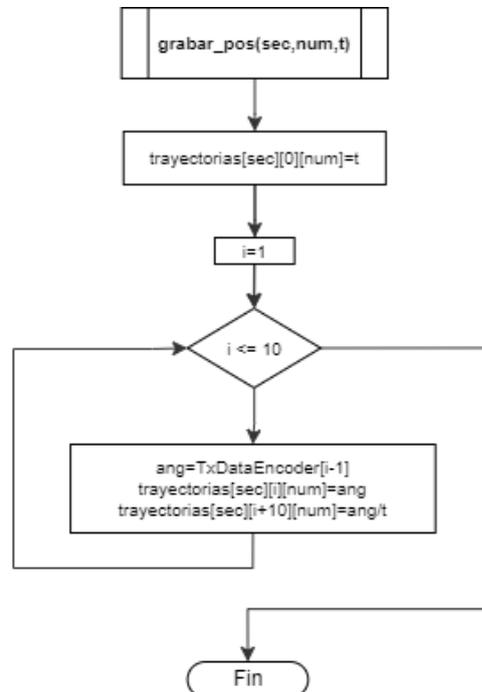


Figura 4.27 Diagrama de flujo: Grabación de posición. (Elaboración Propia)

4.5.6 PCB de control

Para la conexión de los distintos componentes, se diseñará una placa de circuito impreso que irá sobre la tarjeta Nucleo STM32F446ZE; en ella se conectan el módulo de reproducción MP3, Amplificador, transceptor CAN y conectores para baterías, motores, matrices y parlantes. Los diagramas de conexiones de los principales componentes mencionados se muestran en las figuras a continuación.

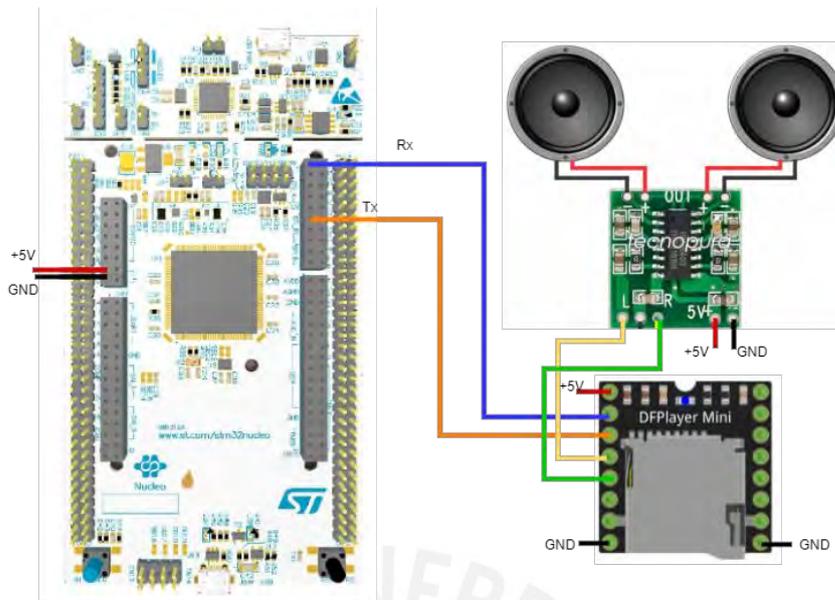


Figura 4.28 Diagrama de conexiones sistema de audio (Elaboración propia)

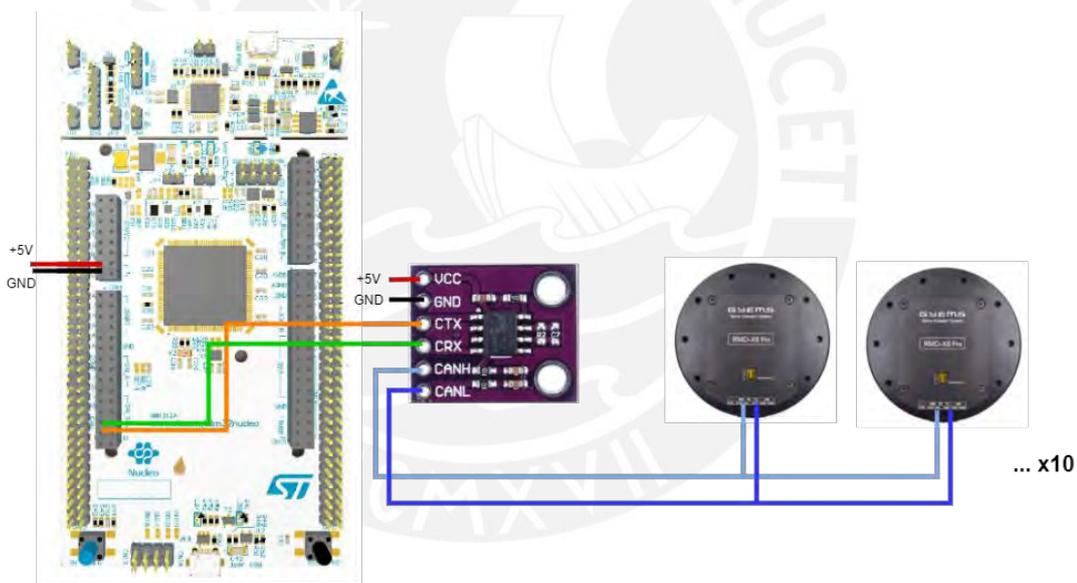


Figura 4.29 Diagrama de conexiones de comunicación CAN Comunicación (Elaboración propia)

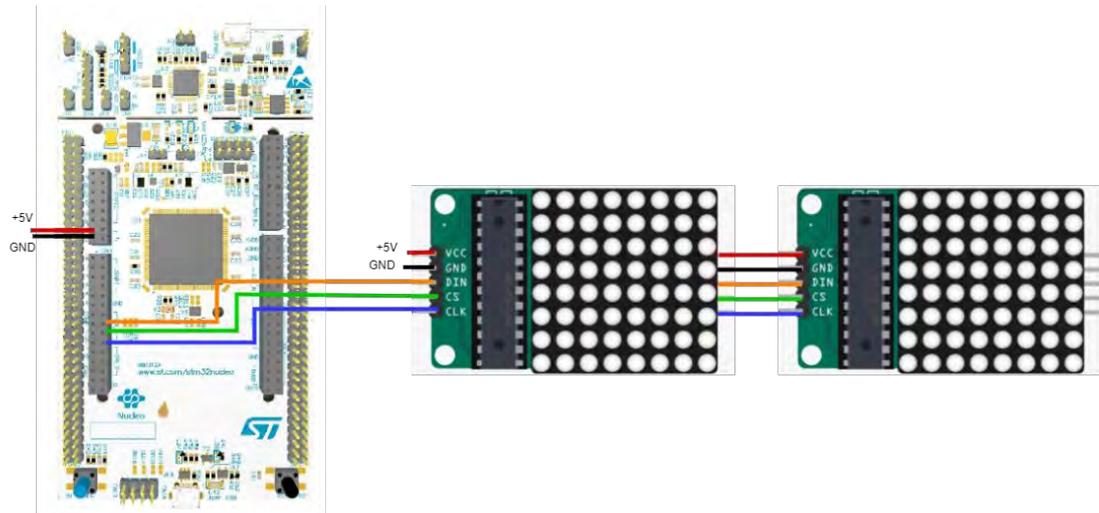


Figura 4.30 Diagrama de conexiones de matrices LED en cascada (Elaboración propia)

En las figuras a continuación, se muestra el diseño de circuito impreso de la tarjeta de comunicación. Se determinó el ancho de pistas mínimos para cada tramo de forma análoga al cálculo realizado en la sección 4.4.2, teniendo en cuenta las corrientes máximas requeridas por cada componente

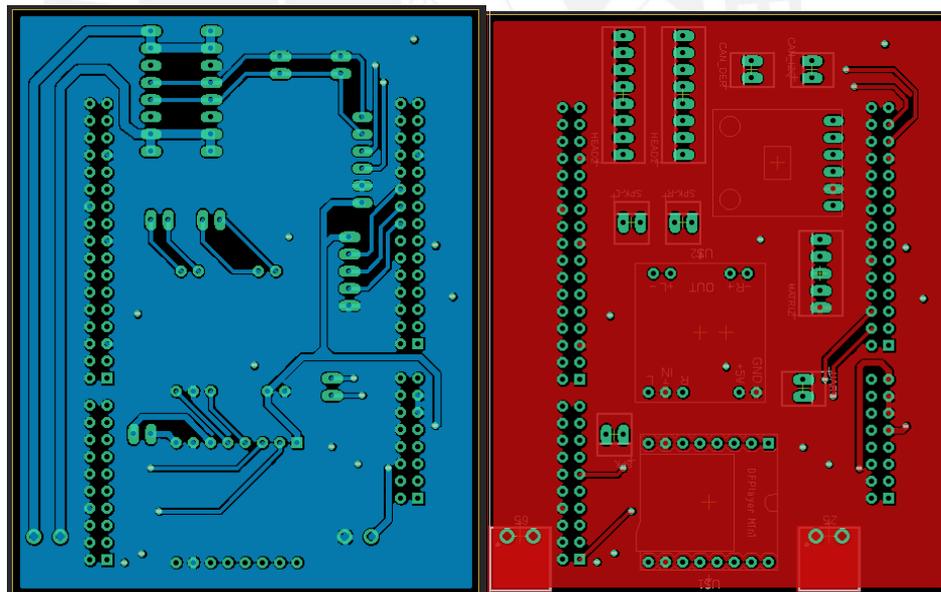


Figura 4.31 Capas inferior y superior del circuito impreso de Control y Comunicación (Elaboración propia)

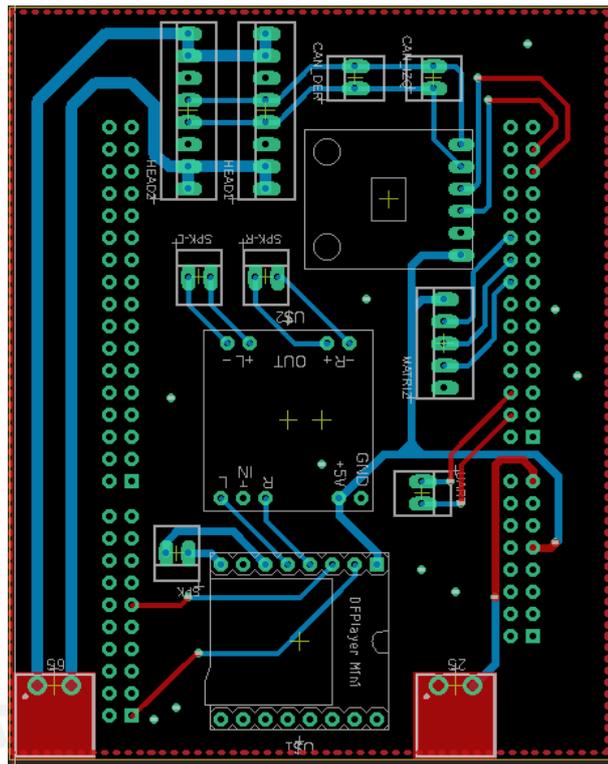


Figura 4.32 Vista general del circuito impreso de Control y Comunicación (Elaboración propia)

En la figura 4.33 se presenta un modelo 3D de la placa montada en la tarjeta Nucleo, señalando sus módulos y conectores. Finalmente, en la figura 4.34 se puede observar la distribución electrónica de los componentes seleccionados y diseñados ubicados en el pecho y cabeza del robot.

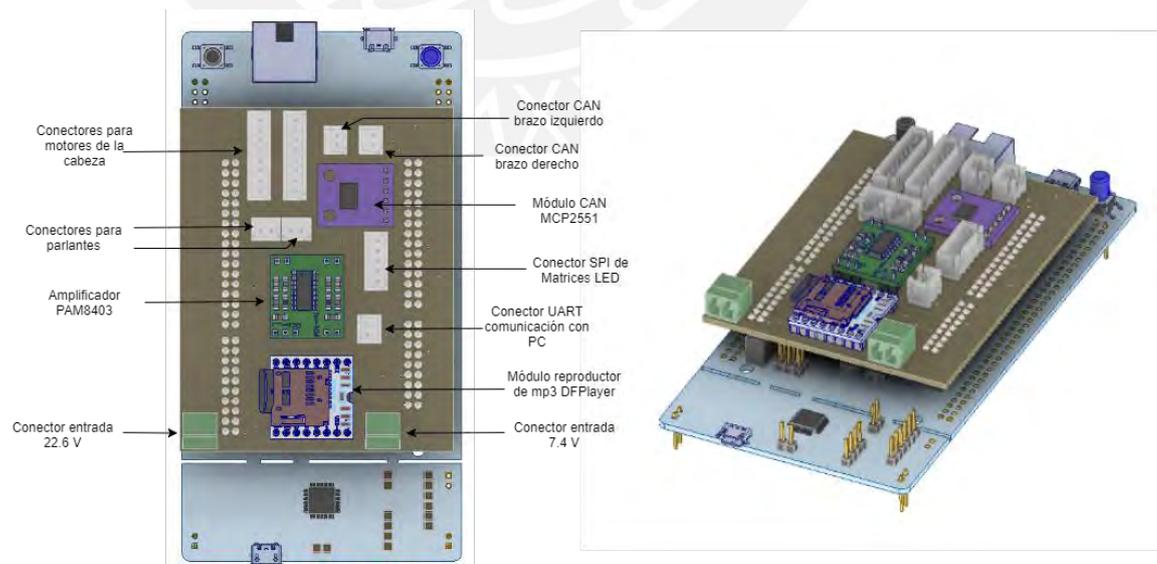


Figura 4.33 Modelo 3D de PCB de Control y Comunicación para tarjeta Nucleo (Elaboración Propia)

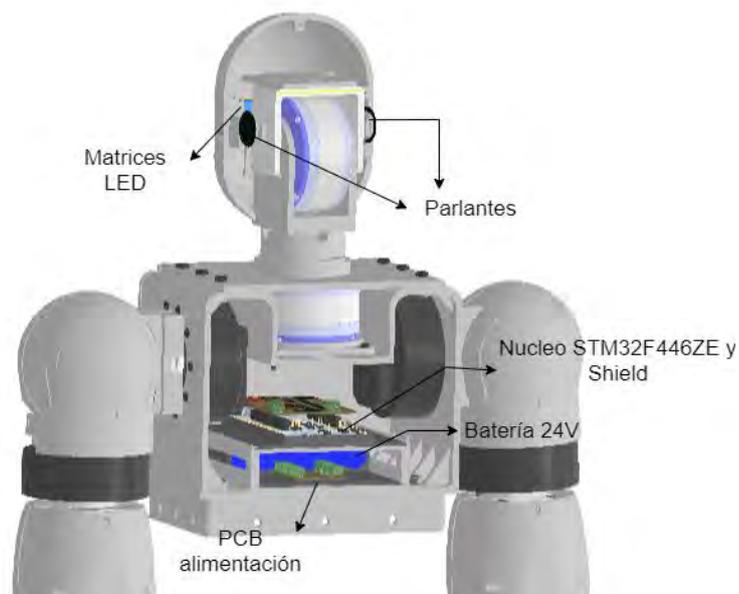


Figura 4.34 Distribución de componentes electrónicos en el Sistema. (Elaboración Propia)

4.6 Planos mecánicos y electrónicos

En esta sección se presentan los planos mecánicos y electrónicos del sistema. En cuanto a los subensambles mecánicos, estos están divididos en: base (o pecho) que sostiene las extremidades, cabeza, hombros, brazos y antebrazos. En la tabla 4.26 se muestra una lista de todos los planos del sistema, los cuales se encuentran detallados en el Anexo K.

Tabla 4.26 Lista de Planos Mecánicos. (Elaboración Propia)

Código	Descripción	Tipo	Tamaño
E-0001-A2	Ensamble General	Ensamble	A2
S-0001-A2	Subensamble Base	Subensamble	A3
D-0001-A3	Pieza Base	Despiece	A3
D-0002-A3	Placa Base Cabeza	Despiece	A3
D-0003-A3	Acople de Motor	Despiece	A3
D-0004-A3	Acople Plataforma	Despiece	A3
S-0002-A2	Ensamble hombro	Subensamble	A2
D-0005-A3	Acople Paralelo 1	Despiece	A3
D-0006-A3	Acople Paralelo 2	Despiece	A3
D-0007-A3	Placa Soporte Cabeza	Despiece	A3
D-0008-A3	Placa Soporte Hombro 1	Despiece	A3
D-0009-A3	Placa Soporte Hombro 2	Despiece	A3
D-0010-A3	Carcasa hombro – a	Despiece	A3
D-0011-A3	Carcasa hombro – b	Despiece	A3

Código	Descripción	Tipo	Tamaño
D-0012-A3	Carcasa hombro – c	Despiece	A3
D-0013-A3	Carcasa hombro – d	Despiece	A3
S-0003-A2	Ensamble brazo	Subensamble	A2
D-0014-A3	Placa soporte Brazo	Despiece	A3
D-0015-A3	Eje Codo	Despiece	A3
D-0016-A4	Separador	Despiece	A4
D-0017-A4	Acople polea - motor	Despiece	A4
D-0018-A3	Carcasa brazo – a	Despiece	A3
D-0019-A3	Carcasa brazo – b	Despiece	A3
S-0004-A2	Ensamble Antebrazo	Subensamble	A2
D-0020-A3	Placa soporte Antebrazo	Despiece	A3
D-0021-A3	Carcasa antebrazo – a	Despiece	A3
D-0022-A3	Carcasa antebrazo – b	Despiece	A3
D-0023-A3	Mano izquierda – a	Despiece	A3
D-0024-A3	Mano izquierda – b	Despiece	A3
D-0025-A3	Mano derecha – a	Despiece	A3
D-0026-A3	Mano derecha – b	Despiece	A3
S-0005-A3	Ensamble Cabeza	Subensamble	A3
D-0027-A3	Acople en L - a	Despiece	A3
D-0028-A3	Acople en L - b	Despiece	A3
D-0029-A3	Pieza de cabeza interior	Despiece	A3
D-0030-A3	Pieza de cabeza exterior - a	Despiece	A3
D-0031-A3	Pieza de cabeza exterior – b	Despiece	A3
D-0032-A3	Acople de Rodamiento - Cabeza	Despiece	A3
D-0033-A3	Soporte motor 2 - a	Despiece	A3
D-0034-A3	Soporte motor 2 - b	Despiece	A3
D-0035-A3	Clip de parlante	Despiece	A3
S-0006-A3	Caja electrónica	Subensamble	A3
D-0033-A3	Caja principal	Despiece	A3
D-0034-A3	Case Nucleo	Despiece	A3
D-0036-A3	Case Baterías	Despiece	A3
D-0037-A3	Case PCB Distribución	Despiece	A3
D-0038-A4	Abrazadera	Despiece	A4
D-0039-A3	Tapa frontal	Despiece	A3
D-0040-A3	Tapa posterior	Despiece	A3

Por otro lado, en tabla 4.27 se listan los dos planos electrónicos para los circuitos impresos diseñados. Estos se pueden ver a detalle en el Anexo L.

Tabla 4.27 Lista de Planos Electrónicos. (Elaboración Propia)

Código	Descripción	Tamaño
P-0001-A4	Distribución de Potencia	A3
P-0002-A4	Shield Nucleo	A3

CAPÍTULO 5

IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO Y PRUEBAS DE VALIDACIÓN

En este capítulo se describirán los procedimientos llevados a cabo en las instalaciones de la universidad como parte de la implementación del prototipo de uno de los brazos móviles, dado que es parte del mecanismo más crítico del sistema de extremidades. Se llevarán a cabo principalmente 3 pruebas de las que se espera obtener información del comportamiento real de los motores en cuanto a su control y consumo de energía, y validar el correcto funcionamiento del algoritmo propuesto para el microcontrolador. Además, con la implementación física de las piezas estructurales y exteriores (carcasa) se ha podido comprobar la factibilidad y funcionalidad del diseño de esta extremidad.

5.1 Prueba de control de motores

Inicialmente, se comprobó el funcionamiento de la comunicación CAN y la recepción de los comandos por parte de los motores, principalmente del control de posición. Para ello se empleó una tarjeta de desarrollo Nucleo144 (microcontrolador STM32F446) conectada al módulo CAN (MCP2551), dos motores y una fuente de alimentación de 24V tal como se muestra en la figura 5.1

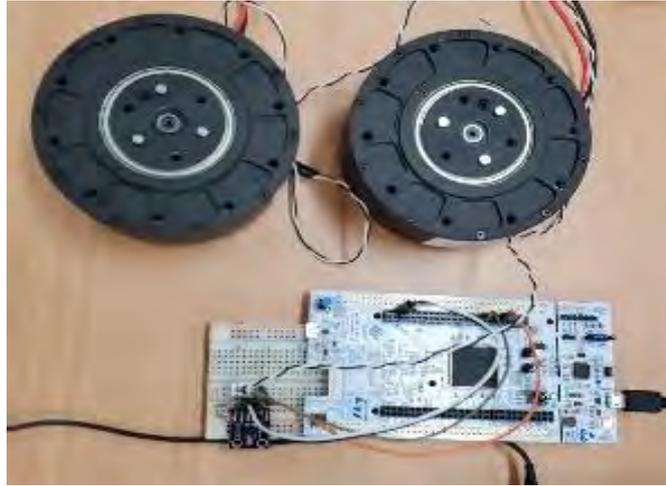


Figura 5.1 Prueba de comunicación con dos motores. (Elaboración Propia)

Al probar los comandos de posición de los motores, se observó que el ángulo de entrada corresponde al ángulo del rotor y no el del eje final del motor, ya que cuenta con una reducción interna de 1:6. A pesar de que la documentación de comandos indica que el ángulo proporcionado al motor debe encontrarse entre 0 y 359.99, se pudo comprobar que multiplicándolo por un factor de 6 es posible llevar el eje hacia su posición real, tomando en cuenta la reducción mencionada. Así mismo, se probó la emisión de varios comandos a más de un motor con diferente identificador CAN (ID). Con ello se validó la configuración realizada a cada motor y también se determinó la existencia de problemas al enviar más de tres comandos a diferentes IDs de forma consecutiva e inmediata. Como solución, se propuso delimitar una diferencia de tiempo mínima de 30 ms entre la emisión de comandos para los motores.

5.2 Prueba de consumo de corriente

Motores

Esta prueba tuvo como objetivo conocer la corriente consumida al energizar todos los motores de un brazo y someterlos individualmente a sus posiciones críticas. De esta manera se es posible estimar adecuadamente la capacidad de las baterías a usar en el sistema. El procedimiento consistió en, una vez armado el brazo, conectar los cuatro motores a la fuente de 24V e ingresar los comandos de las posiciones críticas a través de la tarjeta de desarrollo. En las figuras siguientes se pueden observar las posiciones y el valor en el indicador de corriente de la fuente.

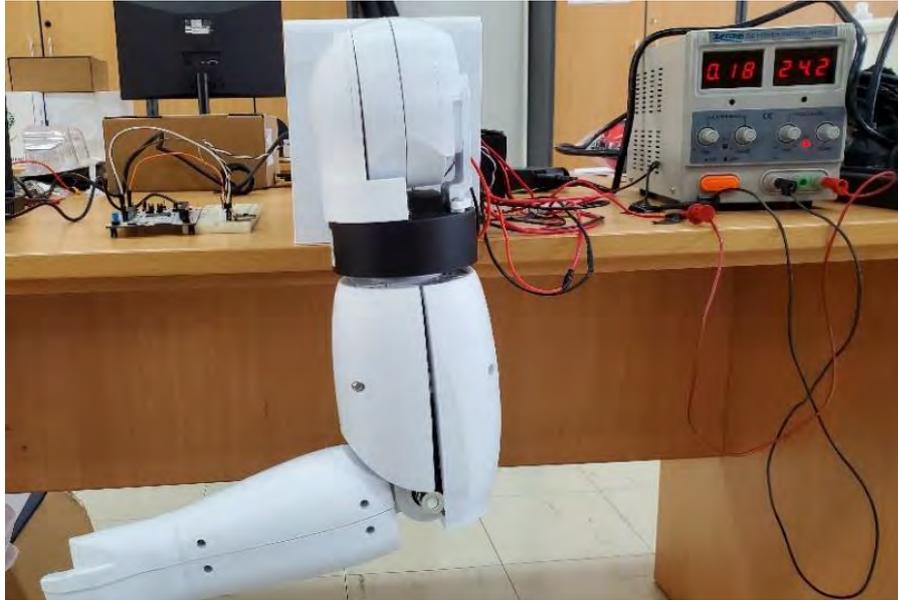


Figura 5.2 Motor de GDL 4 a 90° (Elaboración Propia)



Figura 5.3 Motor de GDL 2 a 90° (Elaboración Propia)



Figura 5.4 Motor de GDL 1 a 90° (Elaboración Propia)

En la tabla 5.1 se resumen los resultados obtenidos.

Tabla 5.1 Corriente total consumida en posiciones críticas del brazo (Elaboración Propia)

Posición	Corriente total consumida (mA)
GDL4 – 90°	180
GDL2 – 90°	290
GDL1 – 90°	300

Matrices Led

Por otro lado, también se requirió verificar el consumo de corriente de las matrices LED teniendo en cuenta las figuras que se mostrarán la mayor parte del tiempo. En la figura 5.5 se muestra el consumo máximo (366 mA), con todos los leds encendidos, y el consumo al mostrar la figura de los ojos (219 mA).

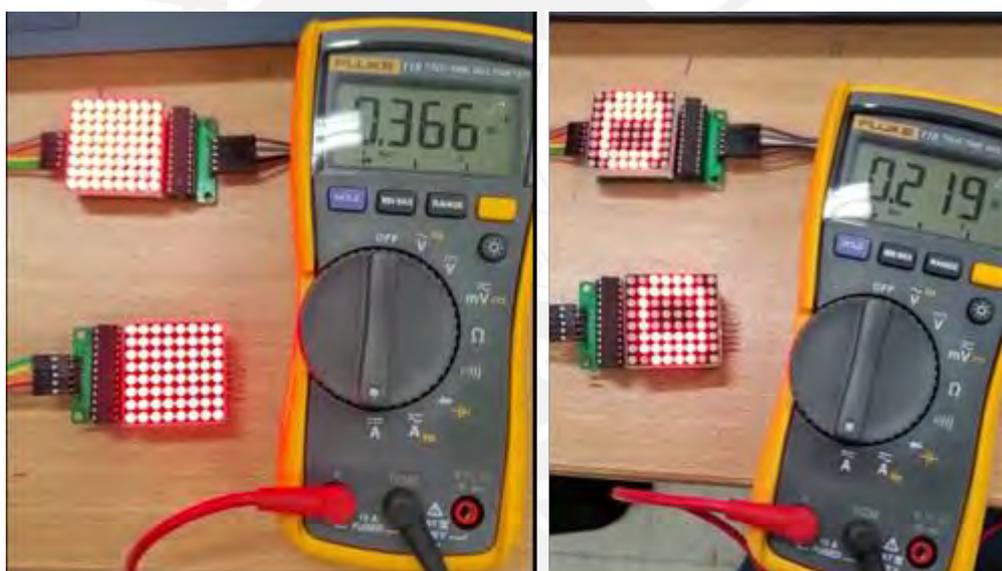


Figura 5.5 Medición de consumo de corriente de matrices LED. (Elaboración Propia)

5.3 Prueba ejecución de comandos para el brazo

Finalmente, se probó el algoritmo para ejecución de secuencias predefinidas descrito en el capítulo anterior, junto con la comunicación con la interfaz creada en python. Para ello se implementó el envío de los comandos correspondientes al presionar los botones de “Saludo” y “Atención a Pantalla” en la sección derecha de la interfaz como se ve en la figura 5.6.

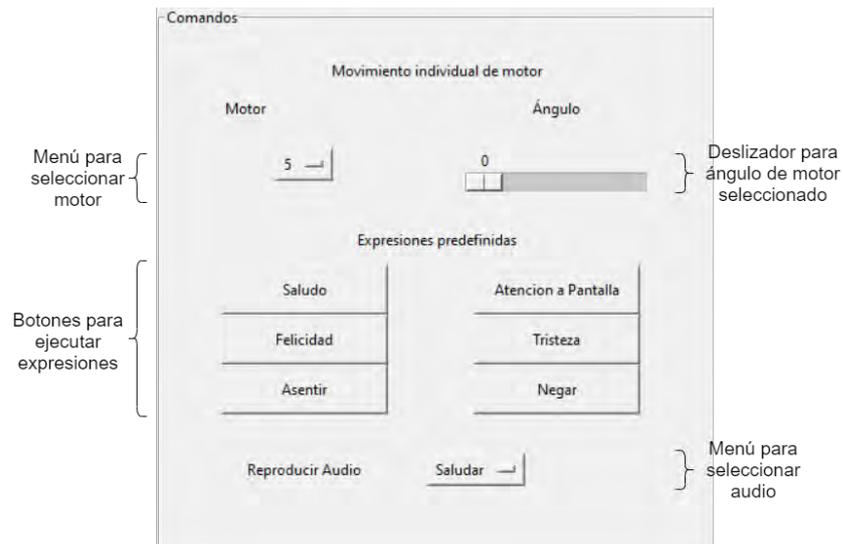


Figura 5.6 Sección de Comandos en Interfaz de desarrollo (Elaboración Propia)

En las imágenes a continuación se muestran fotogramas del video capturado como resultado de las pruebas. Tal como en la prueba de energía, para la alimentación del brazo se empleó la fuente de voltaje a 24V.

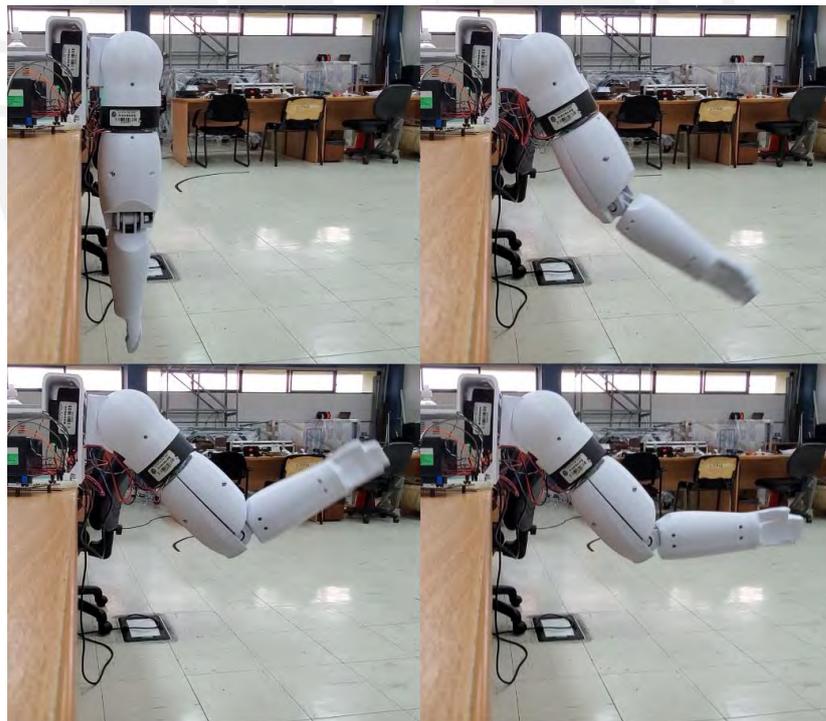


Figura 5.7 Brazo ejecutando secuencia de saludo

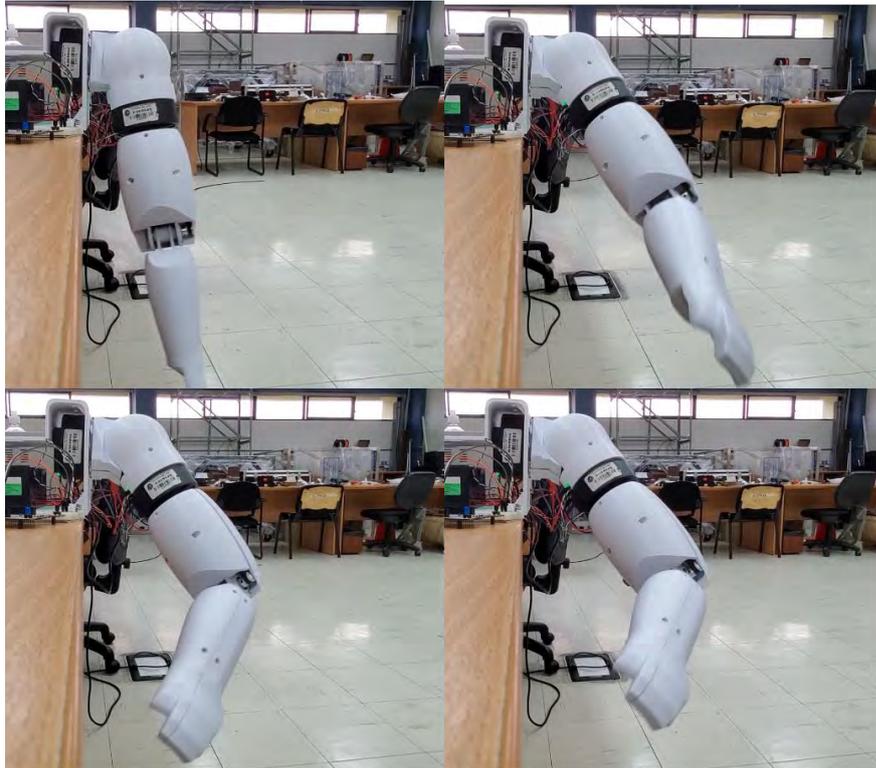


Figura 5.8 Brazo ejecutando secuencia de Señalar Pantalla (Elaboración Propia)

Al ejecutar las secuencias se pudo observar el comportamiento del brazo y realizar ajustes para obtener una mejor secuencia de movimientos. Así mismo, la interfaz facilitó la comunicación y operación independiente de cada articulación para dirigir las a las posiciones requeridas y observar su apariencia.

CAPÍTULO 6

PRESUPUESTO

En este capítulo se listan los precios de cada pieza y componente con el fin de obtener el costo de la implementación del sistema completo y verificar el cumplimiento del requerimiento establecido respecto a este punto (Entre S/30000 y S/40000). Para ello, se dividirá el cálculo en la estimación del costo por materiales de fabricación, componentes electrónicos y componentes mecánicos.

6.1 Costo de Materiales

Se calcula el costo en base al material de impresión y el filamento requerido por el total de las piezas. Se toma S/. 70 como precio promedio de filamento PLA marca ESUN color blanco (Anexo J). Además, para la estimación se considera que se cuenta con una impresora 3D, en este caso una Prusa i3 MK3S. Empleando el software PrusaSlicer, se obtiene el filamento empleado por cada pieza y se configura con el precio del rollo del filamento para estimar el costo por pieza.

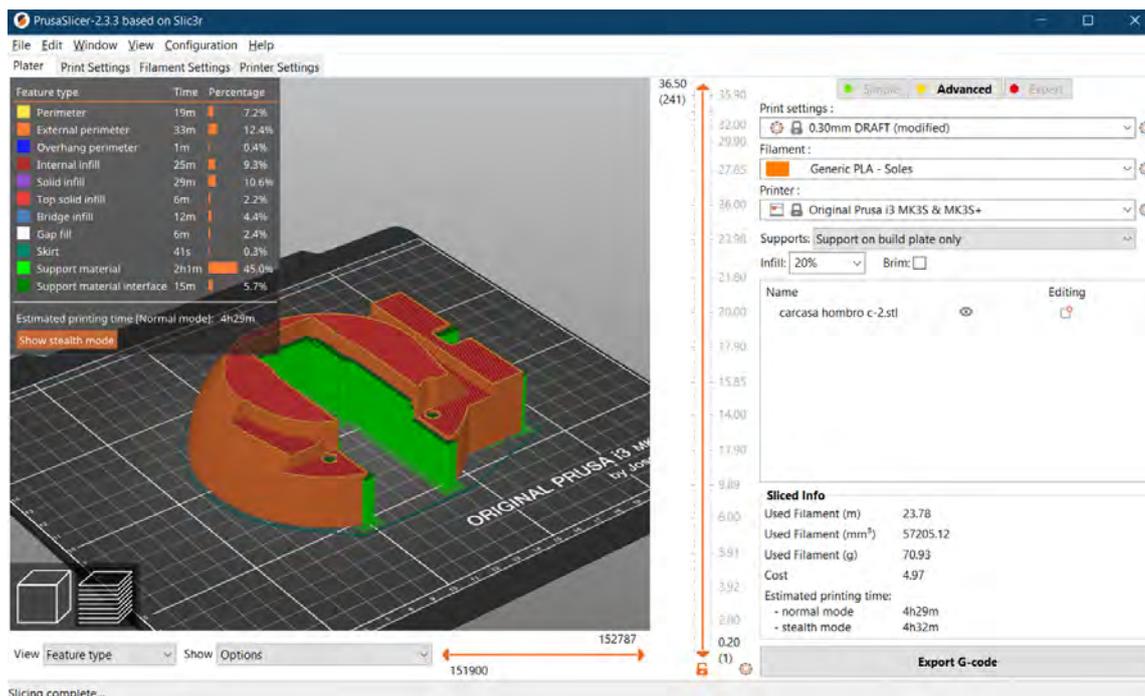


Figura 6.1 Interfaz de programa Prusa Slicer

En la tabla 6.1 se muestran los datos considerados para la estimación del costo de impresión. El costo de cada pieza es calculado en la tabla 6.2.

Tabla 6.1 Datos empleados para el cálculo de costo de impresión

Concepto	Valor
Costo 1kg de PLA	70 S/
Potencia Impresora Prusa ik3 mk3+	80 W
Tarifa de energía (Enel ,2021)	0.7 S./kWh
Costo de impresión 1h	0.056 S/

Tabla 6.2 Costo estimado de impresión de piezas en PLA (Elaboración Propia)

Nombre de Pieza	Cant.	Relleno	Filamento usado	Costo por material	Tiempo de impresión	Costo por energía	Costo total
			(g)	(S/)	(h)	(S/)	(S/)
Pieza Base	1	70%	558.57	39.10	24:03	1.35	40.45
Placa Base Cabeza	1	40%	110.68	7.75	4:09	0.23	7.98
Placa Soporte Cabeza	1	20%	89.29	6.25	3:39	0.20	6.45
Acople Plataforma	1	20%	160.25	11.22	6:21	0.36	11.57
Acople Paralelo 1	2	60%	43.73	3.06	2:03	0.11	6.35
Acople Paralelo 2	2	60%	21.63	1.51	1:10	0.07	3.16
Acople de Motor	4	70%	53.41	3.74	2:53	0.16	15.60
Placa Soporte Brazo	2	20%	42.39	2.97	2:15	0.13	6.19
Eje de Codo	2	80%	15.76	1.10	8:14	0.46	3.13
Placas soporte Antebrazo	2	20%	35.58	2.49	1:45	0.10	5.18
Placa soporte Hombro	2	60%	18.94	1.33	0:57	0.05	2.76
Acople de motor-polea	2	80%	4.73	0.33	0:17	0.02	0.69
Carcasa hombro – a	2	20%	36.31	2.54	2:10	0.12	5.33
Carcasa hombro – b	2	20%	50.55	3.54	3:49	0.21	7.50
Carcasa hombro – c	2	20%	70.93	4.97	4:29	0.25	10.43
Carcasa hombro – d	2	20%	69.43	4.86	3:34	0.20	10.12
Carcasa brazo – a	2	20%	97.51	6.83	4:44	0.27	14.18
Carcasa brazo – b	2	20%	133.18	9.32	5:45	0.32	19.29
Carcasa antebrazo – a	2	20%	70.32	4.92	4:16	0.24	10.32
Carcasa antebrazo – b	2	20%	85.11	5.96	4:20	0.24	12.40
Mano derecha – a	1	20%	18.03	1.26	1:35	0.09	1.35
Mano derecha – b	1	20%	11.35	0.79	1:20	0.07	0.87
Mano izquierda – a	1	20%	18.03	1.26	1:35	0.09	1.35
Mano izquierda – b	1	20%	11.35	0.79	1:20	0.07	0.87
Acople de Rodamiento - Cabeza	1	20%	56.15	3.93	2:57	0.17	4.10
Soporte motor 2 - a	2	40%	40.60	2.84	2:54	0.16	6.01
Soporte motor 2 - b	2	40%	24.70	1.73	1:07	0.06	3.58
Acople en L - a	2	20%	17.19	1.20	0:56	0.05	2.51
Acople en L - b	2	20%	17.19	1.20	0:56	0.05	2.51
Pieza de cabeza interior	2	20%	36.35	2.54	2:07	0.12	5.33
Pieza de cabeza exterior - a	2	15%	211.00	14.77	14:45	0.83	31.19
Pieza de cabeza exterior – b	2	15%	258.16	18.07	17:30	0.98	38.10
Clip de parlante	2	20%	1.45	0.10	0:08	0.01	0.22
Caja electrónica principal	1	20%	91.85	6.43	4:06	0.23	6.66
Case Baterías	1	20%	65.62	4.59	3:18	0.18	4.78
Case PCB Potencia	1	20%	21.91	1.53	0:59	0.06	1.59
Case Nucleo	1	20%	57.96	4.06	2:41	0.15	4.21
						Subtotal	314.31

6.2 Costo de Componentes

A continuación, se muestran los precios de los componentes según las cotizaciones y referencias del Anexo J. Para los componentes importados se considera el cambio de dólar al 8 de noviembre del 2021 (1USD = 4.02PEN).

Electrónicos

Tabla 6.3 Precios de componentes electrónicos (Elaboración Propia)

Cant.	Item	Proveedor	Precio unitario S/	Precio unitario \$	Envío	Precio total S/
8	Motor RMD X8 Pro	My Actuator		439	350	15 525.24
2	Motor RMD S9015	My Actuator		139	0	1 117.56
1	Nucleo STM32F446ZE	Joslin SAC	174.90	-	-	174.90
1	Módulo CAN MCP2551	Tezlatronic	17	-	-	17
2	Matrices LED Max7219	Naylamp Mecatronics	10	-	-	20
2	Parlantes 8 Ohm 1 W	Electrónica HIFI	3.5	-	-	7
1	Módulo DFPlayer Mini	EC Electronic Developer	16	-	-	16
1	Amplificador PAM8403	EC Electronic Developer	5	-	-	5
1	Banco de Baterías 6S	DOC Electronic Perú	201	-	-	201
1	Banco de Baterías 2S	DOC Electronic Perú	80	-	-	80
2	Resistencias 120 Ohm	Electrónica HIFI	0.2	-	-	0.4
3	Conector JST XH-2	Joslin SAC	1	-	-	3
1	Conector JST XH-5	Joslin SAC	1.2	-	-	1.2
2	Conectores JST XH-8	Joslin SAC	2	-	-	4
1	Botón de emergencia	Electrónica HIFI	10.40			10.40
1	PCB Nucleo Shield	JOBARECI E.I.R.L.	108			108
1	PCB Distribución de Potencia	JOBARECI E.I.R.L.	30			30
					Subtotal	17,320.7

Mecánicos

Tabla 6.4 Precios de componentes mecánicos (Elaboración Propia)

Cantidad	Item	Proveedor	Precio unitario S/	Precio total S/
8	Perno Button Allen M6x10 (inox)	Pernos Capeva	0.42	3.36
22	Perno Button Allen M6x16 (inox)	Pernos Capeva	0.42	9.24
104	Perno Button Allen M4x10 (inox)	Pernos Capeva	0.25	26
15	Perno Button Allen M4x12 (inox)	Pernos Capeva	0.25	3.75
18	Perno Button Allen M4x16 (inox)	Pernos Capeva	0.3	5.4
12	Tuerca M4	Pernos Capeva	0.08	0.96
32	Tuerca M6	Pernos Capeva	0.17	5.44
20	Perno Estobol M3	Ferretería Chino	0.2	4
20	Tuerca M3	Ferretería Chino	0.1	2
			Subtotal	60.15

6.3 Presupuesto total

Según los datos anteriores se calcula un presupuesto total para el sistema de S/ 17688, tal como se aprecia en la tabla 6.5. Este monto es incluso menor al presupuesto establecido en los requerimientos. Así mismo, se puede notar que el mayor costo es debido a los componentes electrónicos, específicamente el valor e importación de los servomotores.

Tabla 6.5 Presupuesto total (Elaboración Propia)

Subtotal Materiales	S/ 314.31
Subtotal Electrónica	S/ 17,182.7
Subtotal Mecánica	S/ 60.15
TOTAL	S/ 17,688.16

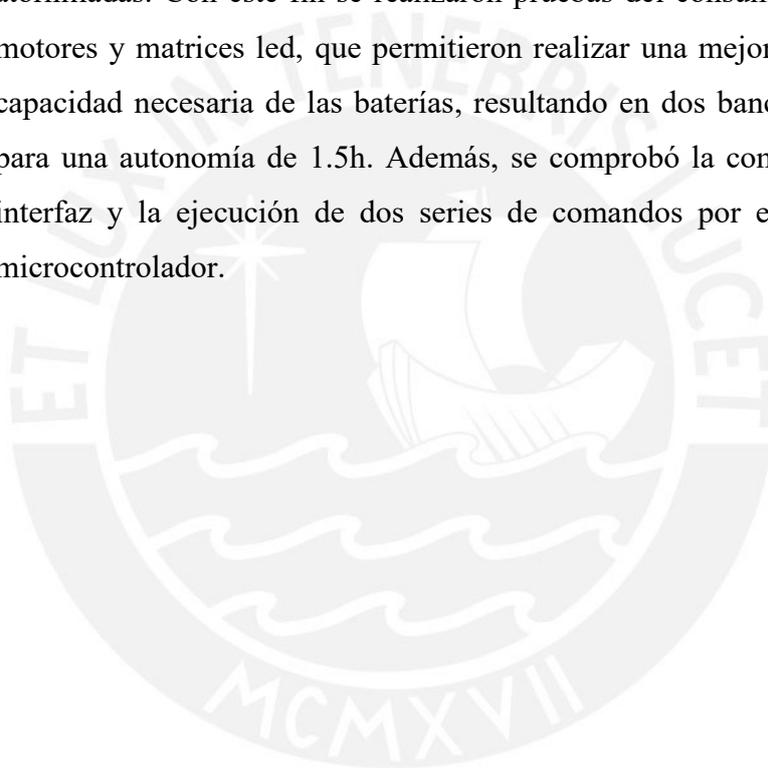
CONCLUSIONES

A partir de este trabajo se llegó a las siguientes conclusiones:

- Se diseñó un sistema de extremidades móviles (brazos y cabeza) que funciona de manera independiente y además es posible acoplarlo a la plataforma móvil del robot de telepresencia. De este modo, se le puede brindar características de un robot humanoide que le permitirá interactuar con los usuarios a través de la ejecución de distintas expresiones.
- Se investigó acerca del impacto del diseño en la aceptación de robots humanoides en el ámbito social, y sobre el estado del arte a nivel técnico de cabezas y brazos robóticos y sus dimensiones antropométricas. Teniendo esto en consideración, se determinó la necesidad de un mínimo de 4 GDL para cada brazo y 2 GDL para la cabeza. Además, se tomaron como medidas base 33 cm hombro-codo, 25 cm codo-muñeca y alto de cabeza 20 cm.
- Se definió la lista de requerimientos según las características del proyecto general y la información recopilada, siendo las más importantes la geometría antropomórfica, la fabricación con técnicas de prototipado rápido, y la utilización de servomotores.
- Se desarrollaron 3 conceptos de solución con las combinaciones de alternativas tecnológicas para cada función. Estas se caracterizaron principalmente por la forma de unión de sus articulaciones: por planchas, tubos o piezas impresas. A partir de la evaluación técnica-económica de estas, se escogió la solución por planchas como la más adecuada para realizar mejoras y llegar al concepto óptimo. De esta forma, se modificó se simplificó el ensamblaje y se añadieron piezas externas para incrementar su valor y llegar al concepto óptimo.
- Se realizó el diseño mecatrónico de la cabeza y brazos antropomórficos, teniendo en cuenta grados de libertad, dimensiones y cargas requeridas, además de complementos como matrices led para los ojos y un sistema de audio para brindar mayor expresividad. En este proceso, se realizaron cálculos para las estimaciones de torque y del modelo cinemático, además de simulaciones mediante elementos finitos para verificar la resistencia de las piezas. El sistema es controlado por un microcontrolador STM32 y se

comunica por protocolo CAN con los 8 motores GYEMS X8 Pro. Este, a su vez, recibe instrucciones desde una interfaz en una computadora personal, donde es posible ingresar secuencias o posiciones predeterminadas. De esta manera, el sistema diseñado permitirá configurar las expresiones y movimientos necesarios para su integración con la plataforma móvil en el robot de telepresencia. Se calculó un presupuesto de S/ 17,557.16 para la fabricación de todo el sistema.

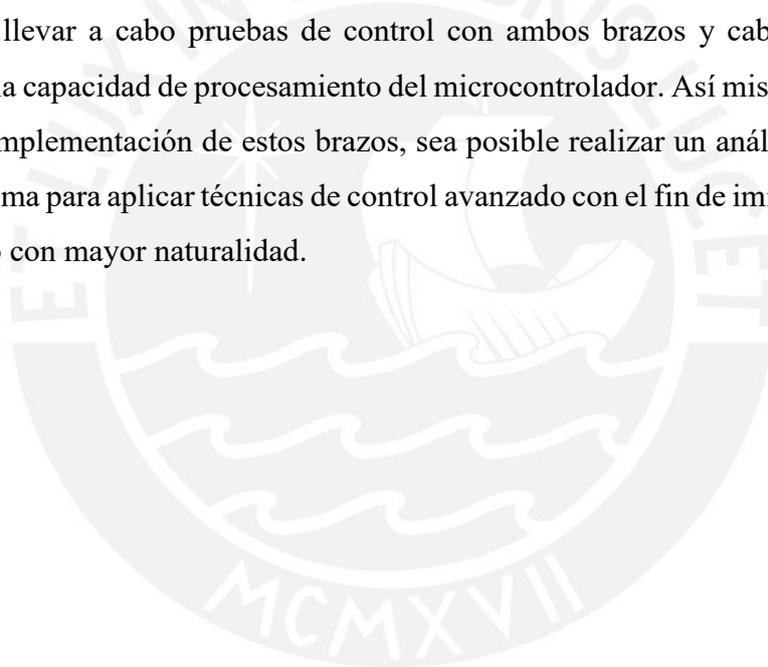
- Finalmente, se validó el diseño de los brazos a través de la implementación y pruebas con un prototipo fabricado por impresión 3D de PLA y uniones atornilladas. Con este fin se realizaron pruebas del consumo de corriente de motores y matrices led, que permitieron realizar una mejor estimación de la capacidad necesaria de las baterías, resultando en dos bancos de 2000 mAh para una autonomía de 1.5h. Además, se comprobó la comunicación con la interfaz y la ejecución de dos series de comandos por el programa en el microcontrolador.



RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

A lo largo del desarrollo de este trabajo de tesis se ha podido notar cómo las características técnicas de los componentes y sus limitaciones permiten el cumplimiento del objetivo de lograr un diseño semejante a los humanos, capaz de mostrar expresividad a través del movimiento.

En ese sentido, para el desarrollo de futuros trabajos se recomienda explorar una mayor variedad de mecanismos de las extremidades, basados quizá en otros actuadores, así como también diferentes soluciones para los rasgos faciales. En cuanto al prototipo, se sugiere llevar a cabo pruebas de control con ambos brazos y cabeza con el fin de validar la capacidad de procesamiento del microcontrolador. Así mismo, se espera que, con la implementación de estos brazos, sea posible realizar un análisis más detallado del sistema para aplicar técnicas de control avanzado con el fin de imitar el movimiento humano con mayor naturalidad.



BIBLIOGRAFÍA

- Baisch, S., Kolling, T., Schall, A., Rühl, S., Selic, S., Kim, Z., Rossberg, H., Klein, B., Pantel, J., Oswald, F., & Knopf, M. (2017). Acceptance of Social Robots by Elder People: Does Psychosocial Functioning Matter? *International Journal of Social Robotics*, 9(2), 293–307. <https://doi.org/10.1007/s12369-016-0392-5>
- Beer, J. M., Prakash, A., Mitzner, T. L., & Rogers, W. A. (2011). *Understanding Robot Acceptance* [Technical Report]. Georgia Institute of Technology. <https://smartech.gatech.edu/handle/1853/39672>
- Beira, R., Lopes, M., Praca, M., Santos-Victor, J., Bernardino, A., Metta, G., Becchi, F., & Saltaren, R. (2006). *Design of the Robot-Cub (iCub) Head*. 7.
- Cavallo, F., Esposito, R., Limosani, R., Manzi, A., Bevilacqua, R., Felici, E., Di Nuovo, A., Cangelosi, A., Lattanzio, F., & Dario, P. (2018). Robotic Services Acceptance in Smart Environments With Older Adults: User Satisfaction and Acceptability Study. *Journal of Medical Internet Research*, 20(9), e264. <https://doi.org/10.2196/jmir.9460>
- Digi-Key Electronics. (n.d.). *PCB Trace Width Conversion Calculator* | DigiKey. Recuperado el 23 de Noviembre del 2021 de <https://www.digikey.com/en/resources/conversion-calculators/conversion-calculator-pcb-trace-width>
- Escobar, C. M. (2020). PERFIL ANTROPOMETRICO DE TRABAJADORES DEL PERU UTILIZANDO EL METODO DE ESCALA PROPORCIONAL. *Ergonomía, Investigación y Desarrollo*, 2.
- Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2016). Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications—A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 367–392. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>
- Federal Aviation Administration. (2016). *Human Factors Design Standard*. https://hf.tc.faa.gov/publications/2016-12-human-factors-design-standard/full_text.pdf
- Gyems (s.f.) RMD X8-Pro. Recuperado el 10 de Septiembre de 2021 de: <http://www.gyems.cn/866757.html>

- Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI. (2018). *Anuario de Estadísticas Ambientales* (p. 717). INEI. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/anuario-estadisticas-ambientales-2018>
- ISO. (s/f). *ISO 13482:2014(en), Robots and robotic devices—Safety requirements for personal care robots*. Recuperado el 8 de mayo de 2021, de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:13482:ed-1:v1:en>
- Isabet, B., Pino, M., Lewis, M., Benveniste, S., & Rigaud, A.-S. (2021). Social Telepresence Robots: A Narrative Review of Experiments Involving Older Adults before and during the COVID-19 Pandemic. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(7), 3597. <https://doi.org/10.3390/ijerph18073597>
- Johannes, M. S., Faulring, E. L., Katyal, K. D., Para, M. P., Helder, J. B., Makhlin, A., Moyer, T., Wahl, D., Solberg, J., Clark, S., Armiger, R. S., Lontz, T., Geberth, K., Moran, C. W., Wester, B. A., Van Doren, T., & Santos-Munne, J. J. (2020). Chapter 21—The Modular Prosthetic Limb. En J. Rosen & P. W. Ferguson (Eds.), *Wearable Robotics* (pp. 393–444). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814659-0.00021-7>
- Kristoffersson, A., Coradeschi, S., Loutfi, A., & Eklundh, K. (2011). An Exploratory Study of Health Professionals' Attitudes about Robotic Telepresence Technology. *Journal of Technology in Human Services*, 29, 263-283. <https://doi.org/10.1080/15228835.2011.639509>
- Langevin (2018) Inmoov Open source 3D printed life-size robot. Recuperado el 11 de abril de 2021 de: <https://inmoov.fr/>
- Mead, R., Yim, M., Mataric, M. J., Kim, S., McDorman, B., Specian, A., Eckenstein, N., Chen, Y., & Lee, J. (s/f). *Quori: A Community-Driven Modular Social Robot Platform for Human-Robot Interaction*. 2.
- Mick, S., Lapeyre, M., Rouanet, P., Halgand, C., Benois-Pineau, J., Palet, F., Cattaert, D., Oudeyer, P.-Y., & de Rugy, A. (2019). Reachy, a 3D-Printed Human-Like Robotic Arm as a Testbed for Human-Robot Control Strategies. *Frontiers in Neurorobotics*, 13. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2019.00065>

- Ministerio de Salud (2020). *Prevención, Diagnóstico y Tratamiento de personas afectadas por el COVID-19 en el Perú* [Documento Técnico]. <https://www.gob.pe/institucion/minsa/informes-publicaciones/473587-prevencion-diagnostico-y-tratamiento-de-personas-afectadas-por-covid-19-en-el-peru>
- Moyle, W., Jones, C., Cooke, M., O'Dwyer, S., Sung, B., & Drummond, S. (2014). Connecting the person with dementia and family: A feasibility study of a telepresence robot. *BMC Geriatrics*, 14(1), 7. <https://doi.org/10.1186/1471-2318-14-7>
- Mushtaq, R., Shoib, S., Shah, T., & Mushtaq, S. (2014). Relationship between loneliness, psychiatric disorders and physical health? A review on the psychological aspects of loneliness. *Journal of Clinical and Diagnostic Research: JCDR*, 8(9), WE01-04. <https://doi.org/10.7860/JCDR/2014/10077.4828>
- Muthugala, M., Munasinghe, M. K. B. S., Lakshan, M. H. C., Madurangi, L. H. H., & Jayasekara, A. G. B. P. (2013). Design of an interactive robotic head with human-like movements. *2013 IEEE 8th International Conference on Industrial and Information Systems*, 355-360. <https://doi.org/10.1109/ICIInfS.2013.6732009>
- PAL Robotics. (s/f). ARI - PAL Robotics: Leading service robotics. *PAL Robotics*. Recuperado el 11 de abril de 2021, de <https://pal-robotics.com/robots/ari/>
- Park, E. (2013). The adoption of tele-presence systems: Factors affecting intention to use tele-presence systems. *Kybernetes*, 42(6), 869-887. <https://doi.org/10.1108/K-01-2013-0013>
- Pateromichelakis, N., Mazel, A., Hache, M. A., Koumpogiannis, T., Gelin, R., Maisonnier, B., & Berthoz, A. (2014). *Head-eyes system and gaze analysis of the humanoid robot Romeo*. 6.
- Pollen Robotics. (2016). *Discover Reachy, a robotic platform based on AI – Reachy by Pollen Robotics, an open source programmable humanoid robot*. Recuperado el 25 de abril de 2021, de <https://www.pollen-robotics.com/reachy/>
- Quirrell. (2020, enero 18). Canon de la cabeza humana. *Quirell*. <http://www.quirell.es/canon-de-la-cabeza-humana/>

- Robotics, P. A. L. (2020, abril 3). EU project SPRING: Thanks to this project we are developing robotics that could help tackle the COVID-19 pandemic. *PAL Robotics Blog*. <https://blog.pal-robotics.com/eu-project-spring-developing-robotics-to-help-tackle-the-covid19-pandemic/>
- Rosen, J., Perry, J. C., Manning, N., Burns, S., & Hannaford, B. (2005). The human arm kinematics and dynamics during daily activities—Toward a 7 DOF upper limb powered exoskeleton. *ICAR '05. Proceedings., 12th International Conference on Advanced Robotics, 2005.*, 532–539. <https://doi.org/10.1109/ICAR.2005.1507460>
- Stock Drive Products (2021) *Center Distance Designer*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2021 de: <https://sdp-si.com/eStore/CenterDistanceDesigner>
- Stock Drive Products (s.f.) *Handbook of Timing Belts*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2021 de: <https://sdp-si.com/eStore/CenterDistanceDesigner>
- SFK. (2021). *61802—Deep groove ball bearings | SKF*. Recuperado el 15 de Noviembre de 2021 de <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-61802>
- SKF. (2021). *51109—Thrust ball bearings, single direction | SKF*. Recuperado el 15 de Noviembre de 2021 de <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/ball-bearings/thrust-ball-bearings/productid-51109>
- SoftBank Robotics. (s/f). *Pepper the humanoid and programmable robot | SoftBank Robotics*. SoftBank Robotics. Recuperado el 25 de abril de 2021, de <https://www.softbankrobotics.com/emea/en/pepper>
- Song, H., Kim, Y.-S., Yoon, J., Yun, S.-H., Seo, J., & Kim, Y.-J. (2018). Development of Low-Inertia High-Stiffness Manipulator LIMS2 for High-Speed Manipulation of Foldable Objects. *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 4145–4151. <https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8594005>
- Spong, M. W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2020). *Robot Modeling and Control* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Ltd. <https://lccn.loc.gov/2019055414>
- Tian, L. (2019). The Uncanny Valley: A Possible Explanation for Creepiness. *Medium*. https://medium.com/@lutian_71494/the-uncanny-valley-a-possible-explanation-for-creepiness-5ce7361d777e

- Wu, Y.-H., Wrobel, J., Cornuet, M., Kerhervé, H., Damnée, S., & Rigaud, A.-S. (2014). Acceptance of an assistive robot in older adults: A mixed-method study of human–robot interaction over a 1-month period in the Living Lab setting. *Clinical Interventions in Aging, 9*, 801-811. <https://doi.org/10.2147/CIA.S56435>



ANEXOS

ANEXO A: Lista de requerimientos

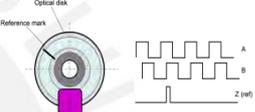
LISTA DE REQUERIMIENTOS			Página 1 de 3	
PROYECTO		Sistema de extremidades móviles para robot de telepresencia		Fecha: 16 de abril de 2021
				Revisado: Diego Arce Cigüeñas
				Elaborado: Fiorella Urbina Garro
Fechas (cambios)	Deseo o Exigencia	Descripción	Responsable	
Función Principal				
16/04/2021	E	Brindar expresividad a la plataforma robótica mediante movimiento para mejorar la interacción con pacientes en centros de salud	Fiorella Urbina Garro	
16/04/2021	D	Establecer 3 movimientos predeterminados para cada extremidad		
Geometría				
06/04/2021	E	Dimensiones proporcionales a un robot de 1.65 m de altura y base móvil de 0.4 m de diámetro.	Fiorella Urbina Garro	
06/04/2021	E	Diseño de piezas externas con formas antropomórficas		
Cinemática				
06/04/2021	E	Brazos de 4 grados de libertad	Fiorella Urbina Garro	
06/04/2021	E	Cabeza de 2 grados de libertad		
06/04/2021	E	Velocidad regulable, en el rango de 10 y 150 deg/s		
Fuerza				
06/04/2021	E	Torque mínimo para el movimiento del hombro de 3 Nm	Fiorella Urbina Garro	
06/04/2021	E	Torque mínimo para motores en la cabeza de 0.01 Nm		
Energía				
06/04/2021	E	Autonomía mínima de 1h	Fiorella Urbina Garro	
06/04/2021	E	Almacenamiento de energía en baterías de Litio de 12V o 24V		

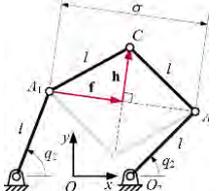
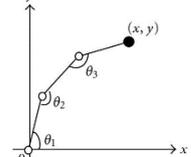
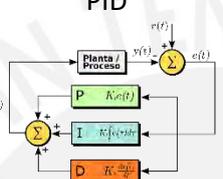
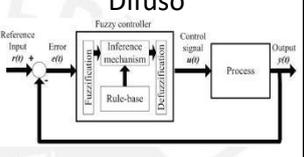
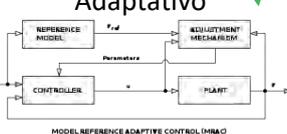
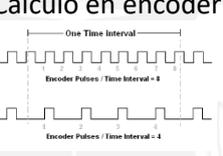
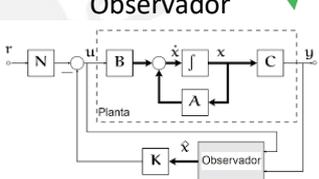
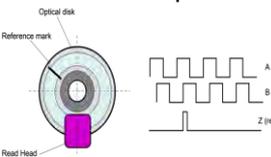
LISTA DE REQUERIMIENTOS			Página 2 de 3
Fechas (cambios)	Deseo o Exigencia	Descripción	Responsable
Señales			
06/04/2021	E	Señales de entrada: - Indicación de movimiento de las articulaciones de los brazos - Indicación de movimiento de las articulaciones de la cabeza - Gesto predefinido	Fiorella Urbina Garro
06/04/2021	E	Señales de salida: - Posición medida de los motores - Audio - Luz	
Control			
06/04/2021	E	Control de posición o velocidad para articulaciones (brazos y cabeza)	Fiorella Urbina Garro
Electrónica (hardware)			
06/04/2021	E	Sensor de velocidad angular	Fiorella Urbina Garro
06/04/2021	E	Motores GYEMS RMD-X8 y S-90	
06/04/2021	E	Parlantes	
06/04/2021	E	Leds para movimiento de los ojos	
Software			
06/04/2021	D	Interfaz para visualizar los parámetros medidos y dar instrucciones de movimiento	Fiorella Urbina Garro
Comunicaciones			
06/04/2021	E	Comunicación alámbrica del subsistema debe ser compatible con la computadora / controlador general del robot	Fiorella Urbina Garro
Seguridad			
06/04/2021	E	Protección para los componentes debido al polvo e impacto leve	Fiorella Urbina Garro
06/04/2021	E	Botón de emergencia	
Fabricación			
06/04/2021	D	Técnicas de prototipado rápido: Corte laser, mecanizado en CNC, impresión 3D, corte y doblado	Fiorella Urbina Garro

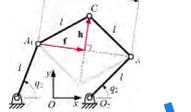
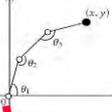
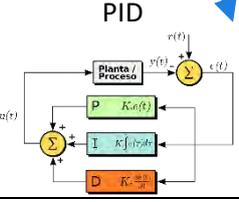
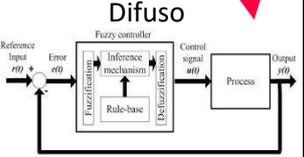
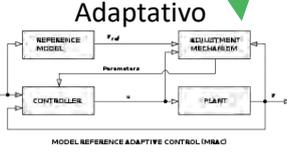
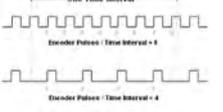
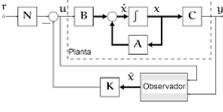
LISTA DE REQUERIMIENTOS			Página 3 de 3
Fechas (cambios)	Deseo o Exigencia	Descripción	Responsable
Montaje			
06/04/2021	E	Establecer tolerancias para el ensamble	Fiorella Urbina Garro
06/04/2021	E	Ensamble al robot mediante uniones atornilladas	
06/04/2021	D	Ensamble por uniones geométricas	
Uso			
06/04/2021	E	Salas de aislamiento en hospitales en Lima y Cusco	Fiorella Urbina Garro
06/04/2021	E	Temperatura 12°C a 30°C	
06/04/2021	E	Humedad relativa entre 64% y 85%	
06/04/2021	E	Presión de 0.7 atm a 1 atm	
Control de calidad			
06/04/2021	E	Tiempo de respuesta del sistema debe ser menor a 1 s	Fiorella Urbina Garro
Mantenimiento			
06/04/2021	D	Mantenimiento preventivo mensual	Fiorella Urbina Garro
Plazos			
06/04/2021	E	Diseño de concepto solución óptimo para el 15 junio del 2021	Fiorella Urbina Garro
Costos			
06/04/2021	E	Presupuesto total entre S/ 30 000 y S/ 40 000	Fiorella Urbina Garro

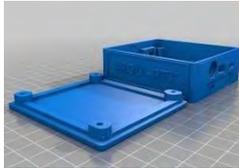
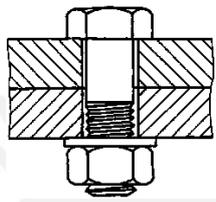
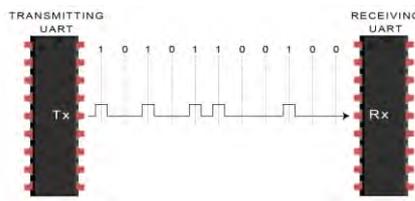
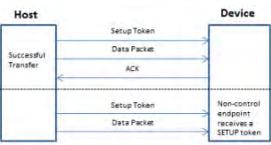
ANEXO B: Matriz morfológica

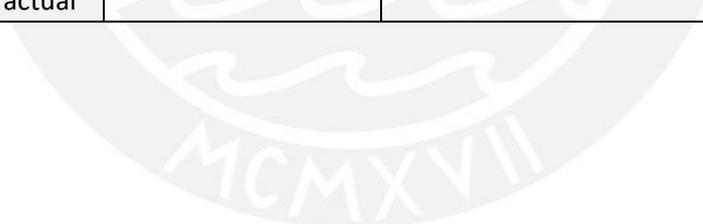
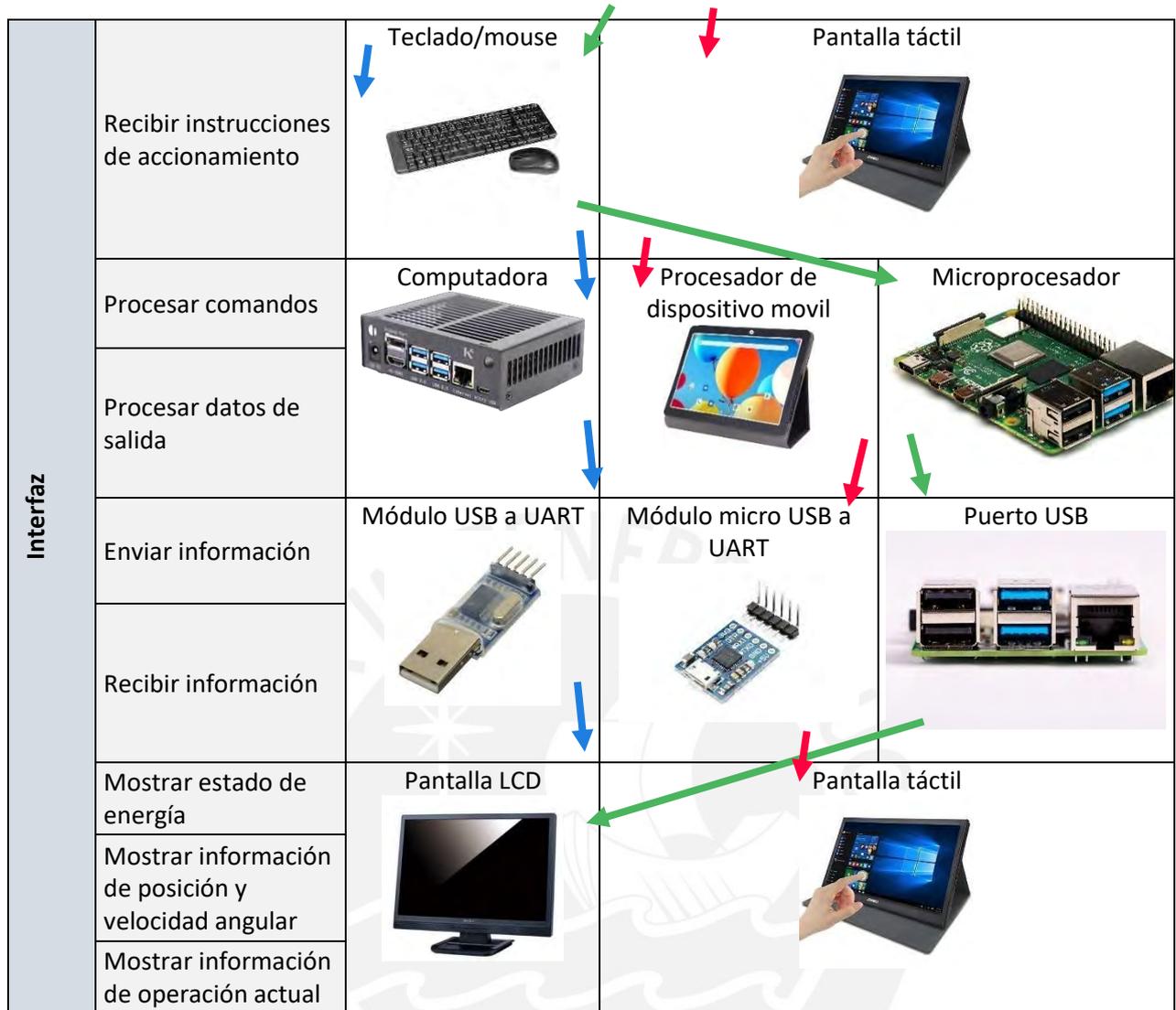
Azul: Concepto solución 1, Rojo: Concepto solución 2, Verde: Concepto solución 3

Subsistema Brazos				
Mecánica	Soportar componentes	Placas/Planchas 	Tubos comerciales para brazos robóticos 	Piezas impresas 
	Unir articulaciones			
	Transmitir movimiento	Tren de engranajes 	Polea dentada 	Conexión directa 
Sensores	Medir posición angular de motores	Encoder magnético 	Encoder óptico 	
		Actuadores	Accionar articulaciones	Motor sin escobillas con control integrado 

Control	Hardware	Procesar datos	Módulo microcontrolador		Computadora	
		Calcular posición				
		Calcular velocidad angular				
	Software	Procesar datos	Cinemática directa 	Cinemática inversa 		
		Controlar posición	PID 	Difuso 	Adaptativo 	
		Calcular velocidad angular	Cálculo en encoder 	Observador 		
Subsistema Cabeza						
Mecánica	Soportar componentes	Placas/Planchas		Piezas impresas		
	Unir articulaciones					
	Transmitir movimiento	Engranajes cónicos 	Polea dentada 	Conexión directa 		
Sensores	Medir posición angular de motores	Encoder magnético 		Encoder óptico 		

Actuadores	Accionar articulaciones	Motores sin escobillas con control integrado 	Motor DC con escobillas 	Servomotor 	
	Emitir sonido	Parlante / altavoz común 	Parlante comercial con rejilla 		
	Emitir Luz	Matriz de leds 	Anillo led rgb 	Micro proyector 	
Control	Procesar datos	Módulo microcontrolador 		Computadora 	
		Calcular posición	Tarjeta SD 	USB 	Memoria interna de parlante 
		Calcular velocidad angular		Módulo reproductor MP3 SD 	Módulo reproductor MP3 USB 
	Almacenar Audio	Cinemática directa 		Cinemática inversa 	
	Procesar y reproducir audio	PID 		Difuso 	Adaptativo 
	Calcular velocidad angular	Cálculo en encoder 	Observador 		

		Subsistema general		
	Proteger y Albergar componentes	Caja comercial de plástico 	Caja fabricada 	Caja impresa en 3D 
	Mecánica	Fijar sistema al robot Unión atornillada 	Unión por forma 	Pestillo 
	Almacenar energía	Batería ácido plomo 	Batería LiPo 	Pack de baterías Lion 
	Energizar actuadores			
Energía	Detener operación	Botón de parada 	Switch de emergencia 	
	Energizar elementos de bajo voltaje	Regulador conmutado 		Regulador lineal 
Comunicación	Enviar información	Protocolo UART 		Protocolo USB 
	Recibir información			



ANEXO C: Conceptos Solución

Concepto solución 1: Unión con placas

Se muestra el primer concepto solución en la figura C.1. Sobre el subsistema de brazos, en la parte mecánica, consta de placas que permiten enlazar los motores y las articulaciones. Estas posteriormente estarán cubiertas por una carcasa que le dé la forma de brazo humano.

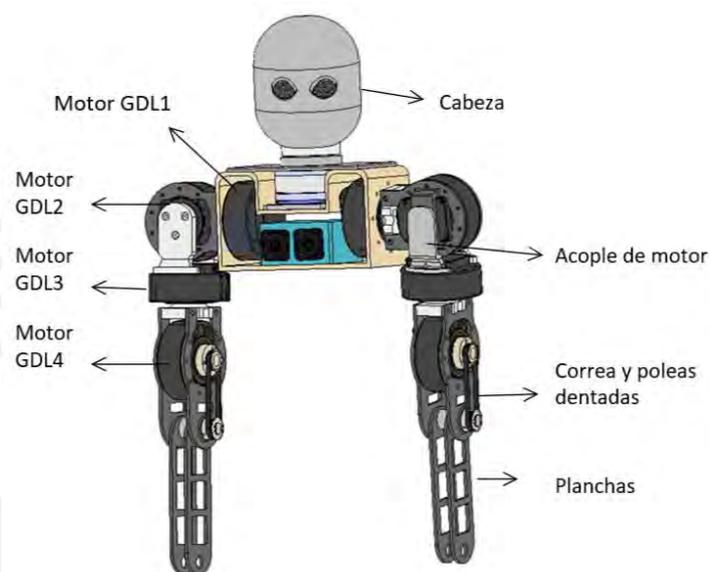


Figura C.1 Concepto solución 1. Elaboración propia

Los motores tienen transmisión directa en los tres primeros grados de libertad. Para el cuarto, se busca reducir el tamaño del codo y aligerar la carga al extremo, por lo que se opta por transmisión por correa dentada.

El subsistema de cabeza está unido mediante placas y elementos cilíndricos en la configuración que puede verse en la figura C.2. Como se observa, se requiere de rodamientos axiales y radiales para efectuar los giros con facilidad y sin dañar los motores. Los ojos son representados por matrices LED de 8x8. La parte exterior se conforma por una carcasa diseñada para tener la forma de una cabeza humana y aberturas para los ojos.

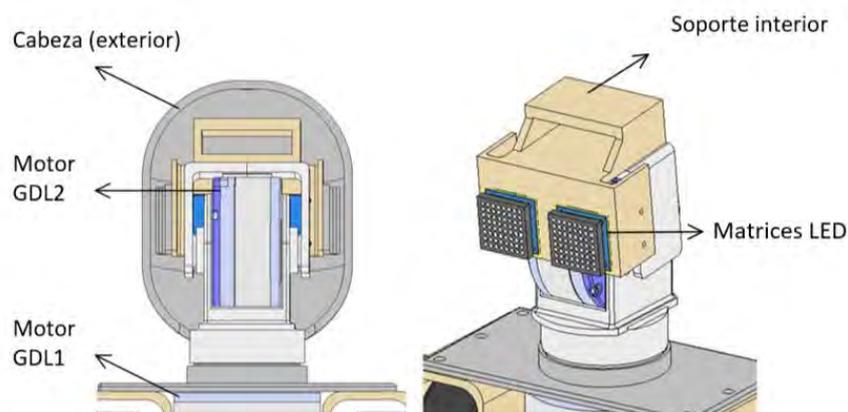


Figura C.2: Concepto solución 1 – Subsistema cabeza. Elaboración propia.

Sobre el control y comunicación, esta solución emplea una tarjeta MC6030, la cual proporciona una línea de alimentación para los motores, e integra transceptores para diferentes protocolos de comunicación, puertos GPIO, analógicos, etc. El controlador, junto con los demás componentes electrónicos, se encuentran en la caja electrónica de la parte central, mostrada en la figura C.3 Además, la interfaz se mostrará en una computadora personal, con la cual el operador puede interactuar usando un *mouse* y teclado. La comunicación entre sistema – interfaz es alámbrica.

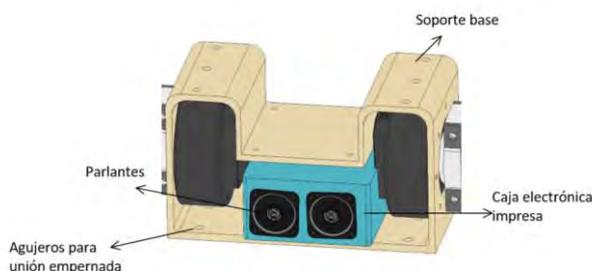


Figura C.3: Concepto solución 1 – parte central. Elaboración propia.

Concepto solución 2: Unión con tubos

En este concepto solución los enlaces son tubos comerciales para uniones de extremidades de este tipo. La conexión entre actuadores-articulación es directa, por lo cual los brazos parecen tener el mismo grosor a lo largo de toda la extremidad (ver figura C.4).

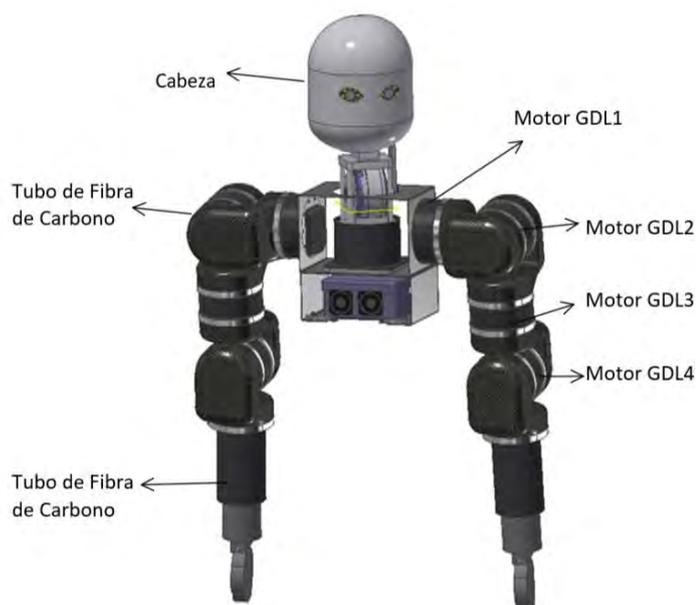


Figura C.4: Concepto solución 2. Elaboración propia.

En la cabeza se emplean anillos de luces led para los ojos, y el segundo grado de libertad cuenta con una polea para mantener los motores más cercanos a la base (ver figura C.5). Ambos subsistemas se unen fijando los motores a chapas dobladas que forman dos niveles, el inferior con espacio para la caja electrónica de plástico y el parlante para el audio. Todo el sistema se une a la plataforma robótica mediante pestillos/ganchos ubicados en la base. En cuanto al control, esta solución emplea un microcontrolador al cual se conectan módulos de comunicación CAN (transceptor) para ser capaz de operar. En este concepto, se empleará un dispositivo móvil con pantalla táctil como interfaz. La comunicación entre sistema – interfaz es alámbrica.

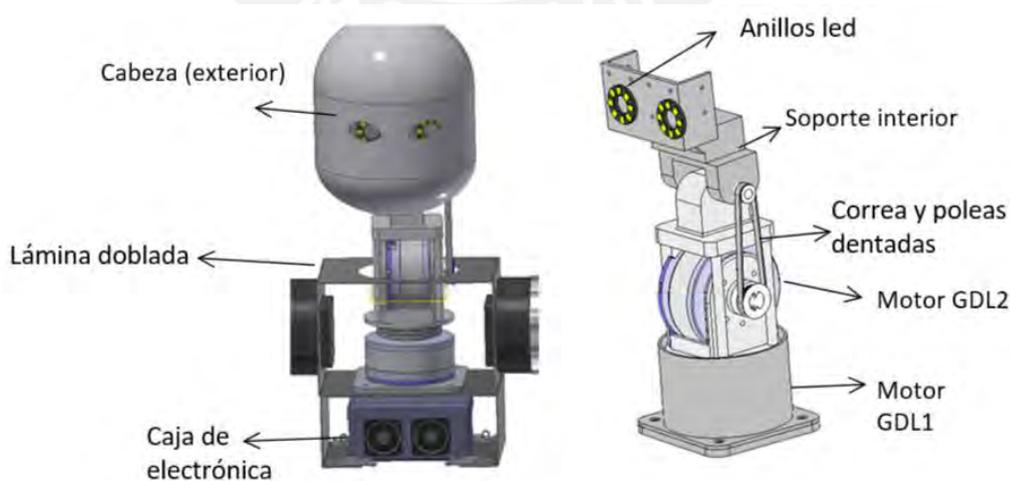


Figura C.5: Concepto solución 2: Subsistema Cabeza. Elaboración propia.

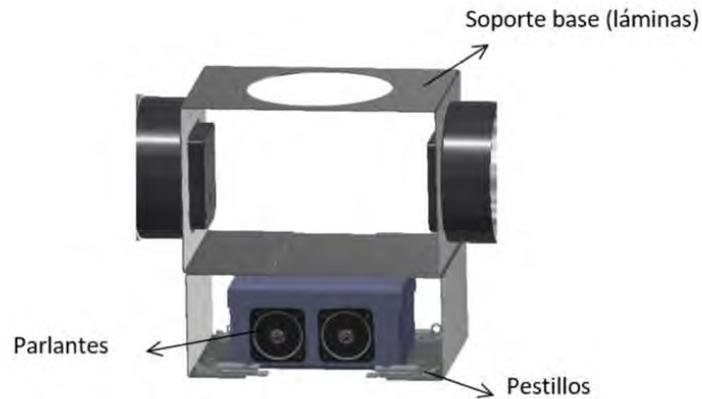


Figura C.6: Concepto solución 2 – parte central. Elaboración propia.

Concepto solución 3: Unión con piezas impresas

En el tercer concepto solución, los enlaces son modelados con formas más orgánicas y similares al brazo humano, ya que se emplea manufactura aditiva para su fabricación (ver figura C.7). El mecanismo de transmisión en la articulación del codo será por tren de engranajes.

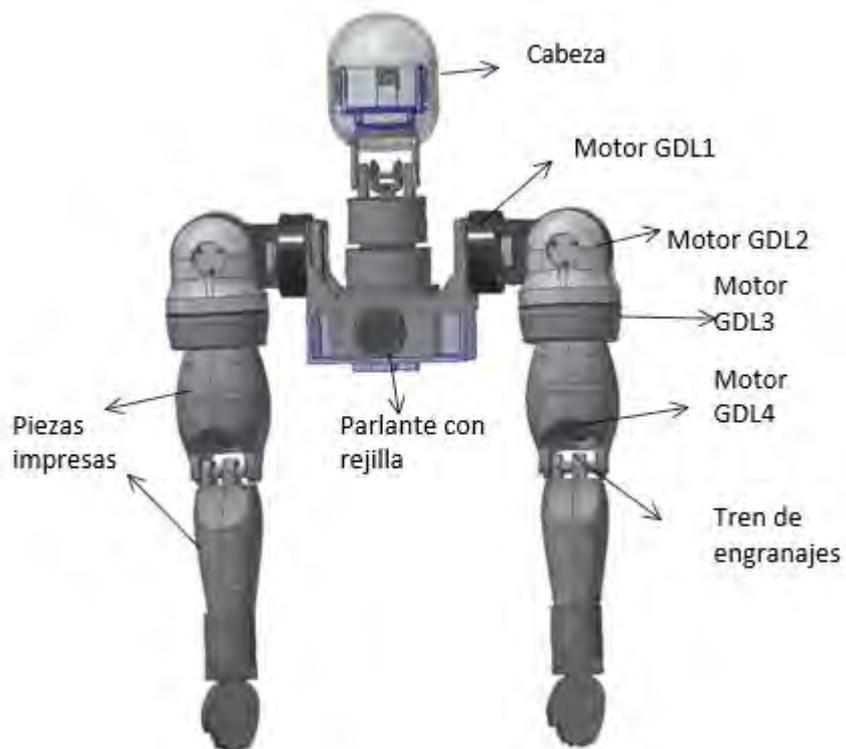


Figura C.7: Concepto solución 3. Elaboración propia.

La cabeza tiene una disposición de motores diferente a las anteriores, ya que se emplean engranajes cónicos para transmitir el movimiento en otro eje (ver figura C.8). Además, dentro de la cabeza se ubica un proyector que permite generar una imagen desde el interior para representar las expresiones faciales del robot. La base que une ambos subsistemas también es impresa y se une por forma a la plataforma robótica como se muestra en la figura C.9. Al igual que el concepto 2, se considera que la interfaz se encontrará en un dispositivo móvil de pantalla táctil.



Figura C.8: Concepto solución 3 – Detalle subsistema cabeza. Elaboración propia.

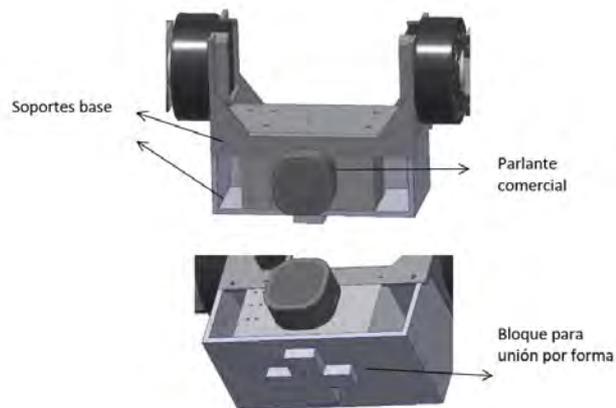


Figura C.9: Concepto solución 3 – detalle de base. Elaboración propia

ANEXO D: Evaluación Técnico-Económica

En esta sección se analizan las tres alternativas según criterios técnicos y económicos basados en las exigencias del sistema. A cada uno se le asigna un peso del 1 al 4 en función a su importancia. En adelante, se detallan cada uno de los criterios y luego se presenta evaluación en las tablas D.1 y D.2.

Criterios técnicos

B. Facilidad de manejo

Este criterio está enfocado principalmente en la interfaz con el usuario, el valor otorgado se debe a que es importante facilitar el ingreso de datos de forma directa en una primera etapa, sin embargo, posteriormente la comunicación sería directa con el control central del robot. Por ello, se le asigna un valor de 2.

- S1: La selección e ingreso de datos es sencilla (teclado y computadora), se otorga un puntaje de $p = 2$.
- S2: Se facilita más el ingreso de datos al tener un dispositivo móvil de pantalla táctil, se otorga puntaje de $p = 3$.
- S3: La selección e ingreso de datos es sencilla (teclado y computadora), se otorga un puntaje de $p = 2$.

C. Repetibilidad

Se refiere a la capacidad de efectuar movimientos obteniendo los mismos resultados (precisión, velocidad, eficiencia, etc) a lo largo del tiempo en repetidas ocasiones. Esto permite asegurar un funcionamiento más preciso, lo cual es más relevante al trabajar de manera remota. Por ello, se le asigna un valor de $g = 3$.

- S1: Es posible tener repetibilidad con el control PID y la simplicidad de las piezas, sin embargo, la transmisión por faja en los brazos aumenta un posible factor de error. Se otorga un puntaje de $p = 2$.

- S2: La estrategia de control es más avanzada y la conexión a los actuadores es directa, por lo que se alcanzaría un alto grado de repetibilidad. Se otorga un puntaje de $p = 3$.
- S3: Es posible tener repetibilidad con el control adaptativo, sin embargo, la transmisión por engranajes en cabeza y brazos aumentan un posible factor de error. Se otorga un puntaje de $p = 2$

D. Consumo de energía

Se considera debido a que se tiene establecido un cierto tiempo de autonomía para el sistema. Un consumo de energía más eficiente y selección óptima de baterías disminuye la carga del robot y aumenta su eficiencia. El peso asignado no es el máximo, teniendo en cuenta que una vez integrado, el sistema estaría en funcionamiento por intervalos cortos y definidos en base a la comunicación o expresión que se requiera en ciertos momentos. Por ello, se le asigna un valor de $g = 2$.

- S1 y S2: El nivel de consumo es similar en ambos casos ya que emplean similares componentes. Se otorga un puntaje de $p = 3$
- S3: Se emplean componentes que consumen mayor energía como el proyector y la computadora. Se le otorga un puntaje de $p = 2$.

E. Simplicidad

Se considera relevante este aspecto ya que facilita su desarrollo teniendo en cuenta que el número de actuadores y piezas mecánicas mínimas que se requieren es alto por sí mismo. Un sistema simple, así mismo, facilita la comunicación entre componentes y permite mejorar tanto el proceso de desarrollo como el de mantenimiento. Por ello, se le asigna un valor de $g = 3$.

- S1: El uso de placas para la estructura interna y la menor cantidad de componentes electrónicos que permite el uso del MC6030 lo hace un diseño simple. Se otorga un puntaje de $p = 3$.
- S2: Se emplean tubos comerciales y conexiones directas por lo que es un diseño simple en cuanto a su diseño mecánico. Se otorga un puntaje de $p = 3$.

- S3: El diseño de piezas estructurales específicas, la transmisión por engranajes y la visualización del retroproyector, sumado a su estrategia de control, lo hacen un diseño mucho más complejo que las opciones anteriores. Se otorga un puntaje de $p = 3$.

F. Diseño antropomórfico

Se relaciona directamente con la función principal del robot. Implica el nivel de coherencia en las proporciones, geometría y configuraciones cinemáticas empleadas, de modo que tenga similitud con una persona tanto en el movimiento como en la apariencia estética. Por esto se le asigna un valor de $g = 4$.

- S1: La disposición de grados de libertad es adecuada. El uso de una carcasa permite que se implementen formas orgánicas, pero incrementa el tamaño de los brazos. La matriz led permite mostrar expresiones variadas. Se otorga un puntaje de $p = 2$.
- S2: Los tubos empleados son similares a los usados por algunas prótesis, pero debido al tamaño y disposición, la geometría se percibe como artificial. La expresión de los ojos solo puede darse por el color. Se otorga un puntaje de $p = 1$.
- S3: Las piezas impresas en formas determinadas da un aspecto más orgánico. Existen numerosas formas de expresión con el retro proyector. Se otorga un puntaje de $p = 3$.

Crterios económicos

G. Costo de la tecnología

Se relaciona con el límite presupuestal del proyecto. Si bien no es crítico que el gasto sea el menor posible, se espera que la solución óptima no sobrepase el monto indicado. Por ello, se le asigna un valor de $g = 2$.

- S1: El costo de los componentes no es elevado. Aumenta ligeramente respecto a la solución 2 por el MC6030, al ser una tarjeta específica e importada. Se otorga un puntaje de $p = 2$

- S2: El costo de los componentes no es elevado, disminuye si se fabrica una tarjeta de control y comunicación propia. Se otorga un puntaje de $p = 3$.
- S3: Emplea componentes de alto valor como la computadora o el proyector. Se le otorga un puntaje de $p = 1$.

H. Costo de fabricación

Se le asigna este valor ya que la fabricación de componentes o piezas individuales supone mayores costos económicos y de tiempo. Además, incrementa innecesariamente la complejidad del sistema en el caso de componentes de precisión que pueden adquirirse comercialmente y no requieren personalización. Por ello, se le asigna un valor de $g = 3$.

- S1: La mayor parte de componentes son integrados o comerciales, el costo de fabricación no es muy elevado. Se otorga un valor de $p = 3$.
- S2: Se requiere la fabricación (mecanizado) de engranajes y fabricación de la placa PCB para la tarjeta de control y comunicación. Se otorga un valor de 2.
- S3: Se requiere la fabricación (mecanizado) de engranajes cónicos y fabricación de la placa PCB para la tarjeta de control y comunicación. Se otorga un valor de 2.

I. Facilidad de adquisición de los materiales

Permite poder replicar el sistema con mayor facilidad, al mismo tiempo que disminuye el tiempo de desarrollo del proyecto y también los costos de importación de materiales y componentes. Por ello, se le asigna un valor de $g = 3$. Para todas las soluciones, los materiales son fáciles de conseguir en importación o están disponibles en el mercado local. Se les otorga un valor de 3.

J. Número de piezas

Se refiere al uso mínimo necesario de piezas mecánicas, ya que simplifica los mecanismos y el montaje del sistema, sin embargo, no se le otorga un peso tan alto pues es posible que la complejidad se compense con otros factores como la obtención de mejores resultados dinámicos o de aspecto. Por ello, se le asigna un valor de $g = 1$.

- S1: Cuenta con varias piezas mecánicas, ya que tiene una sección estructural y una carcasa. Se otorga un puntaje de $p = 1$.
- S2 y S3: Cuentan con menos piezas, ya que las mismas que sostienen la estructura son las que se muestran al exterior. Se les otorga un puntaje de $p = 3$.

K. Número de componentes

Se refiere al uso de componentes electrónicos. A diferencia de su contraparte mecánica, se añade la ventaja de requerir posiblemente menor energía y menores problemas de comunicación entre componentes. Por ello, se le asigna un valor de $g = 2$.

- S1 y S2: Disminuye el número de componentes electrónicos ya que el MC6030 tiene integrado controlador y transceptor. Se le otorga un peso de 3.
- S2 y S3: Tienen algunos componentes adicionales debido a que se debe diseñar una tarjeta de control y comunicación. Se otorga un puntaje de $p = 2$.

L. Facilidad de montaje

El montaje del sistema interno, y la fijación a la plataforma robótica, debe ser en lo posible fácil, pero no es crítico pues quien lo realiza es personal capacitado. Por ello, se le asigna un valor de $g = 1$.

- S1: El montaje atornillado de fijación a la base robótica es sencillo, pero no del todo práctico. Se requieren varias piezas, por lo que la carcasa de los brazos y dificulta el montaje. Se le otorga un valor de $p = 2$.

- S2: Las conexiones directas y el uso de pestillos para fijar la base facilitan el montaje. Se otorga un valor de $p = 3$
- S3: Las piezas en 3D tienen formas complejas para amoldarse a un diseño antropomórfico y a la vez compatible con los componentes internos, lo que hace difícil su montaje. Se le otorga un valor de $p = 1$.

En las tablas D.1 y D.2 se muestra la evaluación realizada. En las columnas se muestra cada solución con el puntaje otorgado (p) y la multiplicación del puntaje por el peso del criterio (gp).

Tabla D.1: Evaluación del valor técnico. Elaboración Propia.

		Valor técnico								
		S1			S2		S3		S ideal	
	Parámetro	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp
A	Facilidad de manejo	2	2	4	3	6	2	4	4	8
B	Repetibilidad	3	2	6	3	9	2	6	4	12
C	Consumo de energía	2	3	6	3	6	2	4	4	8
D	Simplicidad	3	3	9	3	9	1	3	4	12
E	Diseño antropomórfico	4	2	8	1	4	3	12	4	16
Puntaje máximo		14	12	33	13	34	10	29	20	56
Valor técnico				0.589		0.607		0.518		1

Tabla D.2: Evaluación del valor económico. Elaboración Propia.

		Valor económico								
		S1			S2		S3		S ideal	
	Parámetro	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp
F	Costo de la tecnología	2	2	4	3	6	1	2	4	8
G	Costo de fabricación	3	3	9	2	6	2	6	4	12
H	Facilidad de adquisición de materiales	3	3	9	3	9	3	6	4	12
I	Número de piezas (mec)	1	2	2	3	3	3	3	4	4
J	Número de componentes (elec)	2	3	6	2	4	2	4	4	8
K	Facilidad de montaje	1	2	2	3	3	1	1	4	4
Puntaje máximo		12	15	32	16	31	11	22	24	48
Valor económico				0.667		0.646		0.458		1

En la figura D.1 se puede observar el gráfico del valor técnico vs valor económico obtenido a partir de la tabla anterior.

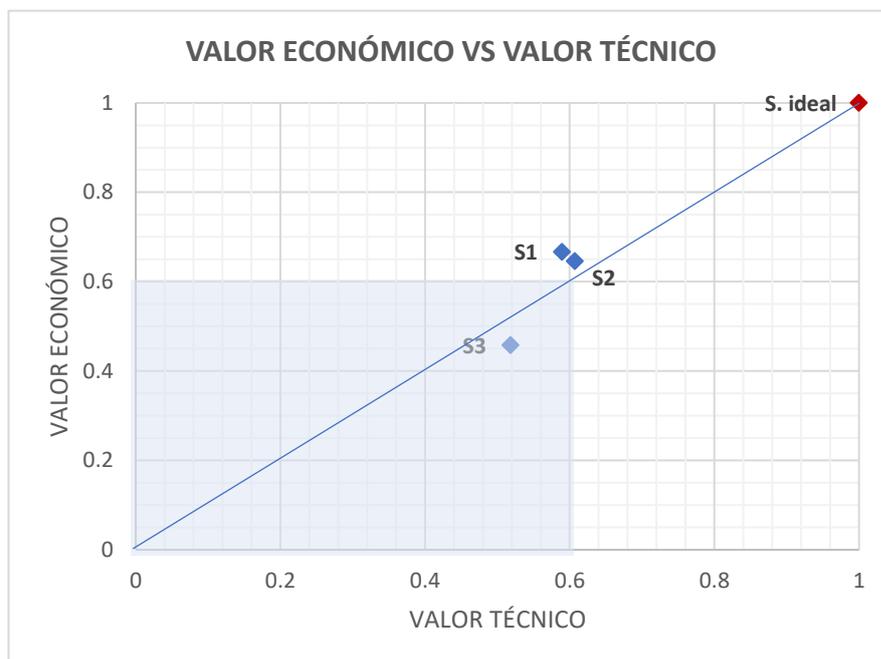


Figura D.1: Valor técnico vs valor económico de las propuestas de solución. Elaboración Propia.

Para la evaluación según la metodología, se inicia con el descarte de las soluciones que se encuentren por debajo del 0,6 para el valor técnico y 0,6 para el valor económico, puesto que estas soluciones no satisfacen con los criterios de evaluación establecidos para el proyecto. Así, se descarta la solución 3. El siguiente criterio es aplicado es determinar cuáles de los valores se encuentran más cercanos a la línea ideal. De esto, se observa que la solución 2 es más cercana. Sin embargo, la solución 1 tiene un valor similar que se diferencia por pocas décimas a nivel técnico, y otorga un valor económico más elevado. Dado que la diferencia es poca, y ambos criterios son deseables para el proyecto, se analizará más a detalle los puntos que los diferencian.

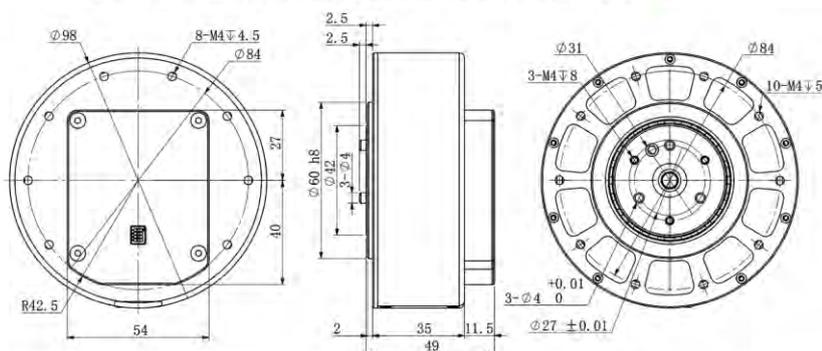
Las diferencias en cuanto a valor técnico, en las características más importantes (con pesos 3 y 4), son en “Repetibilidad (C)” y “Diseño Antropomórfico (F)”. En el primer caso, la repetibilidad está afectada por la estrategia de control usada, la cual podría variar sin afectar el resto de la solución ya que se trata del software en el controlador. Por otro lado, en el segundo caso, el diseño tiene un mayor impacto en la selección de mecanismos y componentes mecánicos de las soluciones. Además, tiene mayor importancia al estar directamente relacionado con el objetivo principal del proyecto.

Es por estas razones, que se selecciona el concepto solución 1 como el más conveniente para obtener el concepto de solución óptimo.



ANEXO E: Motores GYEMS

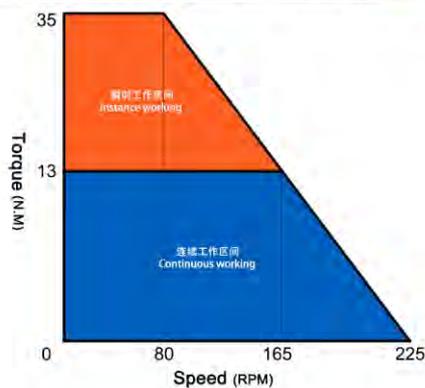
尺寸安装图 INSTALLATION DRAWING



产品参数 PRODUCT PARAMETERS

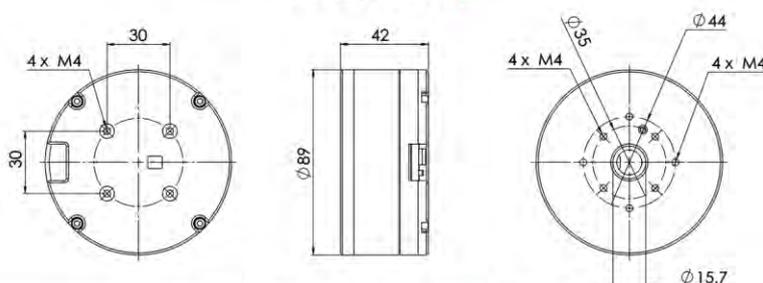
产品型号 (Item name)		RMD-X8 PRO
匝数 (Turns)	T	13
额定电压 (Nominal voltage)	V	48
空载转速 (No-load Speed)	rpm	225
额定转速 (Nominal Speed)	rpm	155
额定电流 (Nominal current)	A	6.5
额定功率 (Nominal power)	W	330
额定扭矩 (Nominal torque)	N.M	13
最大瞬时电流 (Max stall current)	A	12.5
最大瞬时扭矩 (Max stall current)	N.M	35
线电阻 (resistance)		0.55
接线方式 (wire connect)		Y
相间电感 (Phase to phase inductance)	mH	0.54
转速常数 (Speed constant)	rpm/v	30
扭矩电流常数 (Torque constant)	N.M/A	3.30
径向负载 (Radial load)	N	1200
轴向负载 (Axial load)	N	300
转子惯量 (Rotor inertia)	gc m ²	1450
极对数 (Number of pole pairs)		20
电机重量 (Motor weight)	g	710
工作温度范围 (working temperature)	°C	(-20 ~ 80 °C)
最高退磁温度 (Max demagnetize temperature)	°C	120°C
减速机速比 (Reducer ratio)		6:1
减速箱背隙 (Backlash)	Arc min	5
适配驱动类型 (Drive)		DRC20
驱动器输入电压范围 (input voltage)	V	12-50
驱动器电流范围 (Current)	A	Normal : 15A Instant : 30A
额定功率 (Normminal power)	W	700
通信方式 (Communication)		CAN BUS
编码器 (encoder)		16bit magnetic encoder
波特率 (baudrate)	bps	1M
通信频率 (Communication frequency)	HZ	2K
控制频率 (Control frequency)		Torque loop:32KHZ Speed loop:8KHZ Position loop :4KHZ
控制模式 (control mode)		Torque loop/speed loop/position loop
加速度曲线 (S-Curve)		YES
地址选择开关 (ID switch)		YES
接插件 (connector)		XT2.0
温度传感器 (temperature sensor)		YES

工作区域 OPERATING RANGE



INSTALLATION DRAWING

尺寸安装图



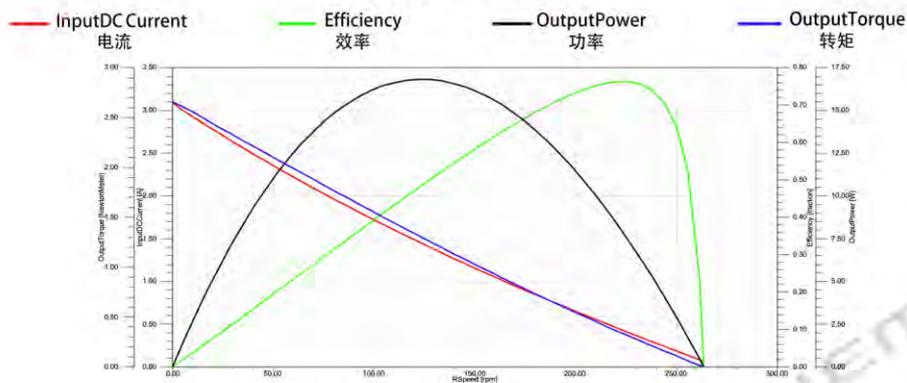
PRODUCT PARAMETERS

产品参数

产品型号	[Item Name]	RMD-5-9015-6ST
额定电压	[Nominal Voltage] V	24
额定电流	[Nominal Current] A	1.72
额定扭矩	[Nominal Torque] N.M	1.55
额定转速	[Nominal Speed] rpm	100
最大空载转速	[Max Speed] rpm	260
最大瞬时扭矩	[Max Instant Torque] N.M	2.7
最大瞬时电流	[Max Instant Current] A	3.10
线电阻	[Line Resistance] Ω	5.80
接线方式	[Wire Connect]	Y
相间电感	[Phase to Phase Inductance] mH	33
转速常数	[Speed Constant] rpm/v	11
扭矩常数	[Torque Constant] N.M/A	0.87
转子惯量	[Rotor Inertia] gc·m ²	3271
极对数	[Number of Pole Pairs]	14
电机重量	[Motor Weight] g	650
工作温度范围	[Working Temperature] °C	(-20 ~ 80 °C)
最高退磁温度	[Max Demagnetize Temperature] °C	120°C
适配驱动器 Matched Driver		适配驱动器 Matched Driver
适配驱动类型	[Drive]	DRC05 V2
驱动器输入电压范围	[Input Voltage] V	8-30
驱动器电流范围	[Current] A	Normal : 5A Instant: 10A
额定功率	[Normminal Power] W	120
通信方式	[Communication]	RS-485/CAN BUS
编码器精度	[Encoder]	12-bit or 18-bit magnetic encoder
波特率	[Baut Rate]	9600、19200、57600、115200(default)
通信频率	[Communication frequency]	CAN BUS @1MBPS; 1KHZ ; RS485@ 115200BPS;500HZ
控制频率	[Control frequency]	Torque open loop:24KHZ / Speed loop:4KHZ / Position loop :2KHZ
控制模式	[control mode]	Torque open loop / speed loop/position loop
加速度曲线	[S-Curve]	YES
地址选择开关	[ID switch]	YES
接插件	[connector]	ZH1.5 /8PIN
温度传感器	[connector]	YES

MOTOR CHARACTERISTIC CURVE

电机特性曲线



ANEXO F: Cálculo de torques requeridos en motores del brazo

Verificación de Torque requerido por los motores para mantenerse en la posición crítica de más alto torque

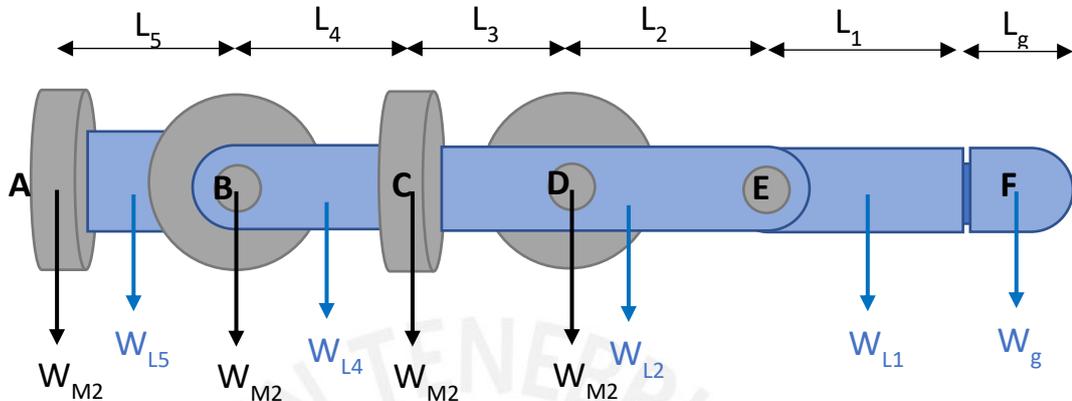


Figura 1: Diagrama de Cuerpo Libre del brazo extendido

Cálculo de torques necesarios en cada articulación, para el eje X

$$T_{E_x} = W_g \left(L_1 + \frac{1}{2} L_g \right) + W_{L1} \frac{1}{2} L_1$$

$$T_{C_x} = W_{M2} L_3 + \left(\frac{1}{2} W_{L2} + W_{M4} + W_{L2} + W_{L1} + W_g \right) (L_3 + L_2) + T_E$$

$$T_{B_x} = L_4 \left(\frac{1}{2} W_{L4} + W_{M3} + W_{M4} + W_{L2} + W_{L1} + W_g \right) + T_C$$

$$T_{A_x} = L_5 \left(\frac{1}{2} W_{L5} + W_{L4} + W_{M3} + W_{M4} + W_{L2} + W_{L1} + W_g \right) + T_B$$

Cálculo de torques necesarios en cada articulación, para el eje Z

$$T_{C_z} = T_{E_x} = W_g \left(L_1 + \frac{1}{2} L_g \right) + W_{L1} \frac{1}{2} L_1$$

$$T_{A_z} = T_{B_x} = L_4 \left(\frac{1}{2} W_{L4} + W_{M3} + W_{M4} + W_{L2} + W_{L1} + W_g \right) + T_C$$

Donde los pesos de cada eslabón (W_i) y sus longitudes (L_i) se pueden verificar en las tablas 1 y 2 respectivamente:

Tabla F.1: Masas y pesos de cada sección del brazo

	Masa M_i (kg)	Peso W_i (N)
g	0.0294	0.2882
L1	0.2266	2.2228
E	0.0418	0.4097
L2	0.3155	3.0948
M4	0.7100	6.9651
M3	0.7100	6.9651
L4	0.1853	1.8182
M2	0.7100	6.9651
L5	0.1796	1.7618
M1	0.7100	6.9651

Tabla F.2: Longitudes de cada sección del brazo

	Longitud (m)
Lg	0.096
L1	0.238
L2	0.084
L3	0.071
L4	0.106
L5	0.07

Así, los torques máximos de cada motor son:

$$T_{E_x} = 0.347 \text{ Nm}$$

$$T_{GDL3} = T_{B_z} = 3.087 \text{ Nm}$$

$$T_{GDL2} = T_{C_x} = 0.346 \text{ Nm}$$

$$T_{GDL1} = T_{A_z} = 3.087 \text{ Nm}$$

Además, con una polea de reducción 1:1 el torque en el motor GDL4:

$$T_{GDL4} = T_{E_x} = 0.347 \text{ Nm}$$

Con estos valores obtenidos para la posición estática más crítica, se verifica que el torque nominal de los motores RMD X8-Pro cumplen para este requisito.

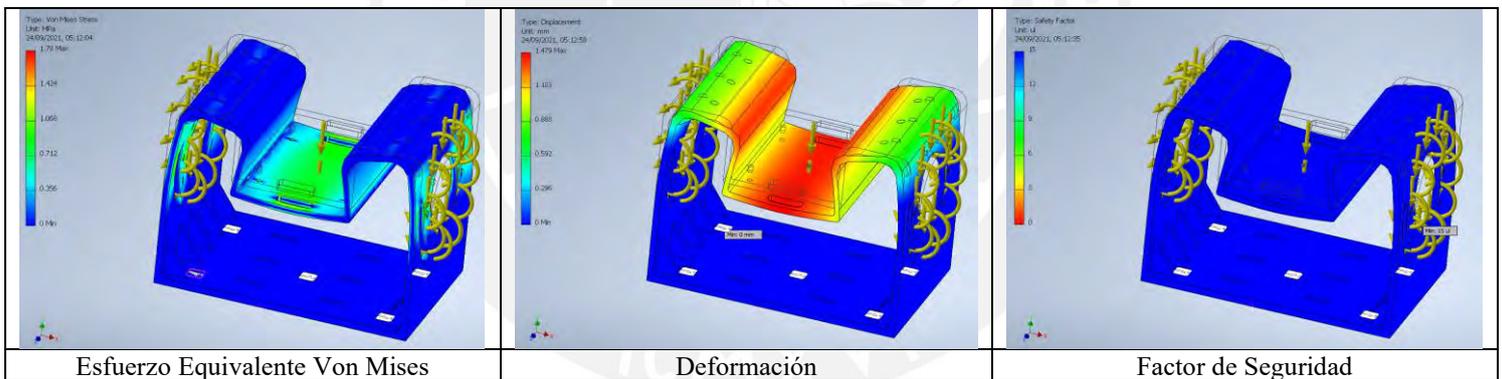
ANEXO G: Simulación de resistencia de piezas estructurales del brazo

Se realiza una simulación de esfuerzos por elementos finitos en el software Inventor 2021. Para esto se creó un material tomando las siguientes consideraciones para PLA impreso con una densidad del 100% (Farah, Shady, et al, 2016):

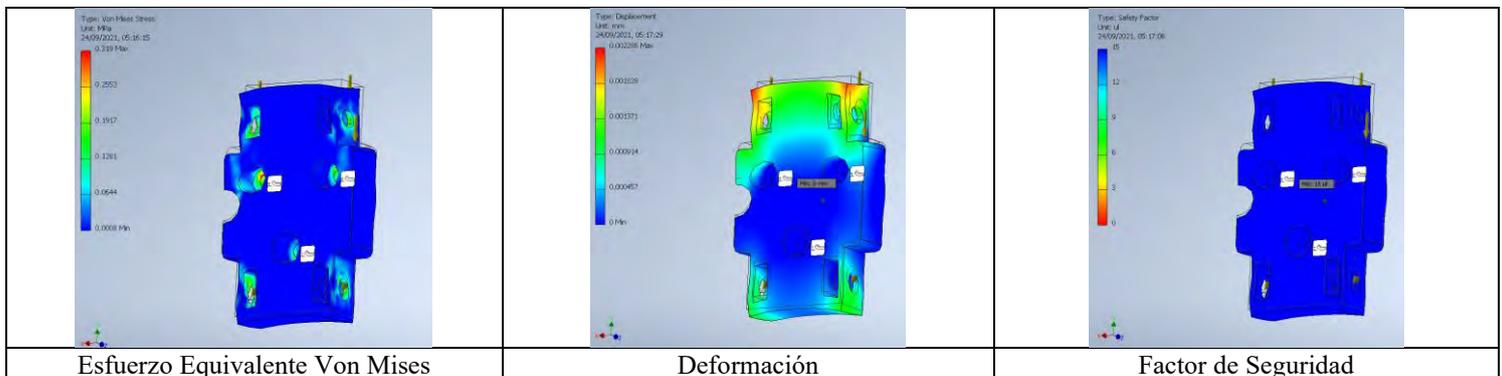
Tabla G.1: Propiedades mecánicas del PLA

Nombre	3D Printed PLA	
General	Densidad	1 g/cm ³
	Esfuerzo de fluencia	70 MPa
	Esfuerzo último de tracción	59 MPa
Esfuerzo	Módulo de Young	1.28 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.36
	Módulo de corte	0.64 GPa

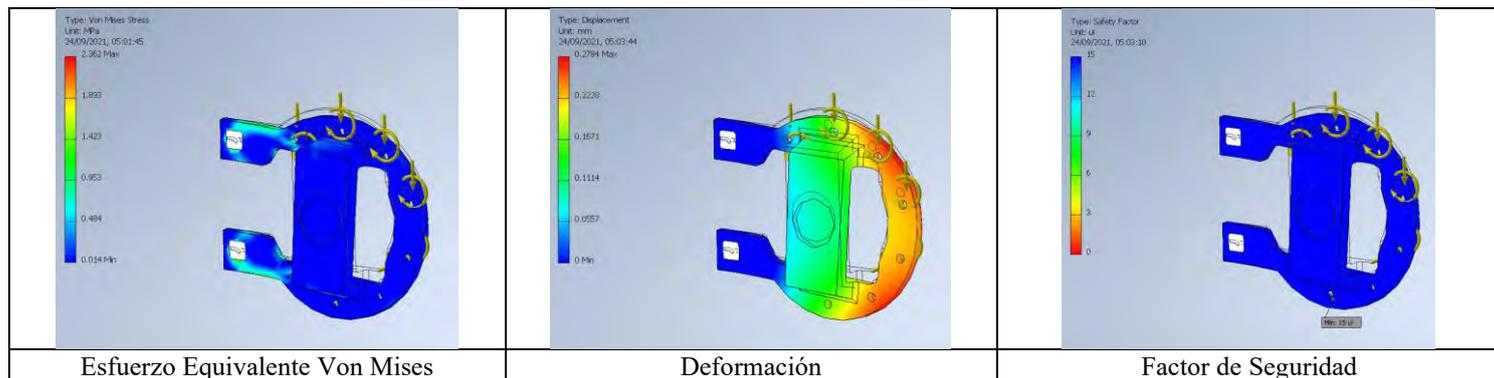
b. Base



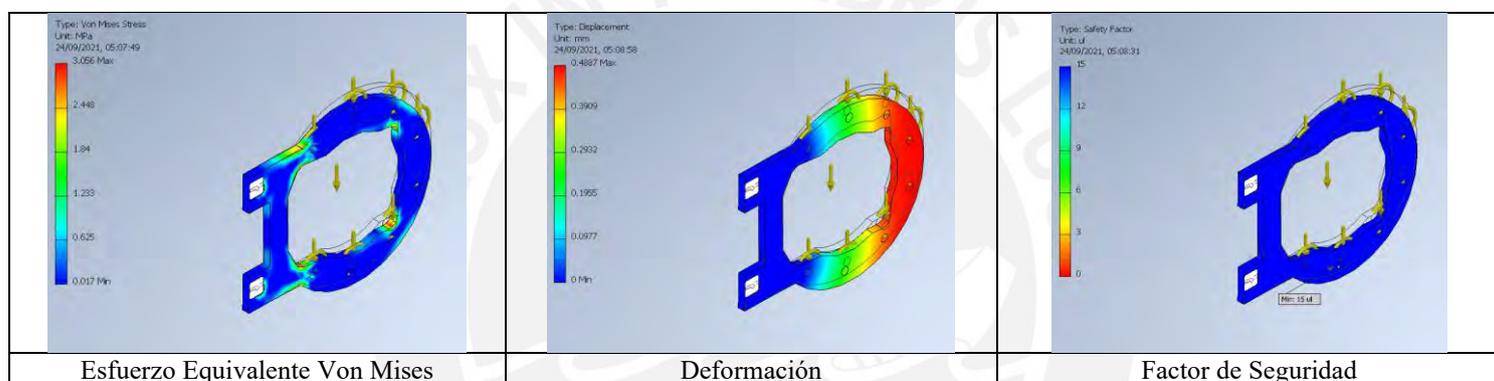
c. Acople Motor GDL1



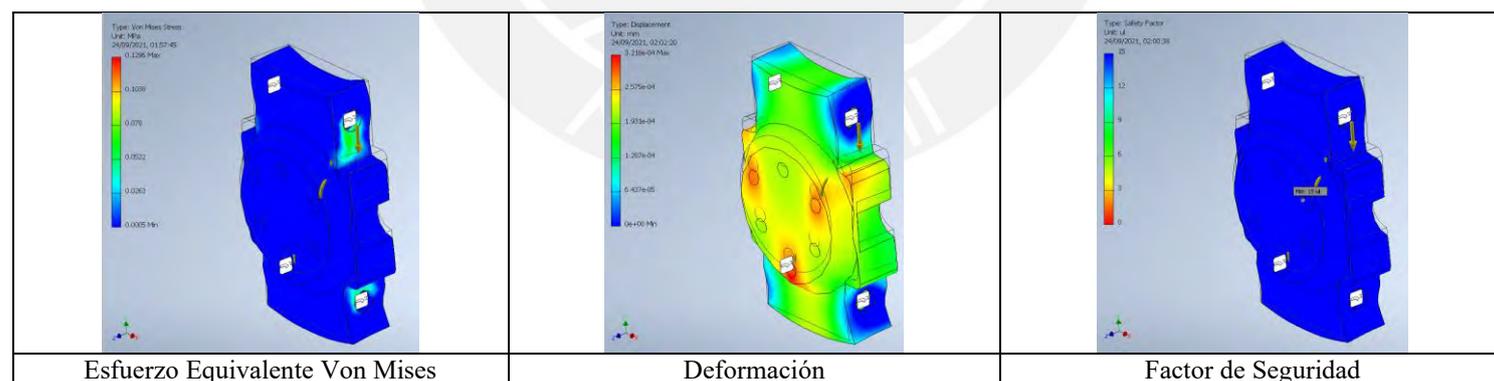
d. Placa de Soporte de Hombro 1



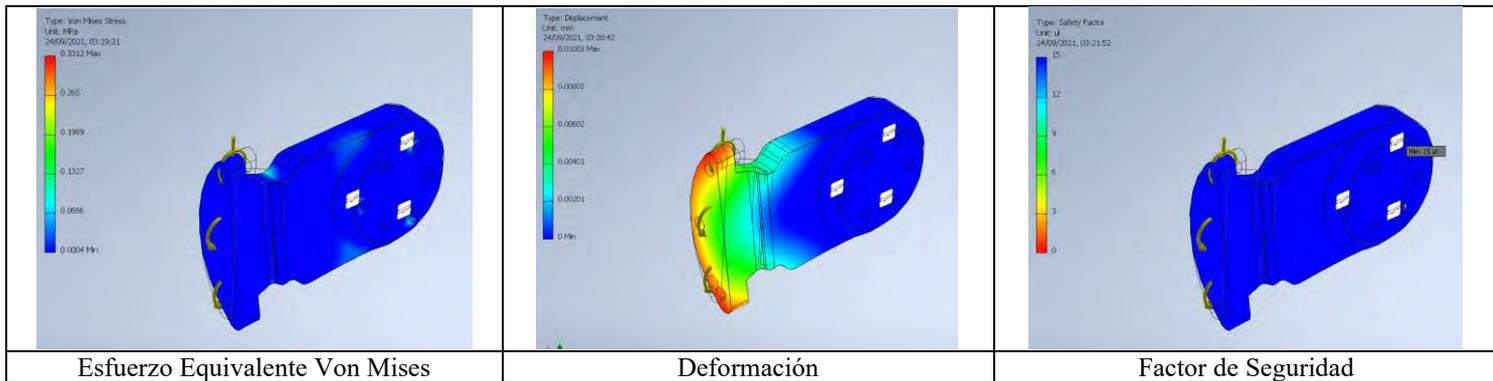
e. Placa de Soporte de Hombro 2



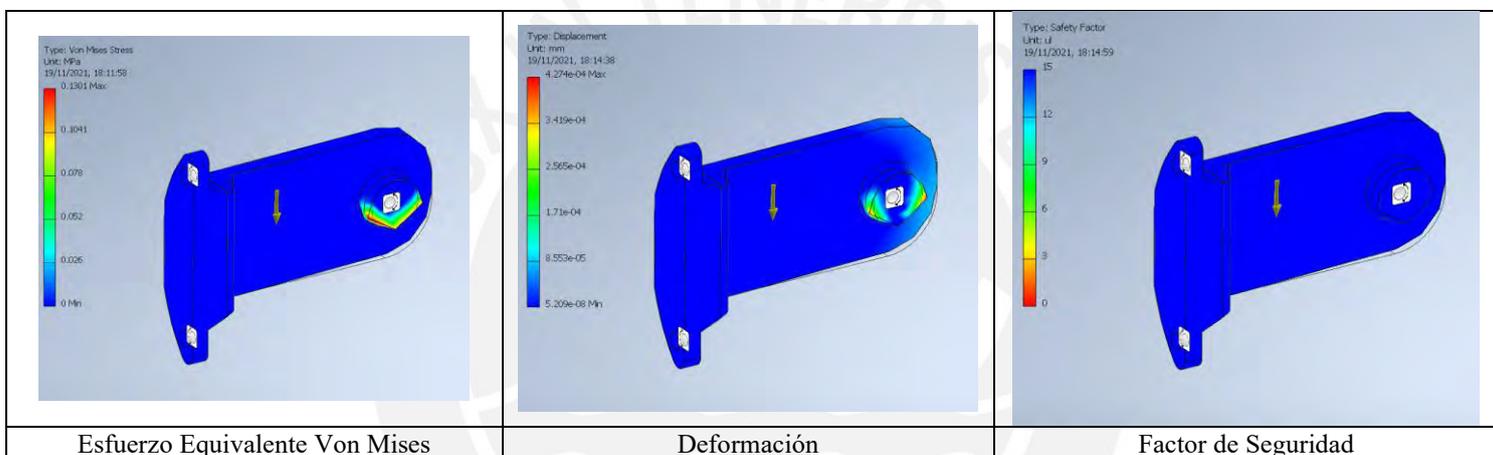
f. Acople de Motor GDL3



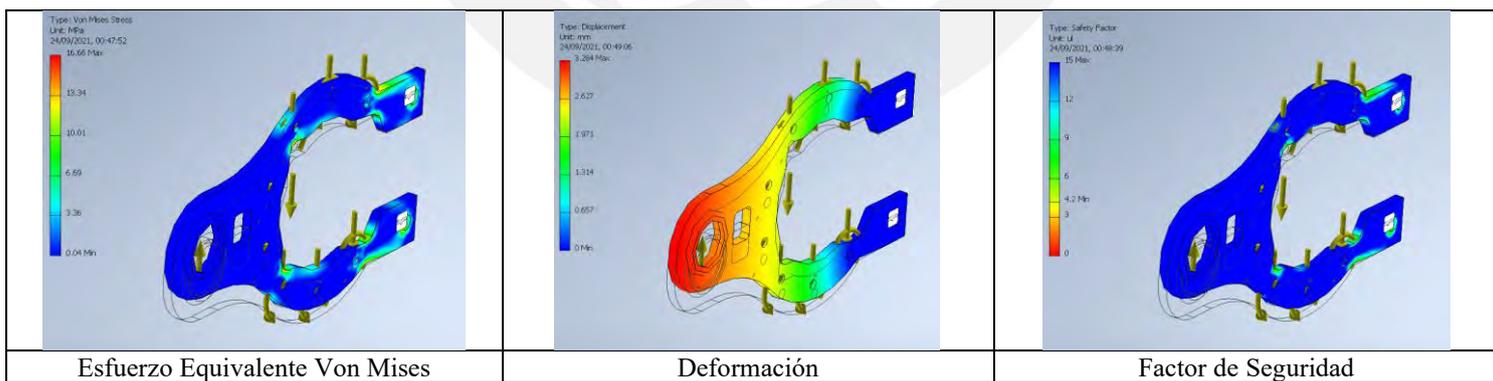
g. Acople Paralelo 1



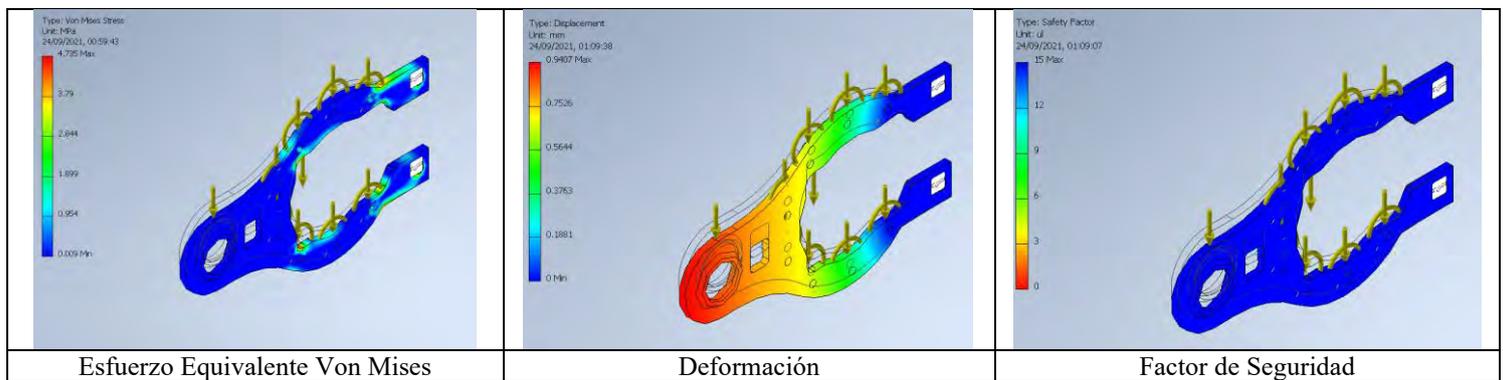
h. Acople Paralelo 2



i. Placa de Soporte de Brazo 1



j. Placa de Soporte de Brazo 2



k. Eje y ante Brazo

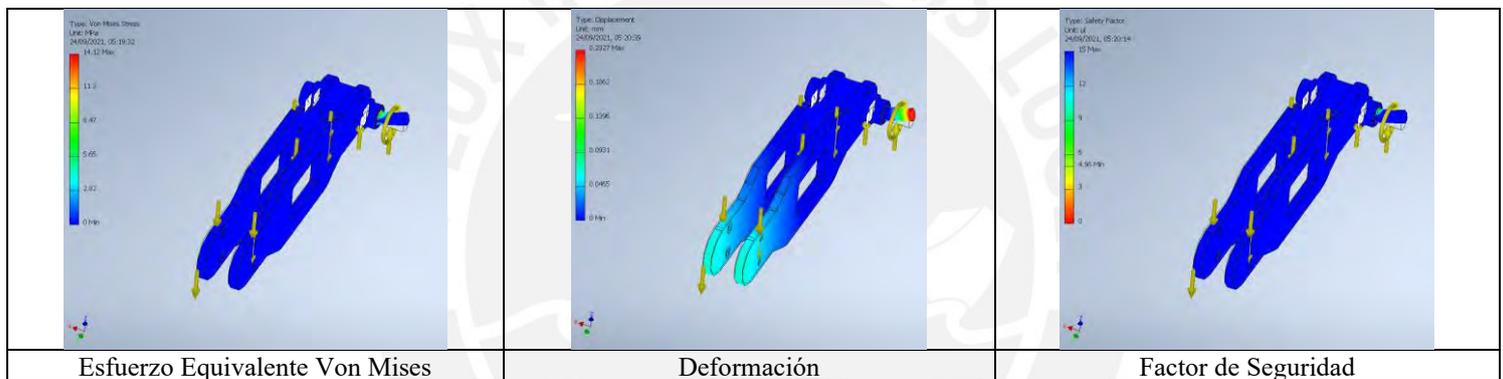
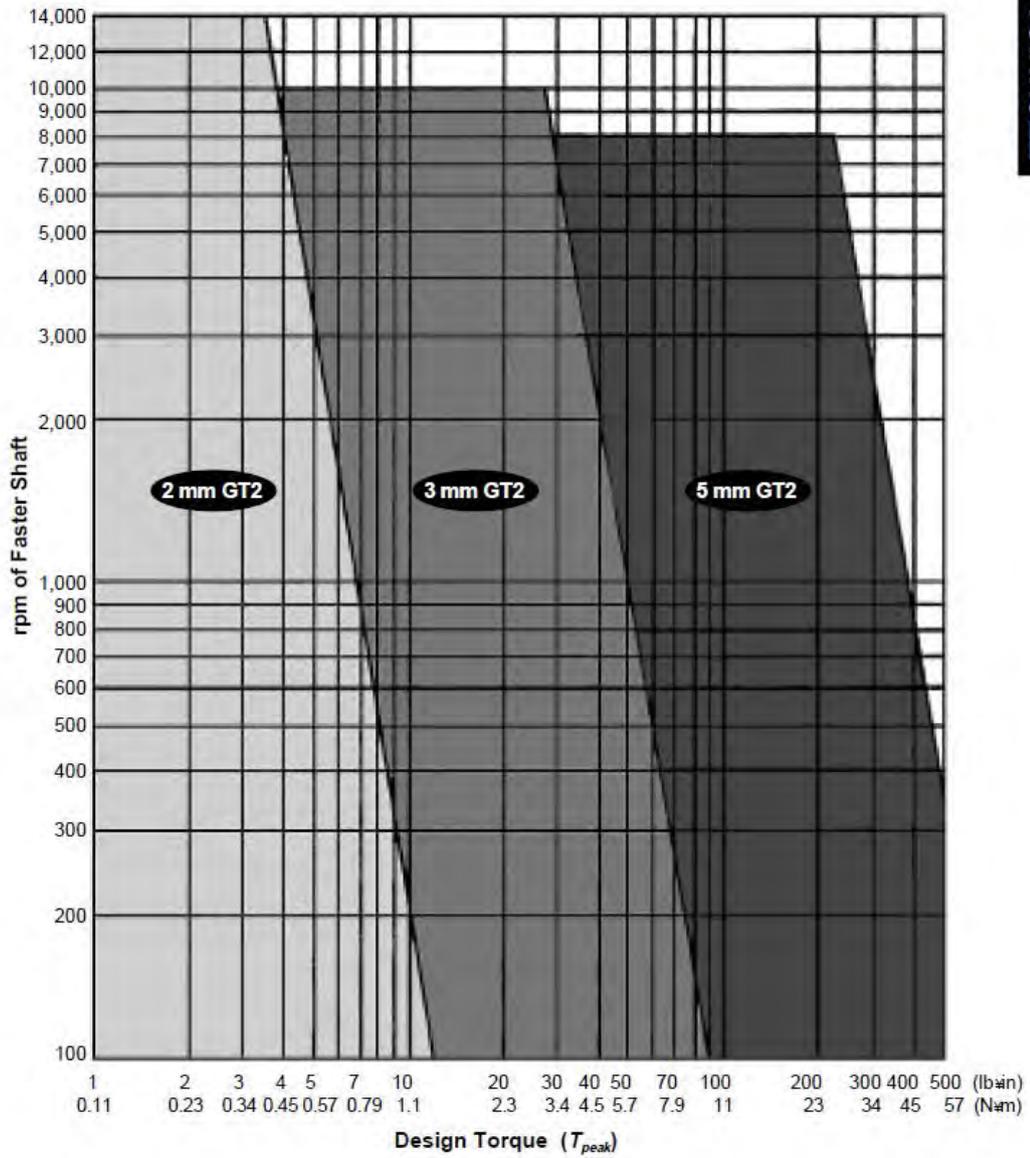


Tabla G.2: Resumen de resultados

Pieza	Esfuerzo equivalente Von mises (Mpa)		Deformación (mm)		Factor de seguridad	
	min	máx.	min	máx.	min	máx.
Base	0	1.78	0	1.48	15	15
Acople motor GDL1	0	0.319	0	0.0027	15	15
Placa soporte Hombro 1	0.04	16.66	0	3.3	4.2	15
Placa soporte Hombro 2	0.009	4.735	0	0.94	15	15
Acople motor GDL3	0.0005	0.1296	0	0.0003	15	15
Acople paralelo 1	0	0.331	0	0.01	15	15
Acople paralelo 2	0	0.421	0	0.2	15	15
Placa soporte Hombro 1	0.014	2.362	0	0.278	15	15
Placa soporte Hombro 2	0	3.056	0	0.488	15	15
Eje + ante Brazo	0	14.2	0	0.2327	4.96	15

ANEXO H: Tablas de selección de correas

Del catálogo de correas, poleas y cadenas de SDP/SI (SDP/SI, s.f):



Nomenclature Used:

- N1 = Number of teeth of large pulley
- N2 = Number of teeth of small pulley
- N1/N2 = Step-up Drive Ratio
- N2/N1 = Step-down Drive Ratio
- N1 – N2 = Pulley tooth differential needed for **Table 42 – Center Distance Factor Table**
- C MIN = Minimum center distance for particular pulley combination expressed in belt pitches

N1/N2	N2/N1	N1	N2	N1-N2	C MIN
		10	10	0	3.183
		11	11	0	3.501
		12	12	0	3.820
		13	13	0	4.138
		14	14	0	4.456
		15	15	0	4.775
		16	16	0	5.093
		17	17	0	5.411
		18	18	0	5.730
		19	19	0	6.048
		20	20	0	6.366
		22	22	0	7.003
		24	24	0	7.639
1.000	1.000	25	25	0	7.958
		28	28	0	8.913
		30	30	0	9.549
		32	32	0	10.186
		36	36	0	11.459
		40	40	0	12.732
		48	48	0	15.279
		60	60	0	19.099
		72	72	0	22.918
		84	84	0	26.738
		96	96	0	30.558
		120	120	0	38.197
		156	156	0	49.656

Table 43 (Cont.) **Rated Torque (N·m) for Small Pulleys — 6 mm Belt Width**

The following table represents the torque ratings for each belt, in its base width, at the predetermined number of grooves, pitch diameters and rpm's. These ratings must be multiplied by the appropriate width factor and applicable belt length factor to obtain the corrected torque rating (see Step 7 of SECTION 24, on page T-150).

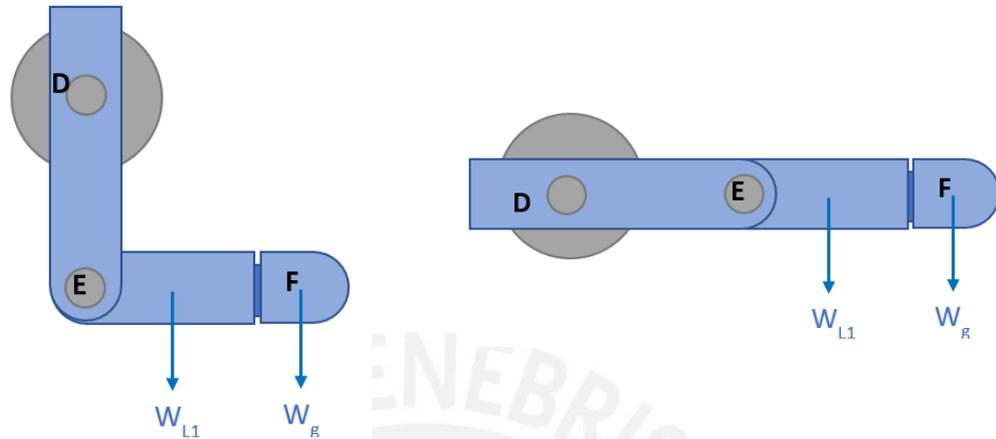
2 mm Pitch PowerGrip® GT² Belts

		Belt Width (mm)														
		4	6	9	12											
		Width Multiplier														
		0.67	1.00	1.50	2.00											
Number of Grooves		12	14	16	18	20	24	28	32	36	40	48	56	64	72	80
Pitch Diameter	mm inches	7.64 0.301	8.91 0.351	10.19 0.401	11.46 0.451	12.73 0.501	15.28 0.602	17.83 0.702	20.37 0.802	22.92 0.902	25.46 1.003	30.56 1.203	35.65 1.404	40.74 1.604	45.84 1.805	50.93 2.005
rpm of Fastest Shaft	10	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.23	0.27	0.31	0.35	0.39	0.47	0.55	0.63	0.71	0.79
	20	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.22	0.26	0.30	0.34	0.38	0.46	0.54	0.62	0.69	0.77
	40	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.22	0.26	0.30	0.33	0.37	0.45	0.53	0.61	0.68	0.76
	60	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.21	0.25	0.29	0.33	0.37	0.45	0.52	0.60	0.68	0.75
	100	0.10	0.12	0.13	0.15	0.17	0.21	0.25	0.29	0.33	0.36	0.44	0.52	0.59	0.67	0.74
	200	0.09	0.11	0.13	0.15	0.17	0.21	0.25	0.28	0.32	0.36	0.43	0.51	0.58	0.65	0.73
	300	0.09	0.11	0.13	0.15	0.17	0.21	0.24	0.28	0.32	0.35	0.43	0.50	0.57	0.65	0.72
	400	0.09	0.11	0.13	0.15	0.17	0.20	0.24	0.28	0.31	0.35	0.42	0.50	0.57	0.64	0.71
	500	0.09	0.11	0.13	0.15	0.17	0.20	0.24	0.28	0.31	0.35	0.42	0.49	0.57	0.64	0.71
	600	0.09	0.11	0.13	0.15	0.16	0.20	0.24	0.27	0.31	0.35	0.42	0.49	0.56	0.64	0.71
	800	0.09	0.11	0.13	0.14	0.16	0.20	0.24	0.27	0.31	0.34	0.42	0.49	0.56	0.63	0.70
	1000	0.09	0.11	0.13	0.14	0.16	0.20	0.23	0.27	0.31	0.34	0.41	0.49	0.56	0.63	0.70
	1200	0.09	0.11	0.12	0.14	0.16	0.20	0.23	0.27	0.31	0.34	0.41	0.48	0.55	0.62	0.69
	1400	0.09	0.11	0.12	0.14	0.16	0.20	0.23	0.27	0.30	0.34	0.41	0.48	0.55	0.62	0.69
	1600	0.09	0.11	0.12	0.14	0.16	0.20	0.23	0.27	0.30	0.34	0.41	0.48	0.55	0.62	0.69
	[Tabulated values are in N·m]	1800	0.09	0.11	0.12	0.14	0.16	0.20	0.23	0.27	0.30	0.34	0.41	0.48	0.55	0.62
2000		0.09	0.10	0.12	0.14	0.16	0.19	0.23	0.27	0.30	0.34	0.41	0.48	0.54	0.61	0.68
2400		0.09	0.10	0.12	0.14	0.16	0.19	0.23	0.26	0.30	0.33	0.40	0.47	0.54	0.61	0.68
2800		0.09	0.10	0.12	0.14	0.16	0.19	0.23	0.26	0.30	0.33	0.40	0.47	0.54	0.61	0.68
3200		0.09	0.10	0.12	0.14	0.16	0.19	0.23	0.26	0.30	0.33	0.40	0.47	0.54	0.61	0.67
3600		0.09	0.10	0.12	0.14	0.16	0.19	0.23	0.26	0.30	0.33	0.40	0.47	0.54	0.60	0.67
4000	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.19	0.23	0.26	0.29	0.33	0.40	0.47	0.53	0.60	0.67	
5000	0.08	0.10	0.12	0.14	0.15	0.19	0.22	0.26	0.29	0.33	0.40	0.46	0.53	0.60	0.66	
6000	0.08	0.10	0.12	0.14	0.15	0.19	0.22	0.26	0.29	0.33	0.39	0.46	0.53	0.59	0.66	
8000	0.08	0.10	0.12	0.13	0.15	0.19	0.22	0.25	0.29	0.32	0.39	0.46	0.52	0.59	0.66	
10000	0.08	0.10	0.12	0.13	0.15	0.19	0.22	0.25	0.29	0.32	0.39	0.45	0.52	0.58	0.65	
12000	0.08	0.10	0.12	0.13	0.15	0.18	0.22	0.25	0.28	0.32	0.38	0.45	0.52	0.58	0.64	
14000	0.08	0.10	0.12	0.13	0.15	0.18	0.22	0.25	0.28	0.32	0.38	0.45	0.51	—	—	

For Belt Length	From	Length (mm)	100	106	124	146	170	198	232	272	318	372	436	510	598	698
		# of teeth	50	53	62	73	85	99	116	136	159	186	218	255	299	349
	To	Length (mm)	104	122	144	168	196	230	270	316	370	434	508	596	696	800
		# of teeth	52	61	72	84	98	115	135	158	185	217	254	298	348	400
Length Correction Factor			0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.15	1.20	1.25	1.30	1.35

ANEXO I: Cálculo del diámetro del eje del codo y verificación por fatiga

Se evalúan dos posiciones críticas para el eje, que se muestran graficadas en la figura I.1



Caso 1: Eje vertical, antebrazo a 90°

Caso 2: Eje horizontal, antebrazo a 0°

Figura I.1: Casos críticos en el codo para cálculo del eje

Caso 1:

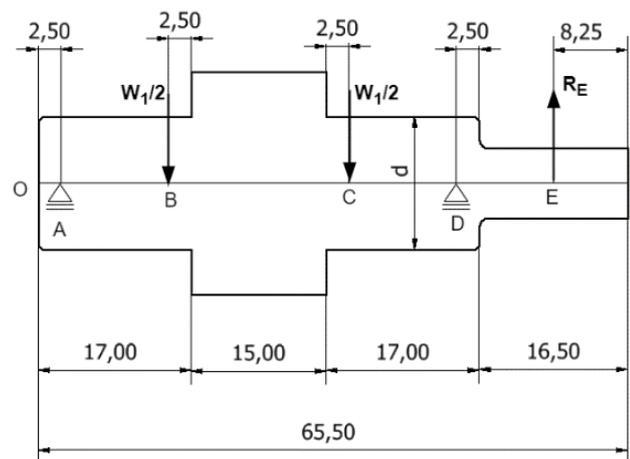


Figura I.2: DCL de eje para el caso 1

W_1 : peso del antebrazo y brazo soportado por el eje

r : radio de la polea

m_p : masa de la polea

W_p : peso de la polea

T_E : Torque externo en la polea

T : tensión en la correa dentada

Con valores:

$$W_1 = 2.5 \text{ N}$$

$$r = 0.012 \text{ m}$$

$$m_p = 0.012 \text{ kg}$$

$$W_p = 0.117 \text{ N}$$

$$T_E = 0.347 \text{ N}$$

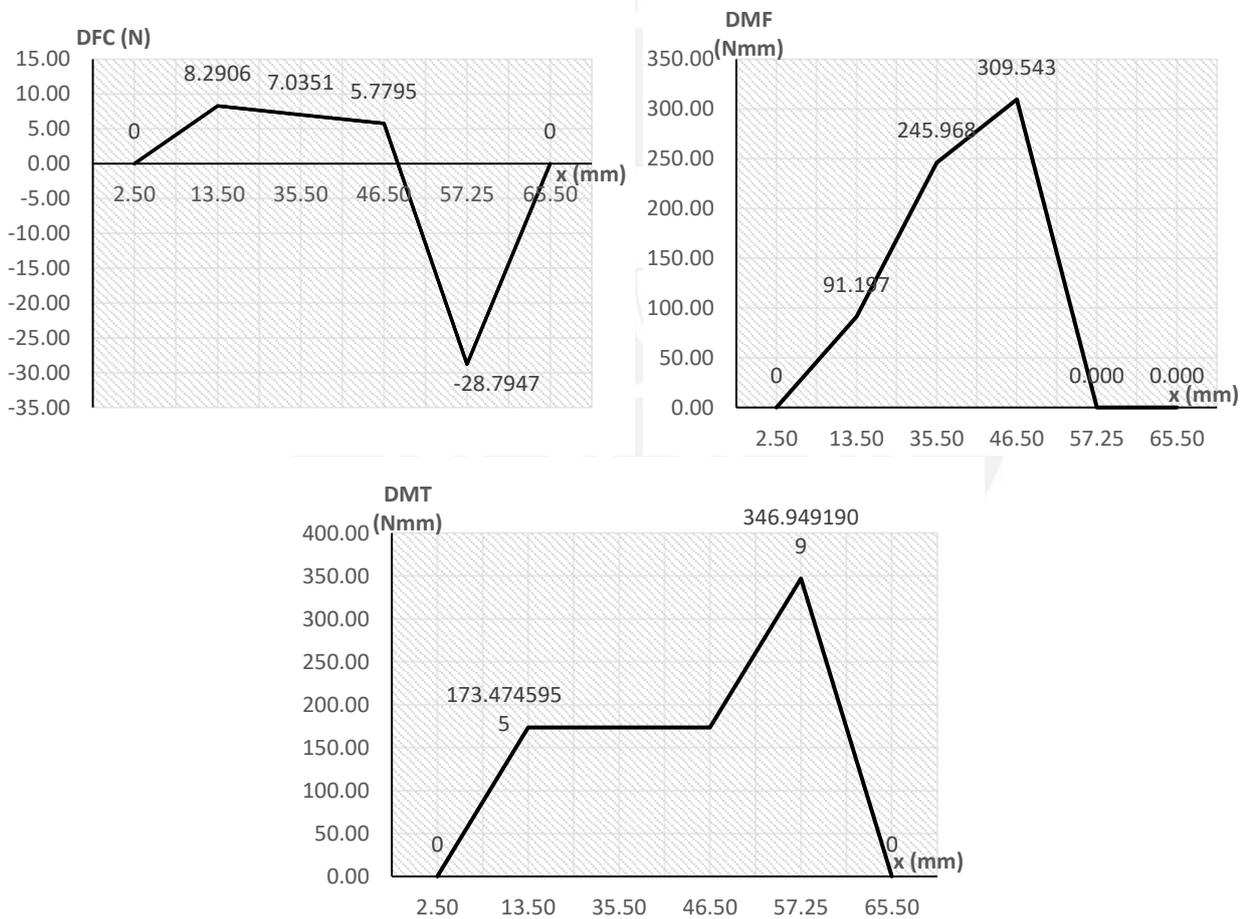
$$T = \frac{T_E}{r} = 28.91 \text{ N}$$

$$R_E = T - W_p = 28.79 \text{ N}$$

Luego, de $\Sigma M_A = 0$ y $\Sigma F_y = 0$

$$R_D = 34.57 \text{ N}$$

$$R_A = 8.29 \text{ N}$$



De la sección más cargada se tiene:

$$M_f = 537,605 \text{ Nmm}$$

$$M_t = 601,53 \text{ Nmm}$$

$$V = 50 \text{ N}$$

$$\sigma_f = \frac{32M_f}{\pi d^3}$$

$$\tau_t = \frac{16M_t}{\pi d^3}$$

$$\tau_c = \frac{4V}{\pi d^2}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_f^2 + 3(\tau_t^2 + \tau_c^2)} < \sigma_{adm} = \frac{\sigma_F}{FS} = 14$$

Para un diámetro de 15 mm, con factor de seguridad 5

$$\sigma_{eq} = 1.33 < \sigma_{adm} = 14$$

Se realiza la verificación por fatiga, considerando el segundo caso

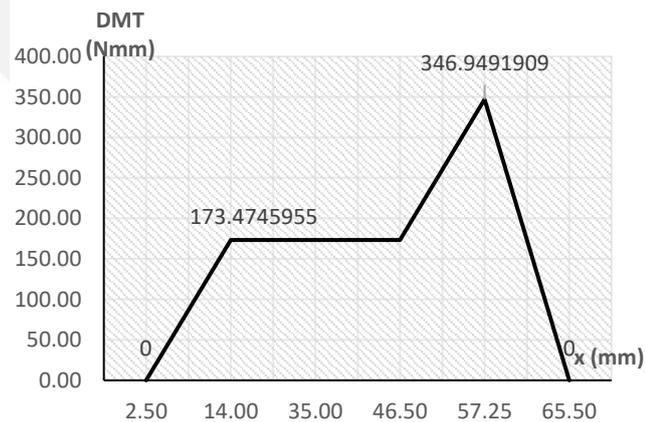
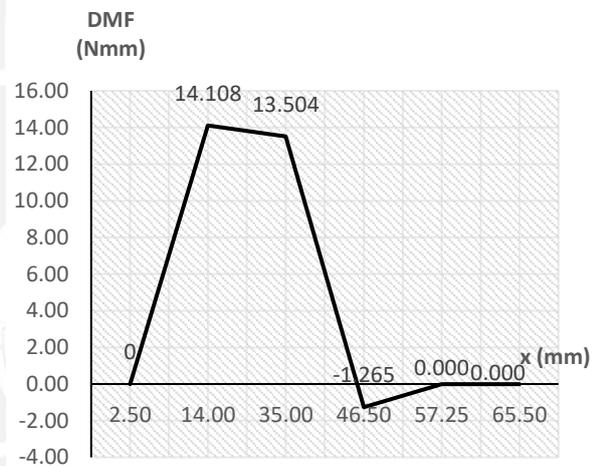
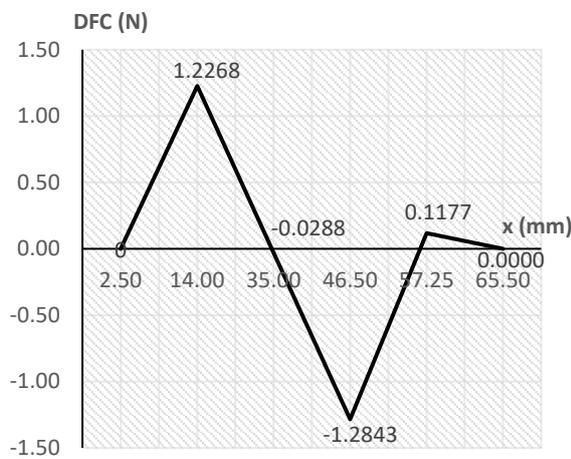
Para el caso 2 se tiene el esfuerzo en dos planos:

En el plano y

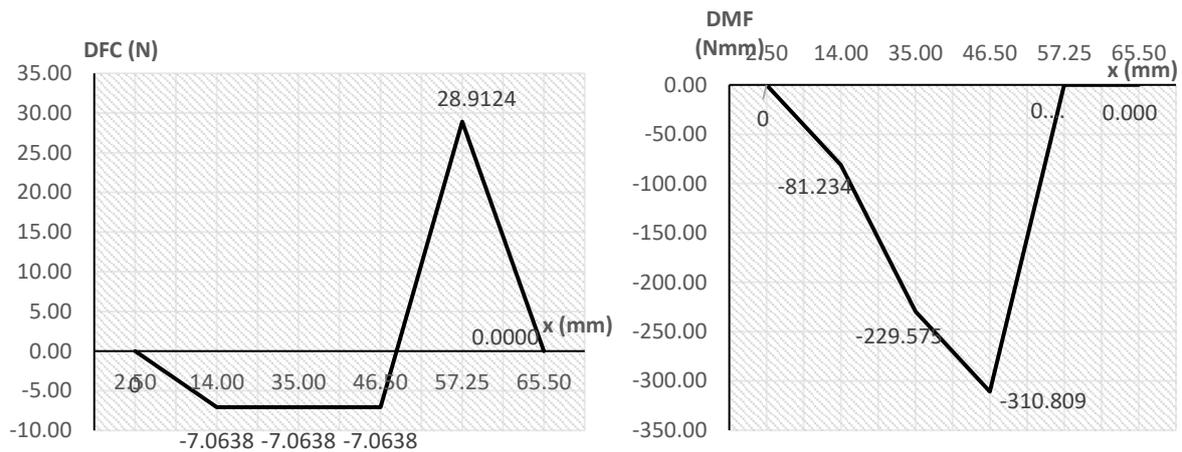
$$R_{E_y} = 0.118 \text{ N}$$

$$R_{D_y} = 1.402 \text{ N}$$

$$R_{A_y} = 1.227 \text{ N}$$



Para el eje Z



De la sección más cargada se tiene:

$$M_f = \sqrt{M_{f_y}^2 + M_{f_z}^2} = 310.81 \text{ Nmm}$$

$$M_t = 346.95 \text{ Nmm}$$

$$V = \sqrt{V_y^2 + V_z^2} = 28.91 \text{ N}$$

$$\sigma_f = \frac{32M_f}{\pi d^3}$$

$$\tau_t = \frac{16M_t}{\pi d^3}$$

$$\tau_c = \frac{4V}{\pi d^2}$$

Para la verificación por fatiga se tiene que el momento flector M_{f_z} es alternante y el momento torsor es pulsante puro.

	superior	inferior	medio	alternante	$\sigma a'$
Flexion	0.934	-0.934	0.000	0.934	1.147
Torsion	0.524	0.000	0.262	0.262	0.321

$$\sigma_{Alt} = 4,9 \text{ Nmm}^2 \quad \sigma_B = 38,7 \text{ Nmm}^2$$

$$\sigma_{meq} = 0,37 \text{ Nmm}^2$$

$$\sigma_{a'eq} = 1,234 \text{ Nmm}^2$$

$$FS = \frac{1}{\frac{\sigma_{a'eq}}{\sigma_{Alt}} + \frac{\sigma_{meq}}{\sigma_B}}$$

Para el diámetro de 15 mm $FS = 3.82$, es un valor aceptable. Se determina que diámetros menores a 11 tienen un factor de seguridad no admisible.

ANEXO J: Presupuesto

	INGENIERIA Y CONTROL INDUSTRIAL SAC RUC: 20544157966 AV. MANCO CAPAC Nº 378 - LA VICTORIA Teléfonos: 940468099 / 4156708		COTIZACIÓN N° 28062021	
	FECHA: 28/05/2021		Persona de Contacto:	
Atte: 20155945860				
En atención de su solicitud tenemos el agrado de enviarle nuestra cotización referente al siguiente servicio				
ITEM	UNIDAD	DESCRIPCION	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	1	MCP2551 CAN BUS	S/.	17.00
2	1	SERVICIO DE ENVIO		12.90
3	1	CABLE DE PODER		12.00
4	1	CABLE MINI USB		5.00
5	2	BLOQUE DE TERMINALES 3A	S/.	2.00
				S/.
				52.90
Condiciones de compra: Precio en Soles. No incluye IGV				
En espera que nuestra cotización sea de su total satisfacción y de esa manera poder atender su requerimiento.				
BCP Soles 191-92949385-0-64 CCI : 002 191 192949385064 57 BCP Dólares 191-97167552-1-40 CCI : 002 191 197167552140 56 Cuenta de Detracción Banco de la Nación 00-004-055454				



JOSLIN
Tecnología al Avance

Cotización

Arequipa, 25 de agosto del 2021

Estimados Srs:

Pontificia Universidad Católica del Perú
 RUC: 20155945860

Nos es grato presentarnos, somos empresa JOSLIN SAC, con RUC 20454034911 ubicados en la ciudad de Arequipa y mediante la presente hacemos llegar nuestra propuesta, los precios se muestran a continuación:

#	DESCRIPCION	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
1	Conectores XHPX de 2 pines	5	S/ 1.00	S/ 5.00
2	Conectores XHPX de 5 pines	4	S/ 1.20	S/ 4.80
3	Conectores XHPX de 8 pines	10	S/ 2.00	S/ 20.00
4	Header macho 1x40 pines en ángulo 90°	3	S/ 1.80	S/ 5.40
**Costo de envío				S/ 16.00
Total				S/ 51.20



ELECTRONICA HI-FI S.A.C.
RUC: 20512089861
Av. General Garzón 1178 - Jesús
María
150101 Lima Lima Perú

¿Tienes una idea?... nosotros los
dispositivos

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL
PERU
AV. UNIVERSITARIA NRO. 1801 URB. PANDO
15

RUC: 20155945860

Factura Electronica F001-05599

Fecha de factura: 27/10/2021 Fecha de vencimiento: 27/10/2021 Origen: S16895

Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Impuestos	Precio Total
[SP-26MM] PARLANTE DE 8 OHM 26MM 1W WSC	4.0 Unidades	3.5000	IGV	S/ 14.00
[4700UF-25V] Condensador electrolítico 4700UF 25VDC 16x25mm 105C	2.0 Unidades	1.6000	IGV	S/ 3.20
[P-20225 Negro] Plug stereo de metal 3.5mm P-20225 (Negro)	4.0 Unidades	0.7000	IGV	S/ 2.80
[ME-4X15-C] Microfono Electret 4x1.5mm con cablecillo	2.0 Unidades	1.7000	IGV	S/ 3.40
[ME-97X67] Capsula Microfono Electret 9.7x6.7mm SG-15E EM-9767	2.0 Unidades	1.0000	IGV	S/ 2.00
[2.2K-025W] Resistencia 1/4W de carbon CFR250 Pack x 100pzs (2.2 Kohm)	1.0 Ciento	1.5000	IGV	S/ 1.50
[2.2UF-160V] Condensador electrolítico 2.2UF 160VDC 12x6.3mm 105C	2.0 Unidades	0.4000	IGV	S/ 0.80
Envío Lima: Envío en Lima por Olva Currier	1.0 Unidades	8.5000	IGV	S/ 8.50
Subtotal				S/ 30.66
IGV				S/ 5.54
Total				S/ 36.20
Pagado en 27/10/2021				S/ 36.20
Importe vencido				S/ 0.00

Por favor utilice la siguiente referencia al realizar su pago: S16895

@ventas@hifisac.com http://www.hifisac.com

BCP CCI Soles 00219100217401605655-----BCP CCI USD 00219100157443610251
Cta Cte Soles Bco de CREDITO 191-2174016-0-56-----Cta Cte Dolares Bco de CREDITO 191-1574436-1-02

Página: 1 de 2

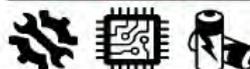
EC ELECTRONIC DEVELOPER E.I.R.L.				
		Venta de Módulos Electrónicos: Arduino, Sensor, Relay, PIR, Puentes, Led, Lcd, etc ventas@makerelectronico.com rpc: 956 788 951 www.makerelectronico.com		
AV. A MZA 1LOTE. 18 URB. SANTO DOMINGO 2DA ET. (CRUCE CON AV L) LIMA - LIMA - CARABAYLLO				
COTIZACIÓN				
Empresa	PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU RUC: 20155945860	Valido	-	
Recibe	-	Cotizacion	-	
TEL:	-	Tipo Pago	BCP SOLES	
Correo:	-	Contacto	ERICSON CRUZ	
Dirección	-	Correo	VENTAS@MAKERELECTRONICO.COM	
IMAGEN	MARCA - DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	IMPORTE
	PAMP8403	1	S/ 5.00	S/. 5.00
	DFPLAYER MINI MP3	1	S/ 16.00	S/. 16.00
	DELIVERY	1	S/ 15.00	S/. 15.00
SUBTOTAL				S/. 30.51
IGV(18%)				S/. 5.49
TOTAL				S/. 36.00
ENTREGA: RECOJO ALMACEN CARABAYLLO, ENVIO DELIVERY.				
FORMA DE PAGO: AL CONTADO, DEPOSITO BCP BCP: 191-24179829-0-68 BCP-CCI: 002-19112417982906859 ERICSON CRUZ RIOS DNI: 46348500				
ATTE. ERICSON CRUZ RPC: 956 788 951 EC ELECTRONIC DEVELOPER EIRL e-mail : ventas@makerelectronico.com				



RUC #10474653213

PROFORMA

N° P-00000352



DOC Electronic PERU ...La tienda Online de Soluciones Electrónicas
Almacen Av. Nicolas Ayllon 500. Urb. Manzanilla Block E-13 Dpto. 103 Cercado Lima

Cliente/Empresa: Fiorella Urbina

Direccion:

DNI/RUC:

Contacto:

Fecha Em:

23-09-2021

QTY	Code		Valor Unit.	Valor Total
1	UNIT	BANCO ION LITIO 6S 1P BMS 12A CON CELDAS GENERICAS DE 2000 Mah	S/201.00	S/201.00
1	UNIT	BANCO ION LITIO 2S 1P BMS 20A CON CELDAS GENERICAS DE 2000 Mah	S/80.00	S/80.00

My shopping cart

	RMD-X8 Pro 1:6 \$428.00 Comunicacion mode CAN	- 8 +	\$3,512.00	×
	RMD-S-9015 \$138.00 Comunicacion mode CAN Asociado: 1268	- 2 +	\$278.00	×

Enter promotion code

New remarks

 **SECURE SHOPPING**
Your data is safe and secure.

Order Summary

Subtotal	\$3,790.00
Shipping	\$350.00
<u>Peru</u>	
Total	\$4,140.00

[Check out](#)

[PayPal Pagar](#)

JOSLINPERU JOSLIN S.A.C. MZA. D LOTE. 4 RES. LA FONDA ESPALDAS DE METRO CERRO COLORADO - AREQUIPA - AREQUIPA	FACTURA ELECTRONICA RUC: 20454034911 E001-19																								
Fecha de Vencimiento : Fecha de Emisión : 07/07/2021 Señor(es) : PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU RUC : 20155945860 Establecimiento del Emisor : RES. LA FONDA MZA. D LOTE. 4 ESPALDAS DE METRO AREQUIPA-AREQUIPA-CERRO COLORADO Tipo de Moneda : SOLES Observación :																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">Cantidad</th> <th style="text-align: left;">Unidad Medida</th> <th style="text-align: left;">Descripción</th> <th style="text-align: right;">Valor Unitario</th> <th style="text-align: right;">ICBPER</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">1.00</td> <td style="text-align: center;">UNIDAD</td> <td>TARJETA DE DESARROLLO NUCLEO STM32F446ZE</td> <td style="text-align: right;">148.221</td> <td style="text-align: right;">0.00</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1.00</td> <td style="text-align: center;">UNIDAD</td> <td>MODULO FTDI FT232RL</td> <td style="text-align: right;">7.883</td> <td style="text-align: right;">0.00</td> </tr> </tbody> </table>		Cantidad	Unidad Medida	Descripción	Valor Unitario	ICBPER	1.00	UNIDAD	TARJETA DE DESARROLLO NUCLEO STM32F446ZE	148.221	0.00	1.00	UNIDAD	MODULO FTDI FT232RL	7.883	0.00									
Cantidad	Unidad Medida	Descripción	Valor Unitario	ICBPER																					
1.00	UNIDAD	TARJETA DE DESARROLLO NUCLEO STM32F446ZE	148.221	0.00																					
1.00	UNIDAD	MODULO FTDI FT232RL	7.883	0.00																					
Valor de Venta de Operaciones Gratuitas : <input style="width: 100%;" type="text" value="S/ 0.00"/>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td>Sub Total :</td> <td style="text-align: right;">S/ 156.10</td> </tr> <tr> <td>Ventas :</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Anticipos :</td> <td style="text-align: right;">S/ 0.00</td> </tr> <tr> <td>Descuentos :</td> <td style="text-align: right;">S/ 0.00</td> </tr> <tr> <td>Valor Venta :</td> <td style="text-align: right;">S/ 156.10</td> </tr> <tr> <td>ISC :</td> <td style="text-align: right;">S/ 0.00</td> </tr> <tr> <td>IGV :</td> <td style="text-align: right;">S/ 28.10</td> </tr> <tr> <td>ICBPER :</td> <td style="text-align: right;">S/ 0.00</td> </tr> <tr> <td>Otros Cargos :</td> <td style="text-align: right;">S/ 0.00</td> </tr> <tr> <td>Otros Tributos :</td> <td style="text-align: right;">S/ 0.00</td> </tr> <tr> <td>Monto de redondeo :</td> <td style="text-align: right;">S/ 0.00</td> </tr> <tr> <td>Importe Total :</td> <td style="text-align: right;">S/ 184.20</td> </tr> </table>	Sub Total :	S/ 156.10	Ventas :		Anticipos :	S/ 0.00	Descuentos :	S/ 0.00	Valor Venta :	S/ 156.10	ISC :	S/ 0.00	IGV :	S/ 28.10	ICBPER :	S/ 0.00	Otros Cargos :	S/ 0.00	Otros Tributos :	S/ 0.00	Monto de redondeo :	S/ 0.00	Importe Total :	S/ 184.20
Sub Total :	S/ 156.10																								
Ventas :																									
Anticipos :	S/ 0.00																								
Descuentos :	S/ 0.00																								
Valor Venta :	S/ 156.10																								
ISC :	S/ 0.00																								
IGV :	S/ 28.10																								
ICBPER :	S/ 0.00																								
Otros Cargos :	S/ 0.00																								
Otros Tributos :	S/ 0.00																								
Monto de redondeo :	S/ 0.00																								
Importe Total :	S/ 184.20																								
SON: CIENTO OCHENTA Y CUATRO Y 20/100 SOLES																									
<i>Esta es una representación impresa de la factura electrónica, generada en el Sistema de SUNAT. Puede verificarla utilizando su clave SOL.</i>																									

MULTI-PERNOS CAPEVA		FACTURA ELECTRONICA		
CARRILLO PEREZ DIONICIO VALENTIN		RUC: 10105328716		
AV. GUILLERMO DANSEY 828 C.C. UDAMPE CALLE 11 STAND E99 E100		E001-1807		
LIMA - LIMA - LIMA				
Fecha de Vencimiento :				
Fecha de Emisión :	12/08/2021			
Señor(es) :	PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU			
RUC :	20155945860			
Dirección del Cliente :	AV. UNIVERSITARIA 1801 URB. PANDO LIMA-LIMA-SAN MIGUEL			
Tipo de Moneda :	SOLES			
Observación :				
Cantidad	Unidad Medida	Descripción	Valor Unitario	ICBPER
22.00	UNIDAD	PERNO BUTTON M6 X 16 INOX	0.4237289	0.00
10.00	UNIDAD	PERNO BUTTON M6 X 10 INOX	0.4237289	0.00
30.00	UNIDAD	ARANDELA PRESTON M6 INOX	0.0847458	0.00
12.00	UNIDAD	TUERCA HEX M4 INOX	0.0847458	0.00
32.00	UNIDAD	TUERCA HEXA M6 INOX	0.1694916	0.00
1.00	UNIDAD	MOVILIDAD	12.711865	0.00
Valor de Venta de Operaciones Gratuitas :		S/ 0.00		
SON: CUARENTA Y UNO Y 60/100 SOLES				
		Sub Total Ventas :	S/ 35.25	
		Anticipos :	S/ 0.00	
		Descuentos :	S/ 0.00	
		Valor Venta :	S/ 35.25	
		ISC :	S/ 0.00	
		IGV :	S/ 6.35	
		ICBPER :	S/ 0.00	
		Otros Cargos :	S/ 0.00	
		Otros Tributos :	S/ 0.00	
		Monto de redondeo :	S/ 0.00	
		Importe Total :	S/ 41.60	
Esta es una representación impresa de la factura electrónica, generada en el Sistema de SUNAT. Puede verificarla utilizando su clave SOL.				

MULTI-PERNOS CAPEVA		FACTURA ELECTRONICA		
CARRILLO PEREZ DIONICIO VALENTIN		RUC: 10105328716		
AV. GUILLERMO DANSEY 828 C.C. UDAMPE CALLE 11 STAND E99 E100		E001-1411		
LIMA - LIMA - LIMA				
Fecha de Vencimiento :				
Fecha de Emisión :	01/07/2021			
Señor(es) :	PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU			
RUC :	20155945860			
Dirección del Cliente :	AV. UNIVERSITARIA 1801 URB. PANDO LIMA-LIMA-SAN MIGUEL			
Tipo de Moneda :	SOLES			
Observación :				
Cantidad	Unidad Medida	Descripción	Valor Unitario	ICBPER
120.00	UNIDAD	PERNO BUTTON M4 X 10 INOX	0.2118645	0.00
35.00	UNIDAD	SBC C/PLANA M4 X 8 INOX	0.1694916	0.00
Valor de Venta de Operaciones Gratuitas :		S/ 0.00		
SON: TREINTA Y SIETE Y 00/100 SOLES				
		Sub Total Ventas :	S/ 31.36	
		Anticipos :	S/ 0.00	
		Descuentos :	S/ 0.00	
		Valor Venta :	S/ 31.36	
		ISC :	S/ 0.00	
		IGV :	S/ 5.64	
		ICBPER :	S/ 0.00	
		Otros Cargos :	S/ 0.00	
		Otros Tributos :	S/ 0.00	
		Monto de redondeo :	S/ 0.00	
		Importe Total :	S/ 37.00	
Esta es una representación impresa de la factura electrónica, generada en el Sistema de SUNAT. Puede verificarla utilizando su clave SOL.				



Products > SWITCH DE PARADA DE EMERGENCIA BOTON = 23.5MM

[LA128AY-11ZS] SWITCH DE PARADA DE EMERGENCIA BOTON = 23.5MM

SKU: LA128AY-11ZS

Wishlist Compare

S/ 10.40

Quantity 1

Category: [Switches](#)

COMERCIAL JCG S.A.
FERRERIA EL CHINO
RUC 20100722713
Av Guardia Civil 263 Chorrillos Lima Lima
Telef: 3476204 Cel: 998 357 910
jcg_sa@yahoo.es
Cel. Jose 998353667

FACTURA ELECTRONICA
FF01-00071521
Fecha Emisión 2021-10-19 16:07
RUC / DNI 20155945800
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
AV UNIVERSITARIA NRO. 1801 URB. PAND
O. SAN MIGUEL LIMA LIMA

ESTOBOL MM C/RED. M 3 x 10	20.00 UND	0.20	4.00
TUERCA MM NC M 3 x 0.5	20.00 UND	0.10	2.00
INOX PERNO SURET M 4 x 12	4.00 UND	0.50	2.00
INOX TUERCA M 4	4.00 UND	0.20	0.80
Op Gravadas			1.44
Op Gravadas			0.00
IGV 18%			1.34
ICBPER			0.00
TOTAL		S/	8.80

IGCHO CON 60/100 SOLES

Vend JCG

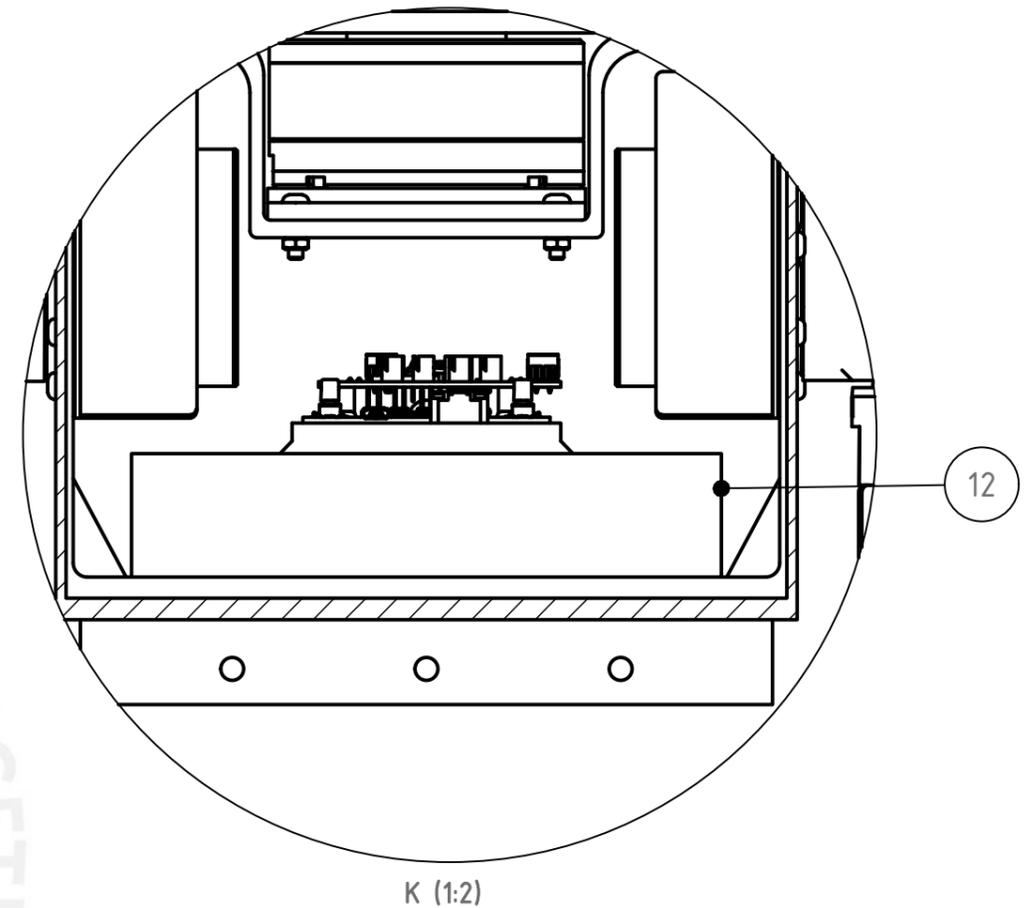
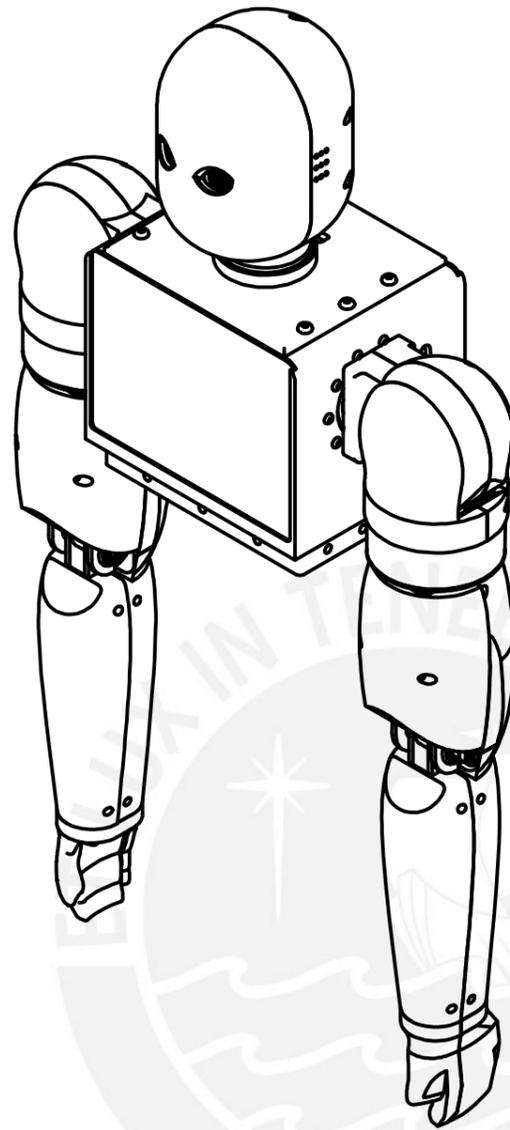
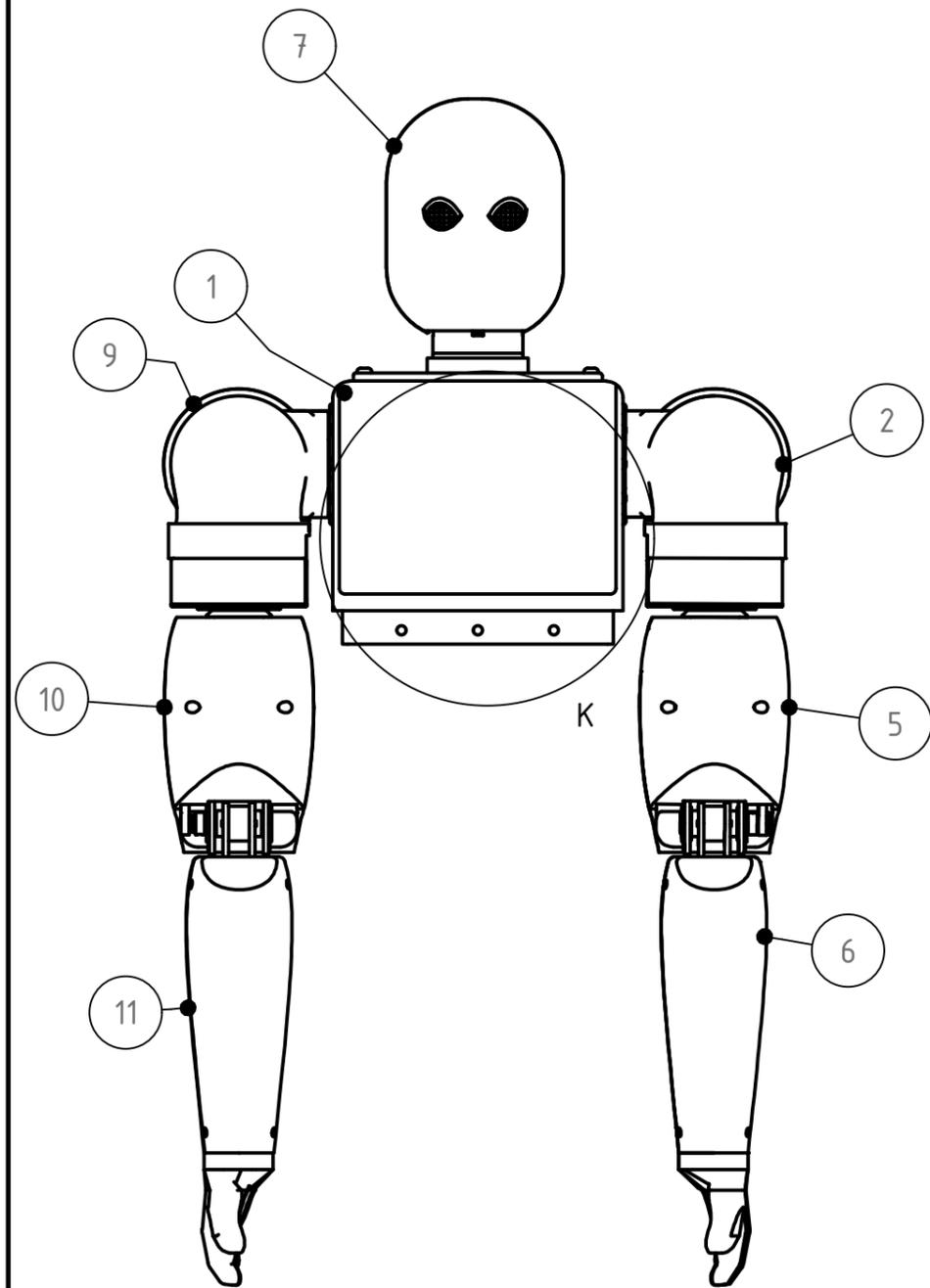
CTA CTE BCP SOLES: 184-2088516-0-18
C.I. 002-194-002088516019-90
Para XML envíe su correo a: jcg_sa@yahoo.es

TIPO DE TRANSAC: CONTADO

* Gracias por su preferencia

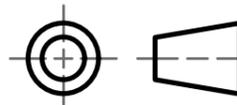
ANEXO K: Planos Mecánicos

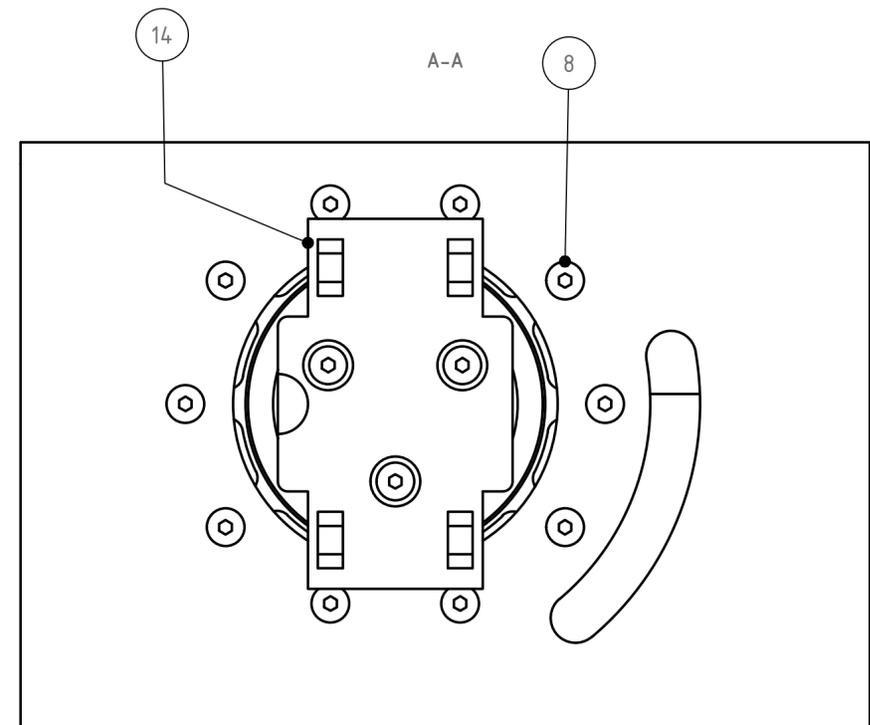
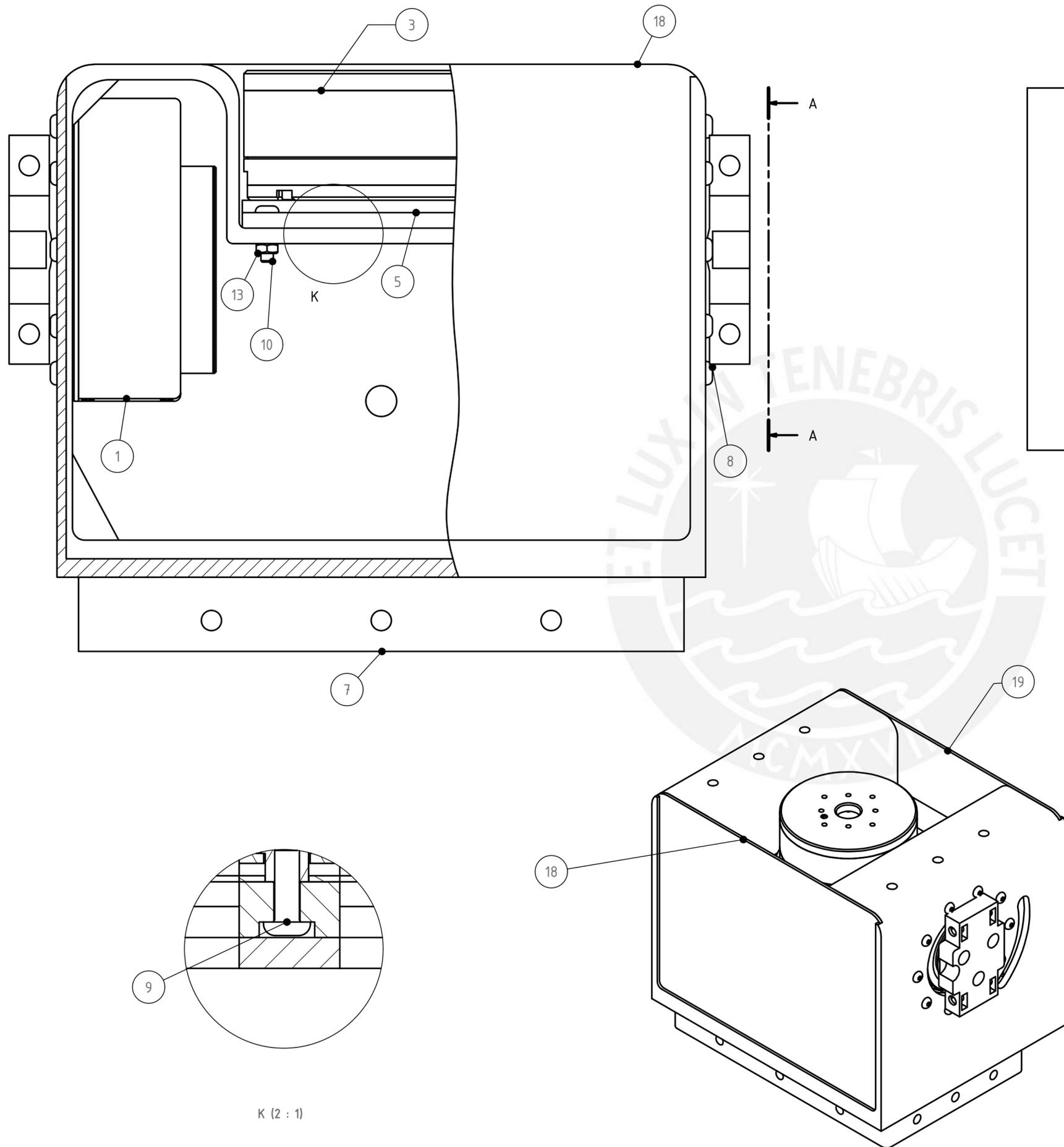




12	1	Ensamble Caja Electrónica	S-0006-A3	
11	1	Ensamble Antebrazo Derecho	S-0009-A2	
10	1	Ensamble Brazo Derecho	S-0008-A2	
9	1	Ensamble Hombro Derecho	S-0007-A2	
8	6	Perno Button Allen	ISO 7380-1 - M6 x 16	
7	1	Ensamble Cabeza	S-0005-A2	
6	1	Ensamble Antebrazo Izquierdo	S-0004-A2	
5	1	Ensamble Brazo Izquierdo	S-0003-A2	
4	4	Perno Button Allen	ISO 7380-1 - M6 x 10	
3	14	Tuerca Hexagonal	ISO 4032 - M6	
2	1	Ensamble Hombro Izquierdo	S-0002-A2	
1	1	Subensamble Base	S-0001-A2	
REF	CANT	DENOMINACION	DESIGNACION Y DATOS TECNICOS	OBSERVACIONES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	ENSAMBLE GENERAL	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO S-0004-A2

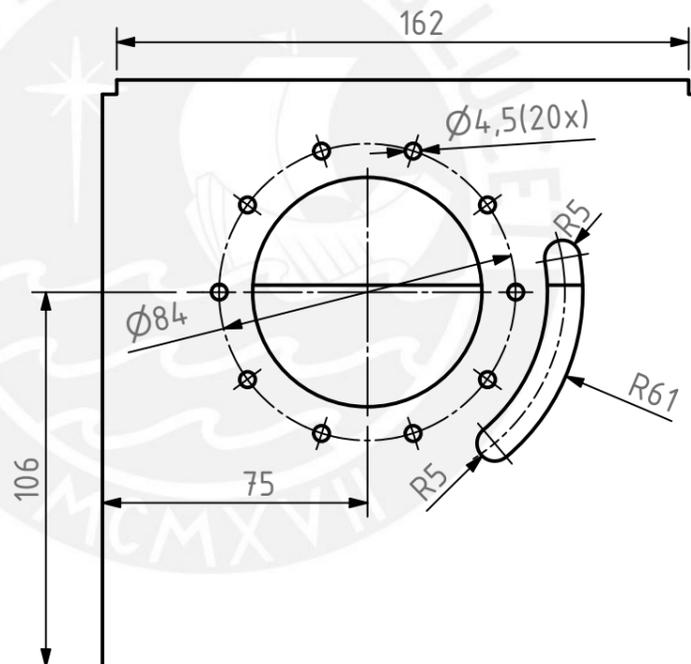
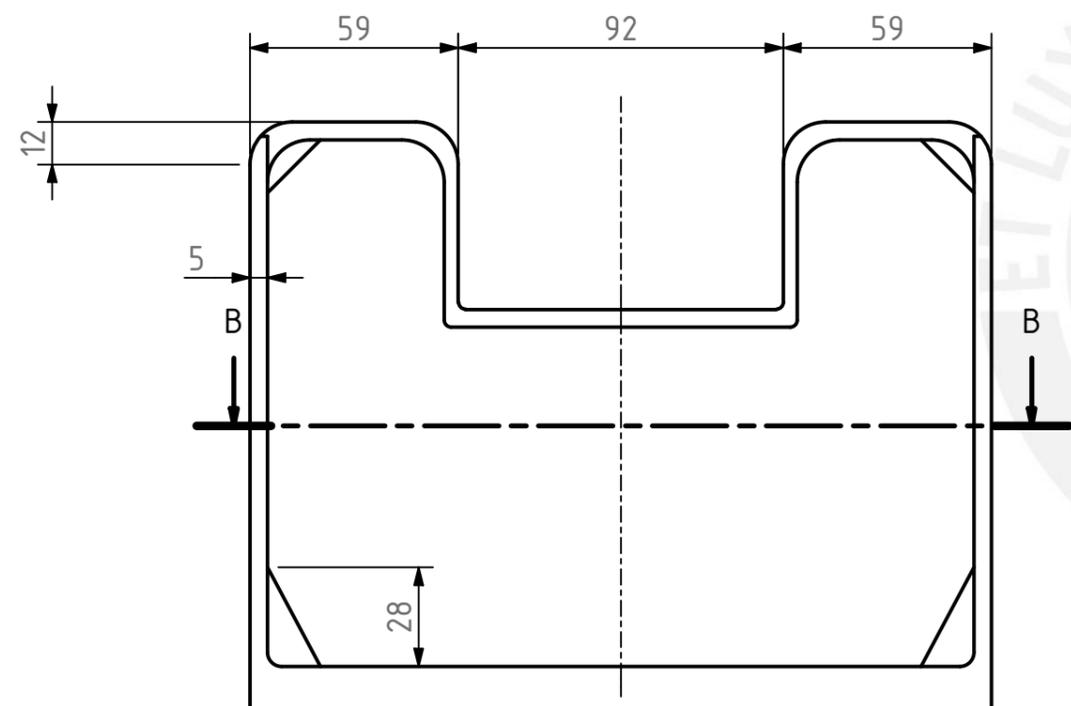
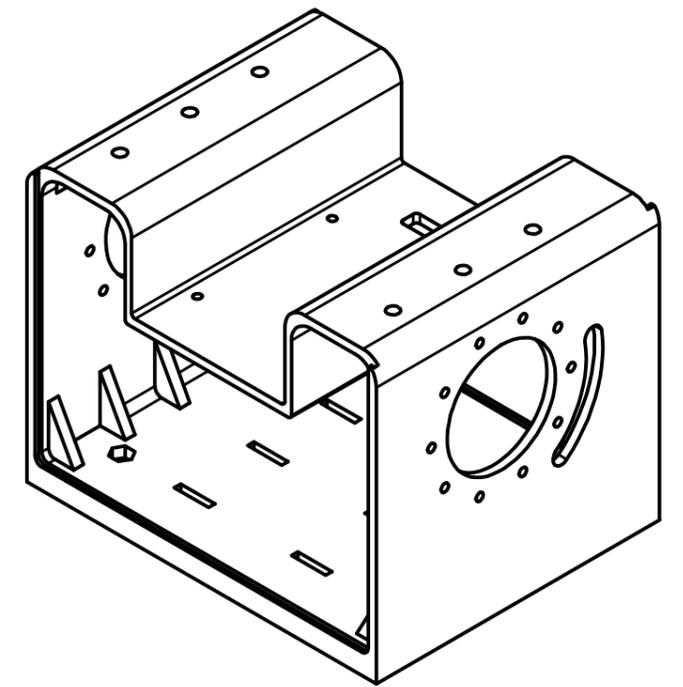
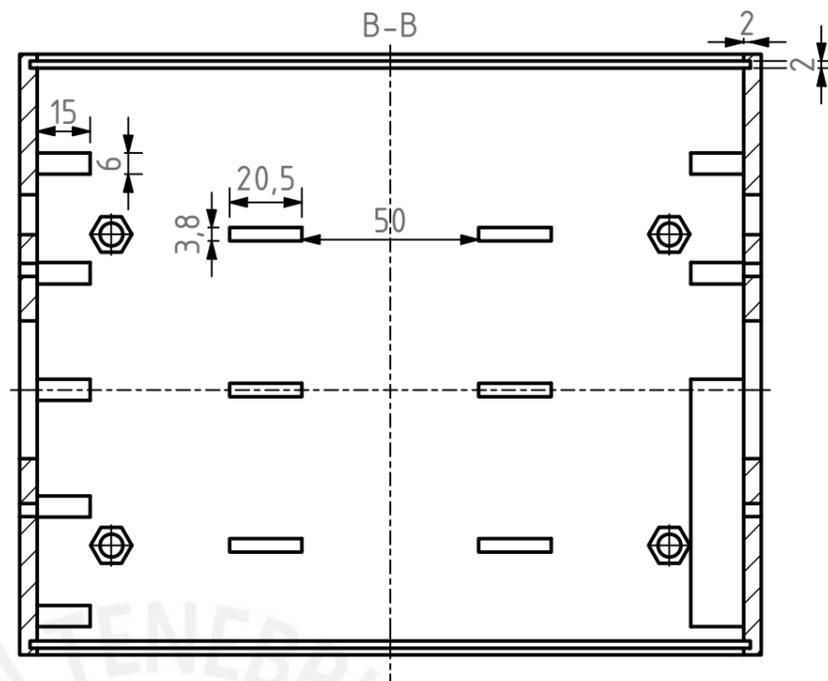
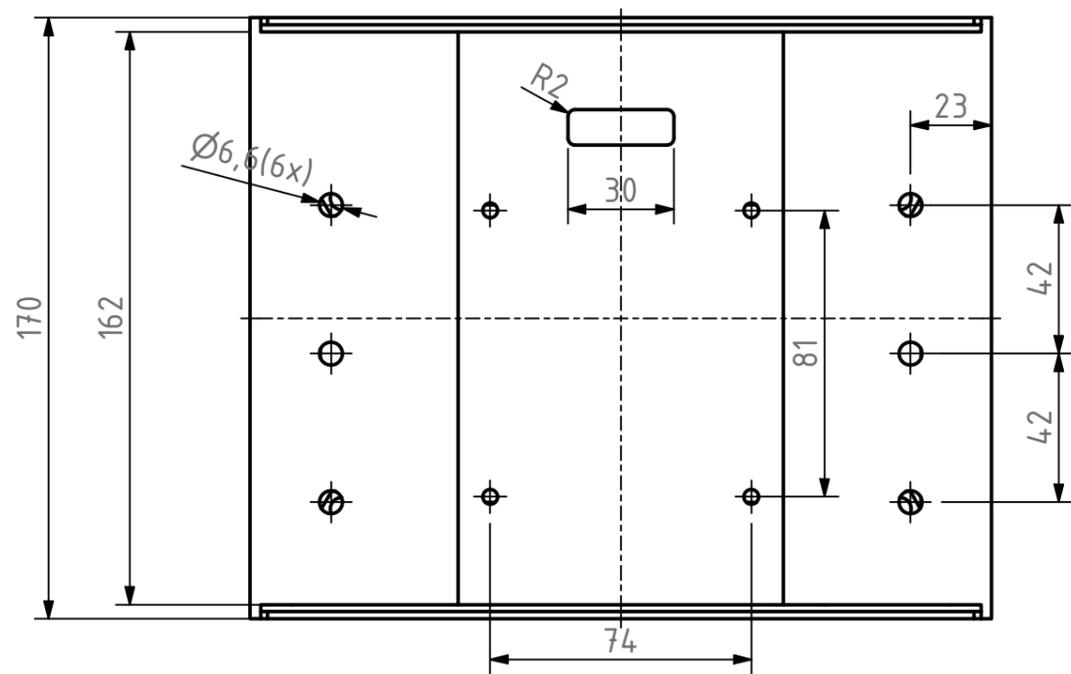


19	1	Tapa posterior	D-0039-A3	
18	1	Tapa Frontal	D-0038-A3	
17	4	Perno Button Allen	ISO 7380-1 - M6 x 10	
16	4	Tuerca hexagonal	ISO 4032 - M6	
15	6	Perno Button Allen	ISO 7380-1 - M4 x 6	
14	2	Acople de Motor	D-0003-A3	
13	4	Tuerca Hexagonal	ISO 4032 - M4	
10	4	Perno Allen tipo Button	ISO 7380-1 - M4 x 16	
9	4	Perno Allen tipo Button	ISO 7380-1 - M4 x 12	
8	20	Perno Allen tipo Button	ISO 7380-1 - M4 x 10	
7	1	Acople Plataforma	D-0004-A3	
5	1	Placa Base Cabeza	D-0002-A3	
3	1	Motor	RMD-S-90RMD-9015	
2	1	Pieza Base	D-0001-A3	
1	2	Motor	RMD-X8-Pro	
REF	CANT	DENOMINACION	DESIGNACION Y DATOS TECNICOS	OBSERVACIONES

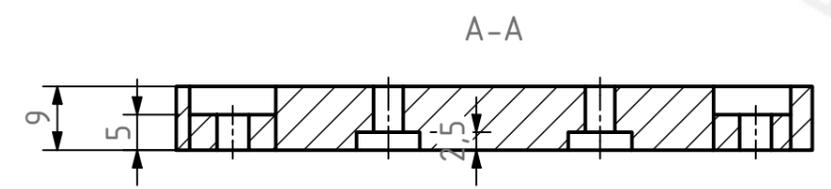
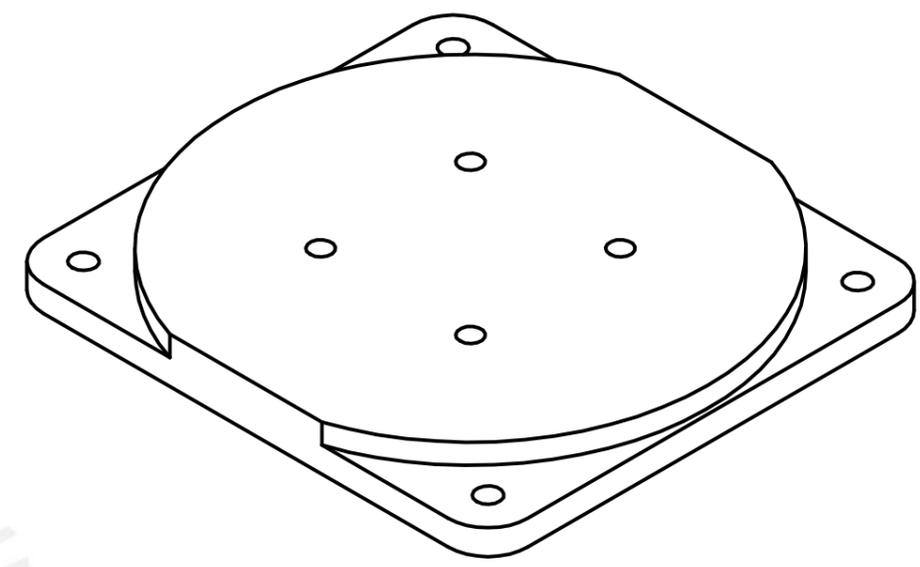
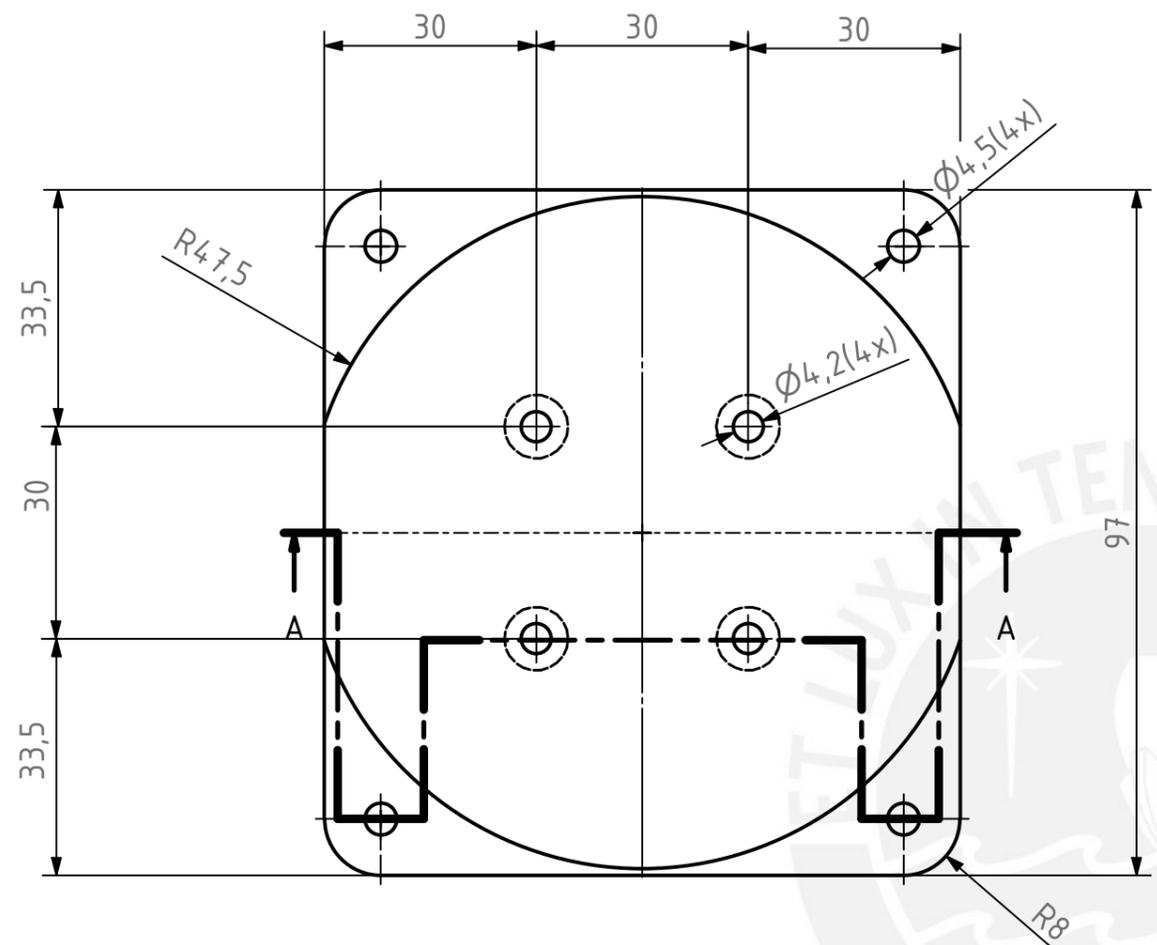
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - -HORARIO 10M1	ESCALA
	SUBENSAMBLE BASE	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO S-0001-A3

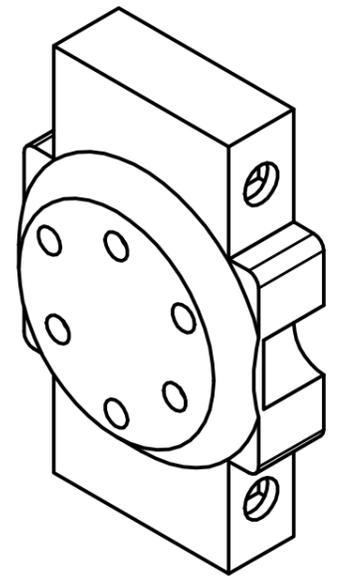
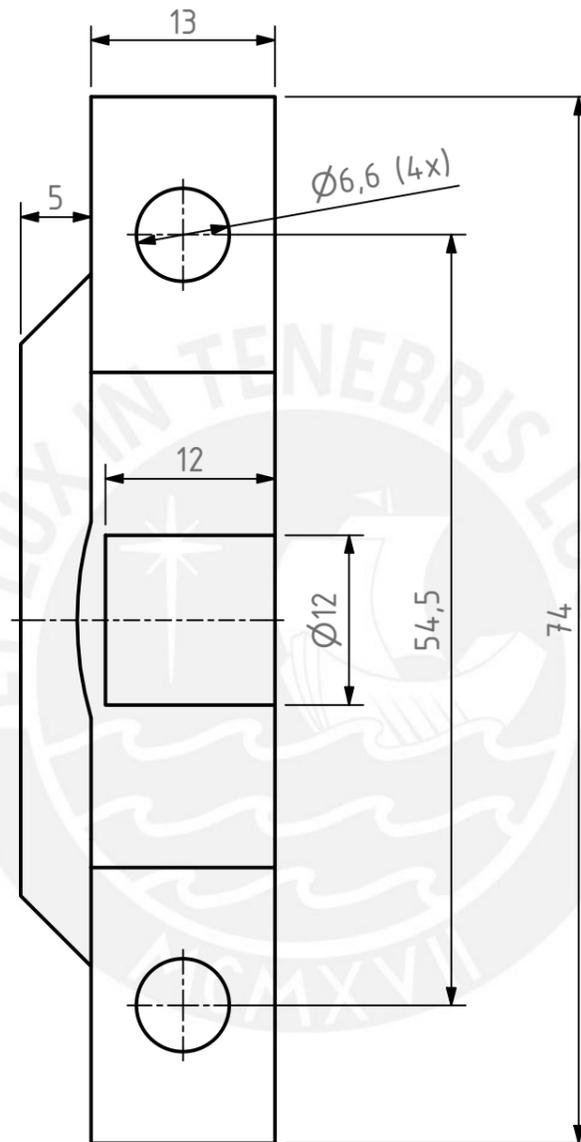
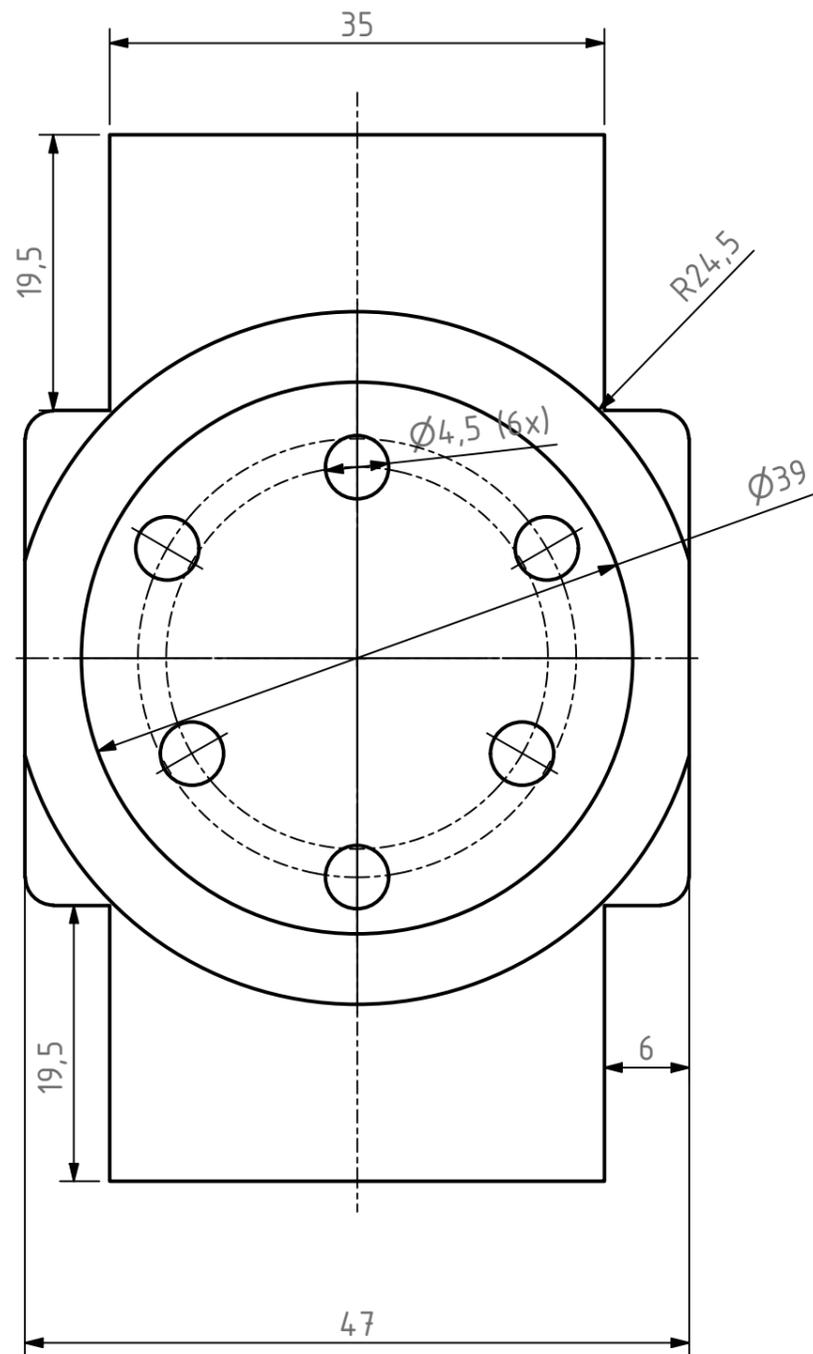
K (2 : 1)



ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	Base Brazos	1:2
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO: D-0001-A3

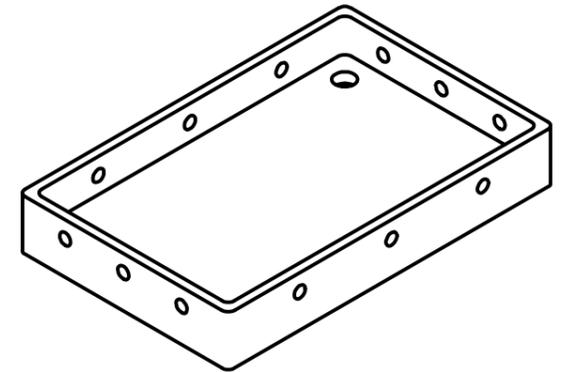
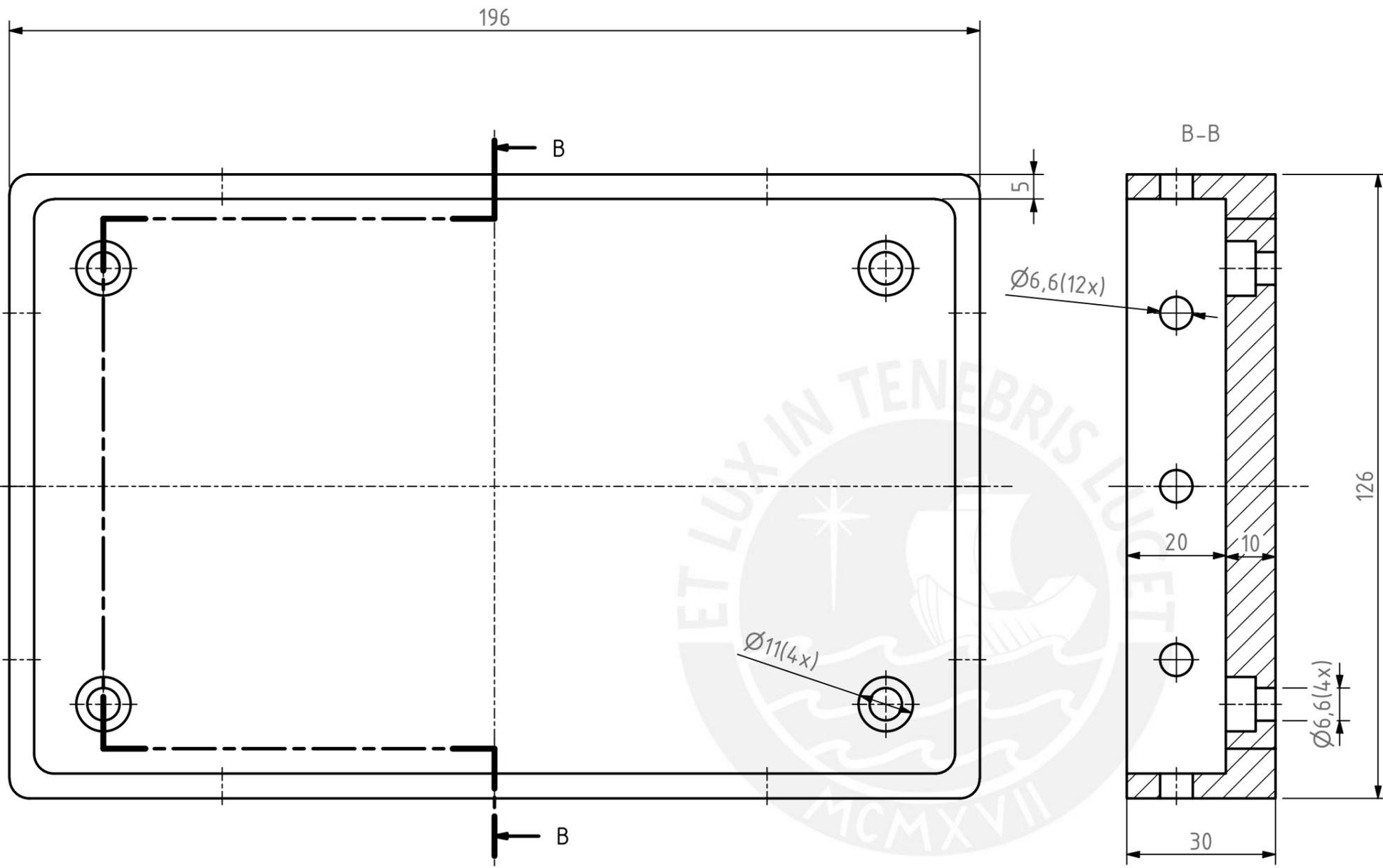


ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0.03	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	<h2>Placa Base Cabeza</h2>	<h3>1:1</h3>
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO: D-0002-A3



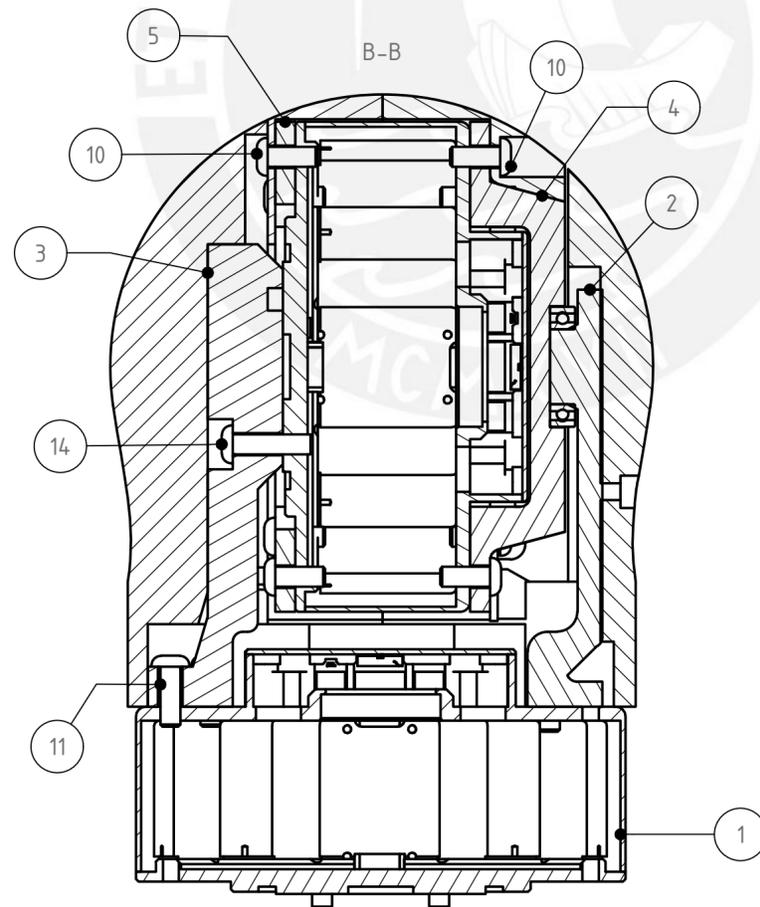
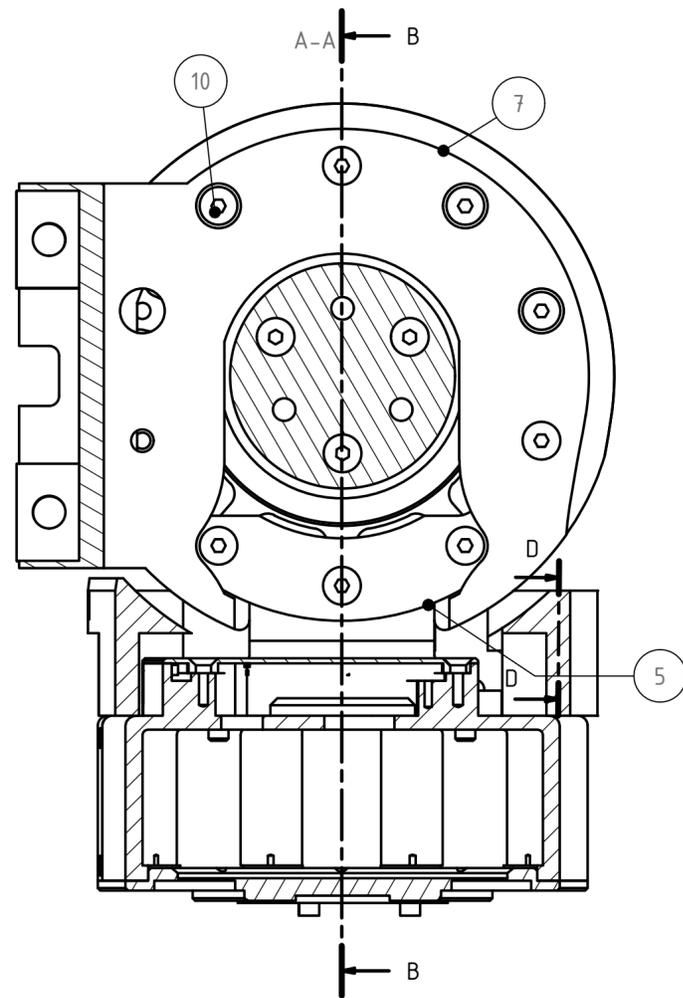
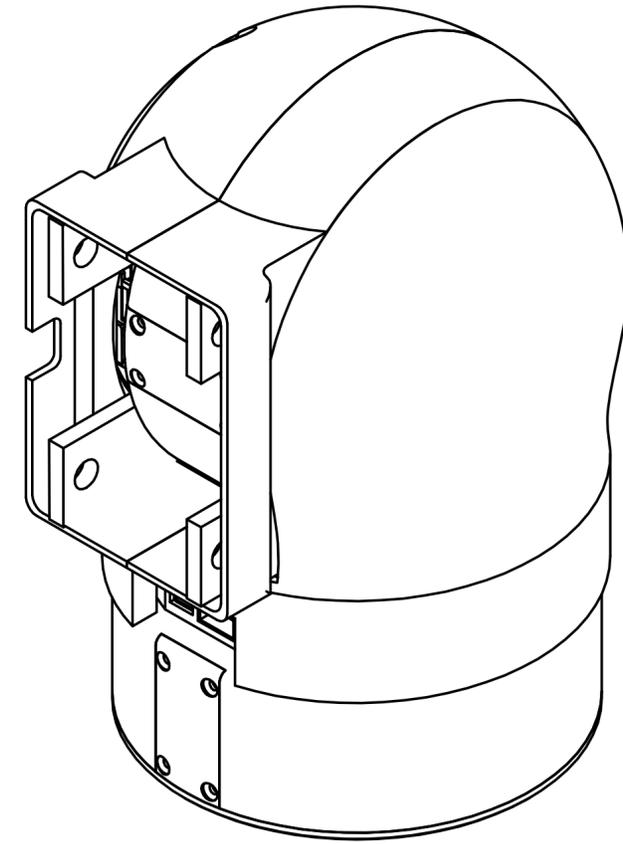
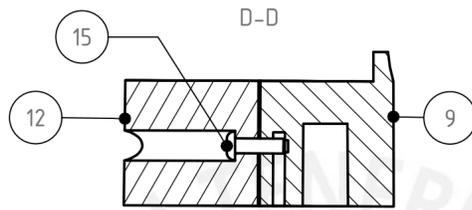
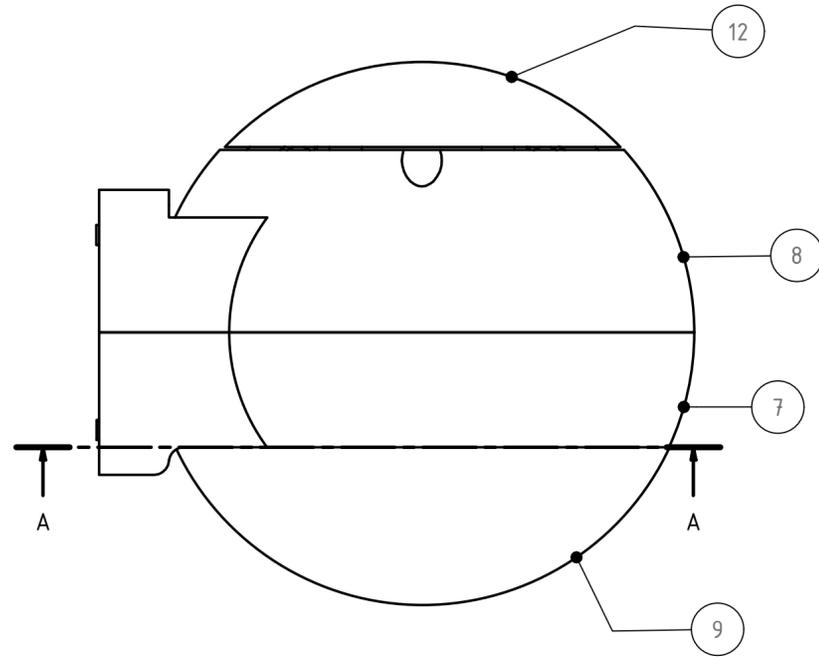
REDONDEOS NO INDICADOS R2

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	- ± 0,3 mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	ACOPLE DE MOTOR	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO: D-0003-A3



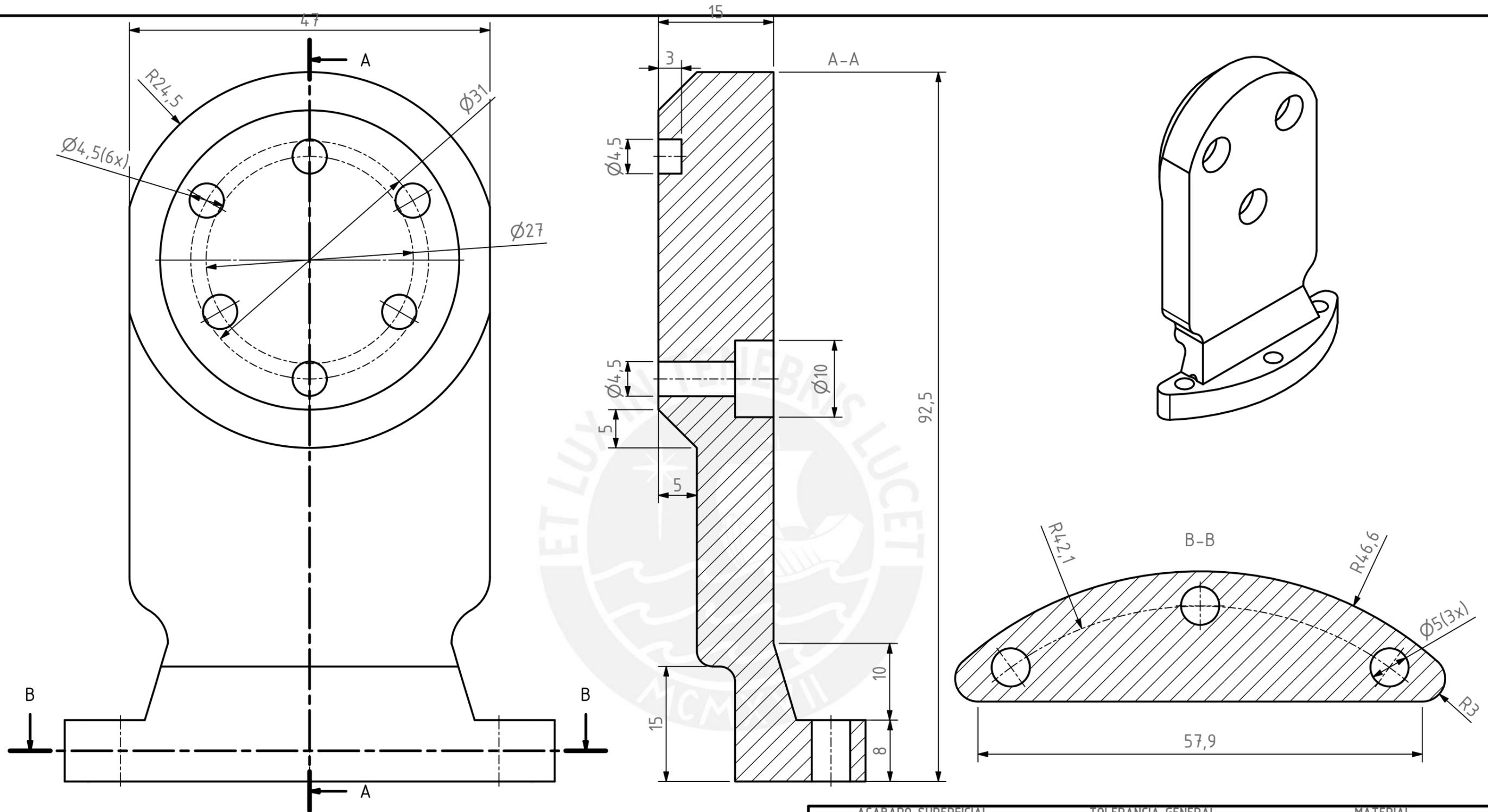
REDONDEOS NO INDICADOS R4

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	ACOPLE PLATAFORMA	1:2
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0004-A3



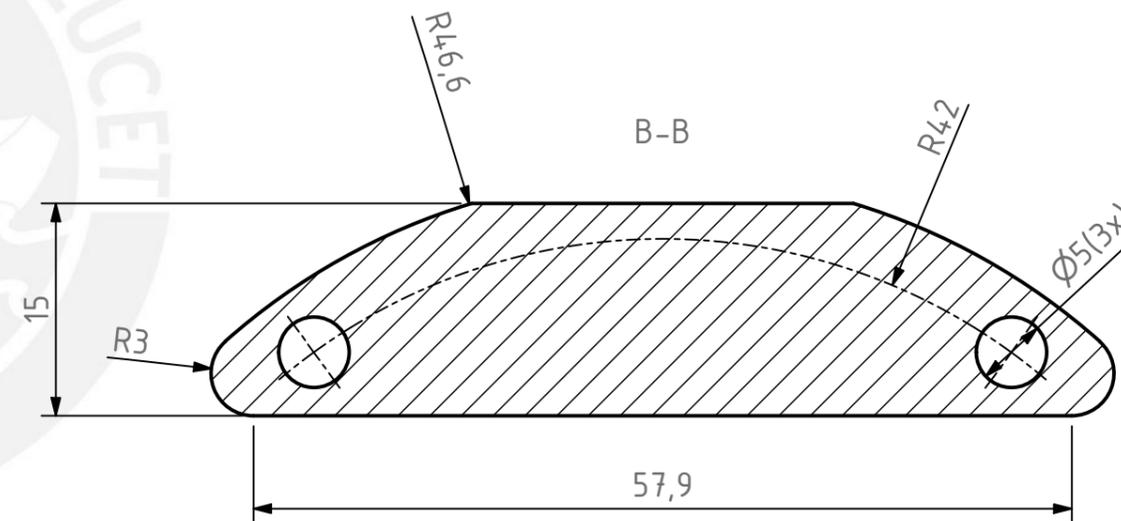
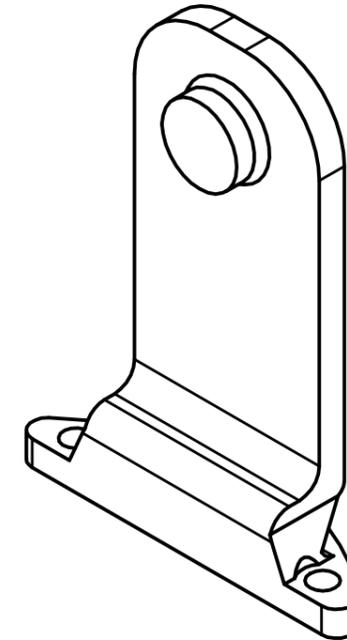
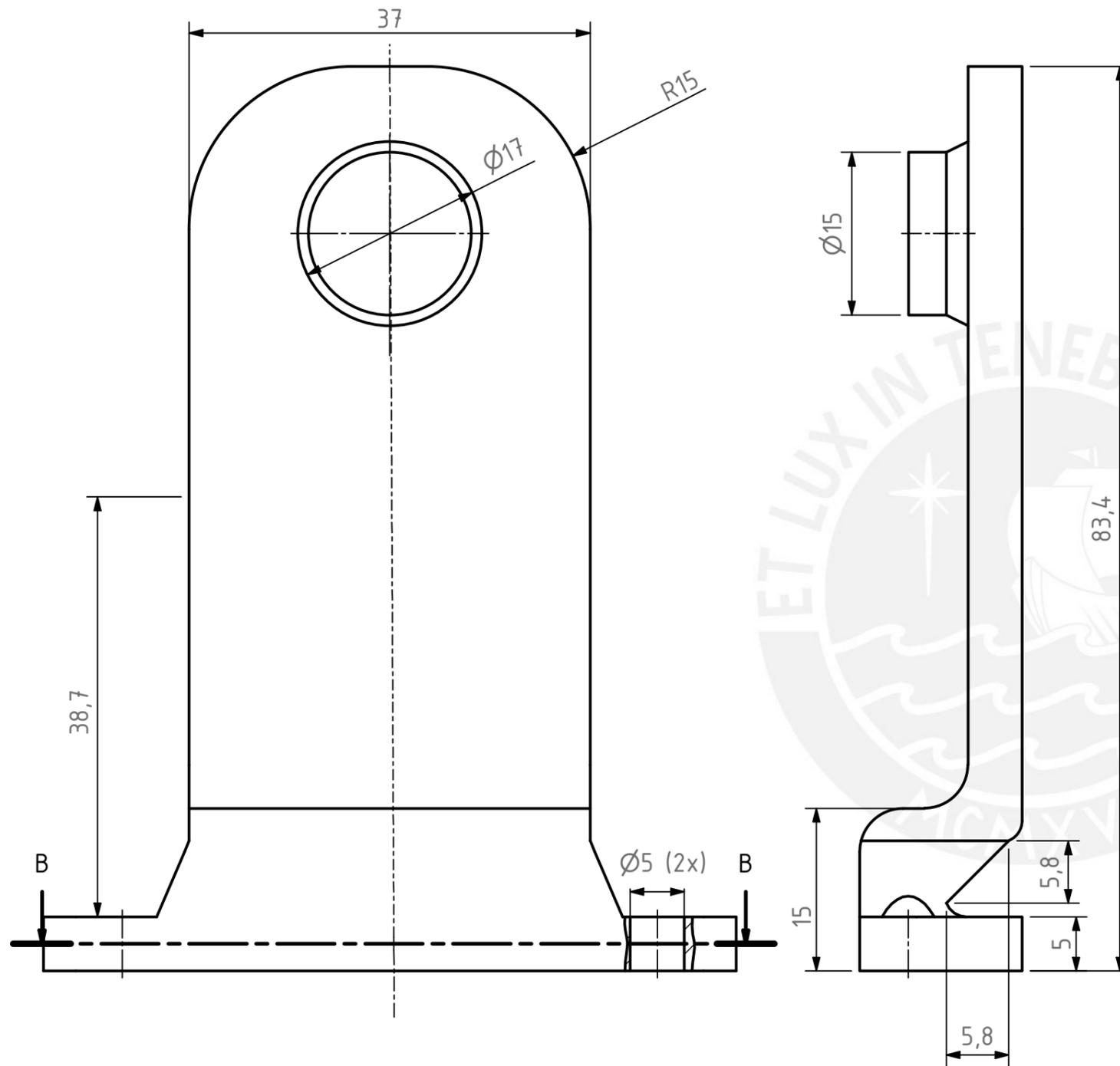
REF	CANT	DENOMINACION	DESIGNACION Y DATOS TECNICOS	OBSERVACIONES
16	1	Rodamiento radial	SKF 61802	
15	2	Perno Button Allen	ISO 7380-1 - M3 x 10	
14	3	Perno Button Allen	ISO 7380-1 - M4 x 16	
12	1	Carcasa hombro izq B	D-0011-A3	
11	3	Perno Button Allen	ISO 7380-1 - M4 x 12	
10	18	Perno Button Allen	ISO 7380-1 - M4 x 10	
9	1	Carcasa hombro izq D	D-0013-A3	
8	1	Carcasa hombro izq C	D-0012-A3	
7	1	Carcasa hombro izq A	D-0010-A3	
5	1	Placa Hombro 1	D-0008-A3	
4	1	Placa Hombro 2	D-0009-A3	
3	1	Acople paralelo 1	D-0005-A3	
2	1	Acople Paralelo 2	D-0006-A3	
1	2	Servomotor	RMD-X8-Pro	

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA			
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2	-	-HORARIO 10M1
	ENSAMBLE HOMBRO		ESCALA 1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA		FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN		CÓDIGO S-0002-A2



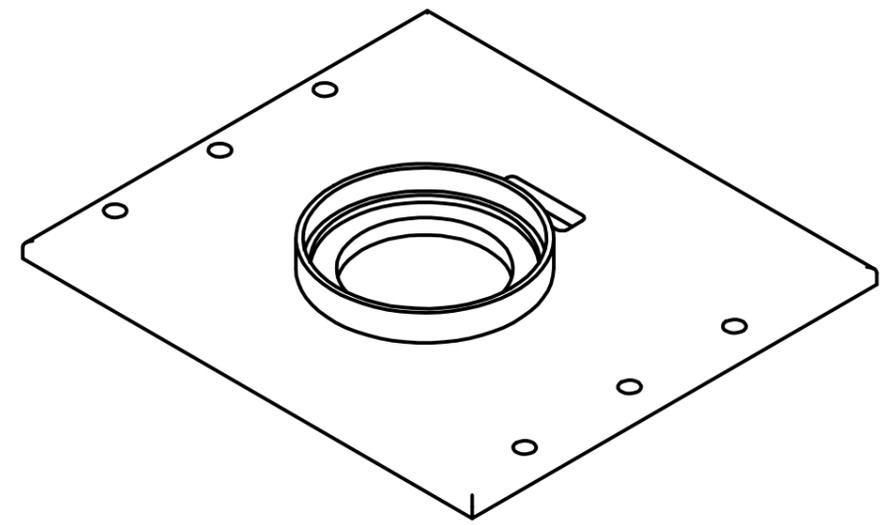
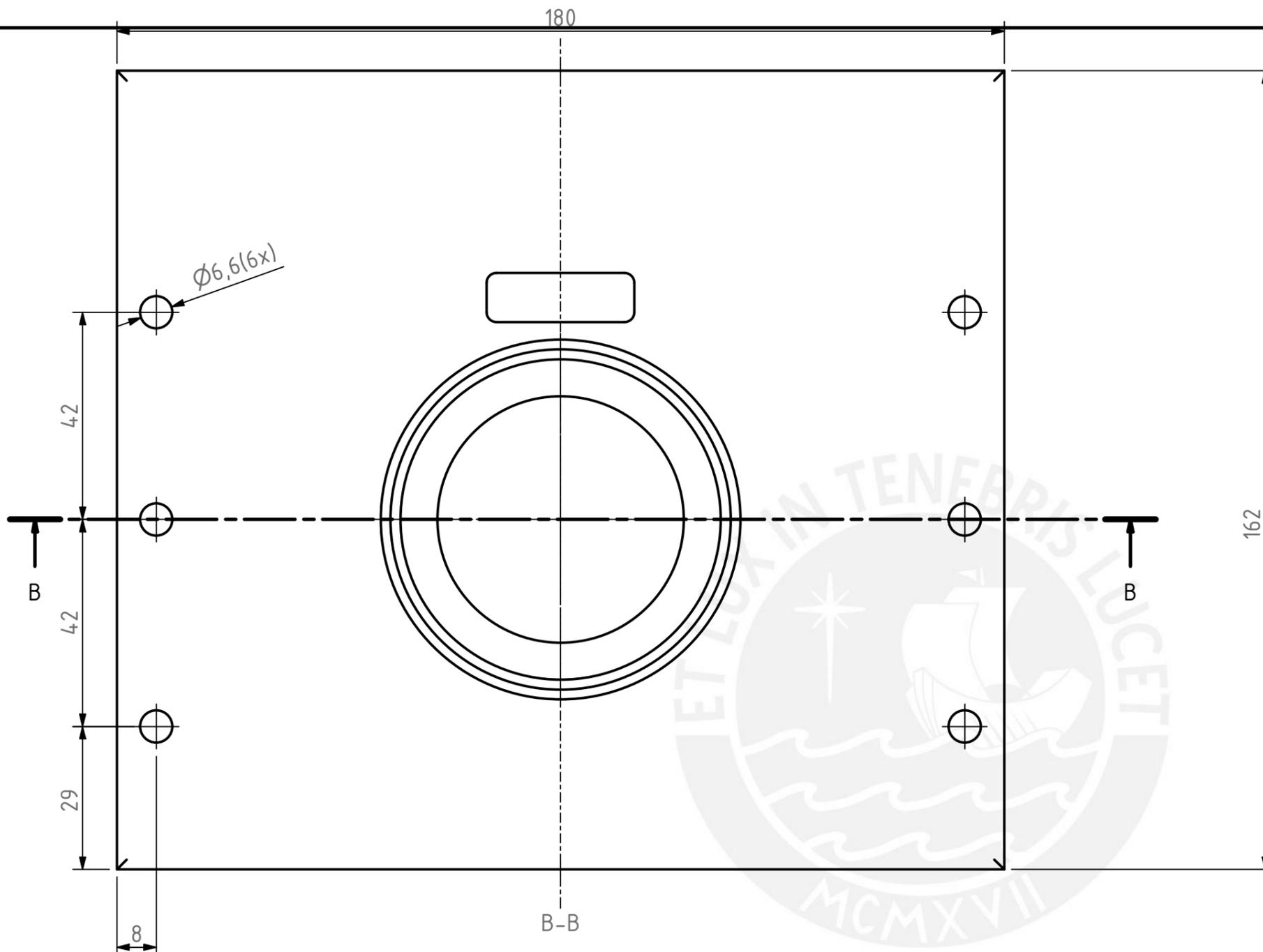
REDONEDOS NO INDICADOS R2

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	$\pm 0,3\text{mm}$	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 + - - HORARIO 10M1	ESCALA
	ACOPLE PARALELO 1	2:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0005-A3

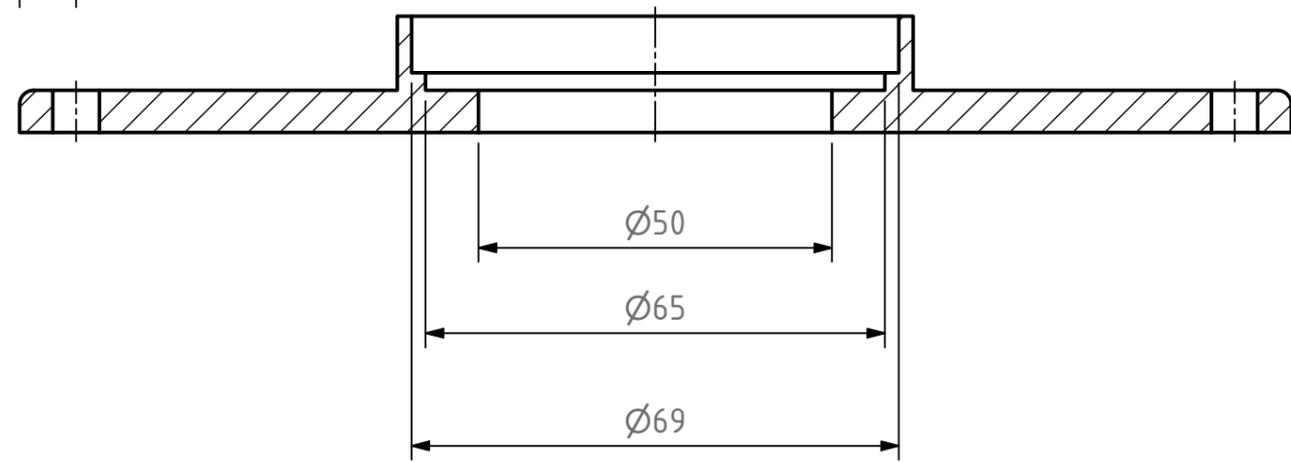


REDONDEOS NO INDICADOS R4

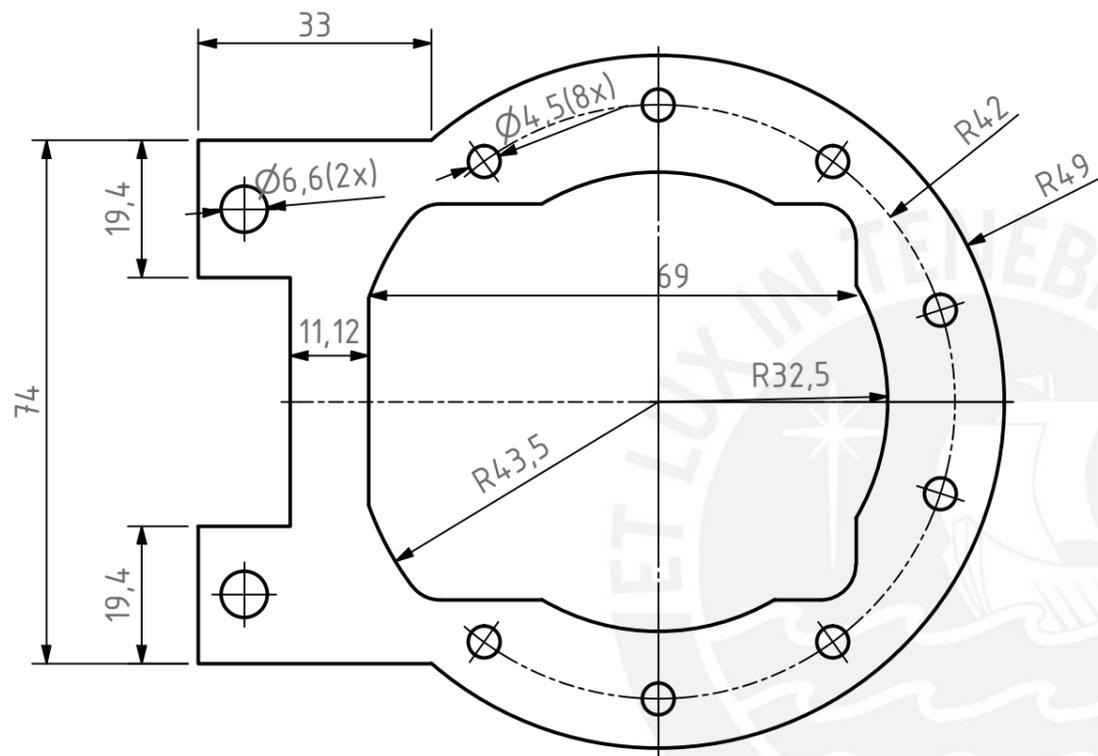
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	ACOPLE PARALELO 2	2:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0006-A3



REDONDEOS NO INDICADOS R2

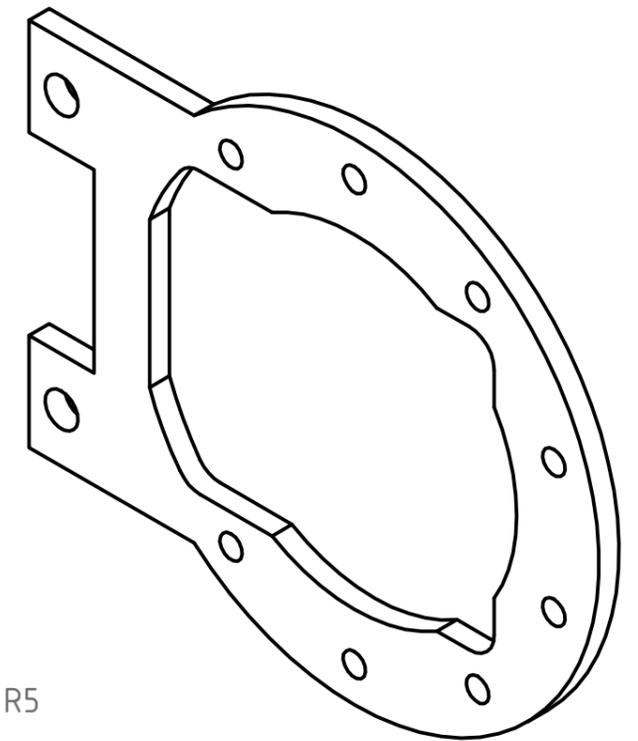


ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	$\pm 0,3\text{mm}$	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	PLACA SOPORTE DE CABEZA	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	LÁMINA: D-0007-A3

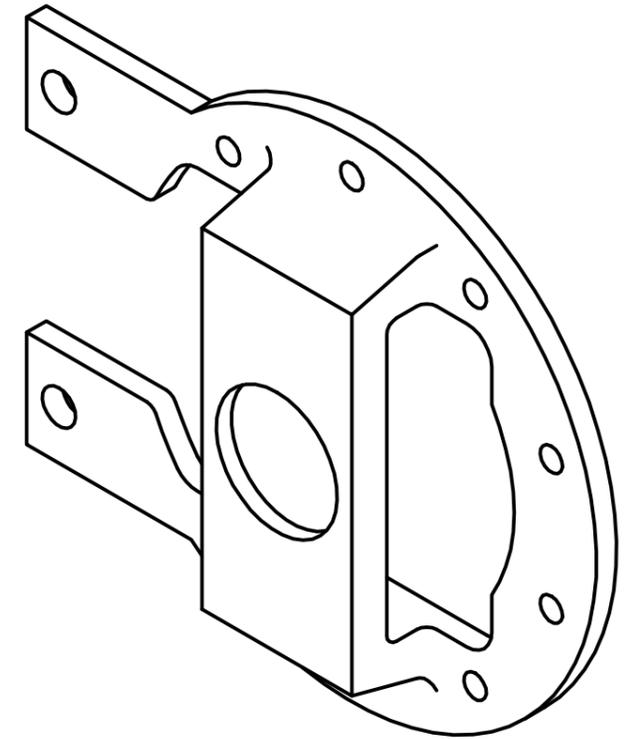
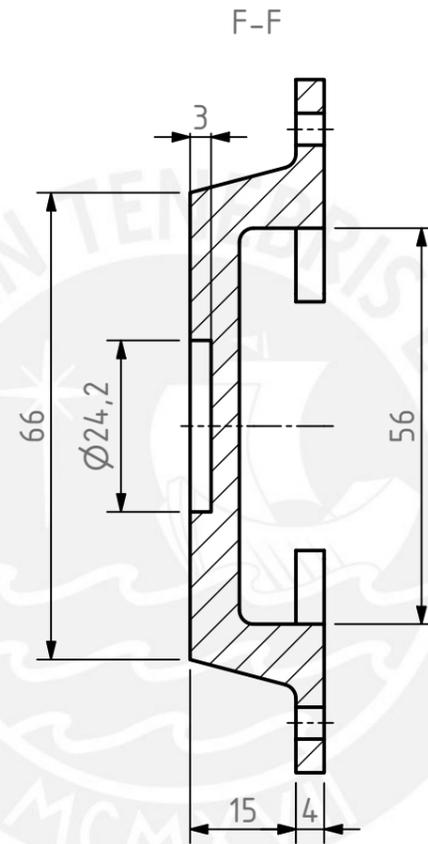
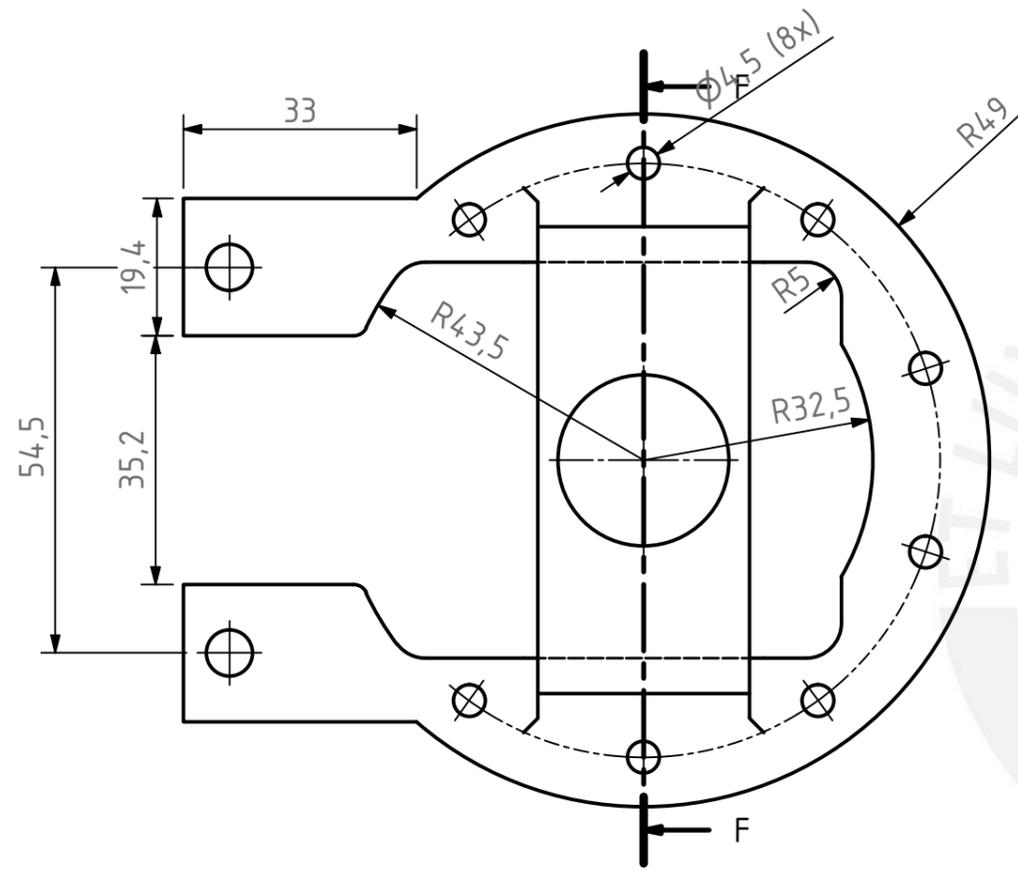


ESPESOR 4mm

REDONDEOS NO INDICADOS R5

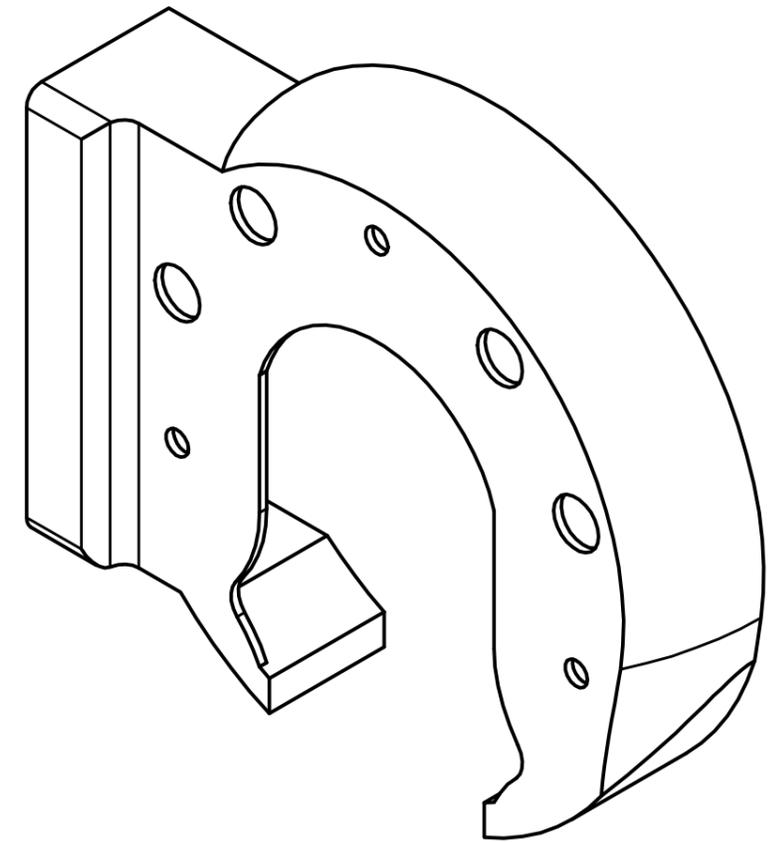
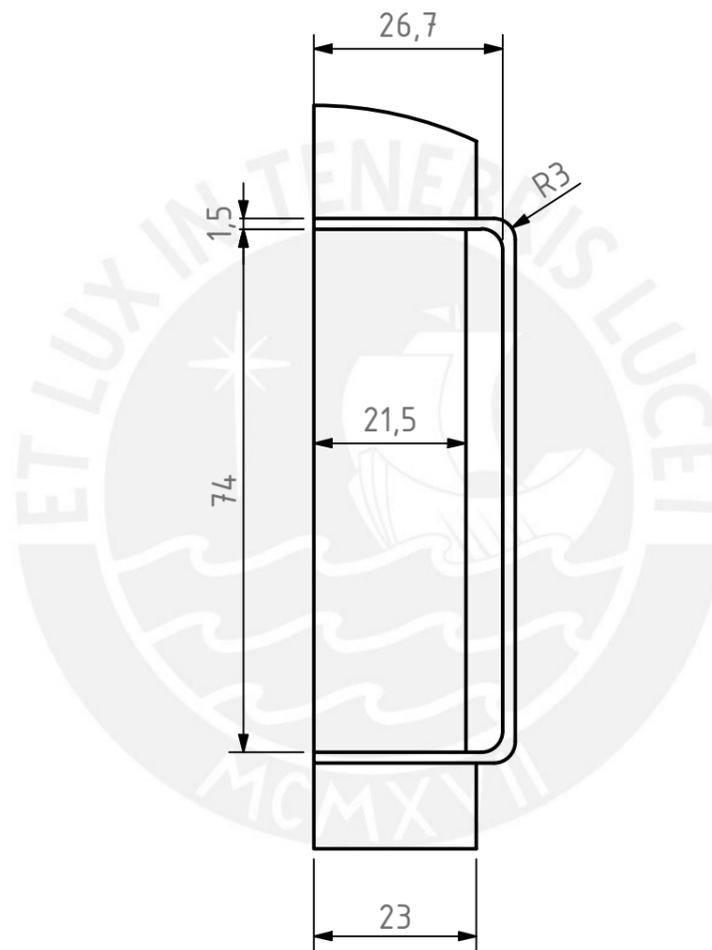
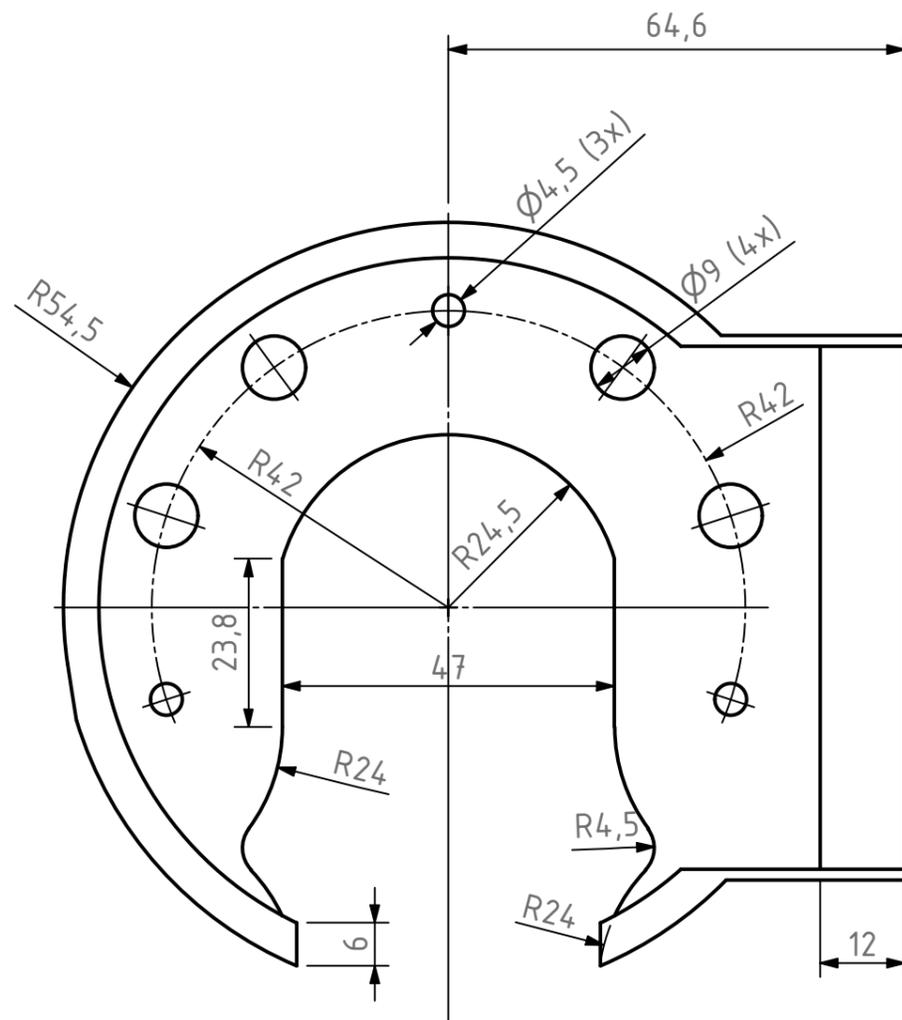


ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	±0,3 mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	PLACA SOPORTE HOMBRO 1	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO: D-0008-A3

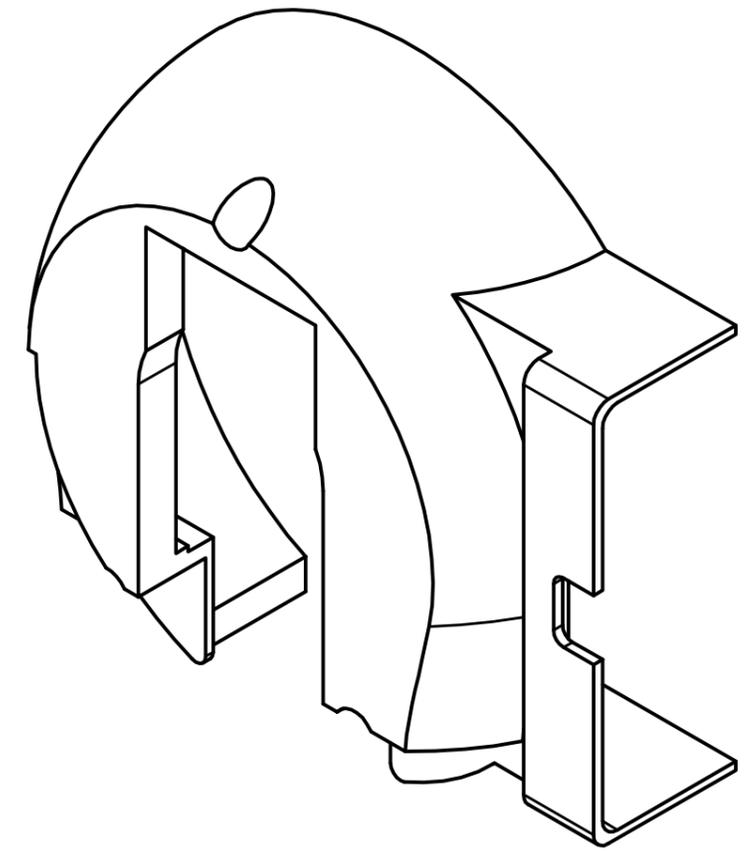
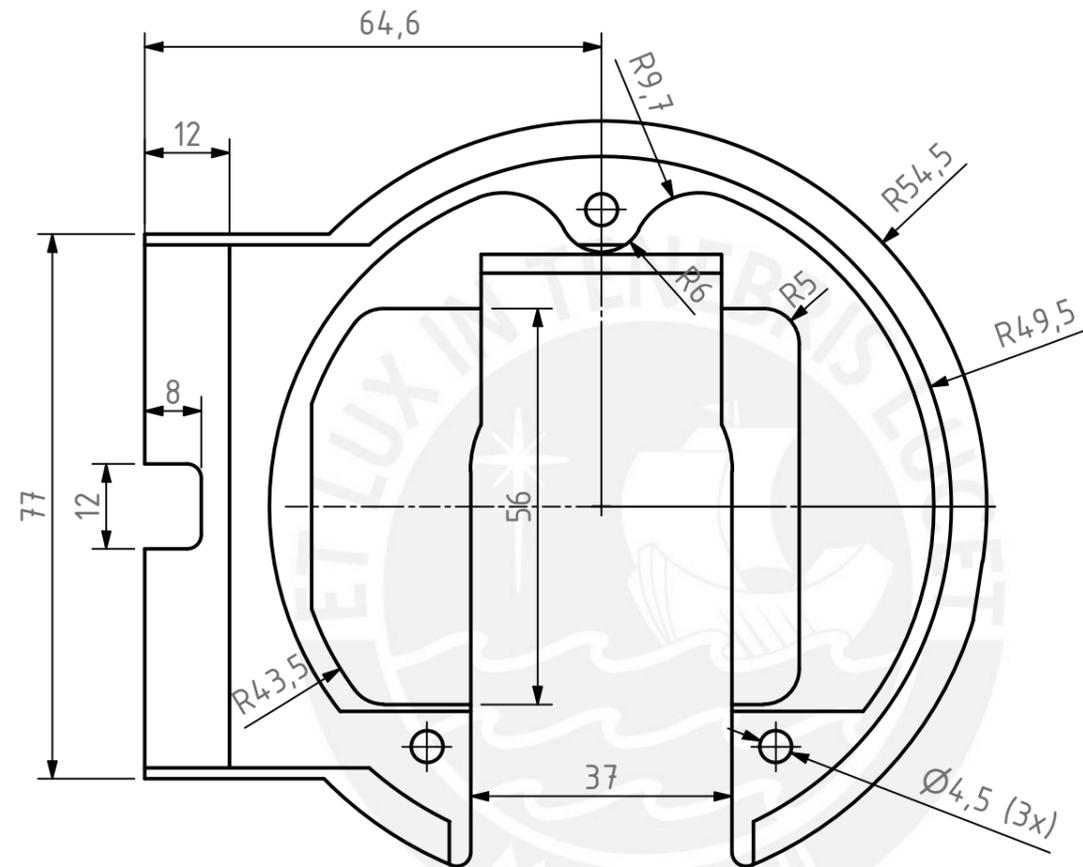
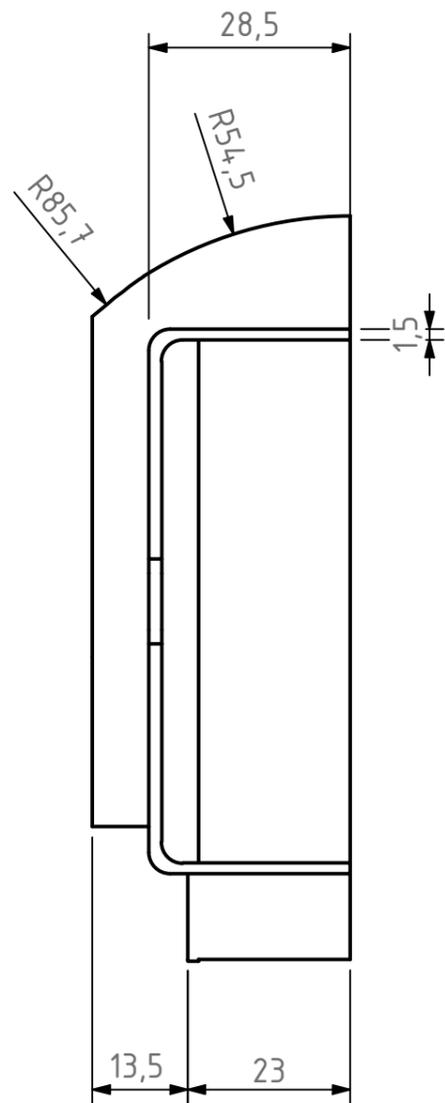


REDONDEOS NO INDICADOS R2

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	PLACA SOPORTE HOMBRO - 2	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0009-A3

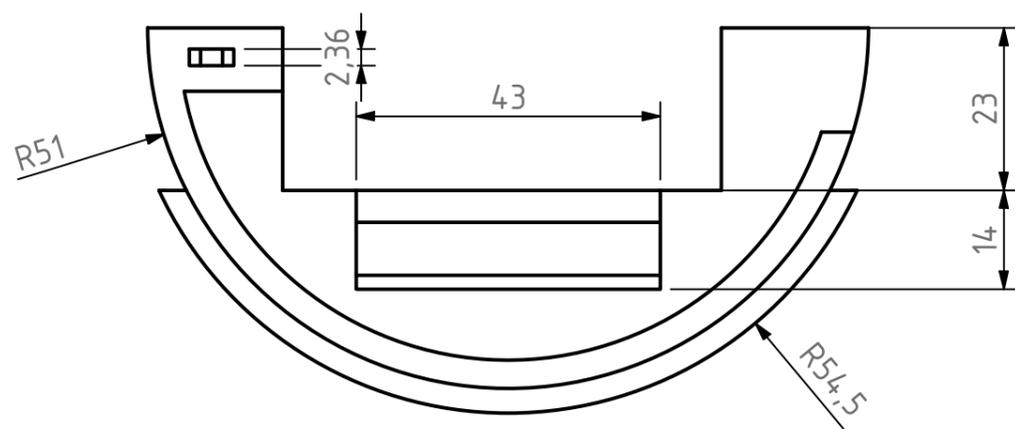
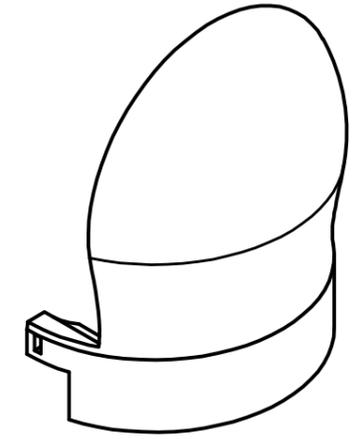
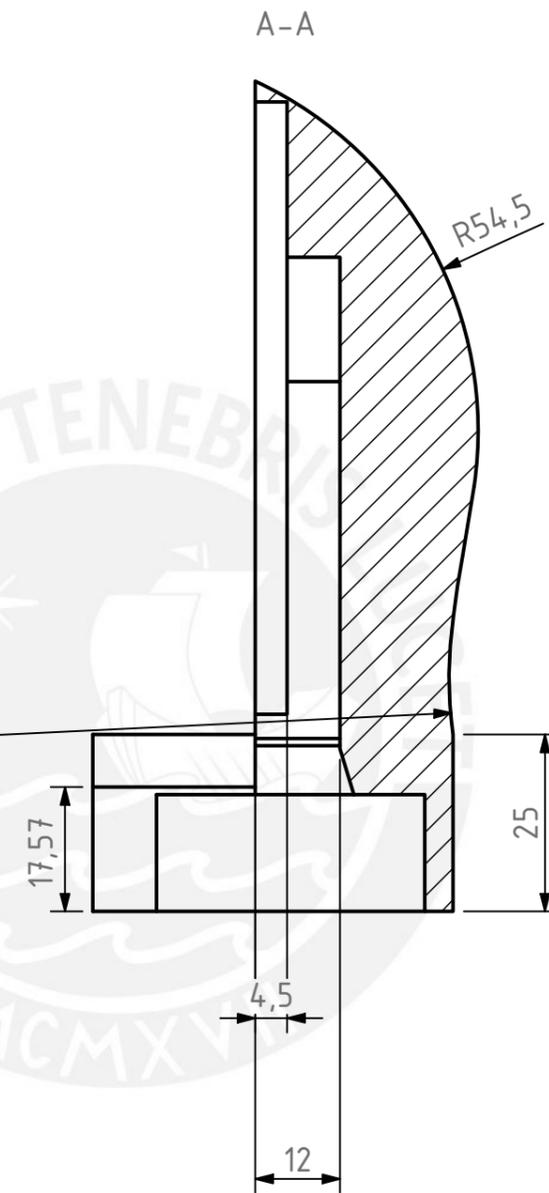
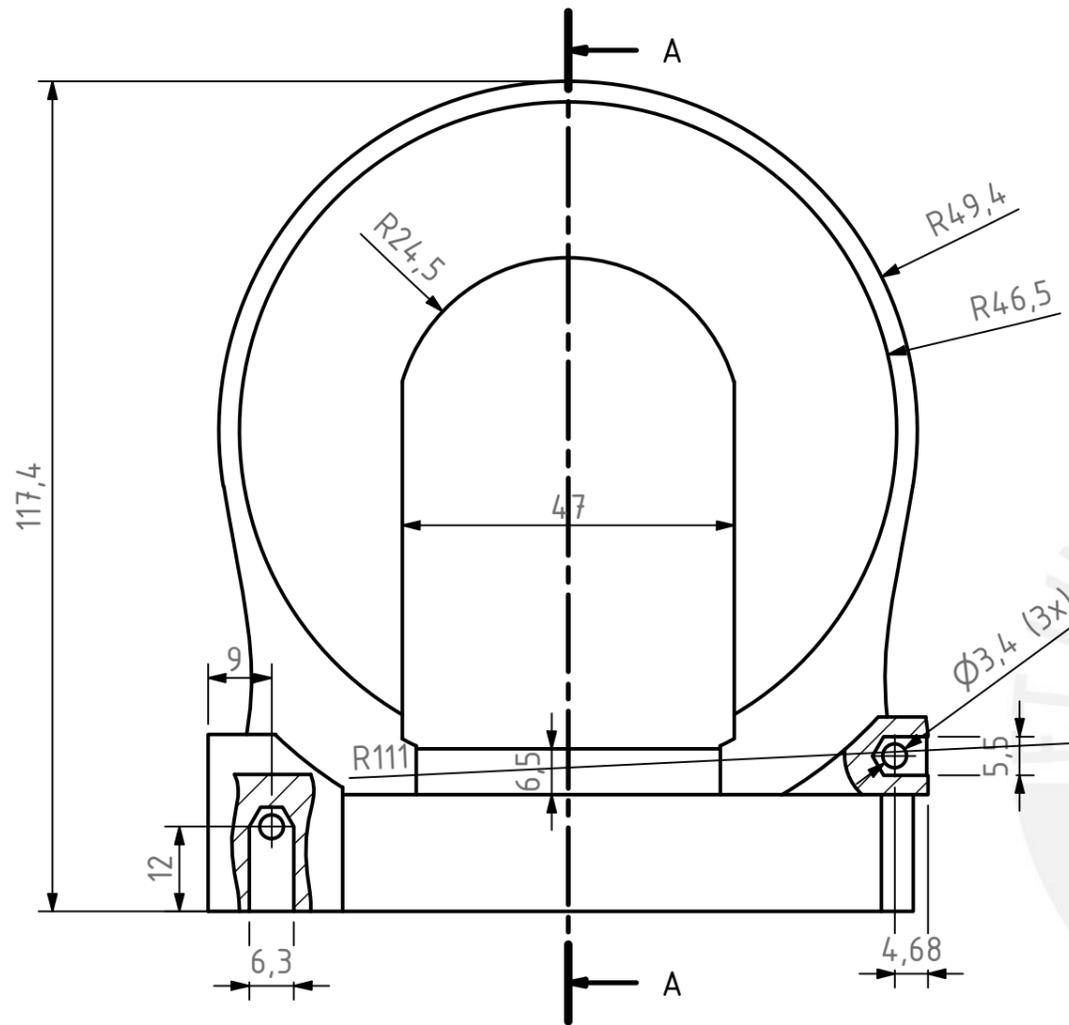


ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	CARCASA HOMBRO IZQ - A	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0010-A3

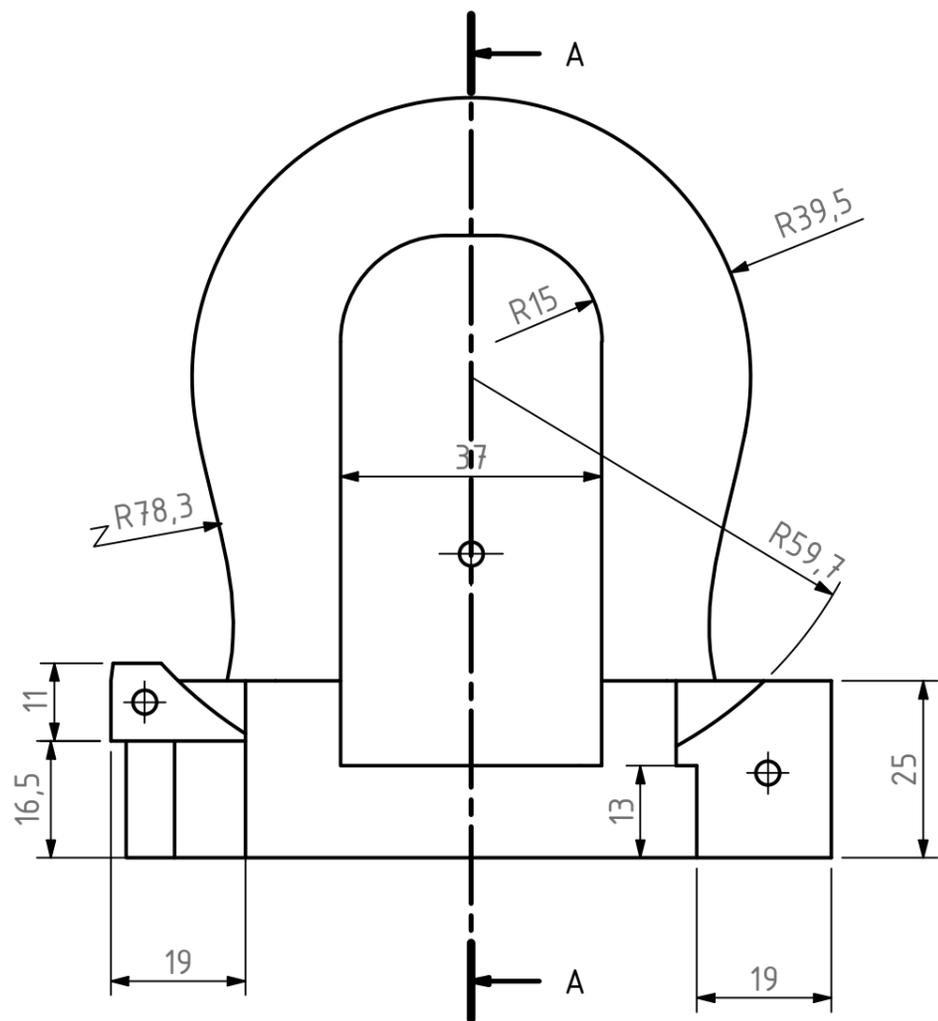


REDONDEOS NO INDICADOS R2

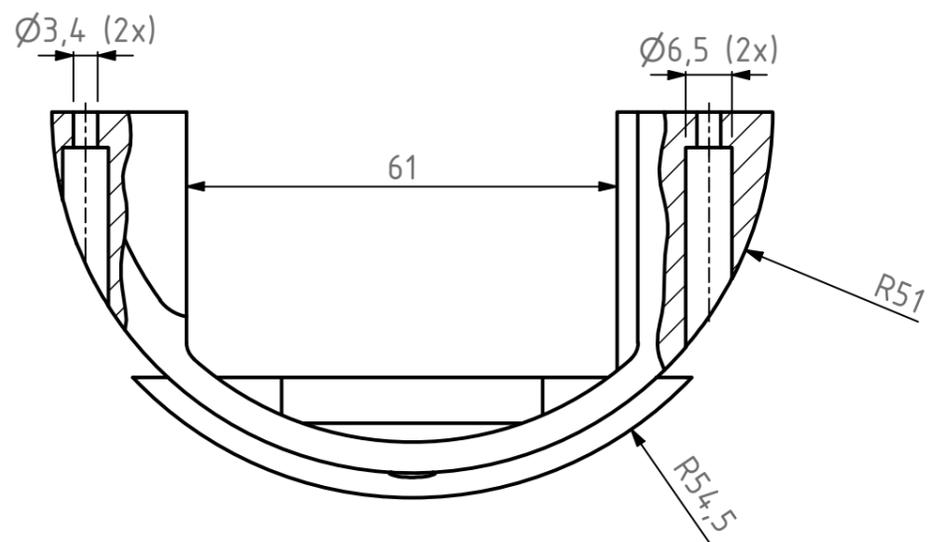
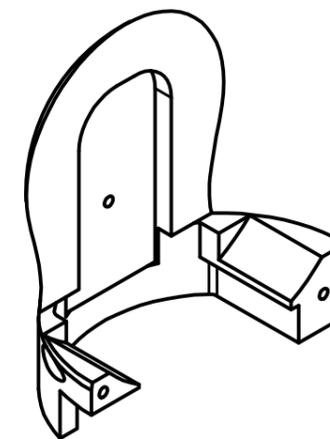
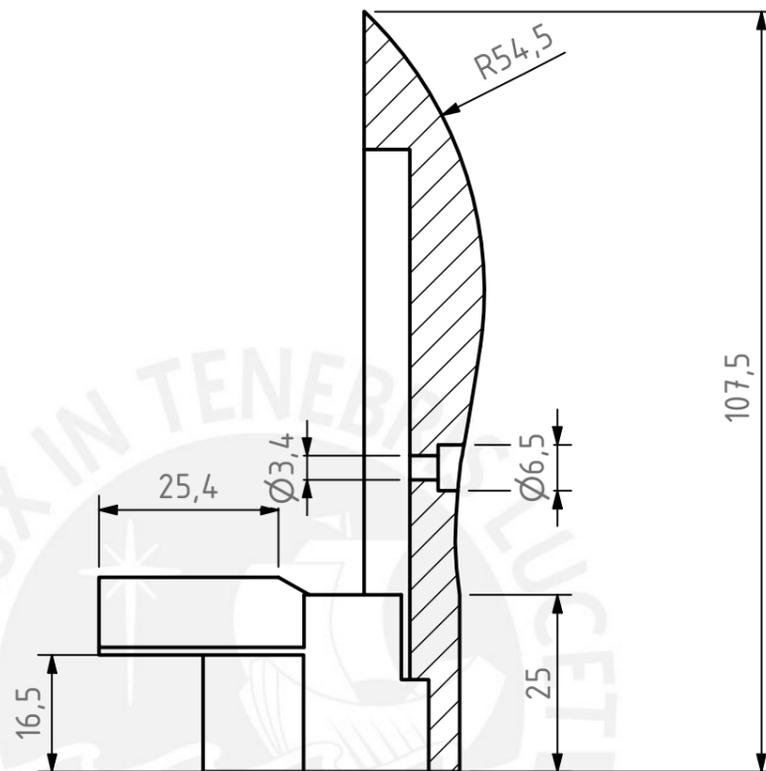
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	CARCASA HOMBRO IZQ - B	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0011-A3



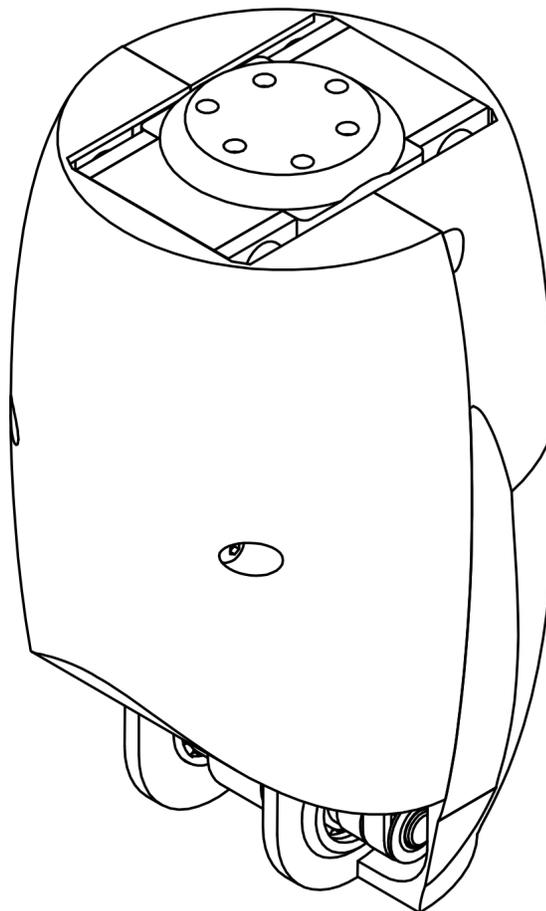
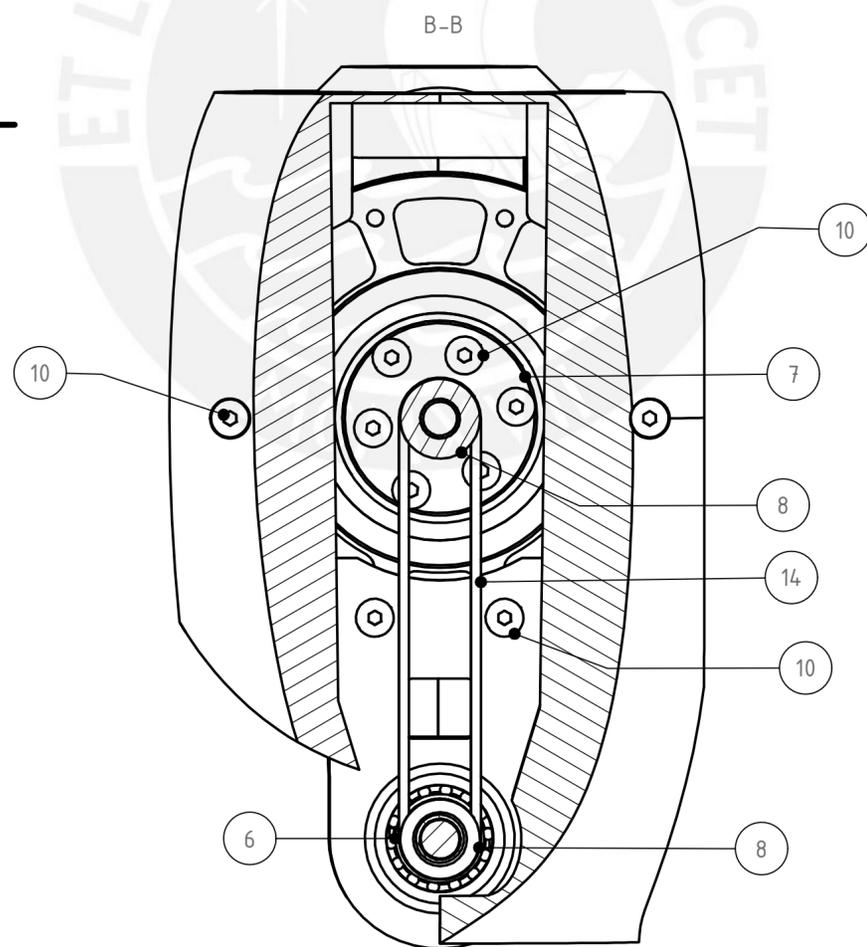
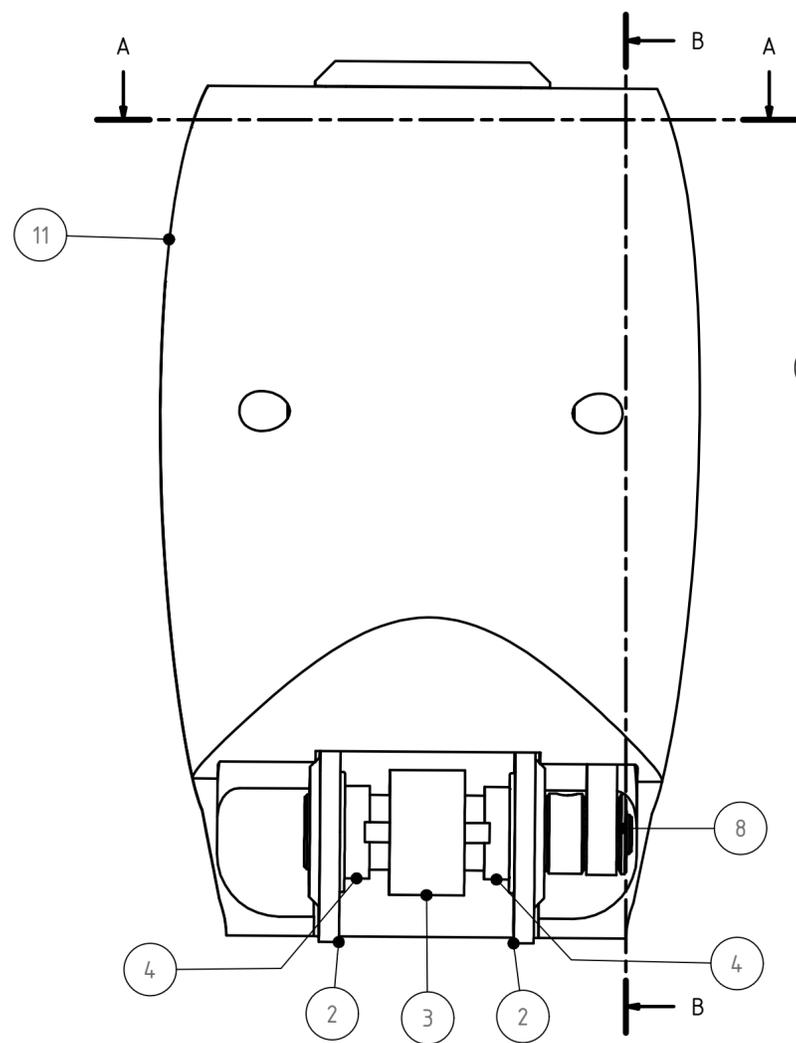
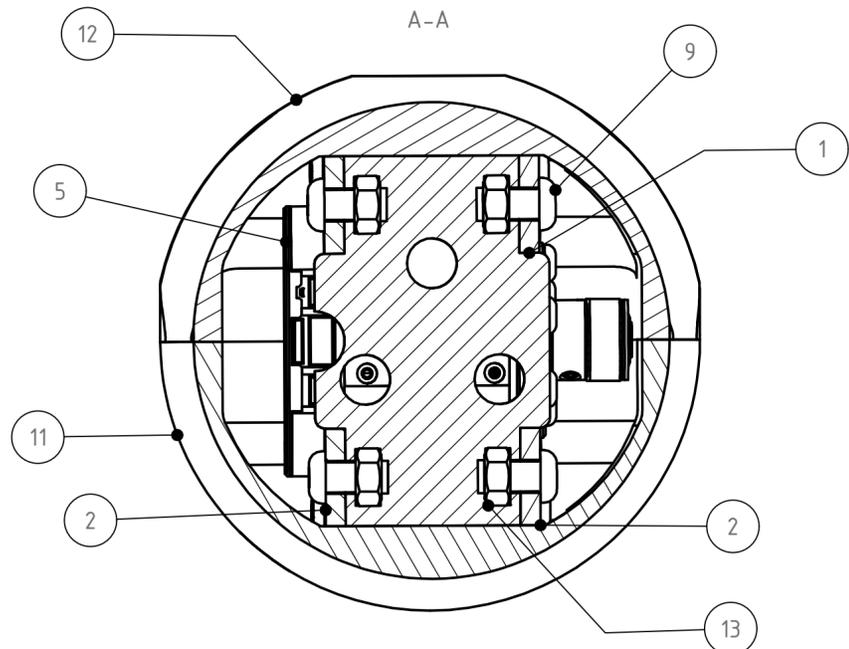
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	CARCASA HOMBRO IZQ - C	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0012-A3



A-A

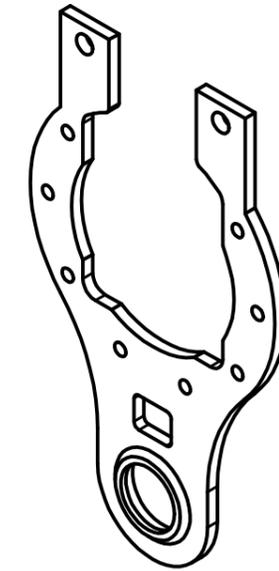
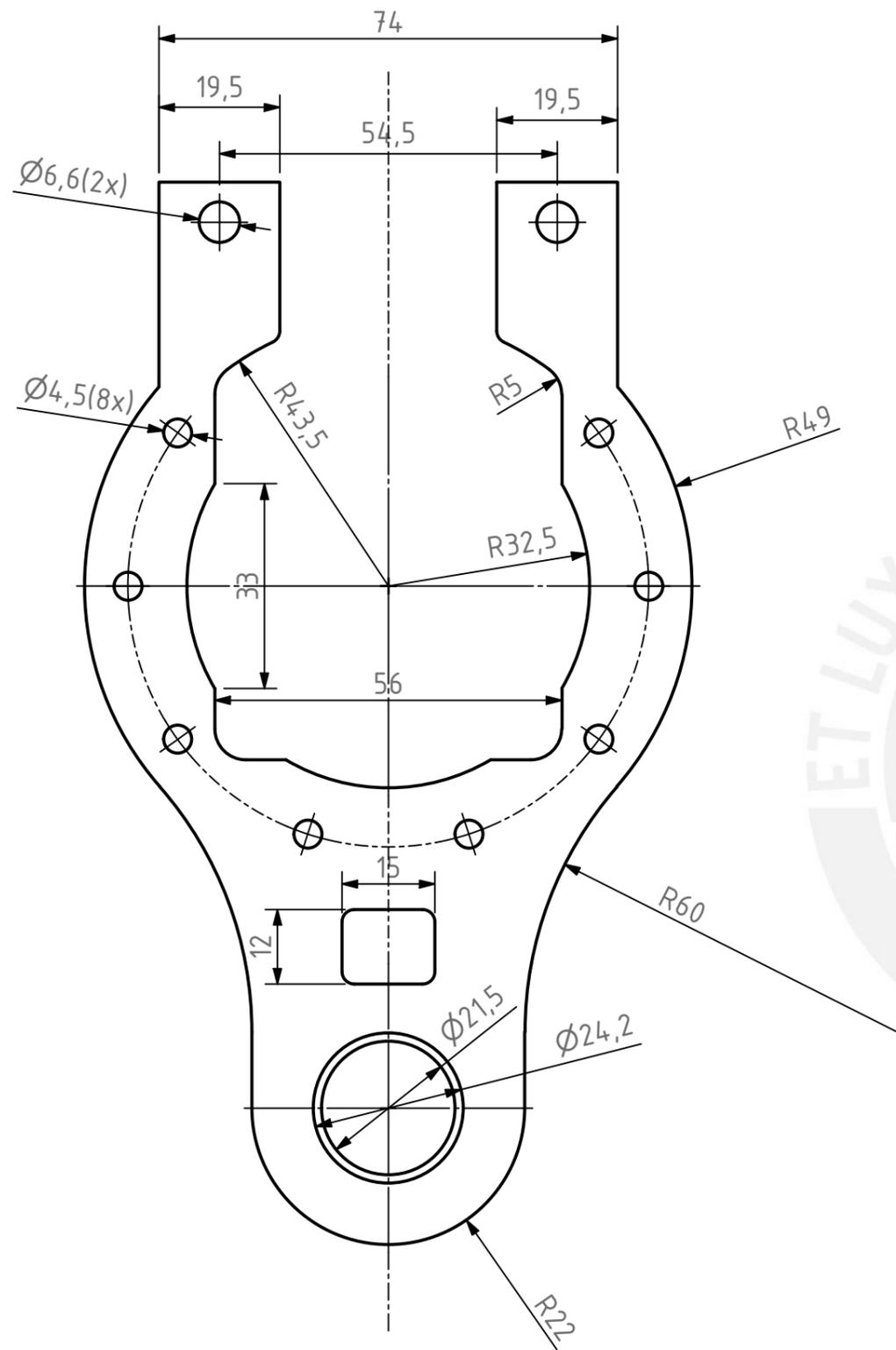


ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	$\pm 0,3\text{mm}$	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	CARCASA HOMBRO IZQ - D	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0013-D



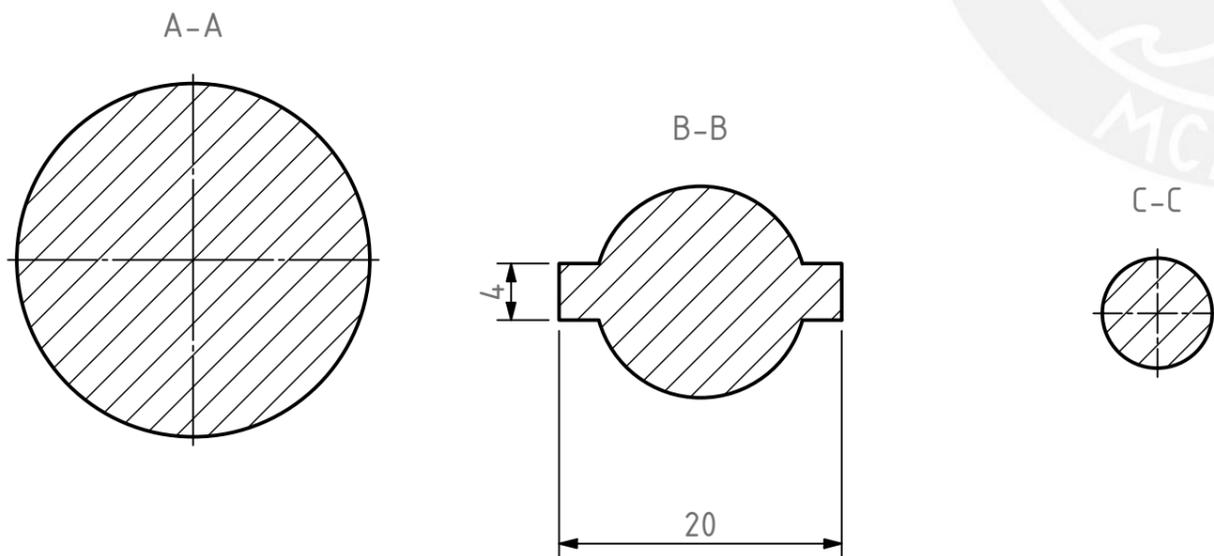
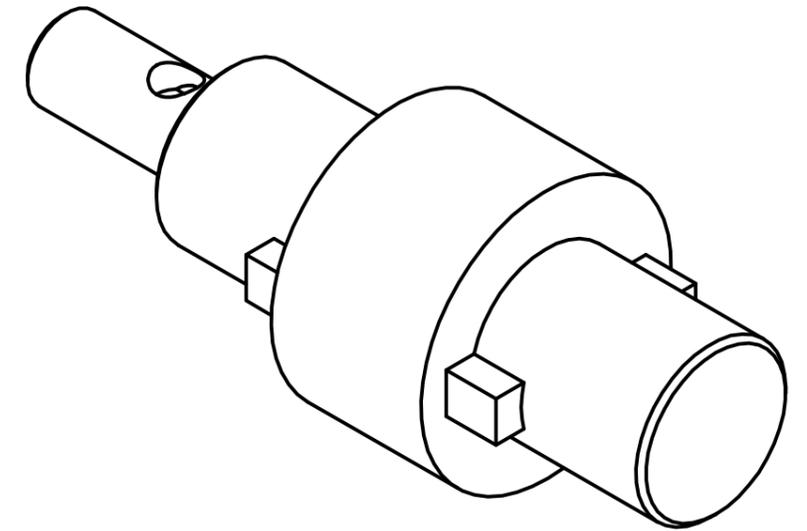
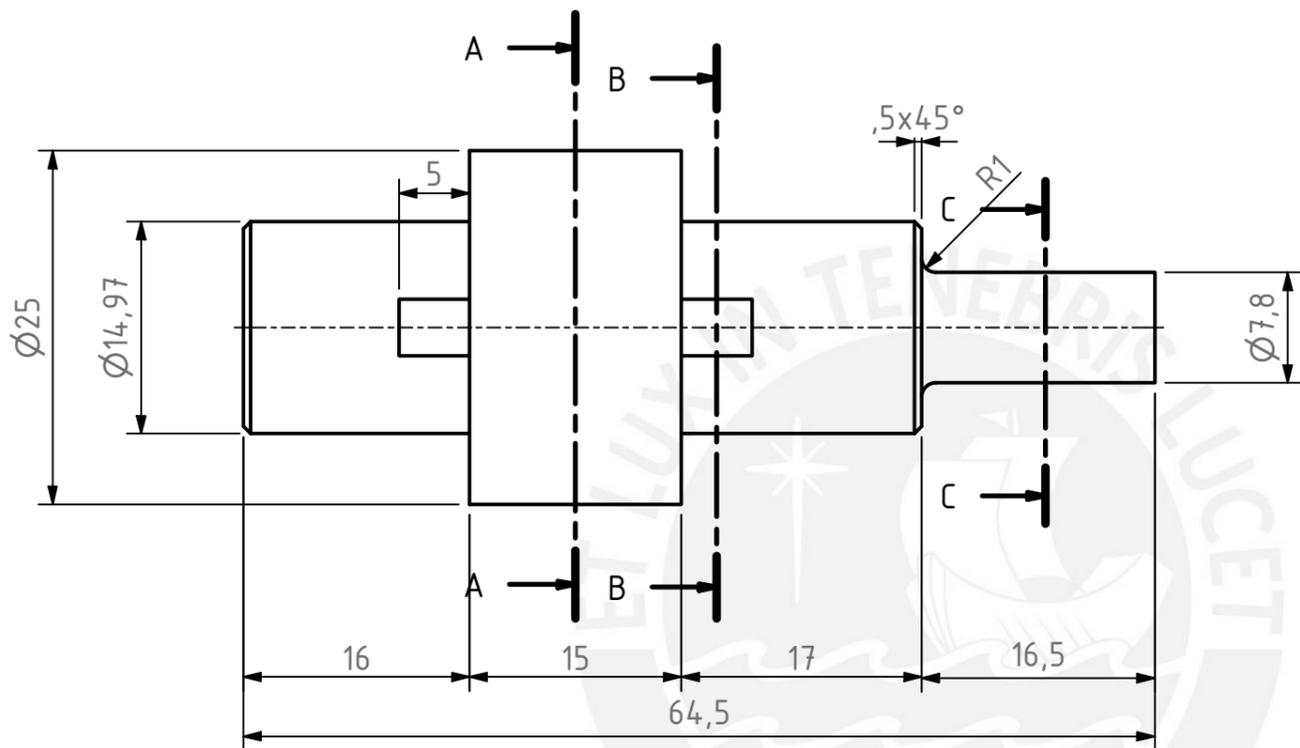
REF	CANT	DENOMINACION	DESIGNACION Y DATOS TECNICOS	OBSERVACIONES
14	1	Correa dentada	GT2-6mm	
13	4	Tuerca Hexagonal	ISO 4032 - M6	
12	1	Carcasa Brazo - B	D-0019-A3	
11	1	Carcasa Brazo - A	D-0018-A3	
10	22	Perno Button Allen	ISO 7380-1 - M4 x 10	
9	4	Perno Button Allen	ISO 7380-1 - M6 x 10	
8	2	Polea dentada	GT2 20T-sh8	
7	1	Acople polea-motor	D-0017-A4	
6	2	Rodamiento radial	SKF 61802	
5	1	Servomotor	RMD-X8-Pro	
4	2	Separador	D-0016-A4	
3	1	Eje Codo	D-0015-A3	
2	2	Placa soporte Brazo	D-0014-A3	
1	1	Acople Motor	D-0007-A3	

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA			
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - -HORARIO 10M1	ESCALA	
		ENSAMBLE BRAZO	
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30	
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO S-0003-A2	

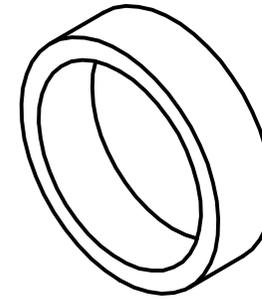
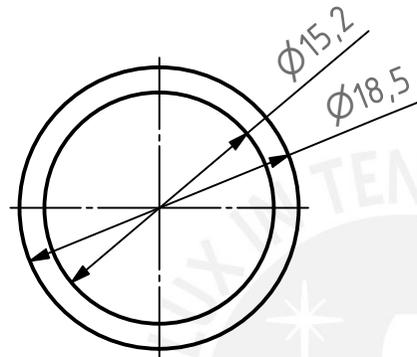


REDONDEOS NO INDICADOS R2

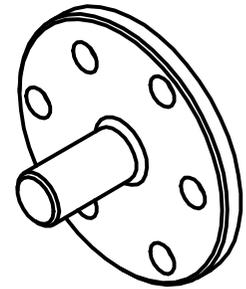
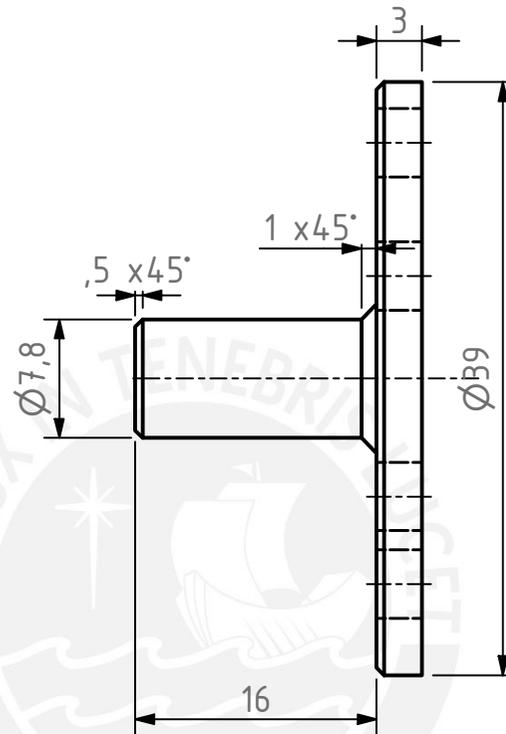
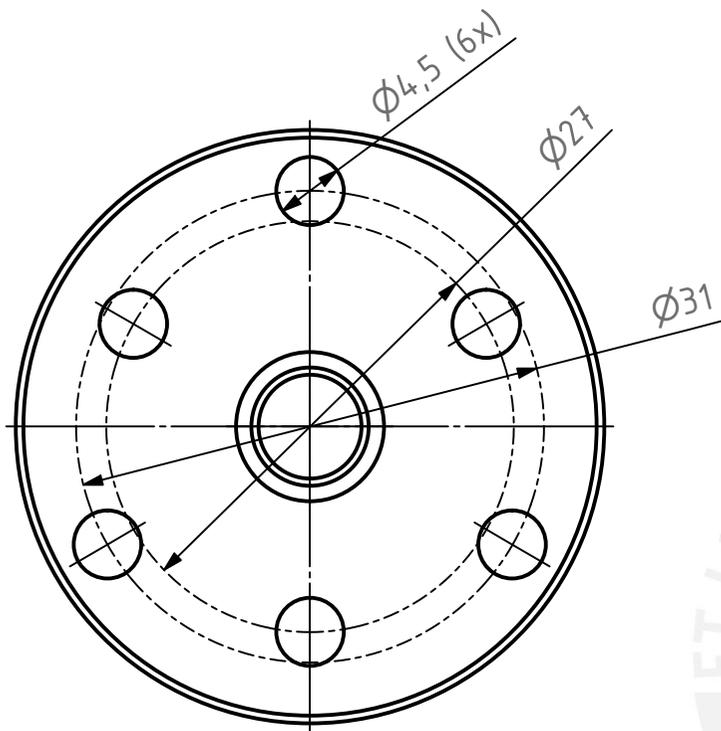
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	Placa Soporte Brazo	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO: D-0014-A3



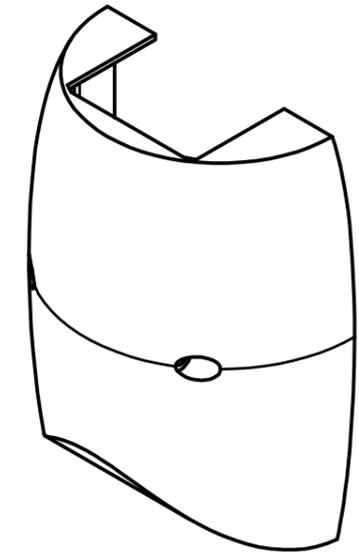
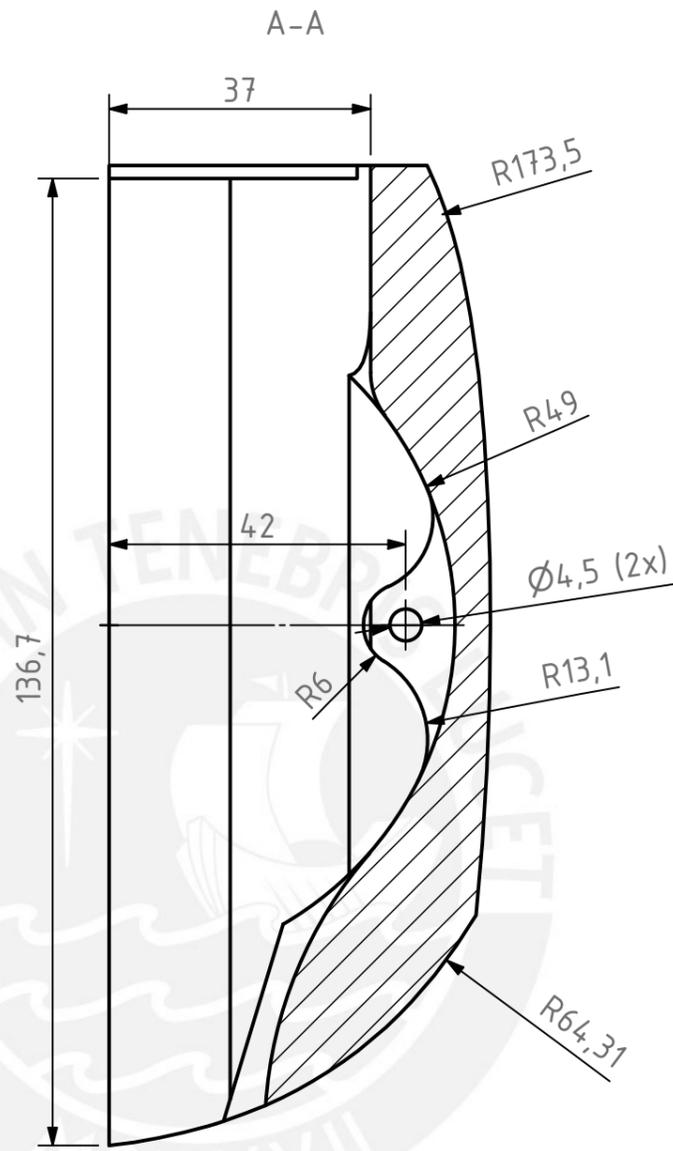
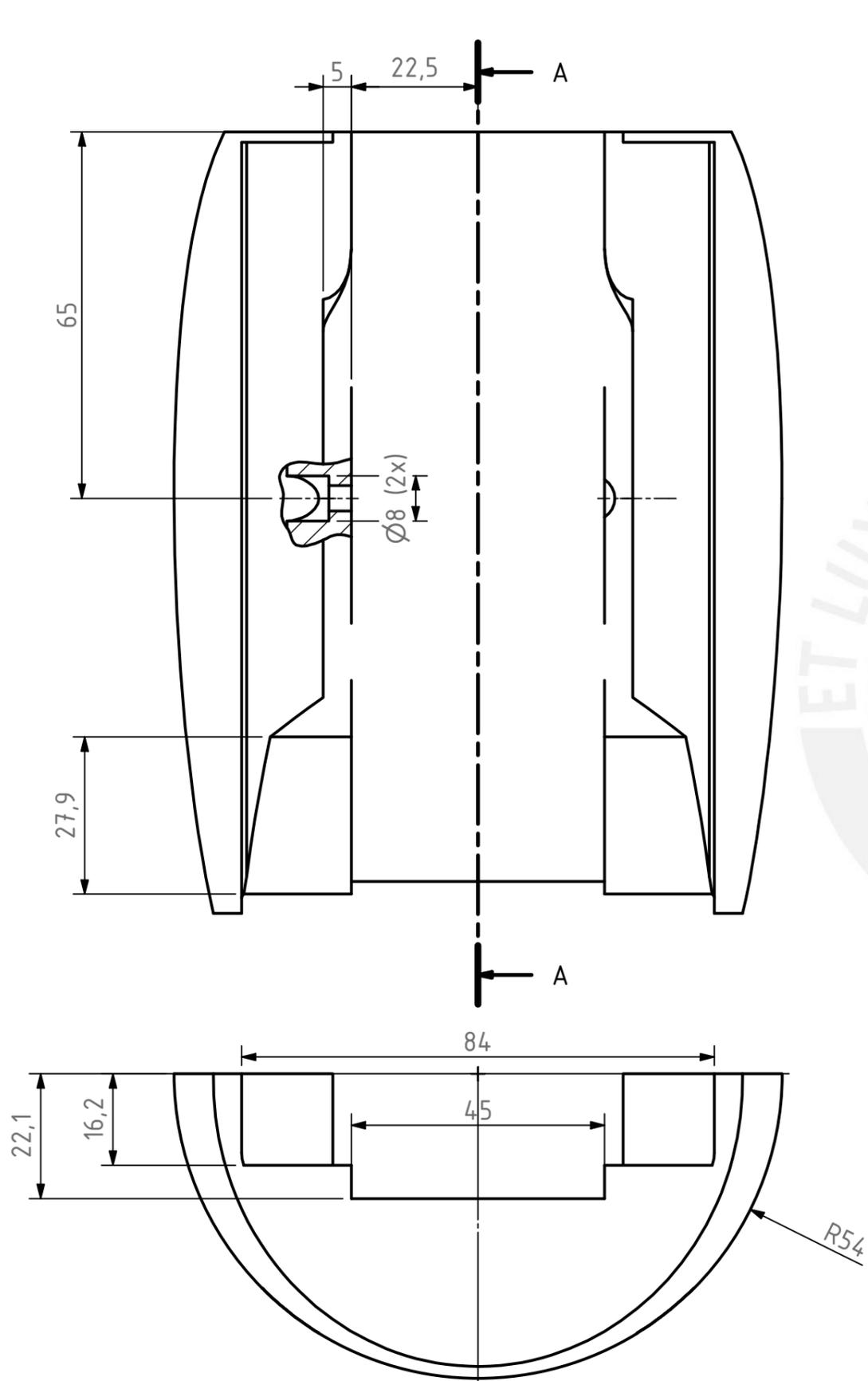
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	±0.03	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	EJE CODO	2:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO: D-0015-A3



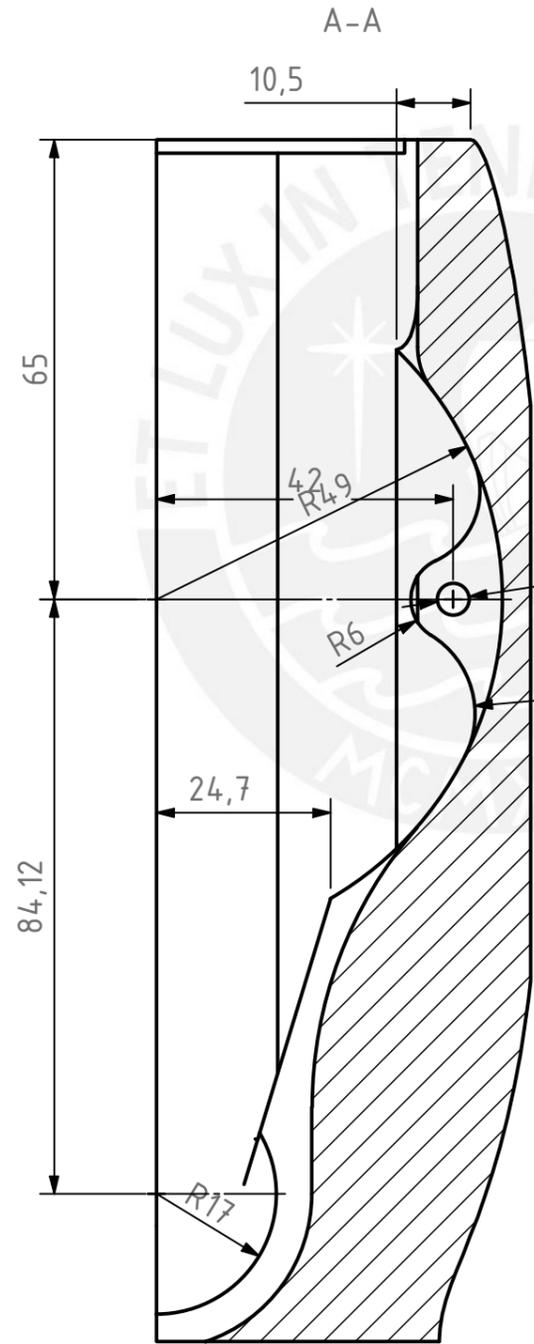
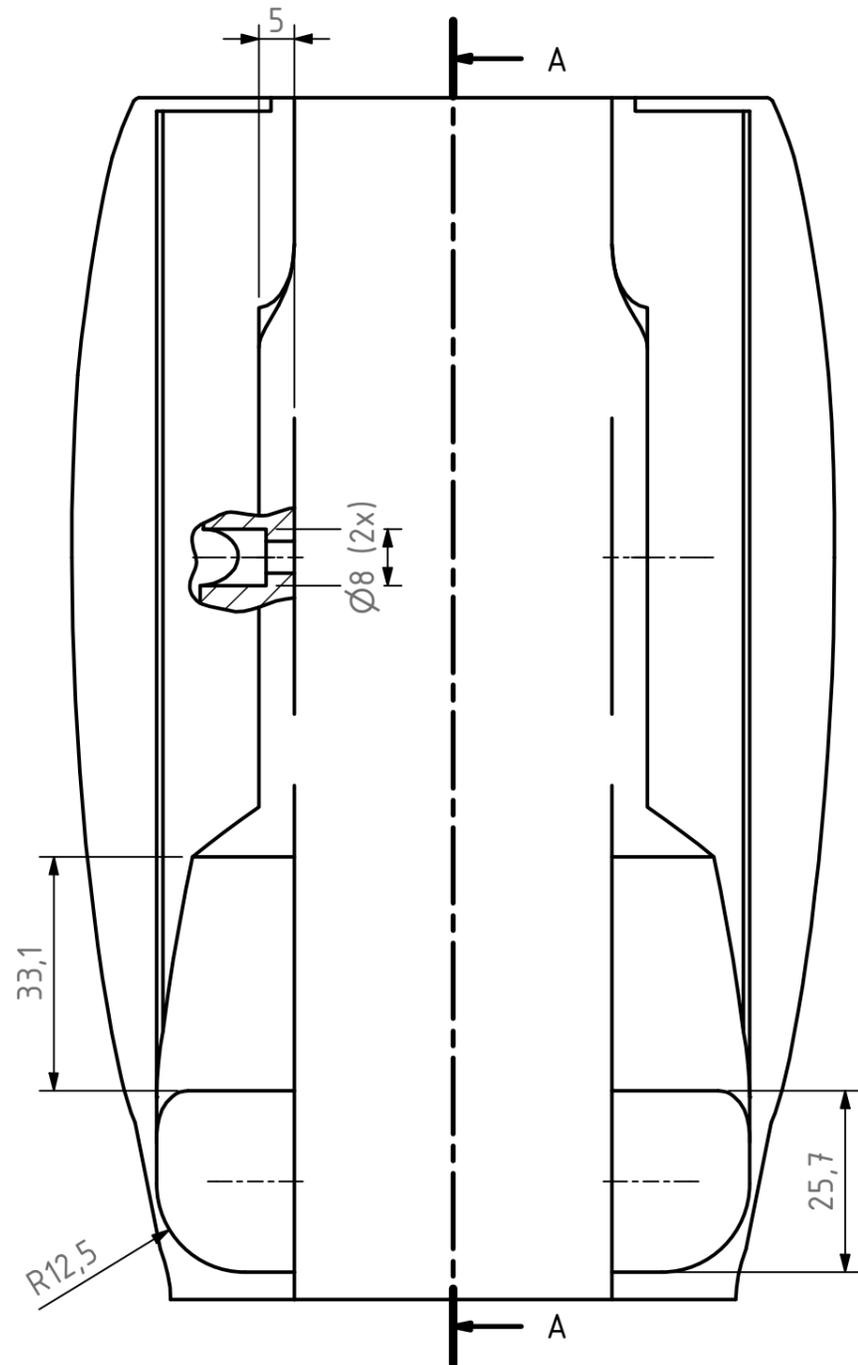
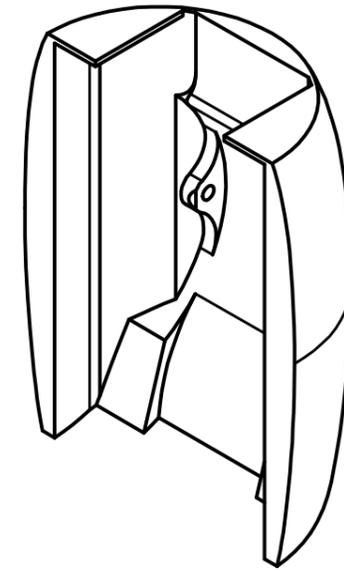
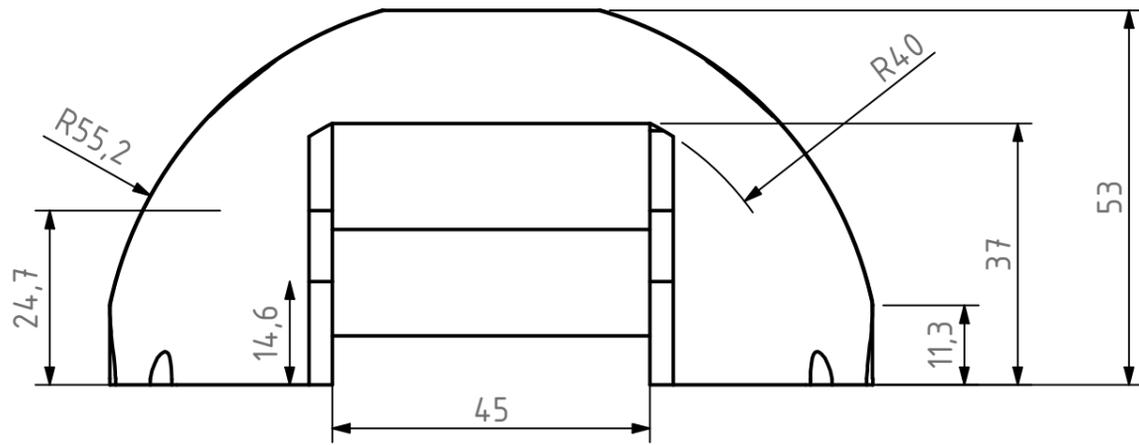
ACABADO SUPERFICIAL		TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
		$\pm 0,3\text{mm}$	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA			
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2	-	- HORARIO 10M1
	SEPARADOR		ESCALA
			2:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA		FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN		CÓDIGO D-0016-A3



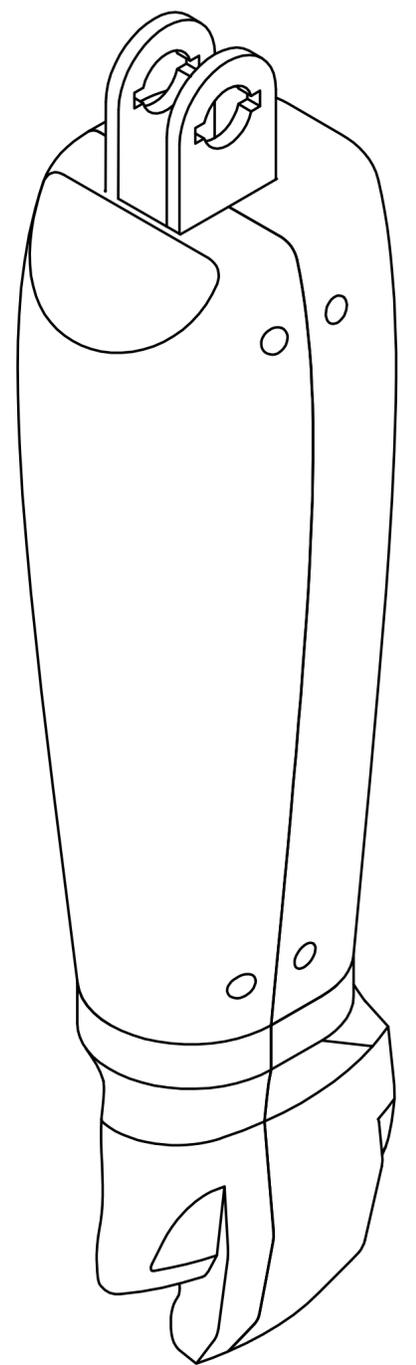
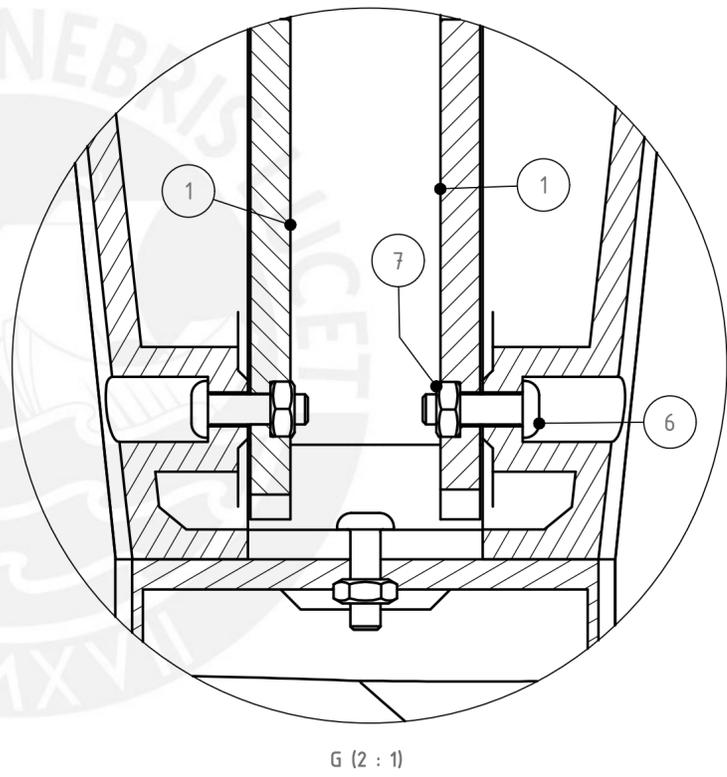
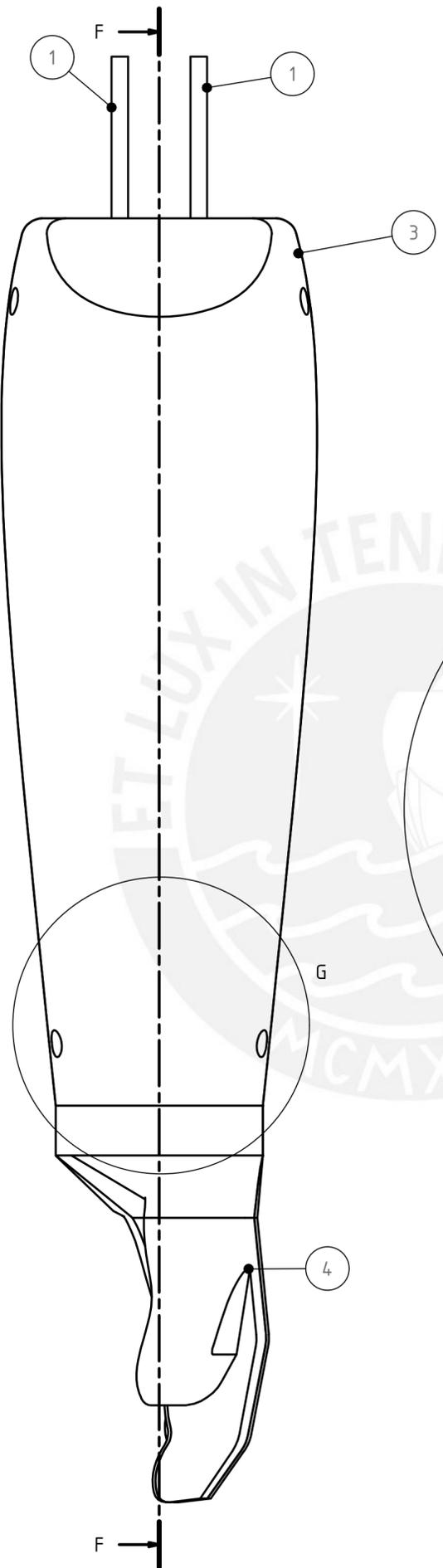
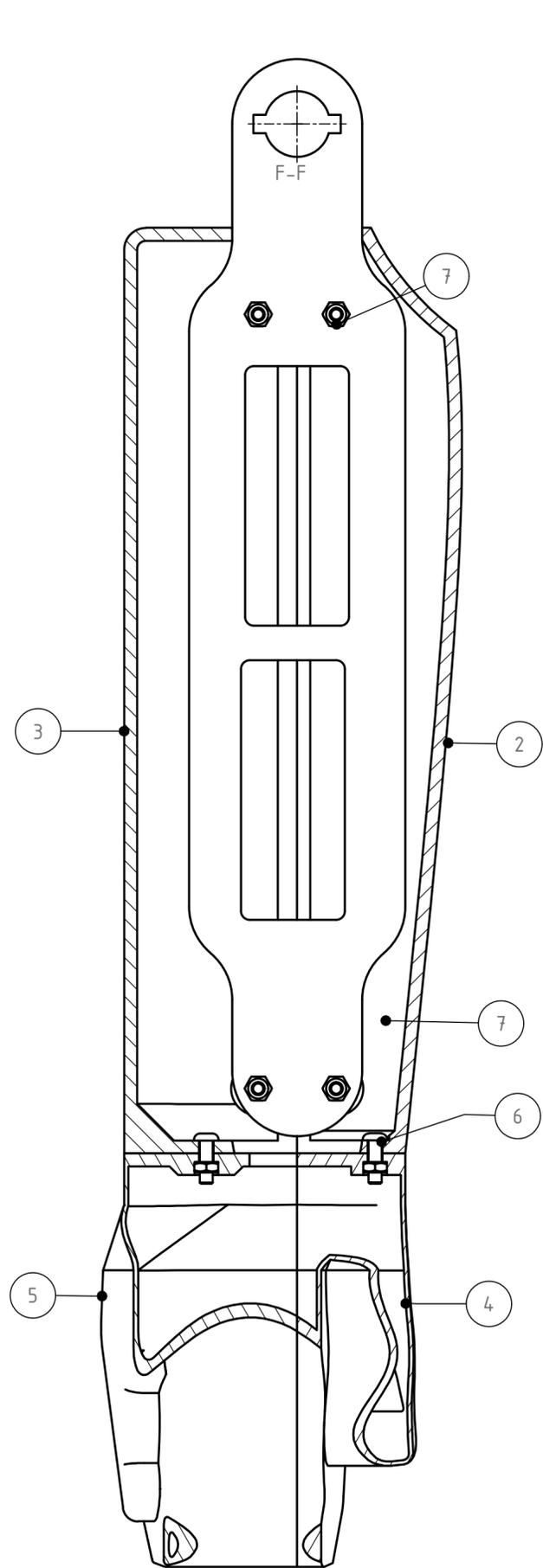
ACABADO SUPERFICIAL		TOLERANCIA GENERAL		MATERIAL
		± 0,3mm		Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA				
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - - HORARIO 10M1			ESCALA
	ACOPLE POLEA-MOTOR			2:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA			FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN			CÓDIGO D-0017-A4



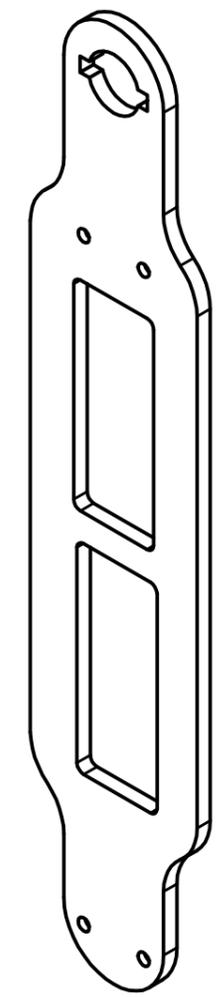
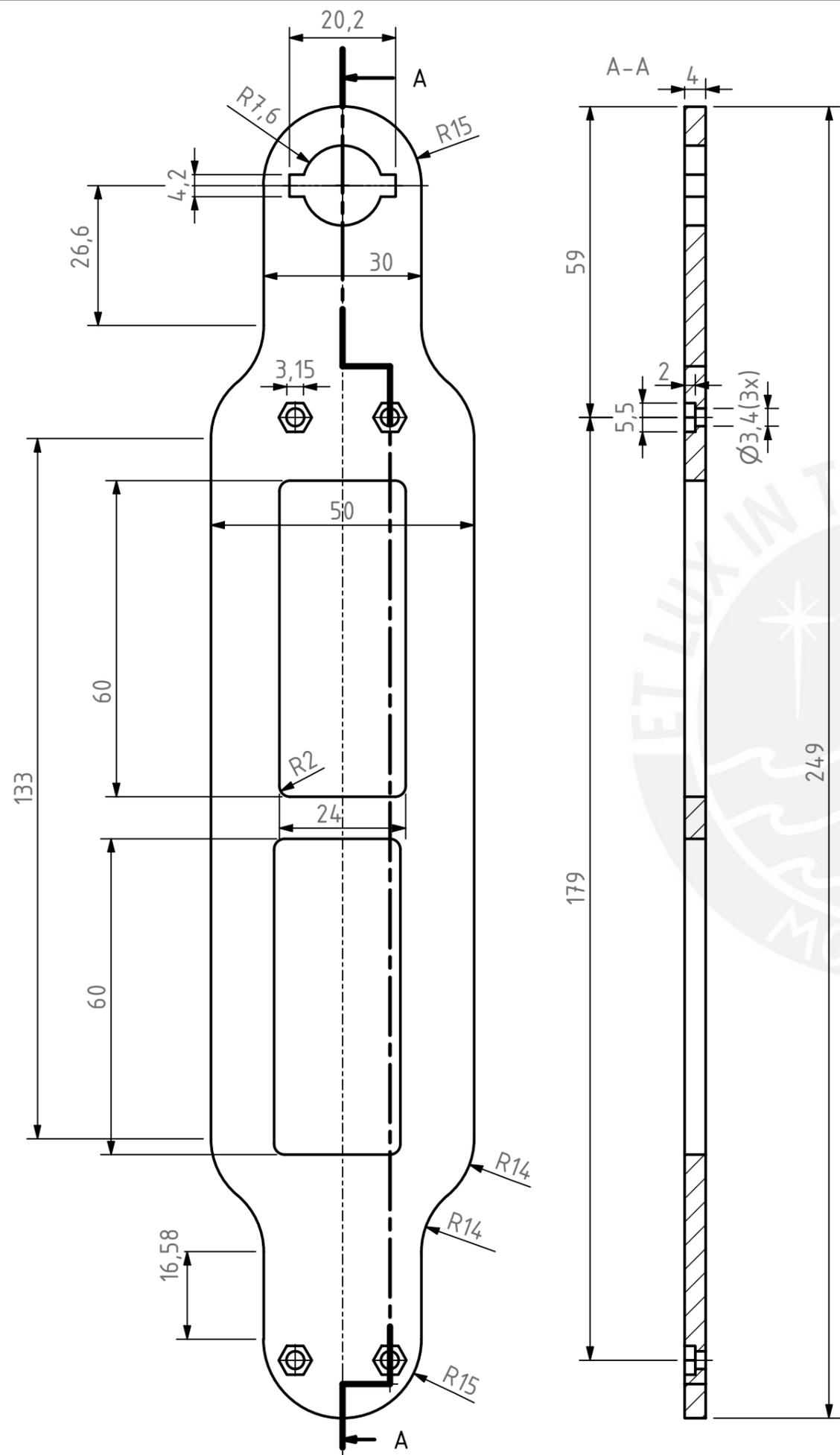
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	$\pm 0,3\text{mm}$	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	CARCASA BRAZO - A	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0018-A3



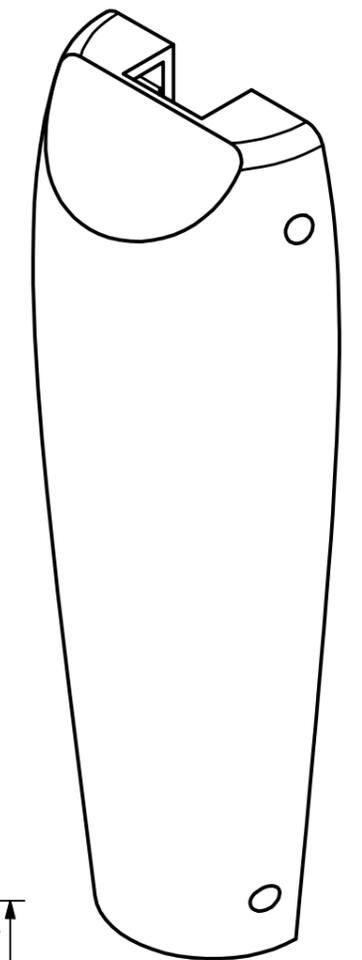
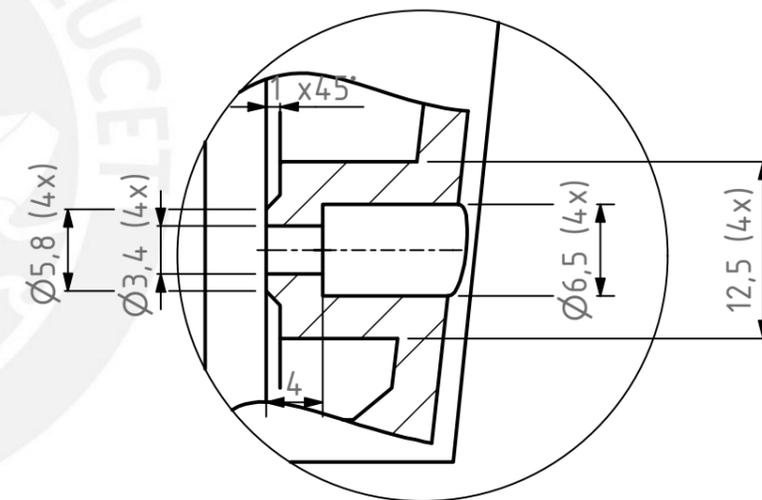
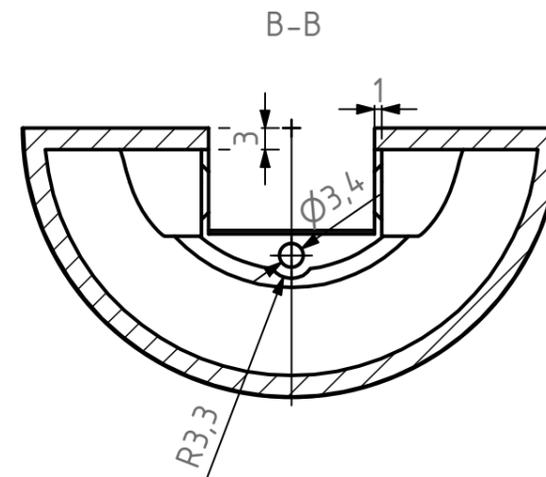
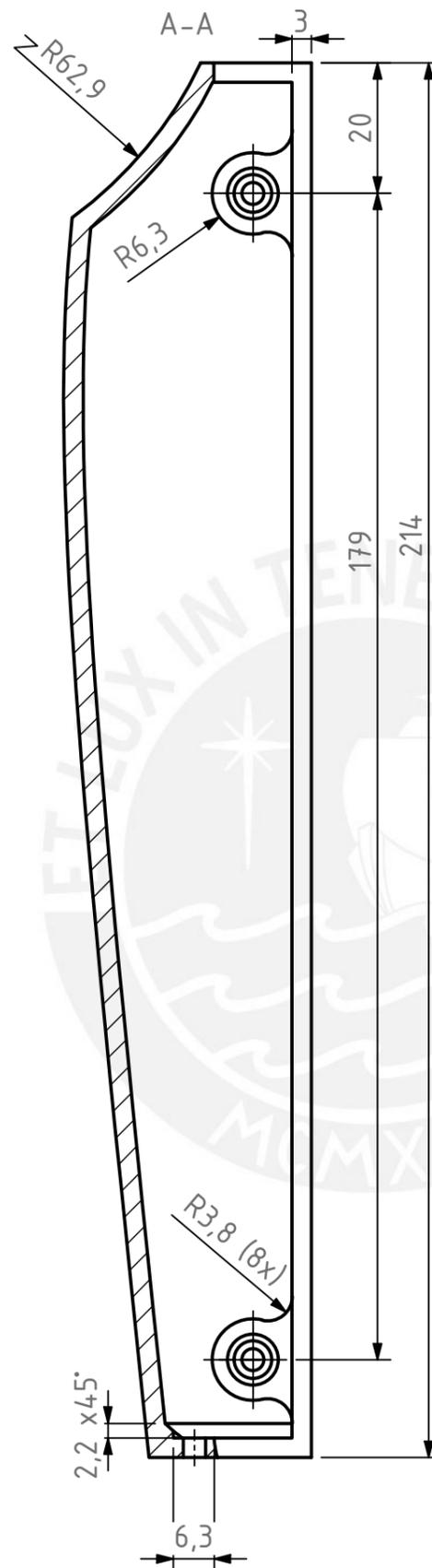
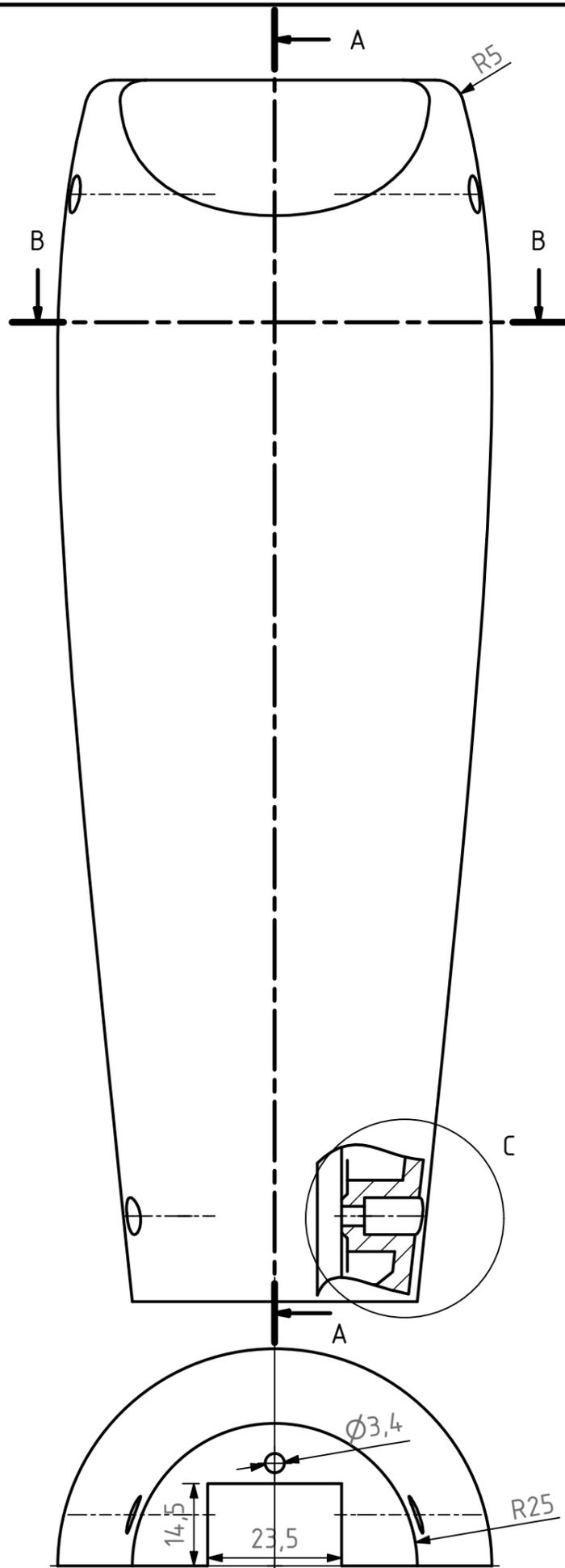
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	CARCASA BRAZO- B	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0019-A3



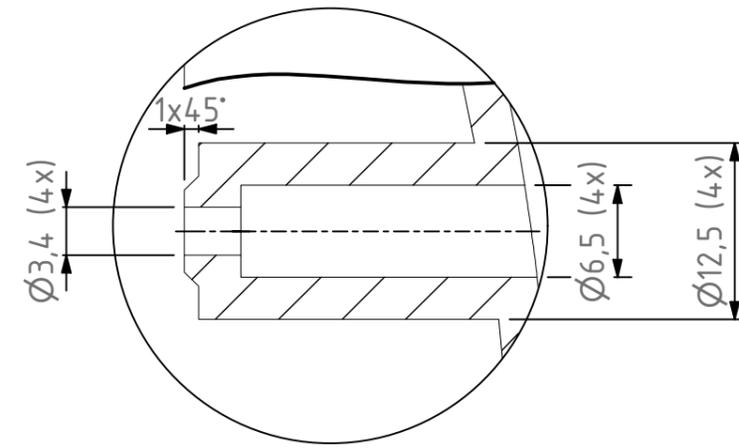
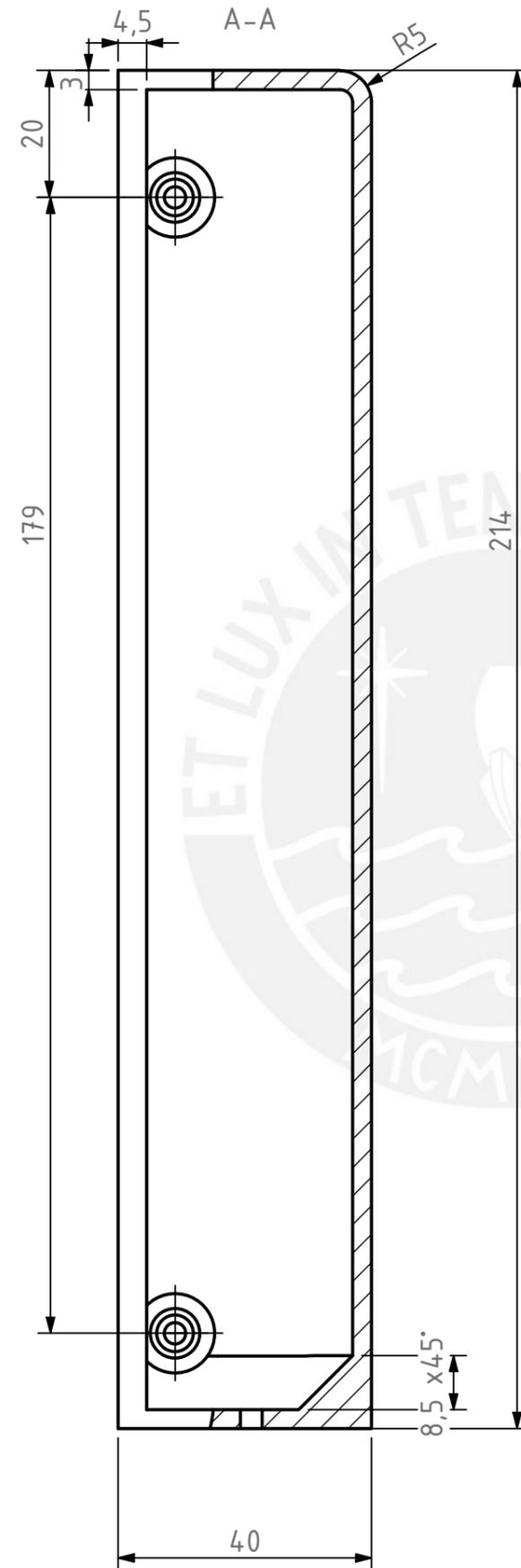
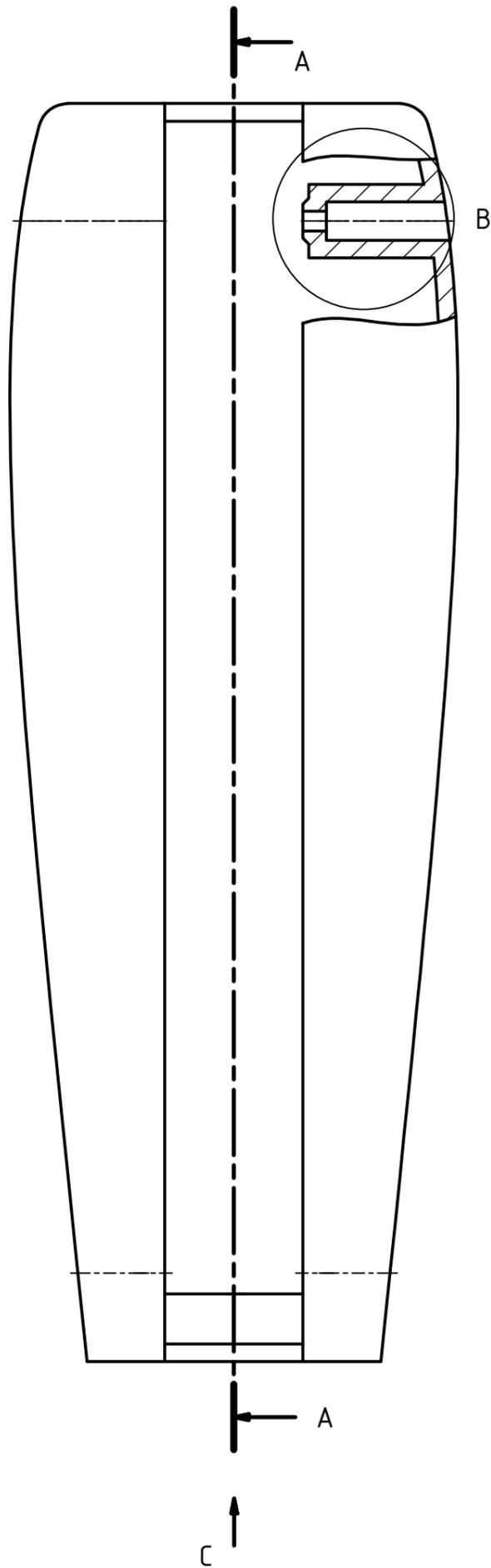
7	10	Tuerca Hexagonal	ISO 4032 - M3	
6	10	Perno Buffon Allen	ISO 7380-1 - M3 x 10	
5	1	Mano izquierda - B	D-0024-A3	
4	1	Mano izquierda - A	D-0023-A3	
3	1	Carcasa Antebrazo - B	D-0022-A3	
2	1	Carcasa Antebrazo - A	D-0021-A3	
1	2	Placa Soporte de Antebrazo	D-0020-A3	
REF	CANT	DENOMINACION	DESIGNACION Y DATOS TECNICOS	OBSERVACIONES
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA				
MÉTODO DE PROYECCIÓN		TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - - HORARIO 10M1		ESCALA
		ENSAMBLE ANTEBRAZO		1:1
20170133		URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA		FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:		ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN		CÓDIGO S-0004-A2



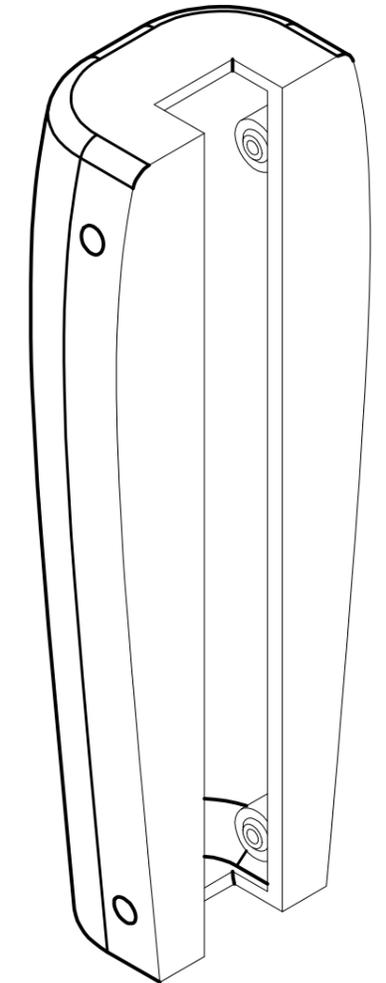
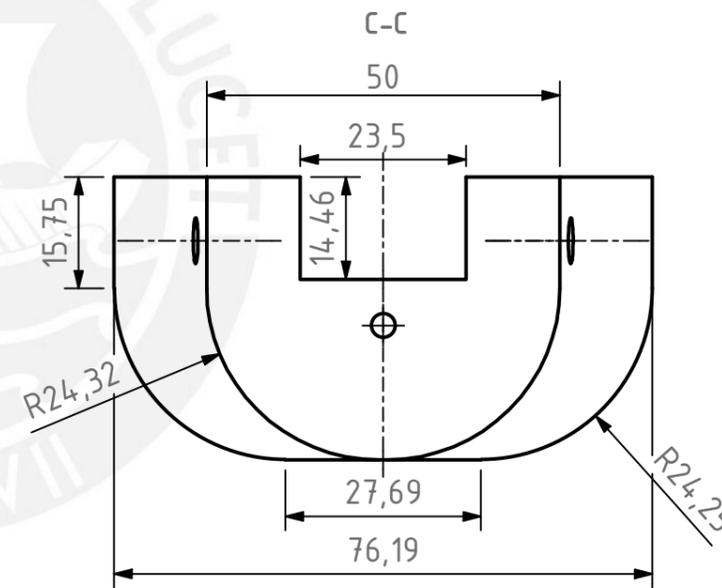
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	$\pm 0,3 \text{ mm}$	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	PLACA SOPORTE ANTEBRAZO	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO: D-0020-A3



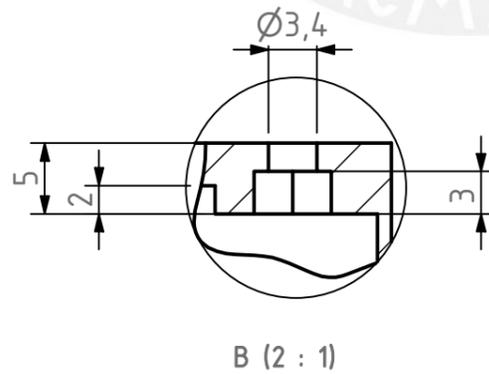
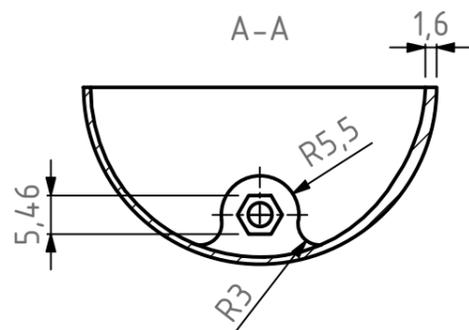
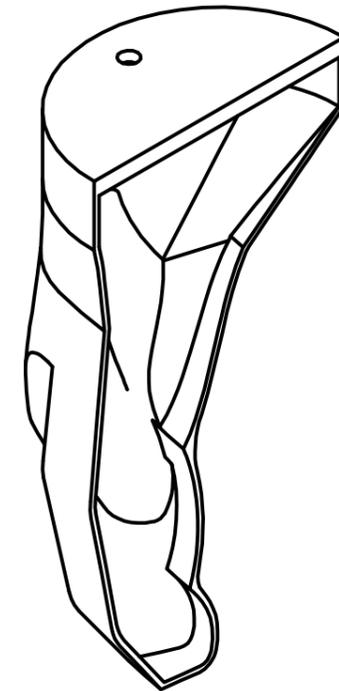
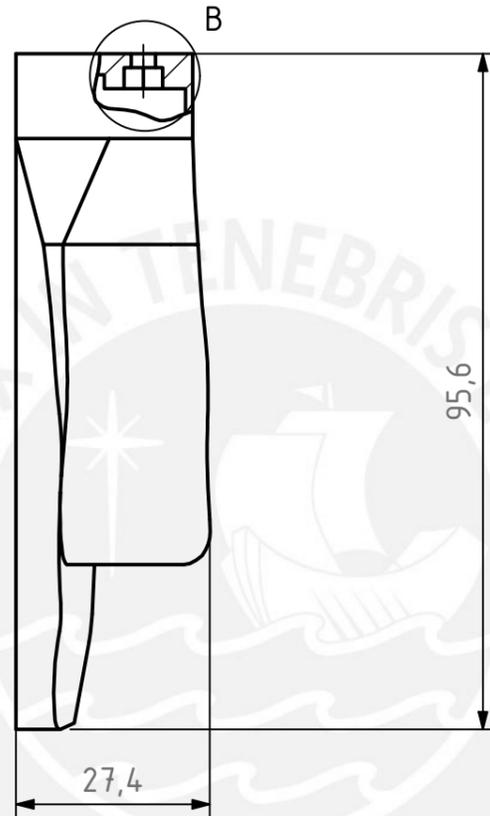
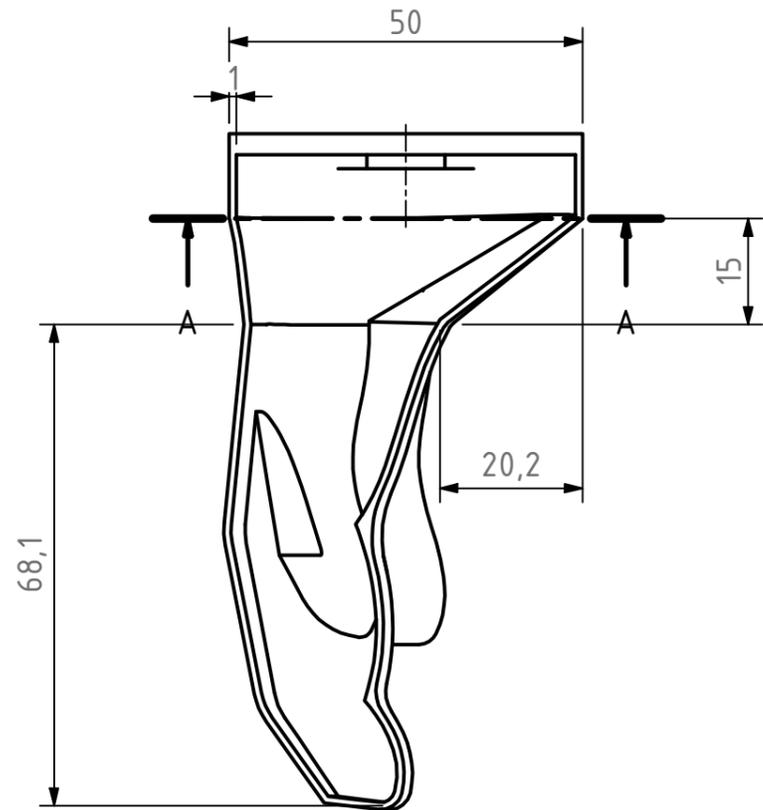
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	Carcasa antebrazo - a	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0021-A3



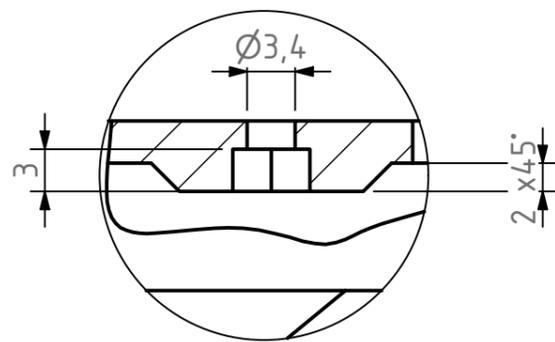
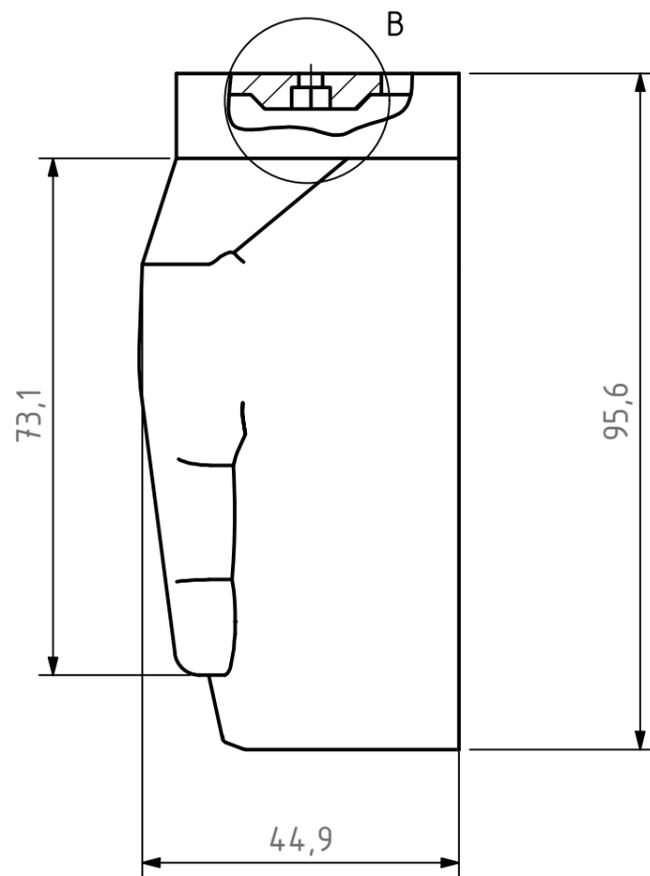
B (2 : 1)



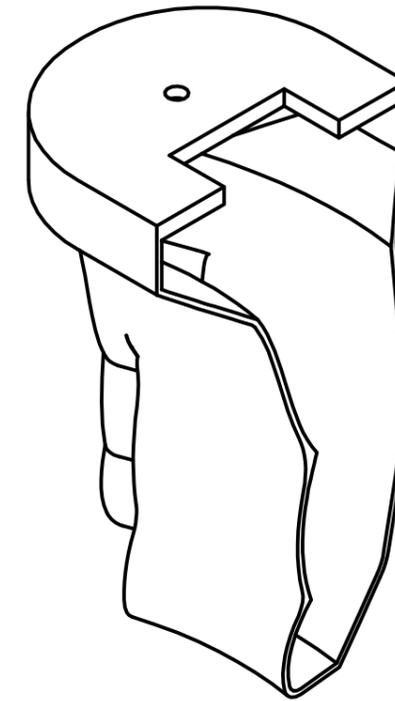
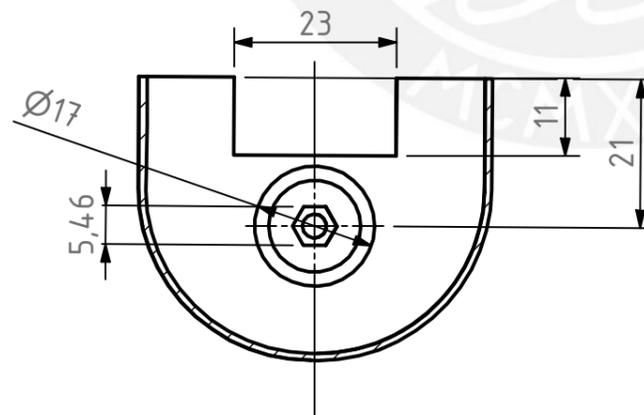
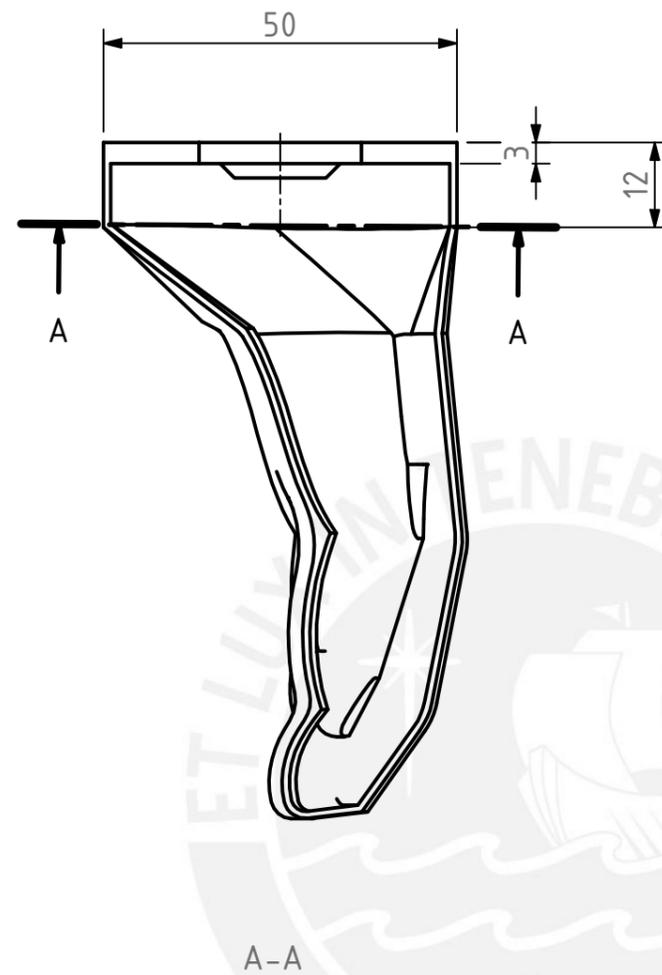
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	$\pm 0,3\text{mm}$	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	Carcasa antebrazo - b	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0022-A3



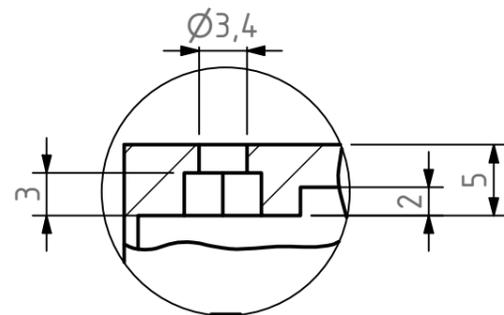
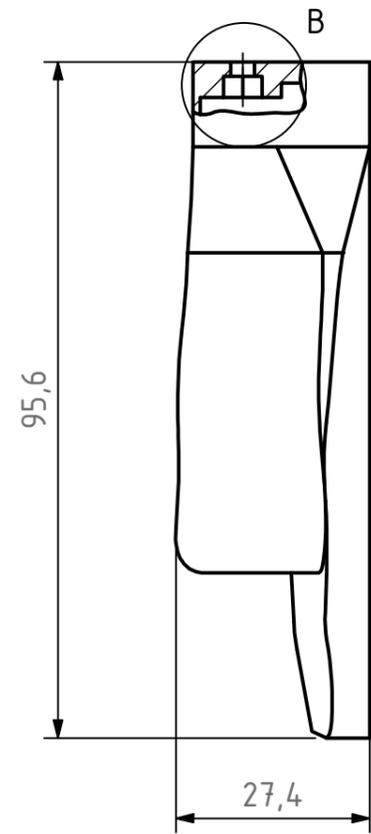
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	Mano izquierda - a	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0023-A3



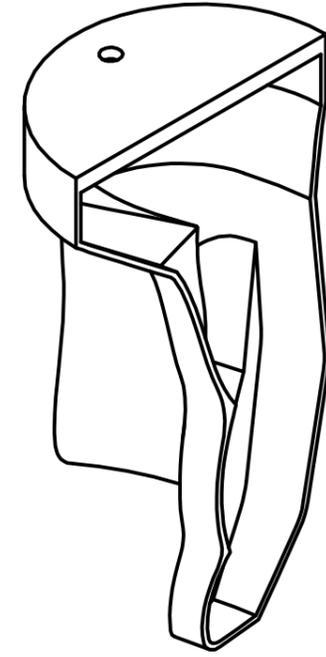
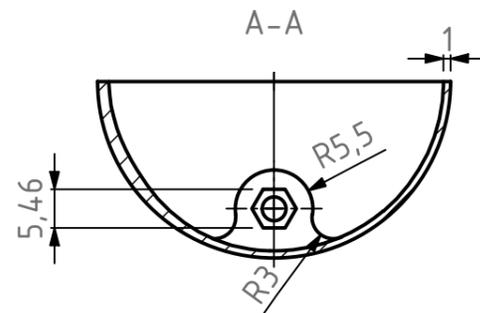
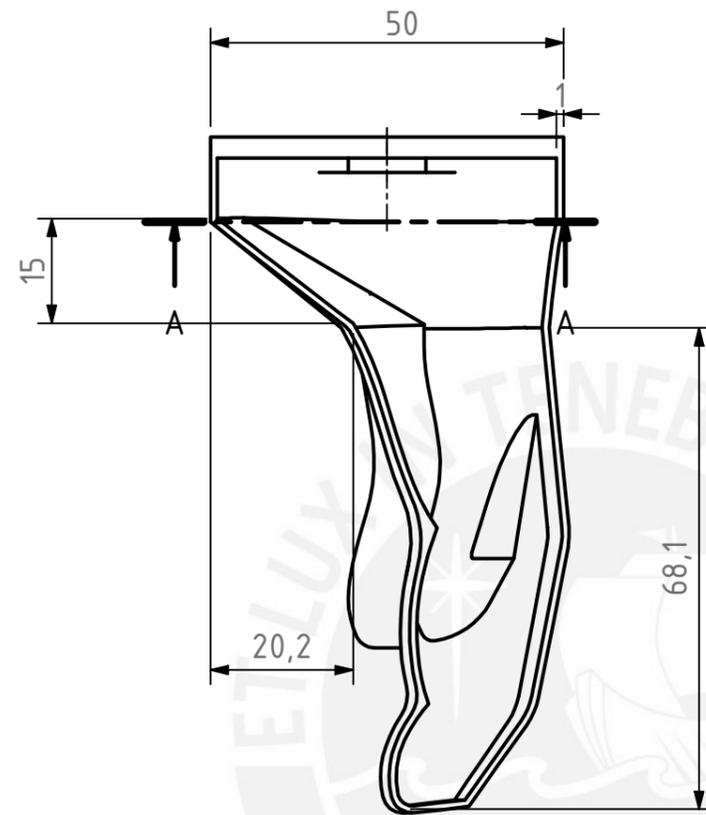
B (2 : 1)



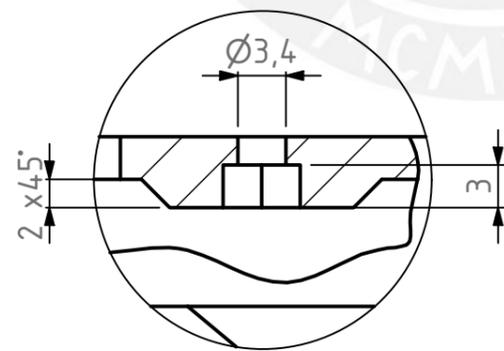
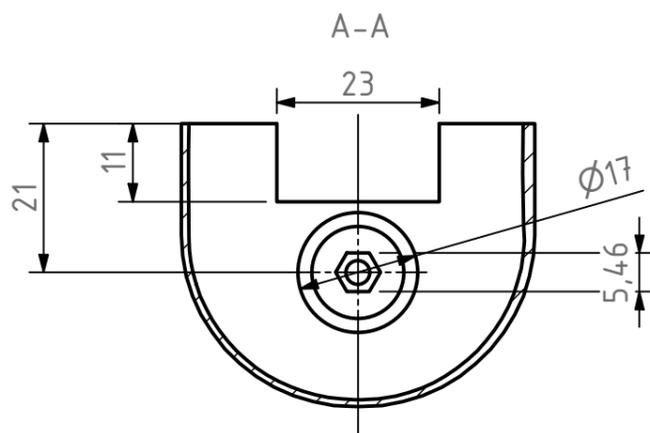
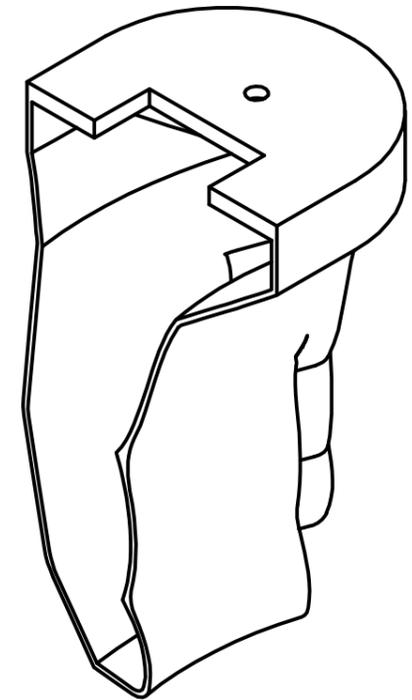
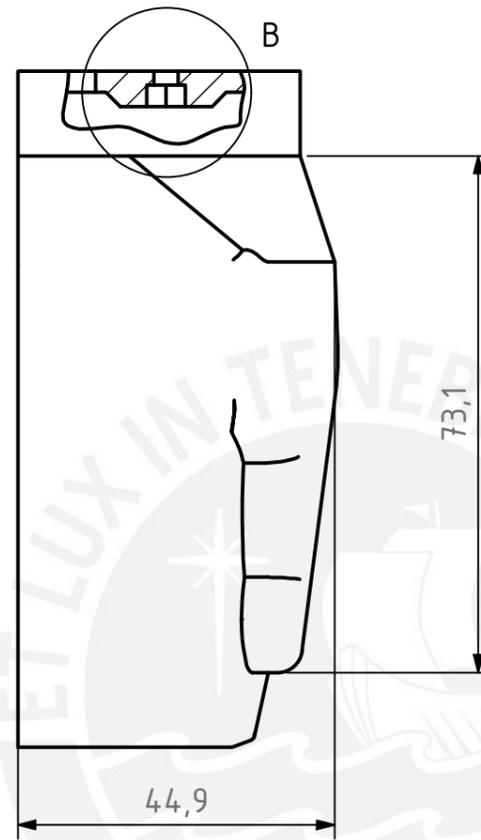
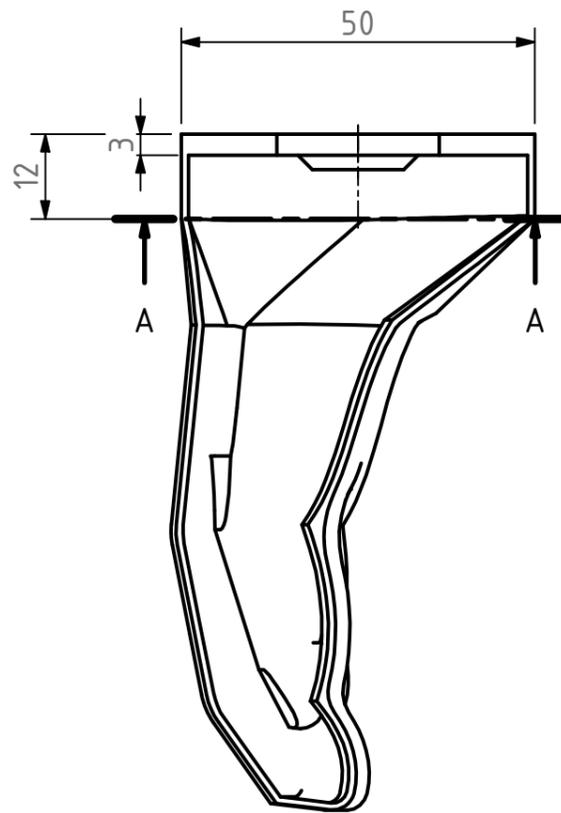
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	Mano izquierda - b	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0024-A3



B (2 : 1)

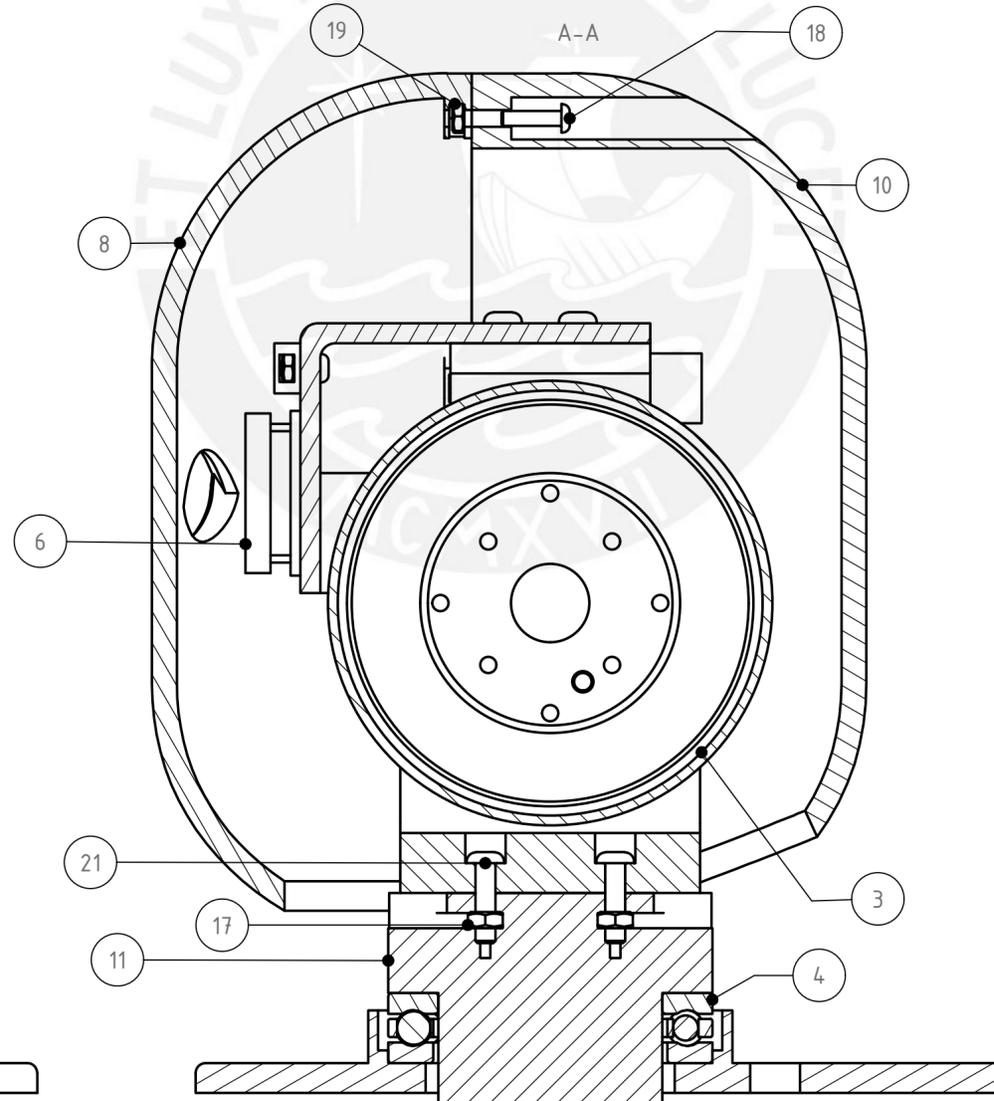
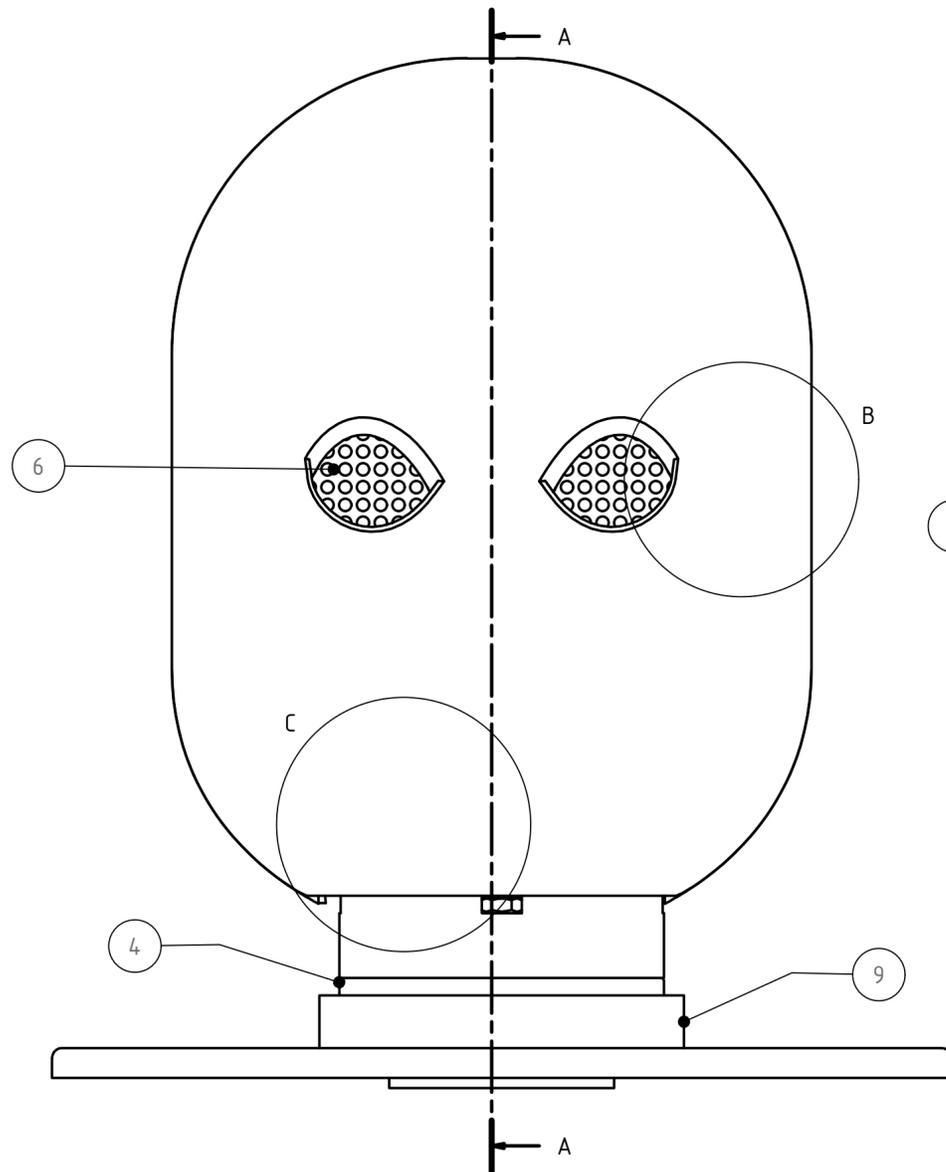
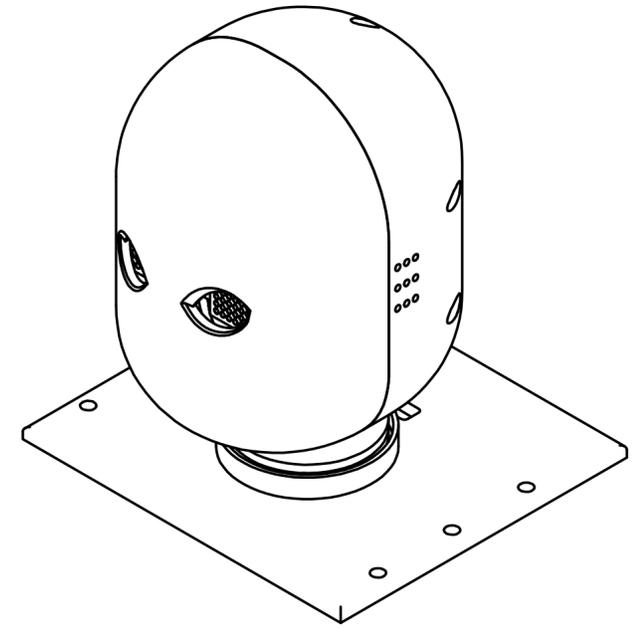
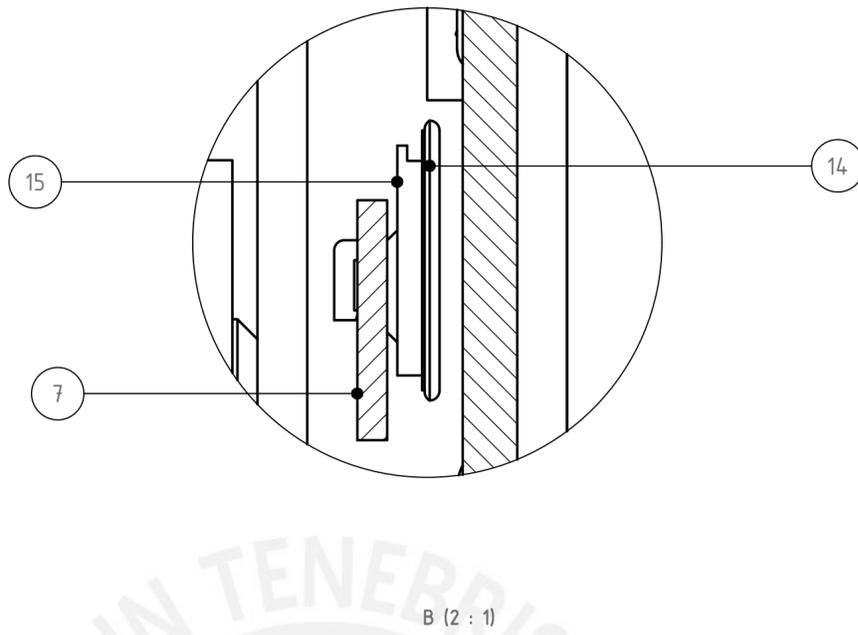
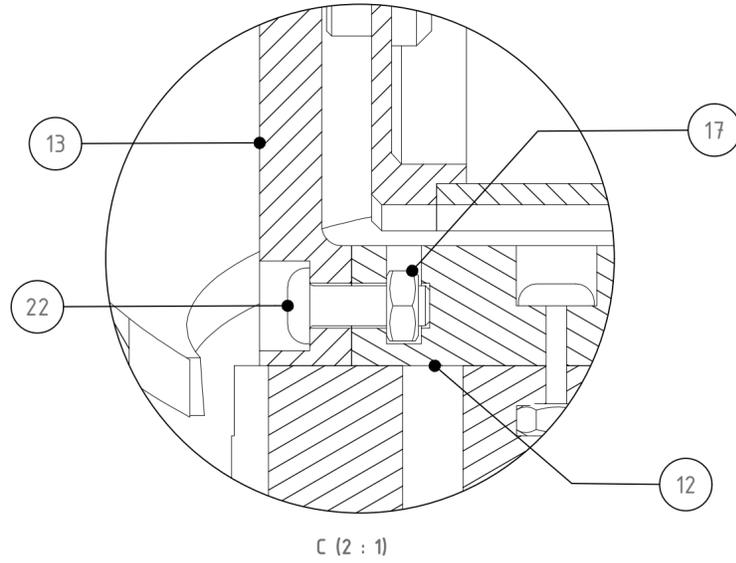


ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	Mano derecha - a	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0025-A3



B (2 : 1)

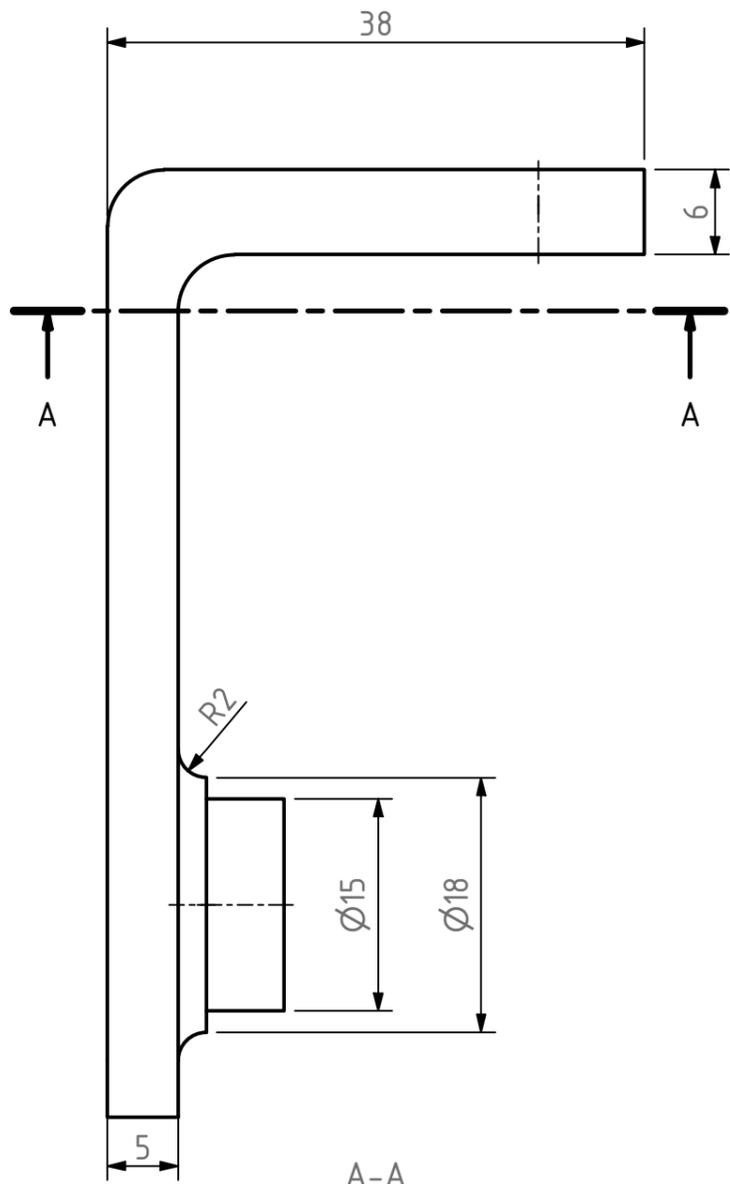
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	Mano derecha - b	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0026-A3



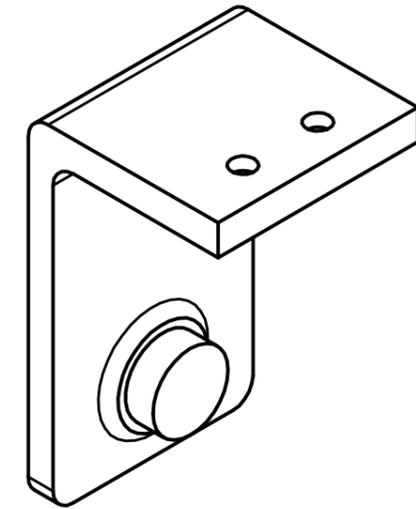
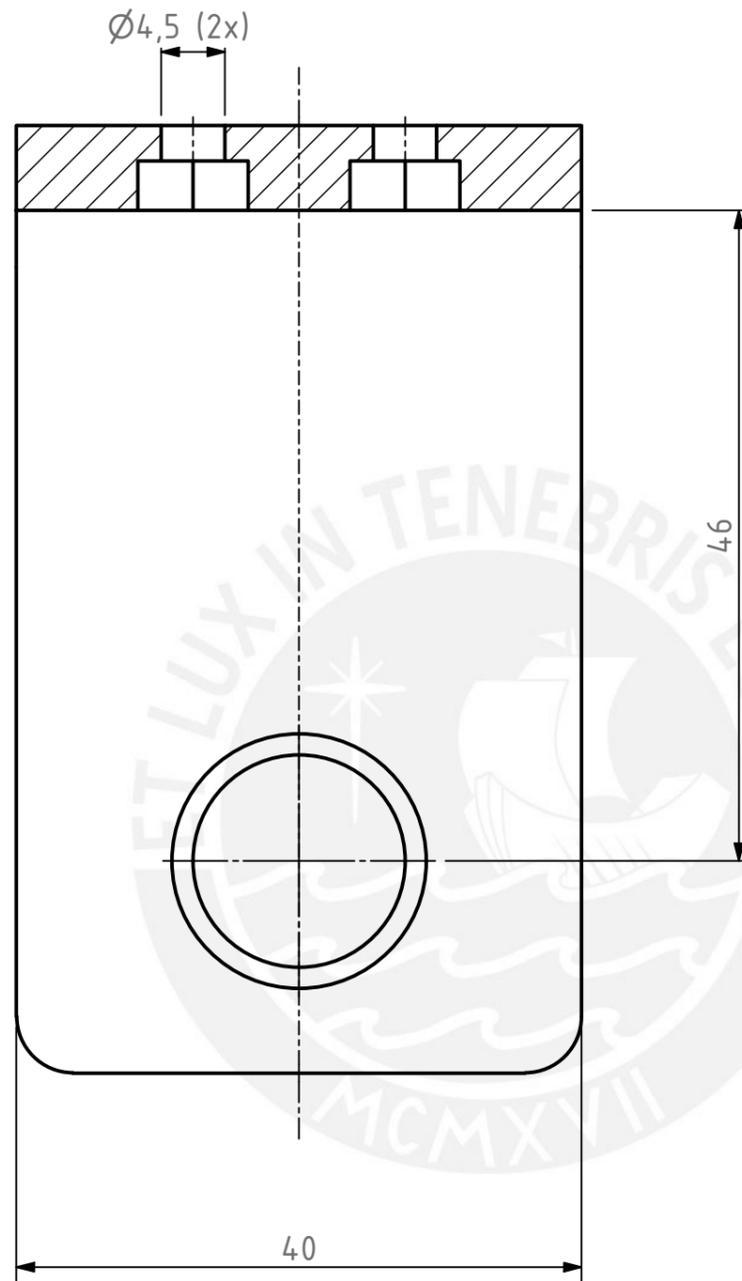
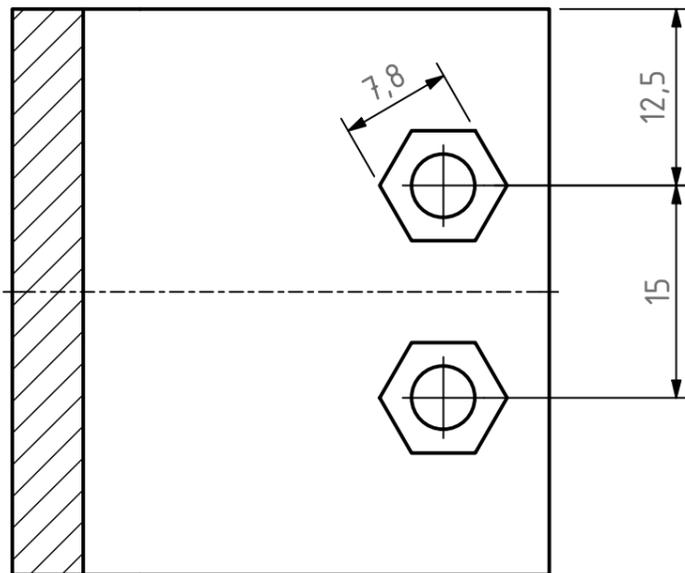
23	1	AcopleCabezaGDL2		
22	2	Perno Button Allen	ISO 7380-1 - M4 x 12	
21	4	Perno Button Allen	ISO 7380-1 - M4 x 16	
20	2	Perno Button Allen	ISO 7380-1 - M3 x 8	
19	7	Tuerca hexagonal	ISO 4032 - M3	
18	5	Perno Button Allen	ISO 7380-1 - M3 x 12	
17	10	Tuerca hexagonal	ISO 4032 - M4	
16	4	Perno Button Allen	ISO 7380-1 - M4 x 10	
15	2	Clip de Parlante	D-0035-A3	
14	2	Parlante	1 W / 8 Ohm / 28mm	
13	1	Soporte Motor2 - B	D-0034-A3	
12	1	Soporte Motor2 - A	D-0033-A3	
11	1	Acople rodamiento de Cabeza	D-0032-A3	
10	1	Cabeza Exterior - B	D-0031-A3	
9	1	Placa Soporte Cabeza	D-0007-A3	
8	1	Cabeza Exterior - A	D-0030-A3	
7	1	Cabeza Interior	D-0029-A3	
6	2	Matriz Led 8x8	MAX7219	
5	2	Rodamiento Lineal	SKF 61802	
4	1	Rodamiento Axial	SKF 51109	
3	1	Servomotor	RMD-S9015	
2	1	Acople L - B	D-0028-A3	
1	1	Acople L - A	D-0027-A3	
REF	CANT	DENOMINACION	DESIGNACION Y DATOS TECNICOS	OBSERVACIONES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - -HORARIO 10M1	ESCALA
		1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO S-0005-A2

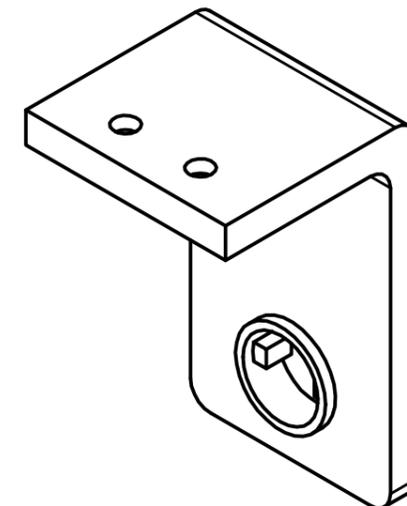
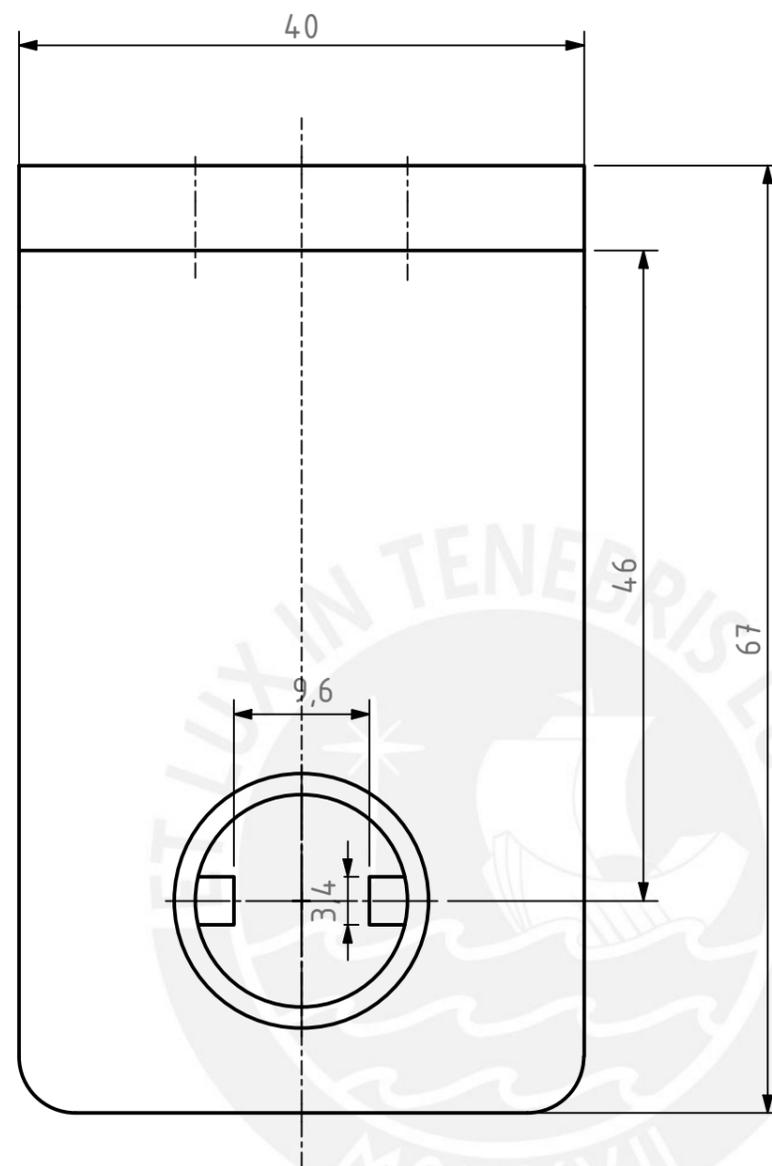
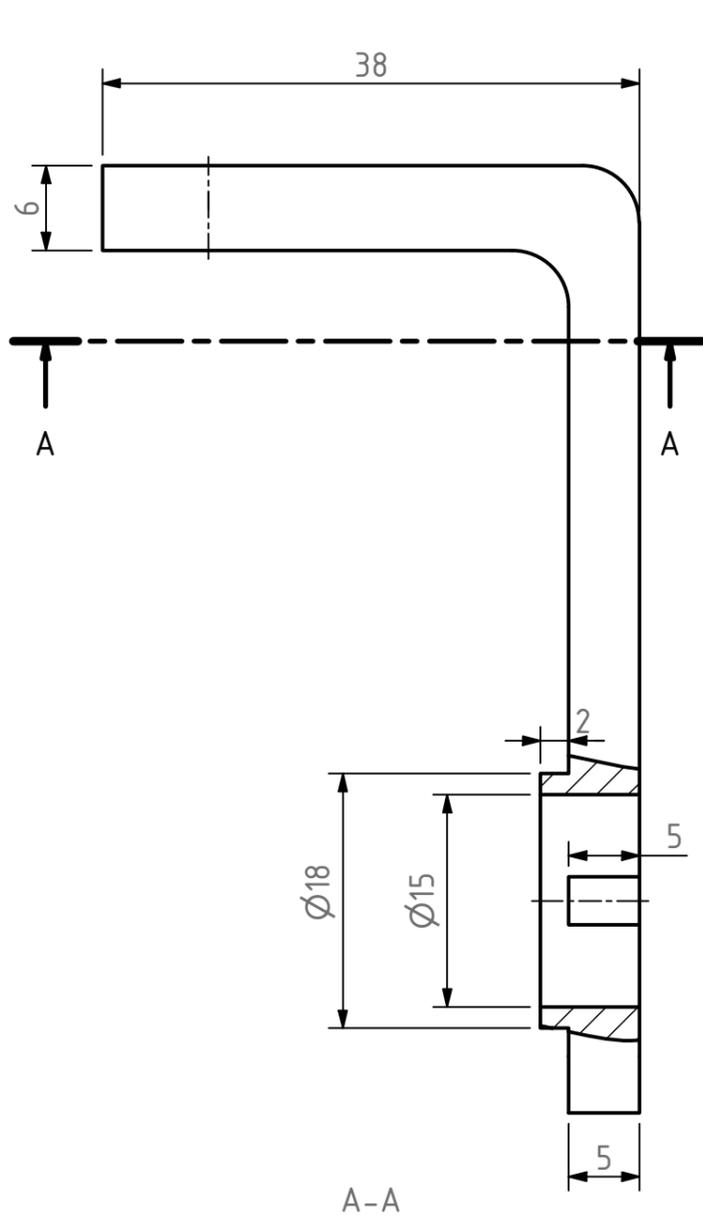


A-A

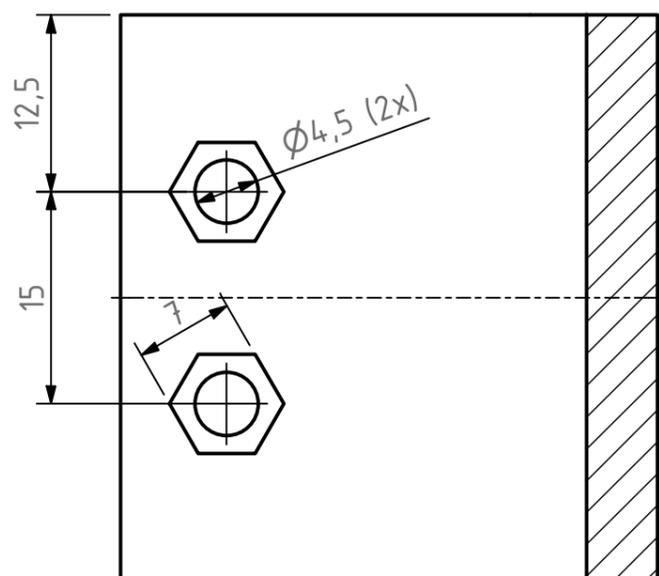


REDONDEOS NO INDICADOS R4

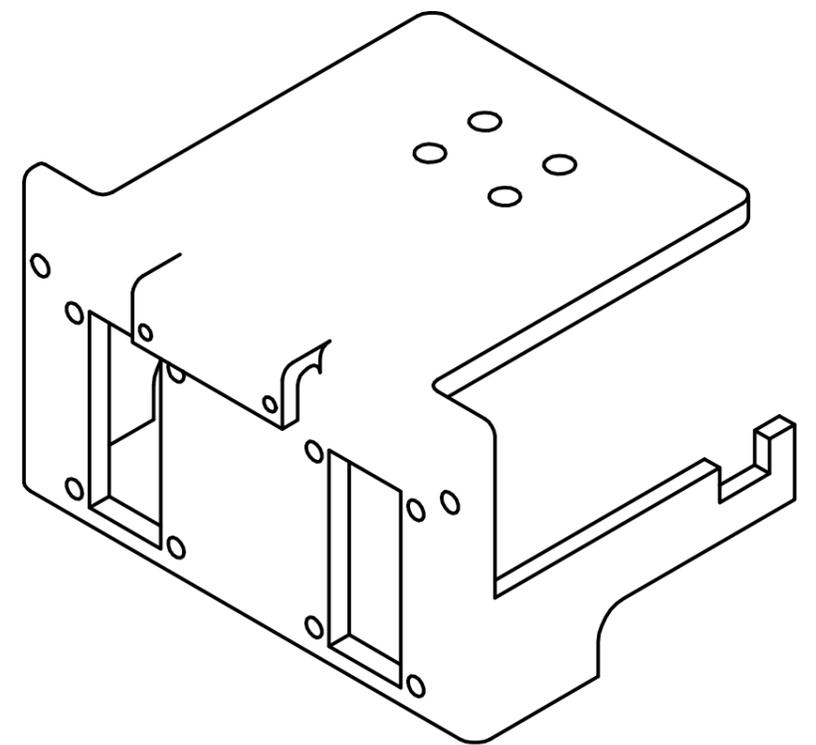
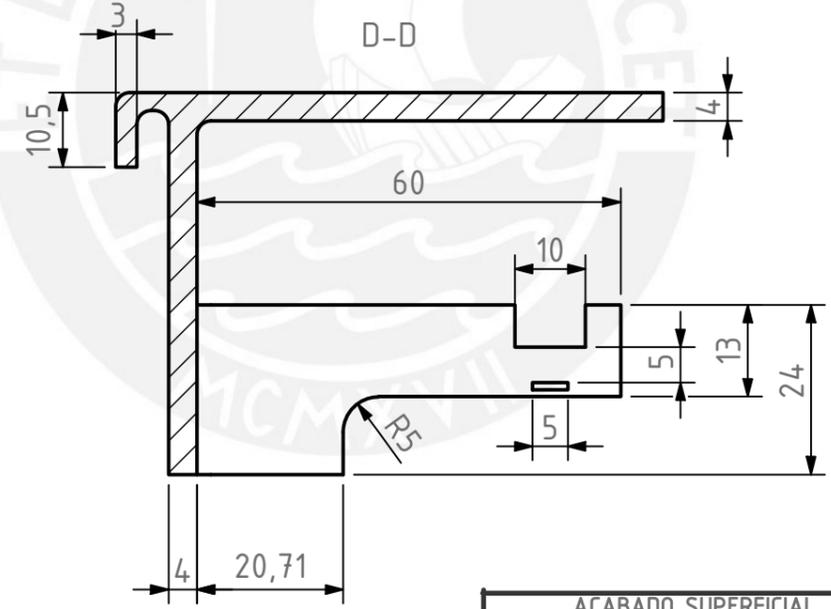
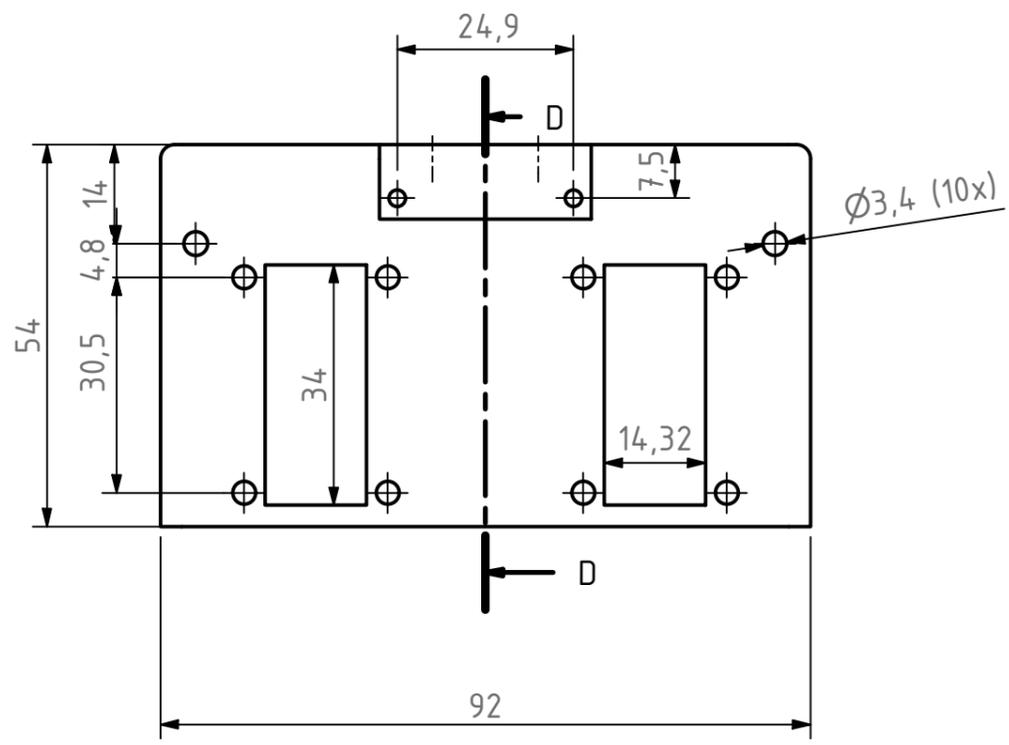
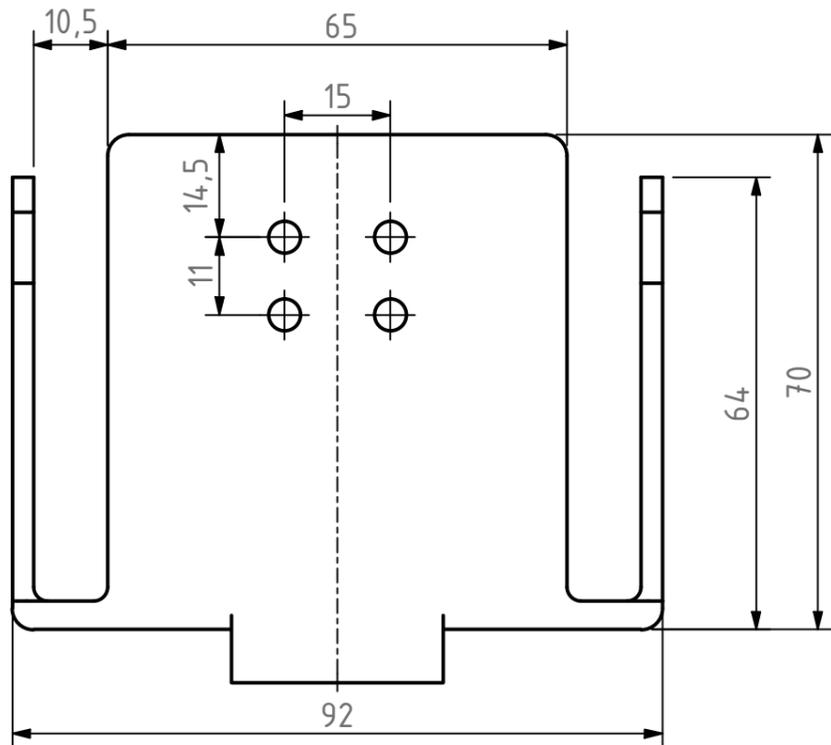
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	Acople en L - a	2:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0027-A3



REDONDEOS NO INDICADOS R4

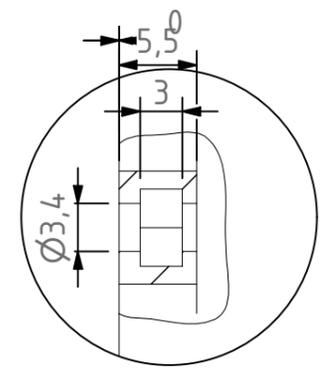
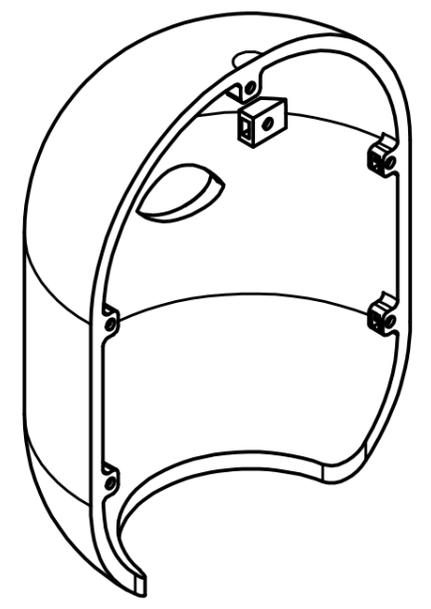
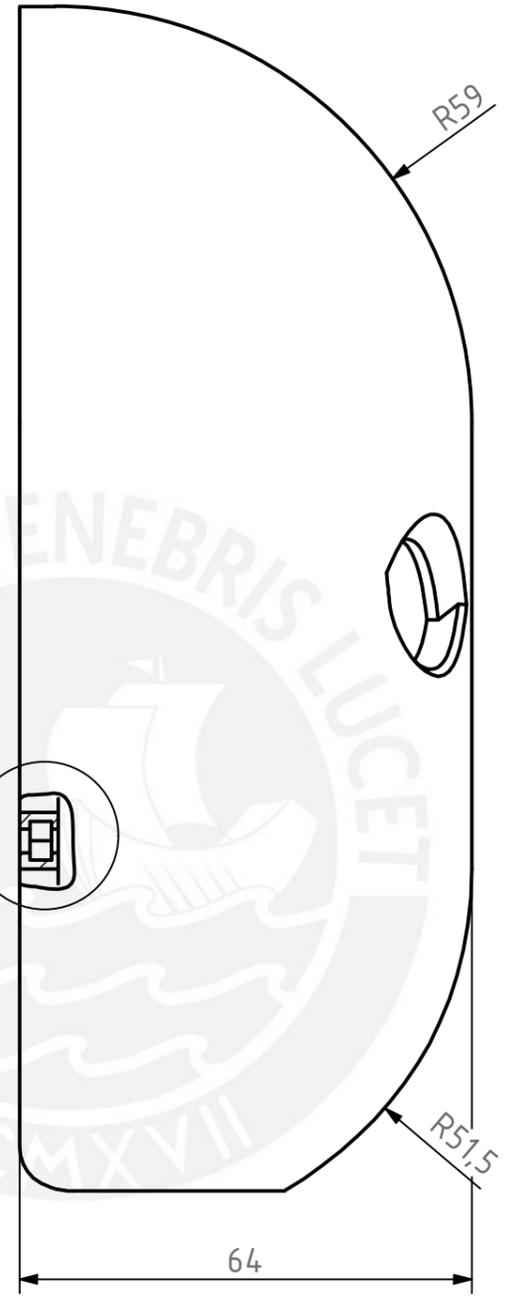
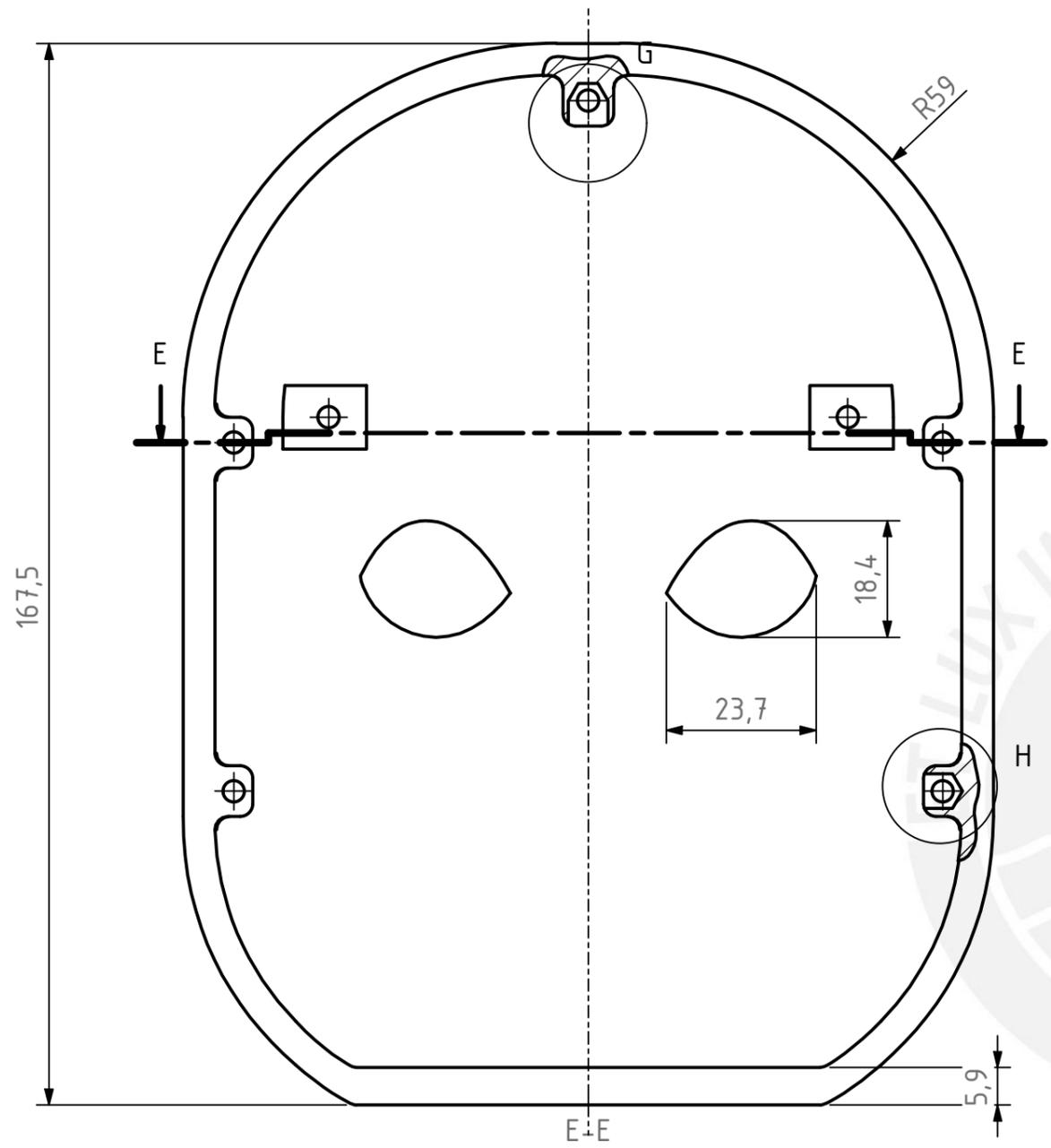


ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	Acople en L - b	2:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0028-A3



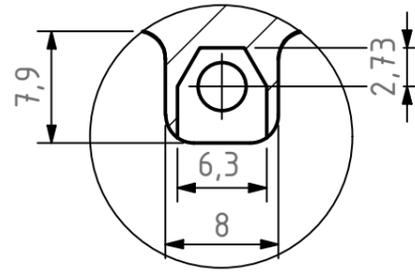
REDONDEOS NO INDICADOS R2

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	PIEZA DE CABEZA INTERIOR	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO A3

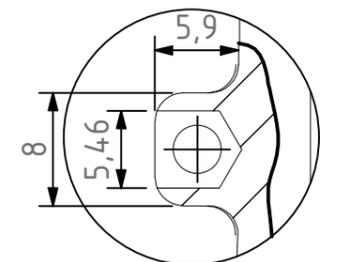


K (2 : 1)

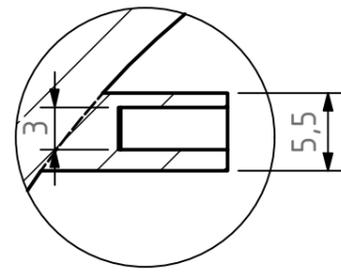
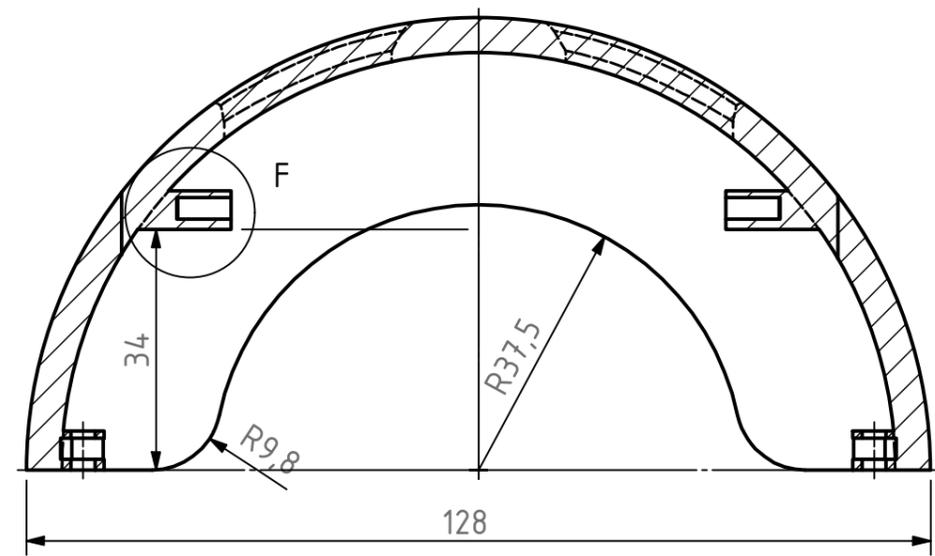
REDONDEOS NO INDICADOS R2



G (2 : 1)

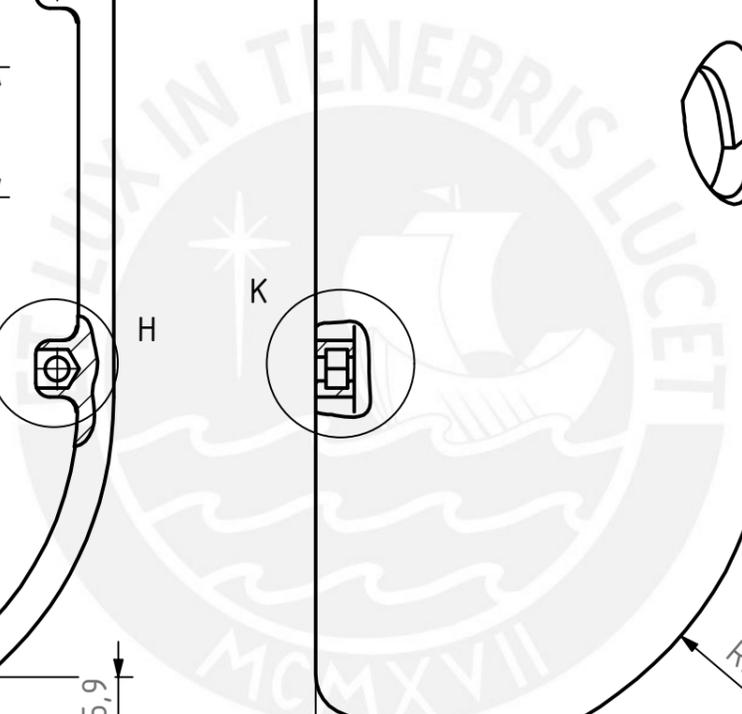


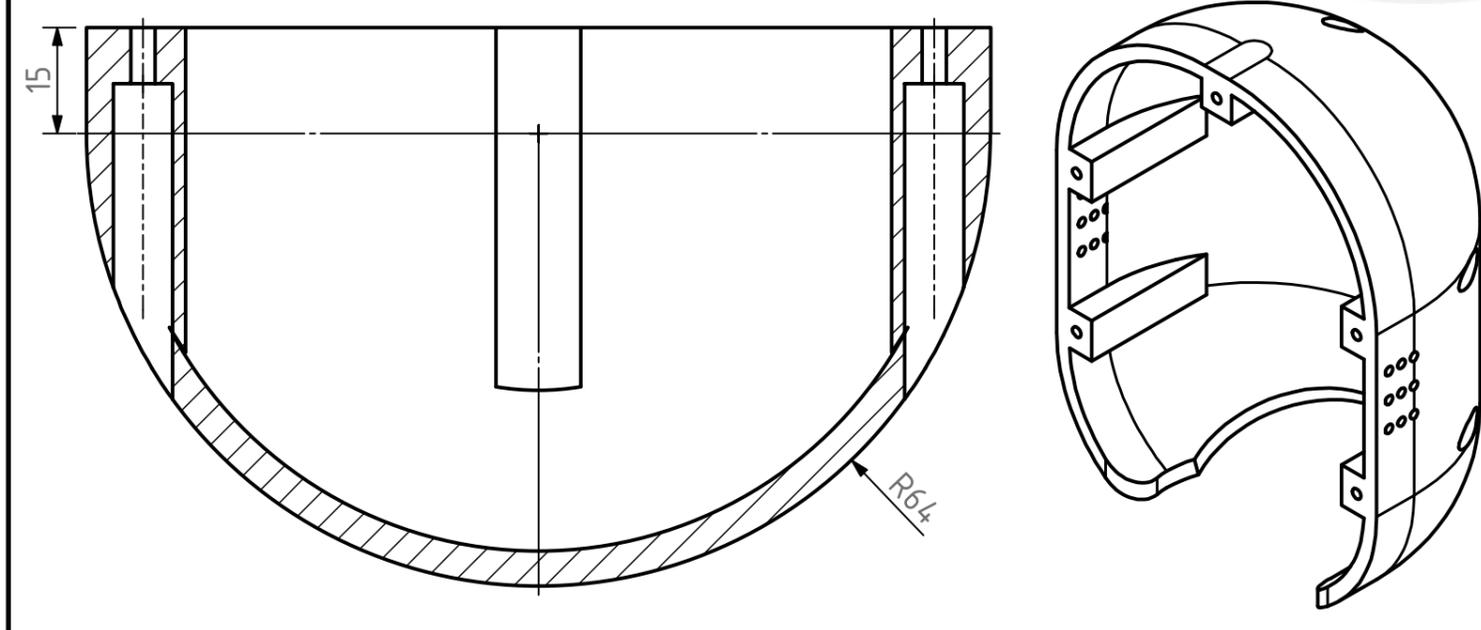
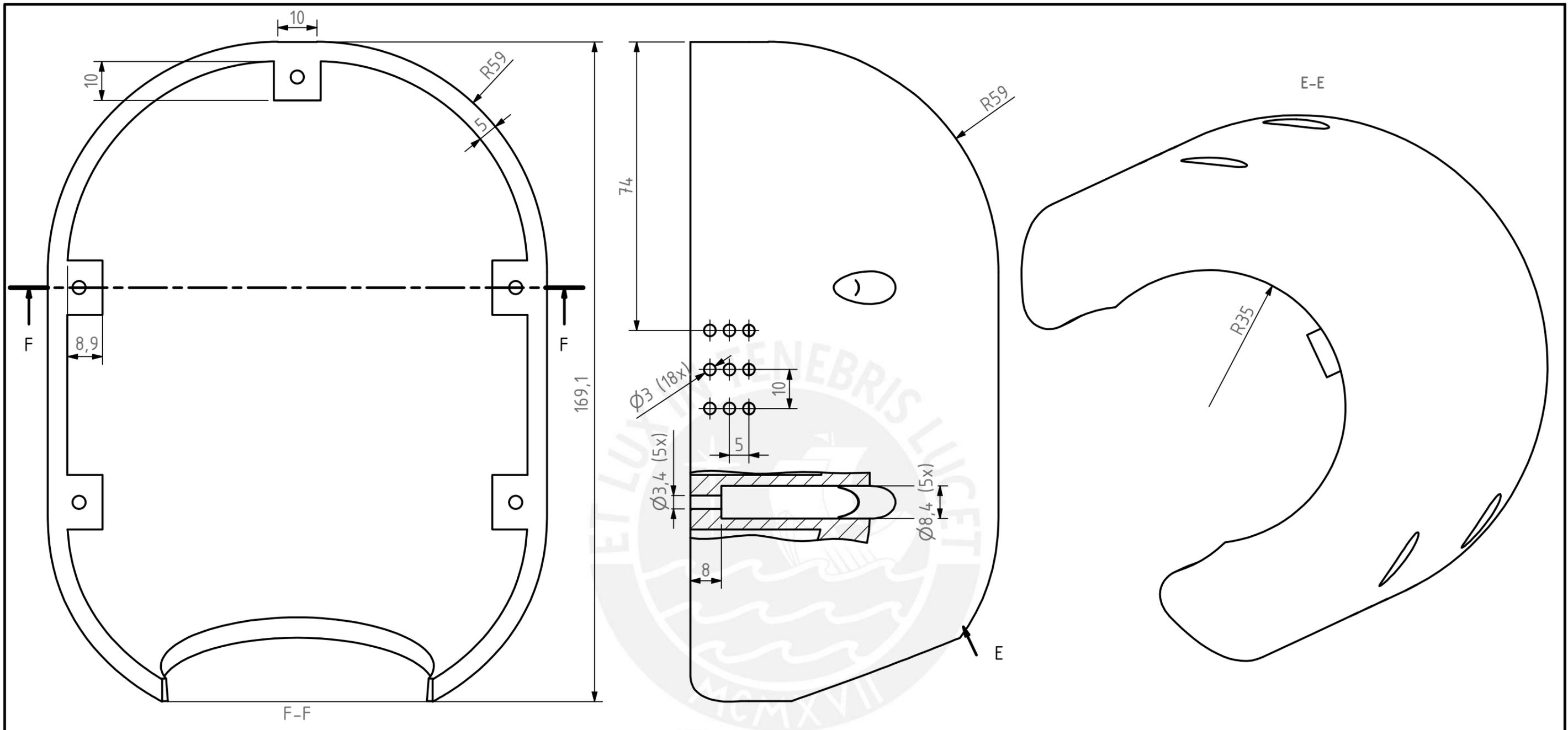
H (2 : 1)



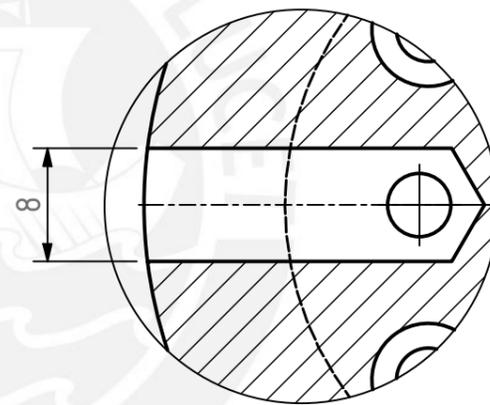
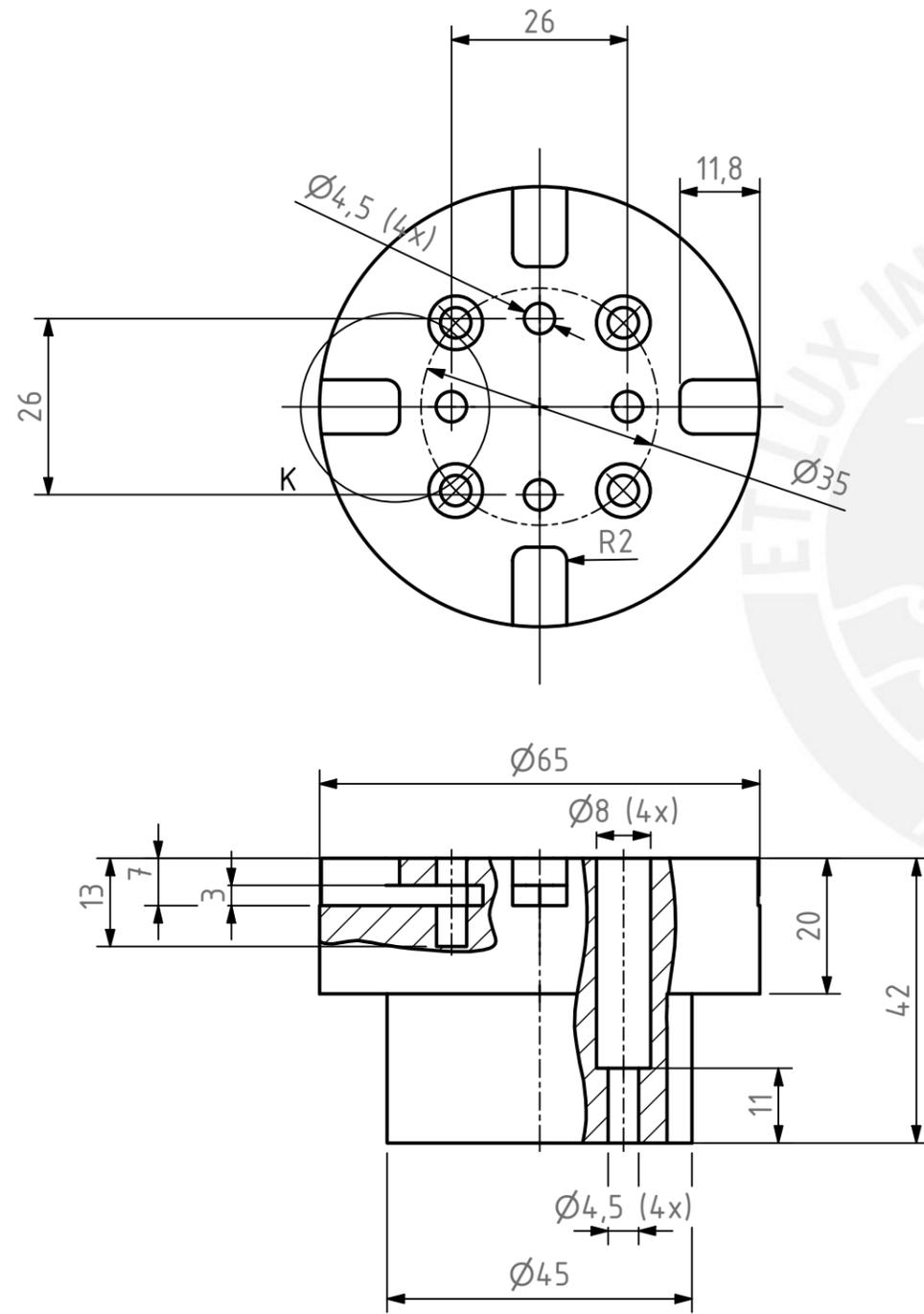
F (2 : 1)

ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
		1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0030-A3

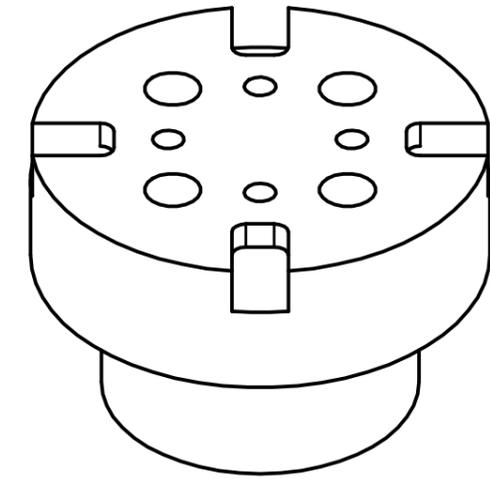




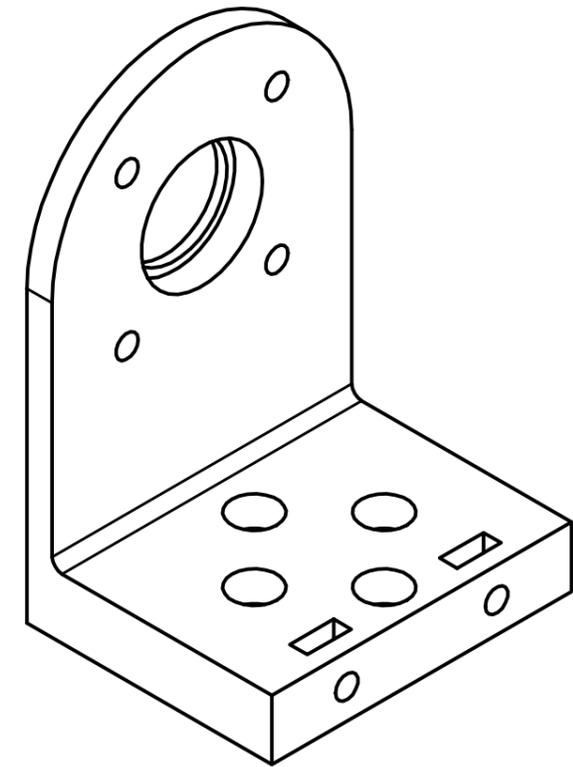
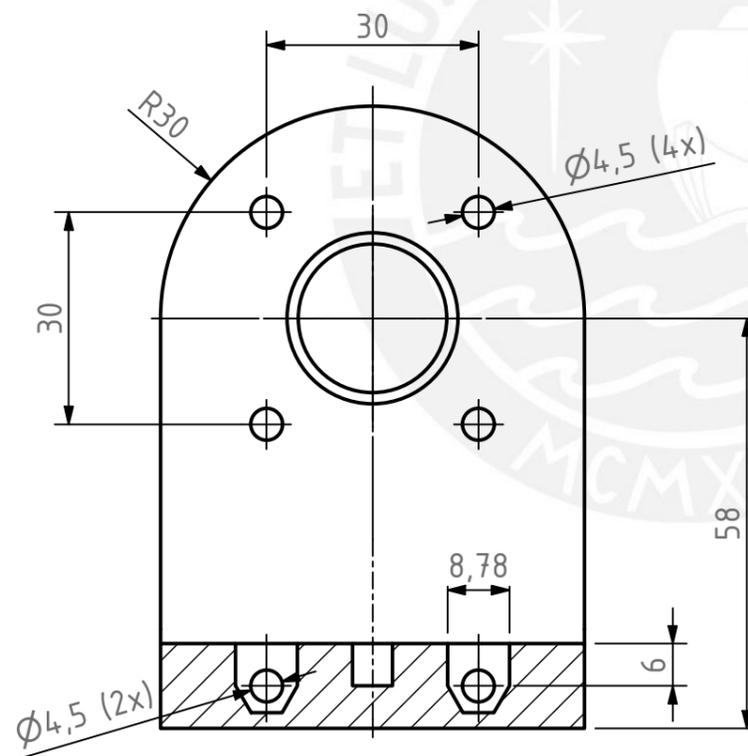
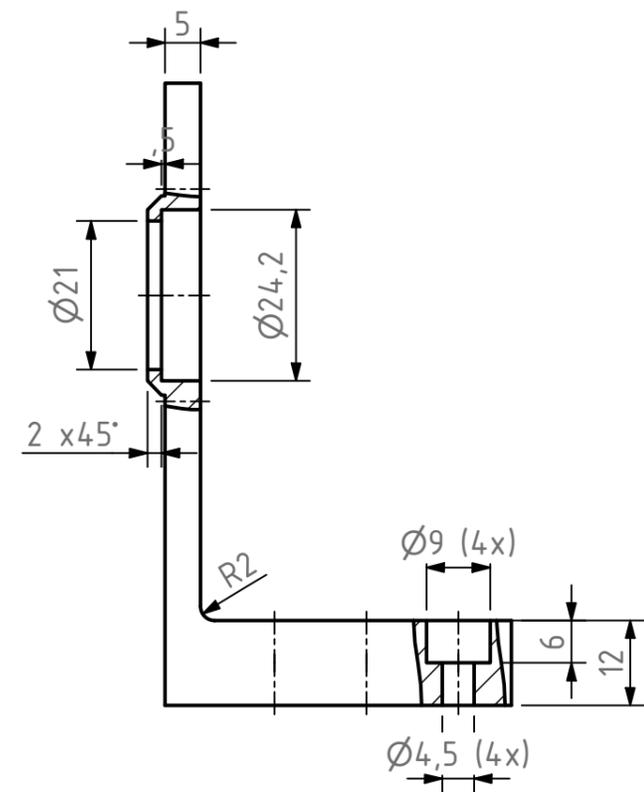
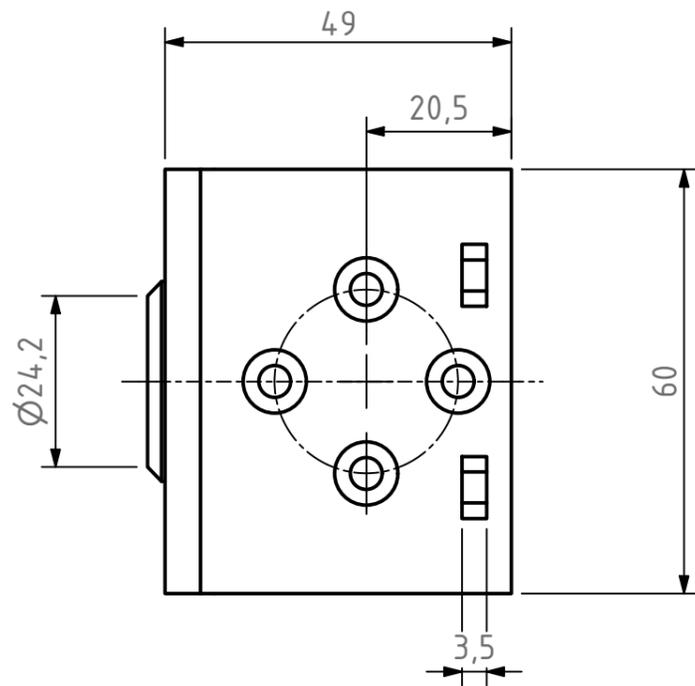
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	$\pm 0,3\text{mm}$	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	Pieza de cabeza exterior - b	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0031-A3



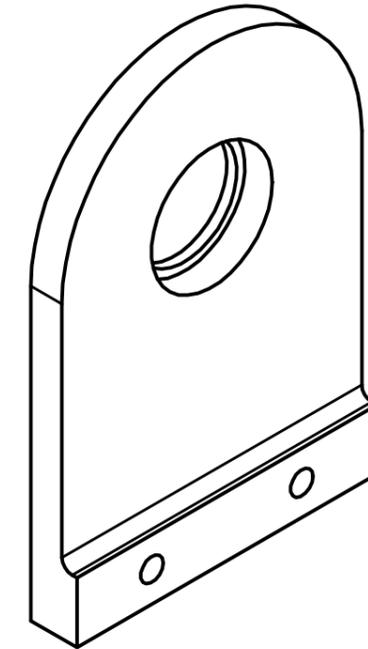
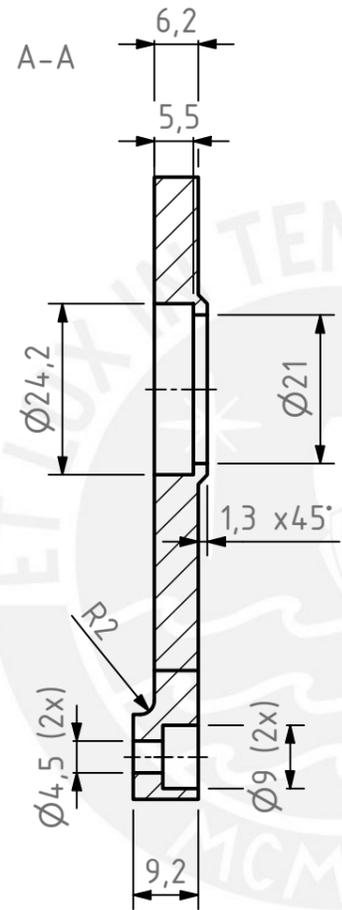
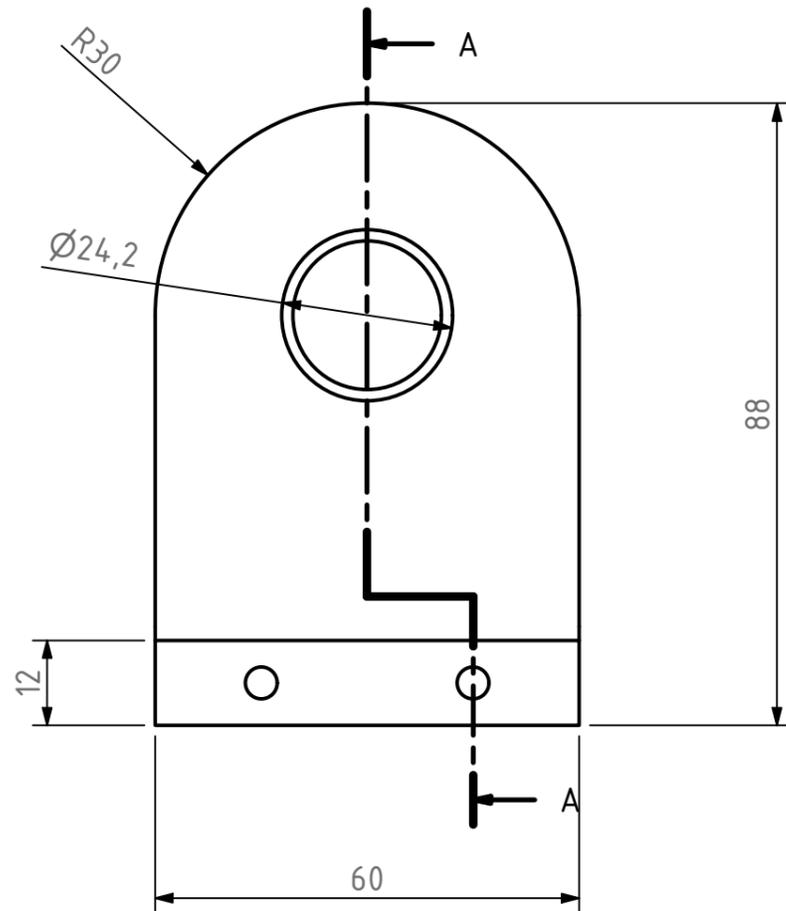
K (2 : 1)



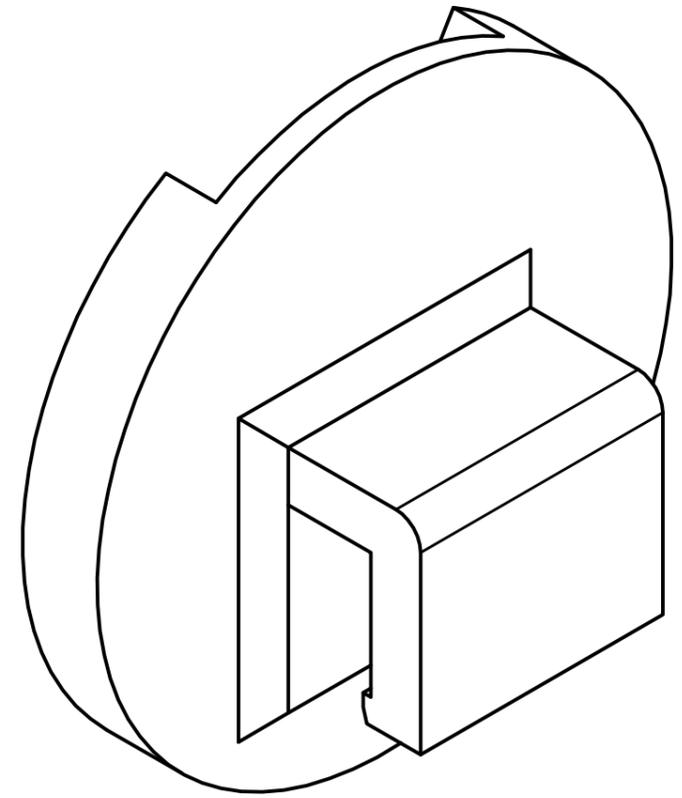
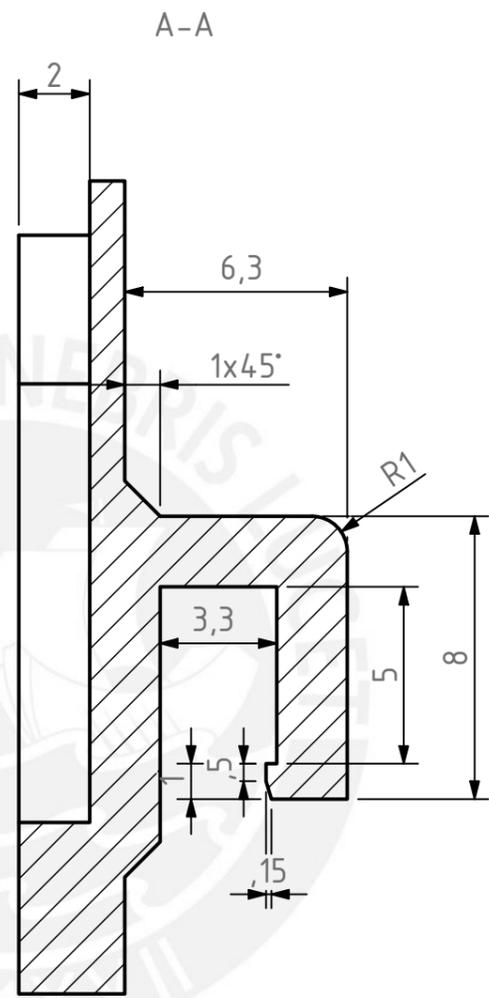
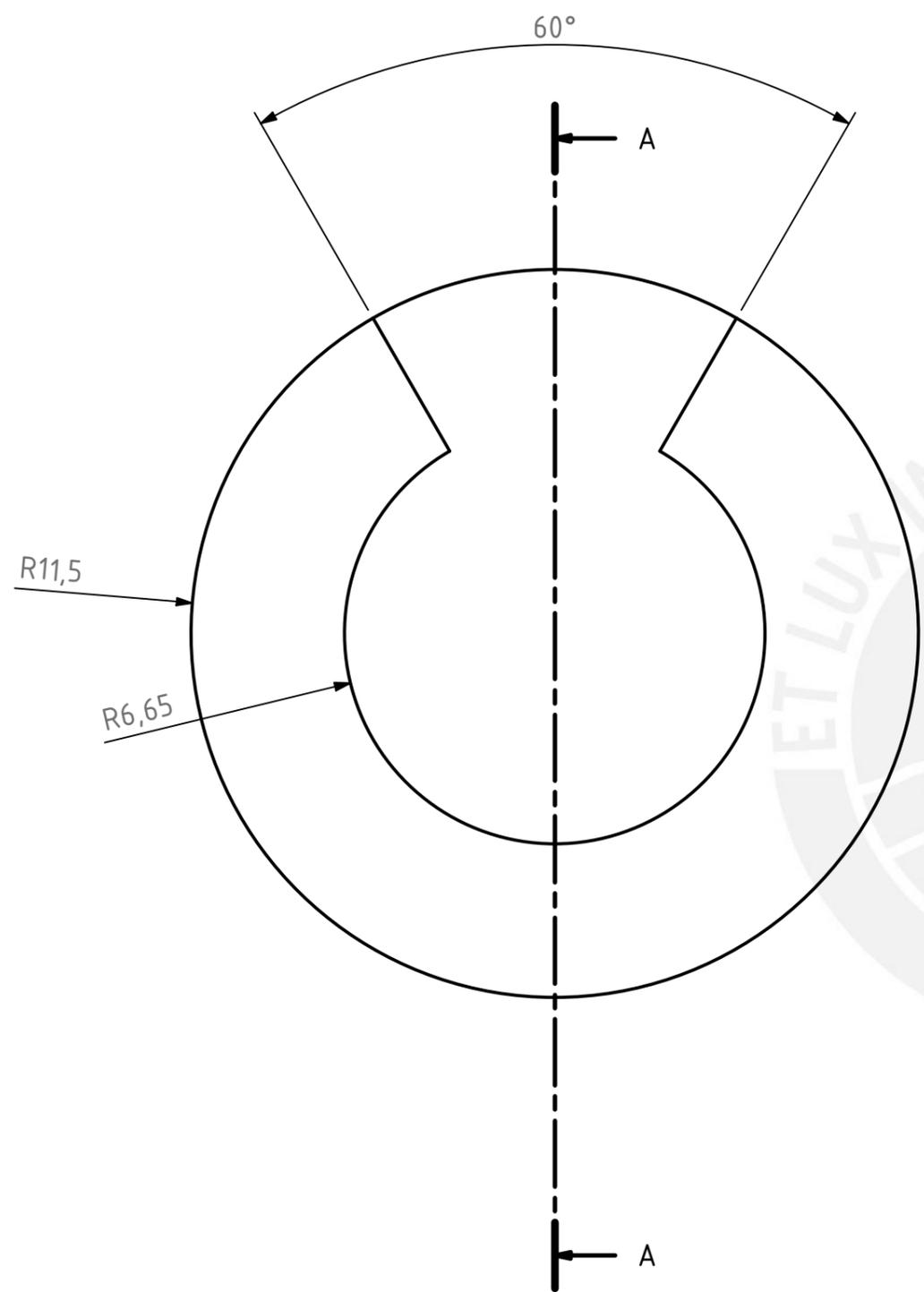
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	Acople de rodamiento cabeza	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0032-A3



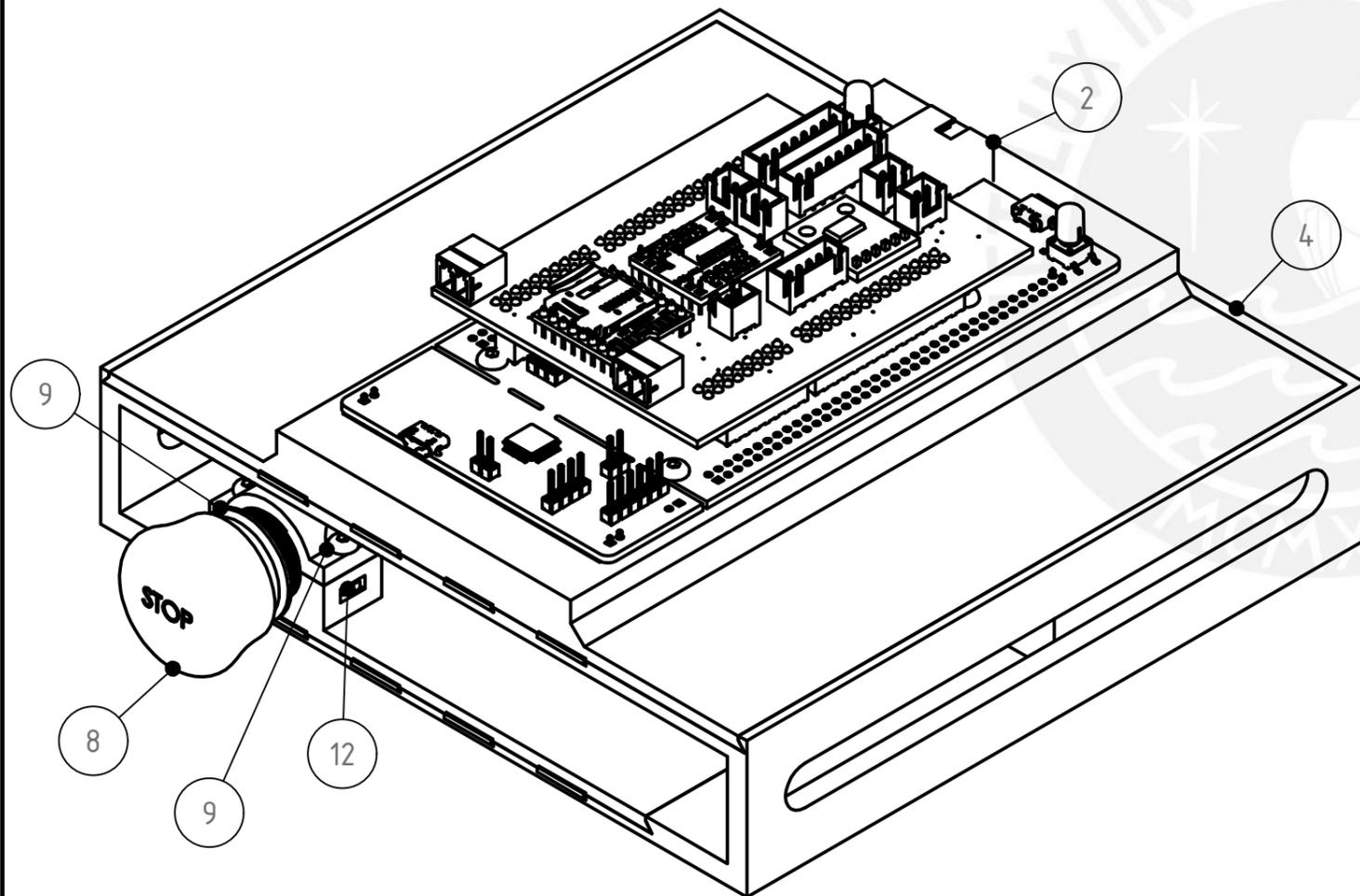
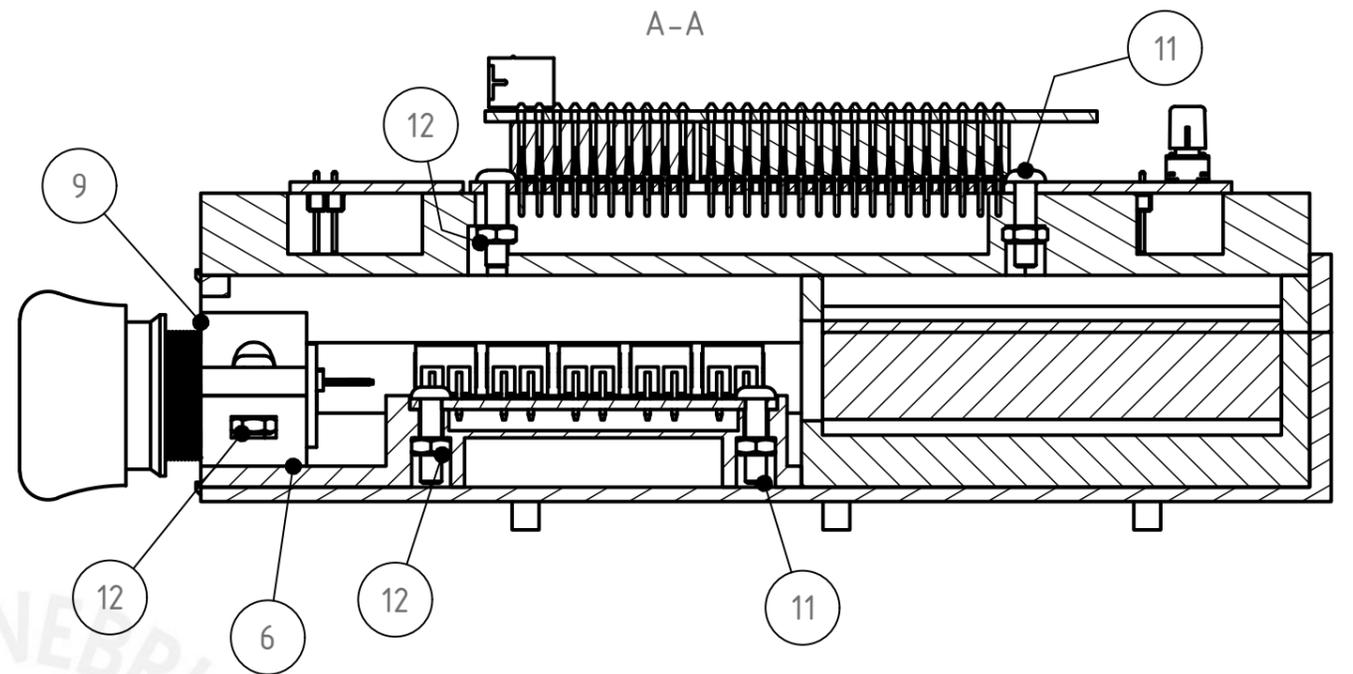
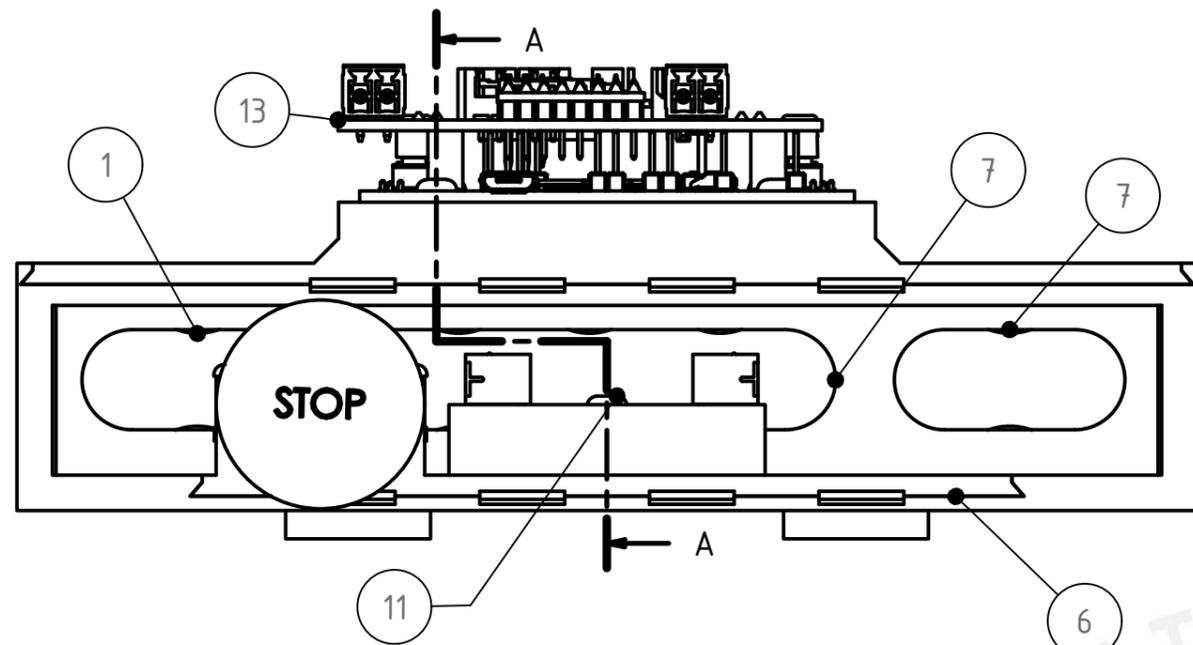
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	Soporte motor 2 - a	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0033-A3



ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	Soporte motor 2 - b	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0034-A3

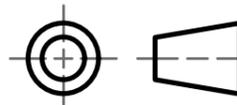


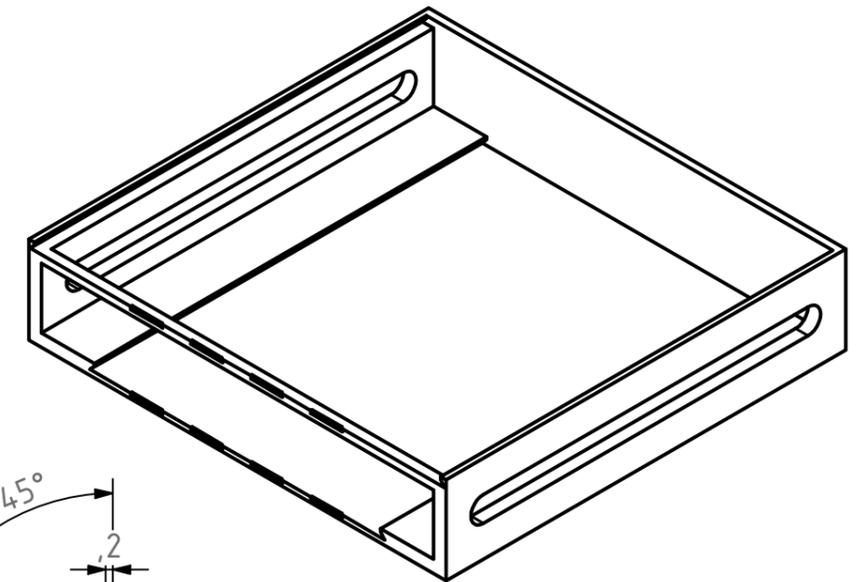
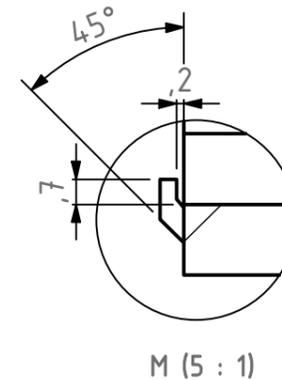
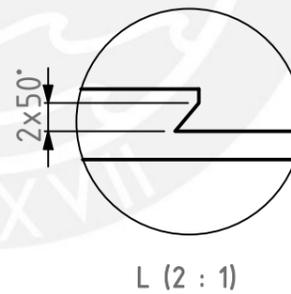
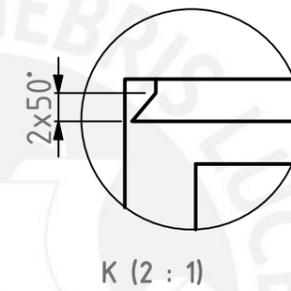
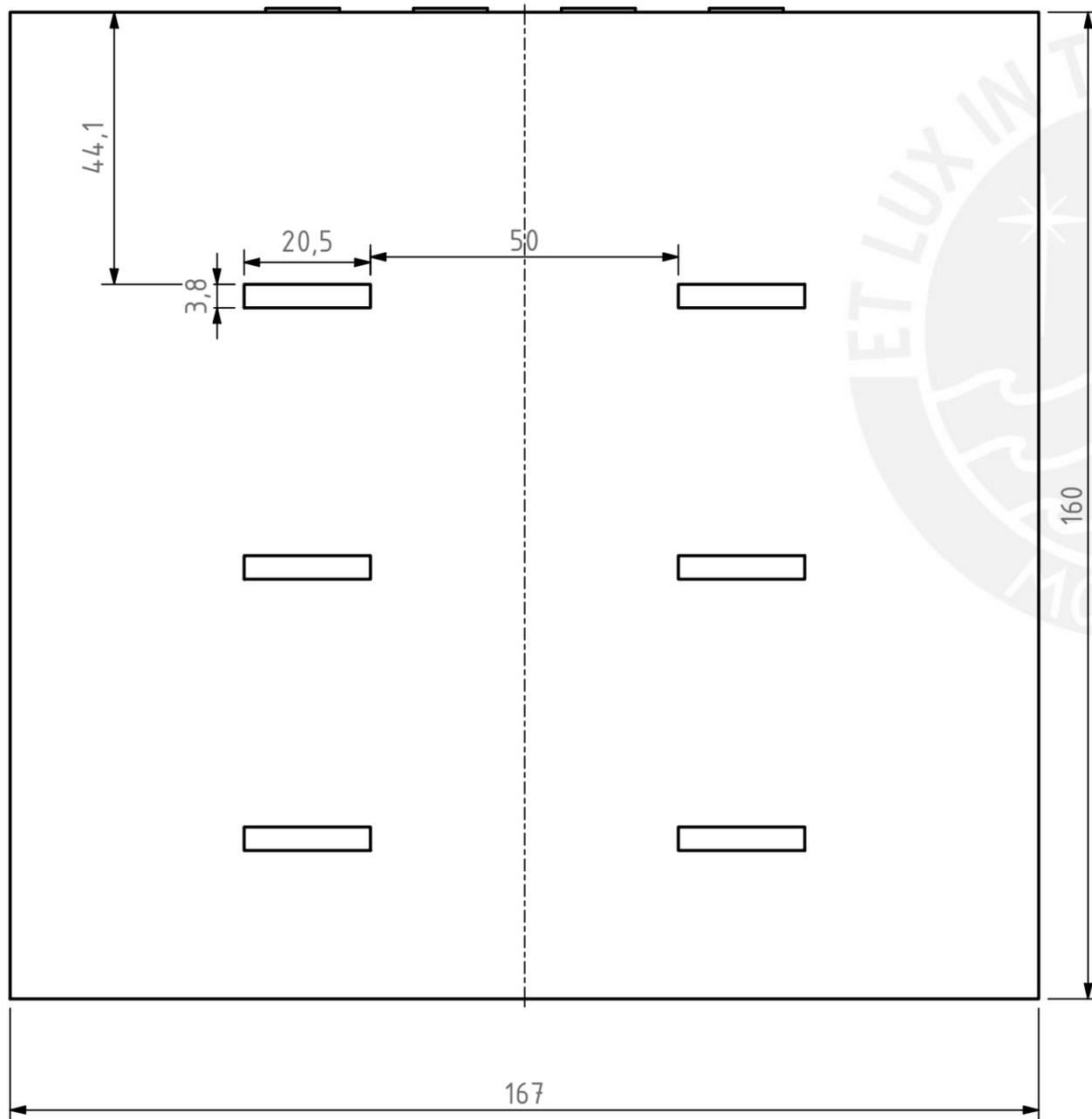
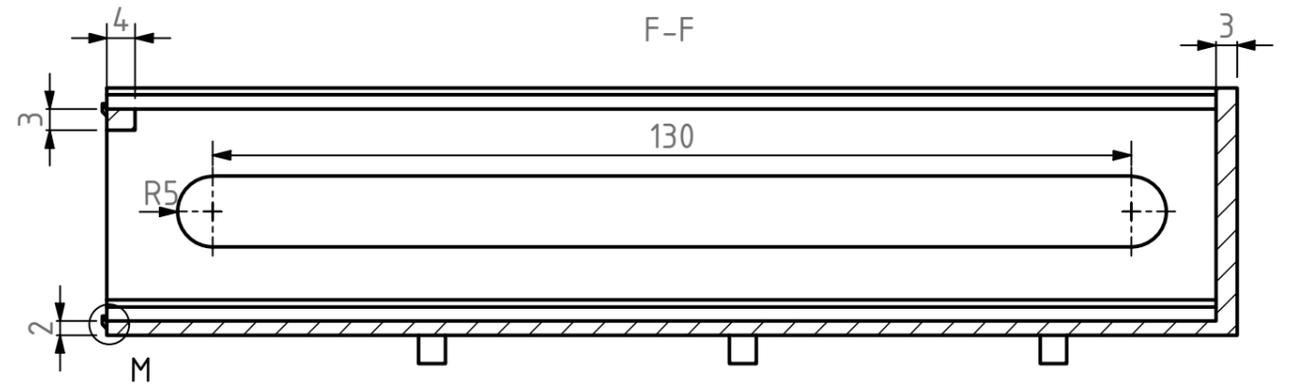
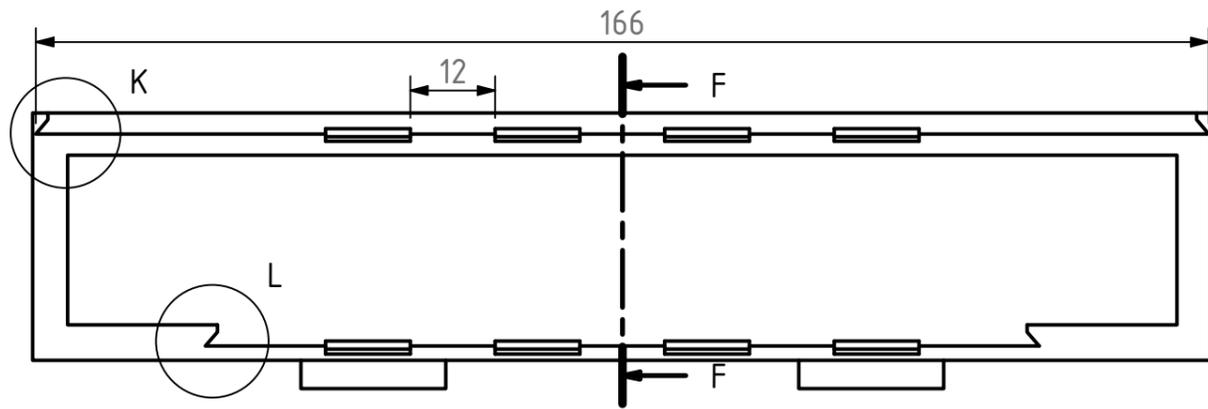
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	Clip de parlante	5:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0035-A3



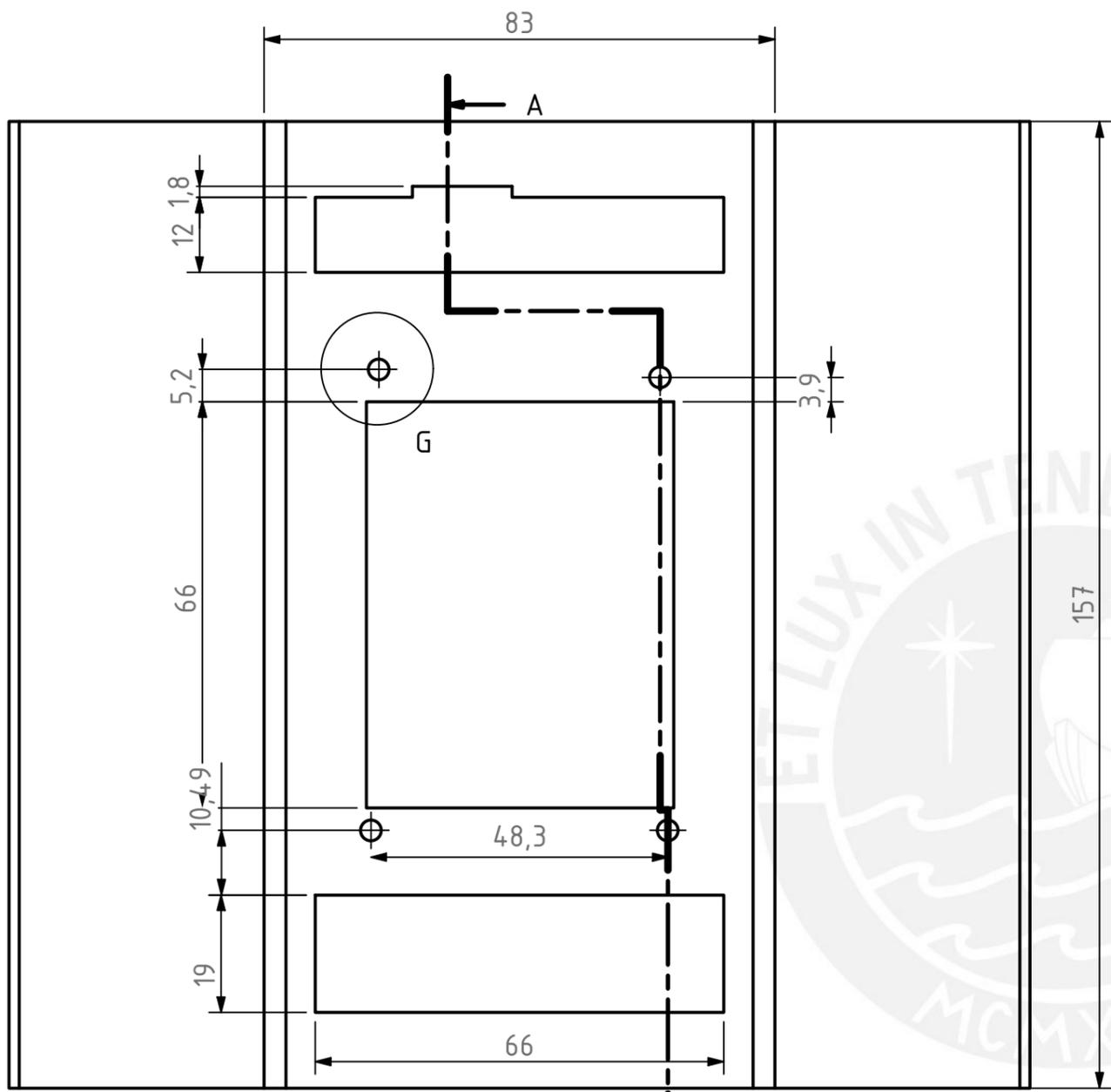
13	1	Shield Nucleo	P-0002-A4	
12	8	Tuerca Hexagonal	ISO 4032 - M3	
11	8	Perno Button Allen	ISO 7380-1 - M3 x 12	
10	1	PCB Distribución de potencia	P-0001-A4	
9	1	Abrazadera	D-0037-A4	
8	1	Bofón de emergencia	LA128AY-11ZS	
7	1	Case Baterías	D-0035-A3	
6	1	Case PCB Distribución	D-0036-A3	
5	1	Case Nucleo	D-0034-A3	
4	1	Case Principal	D-0033-A3	
3	1	Banco de Baterías Ion-Litio de 2 celdas	BatteryPack2S	
2	1	Tarjeta Nucleo 144	Nucleo 144 STM32466ZE	
1	1	Banco de Baterías Ion-Litio de 6 celdas	BatteryPack6S	
REF	CANT	DENOMINACION	DESIGNACION Y DATOS TECNICOS	OBSERVACIONES

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA

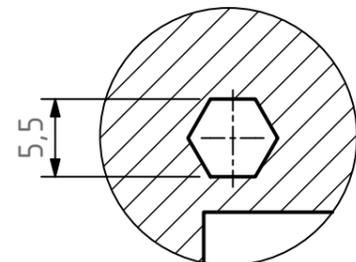
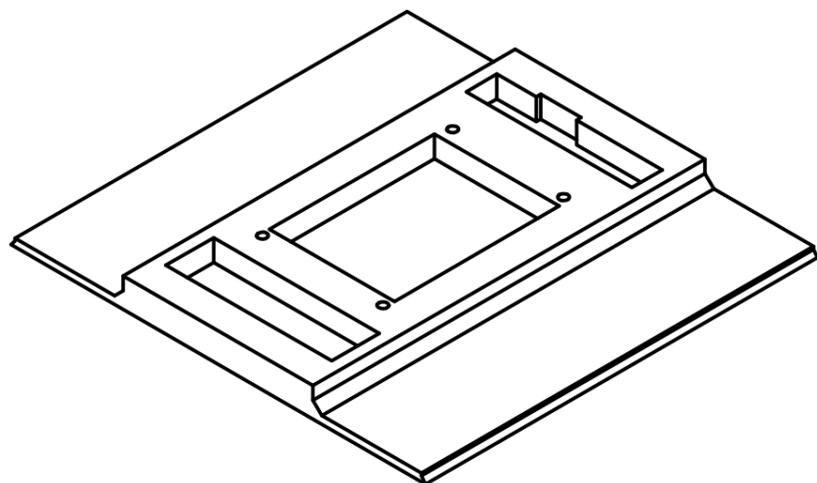
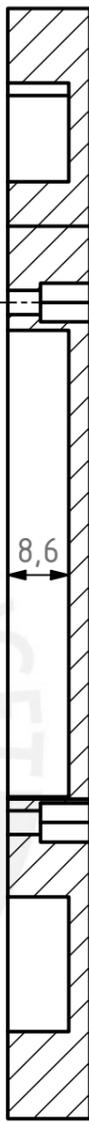
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	CAJA ELECTRÓNICA	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO S-0006-A3



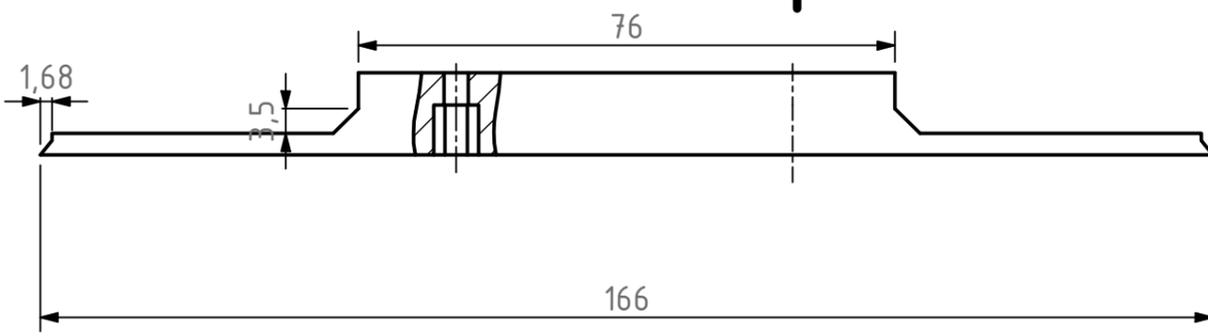
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	CAJA PRINCIPAL	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0033-A3



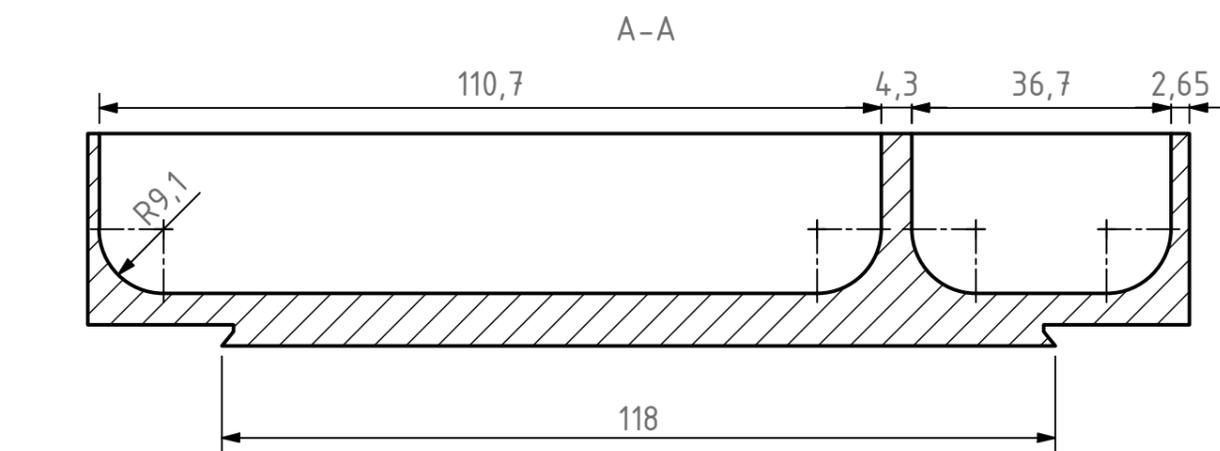
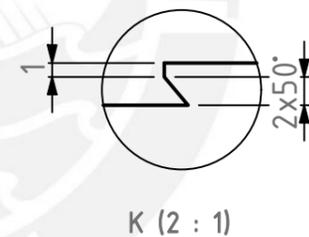
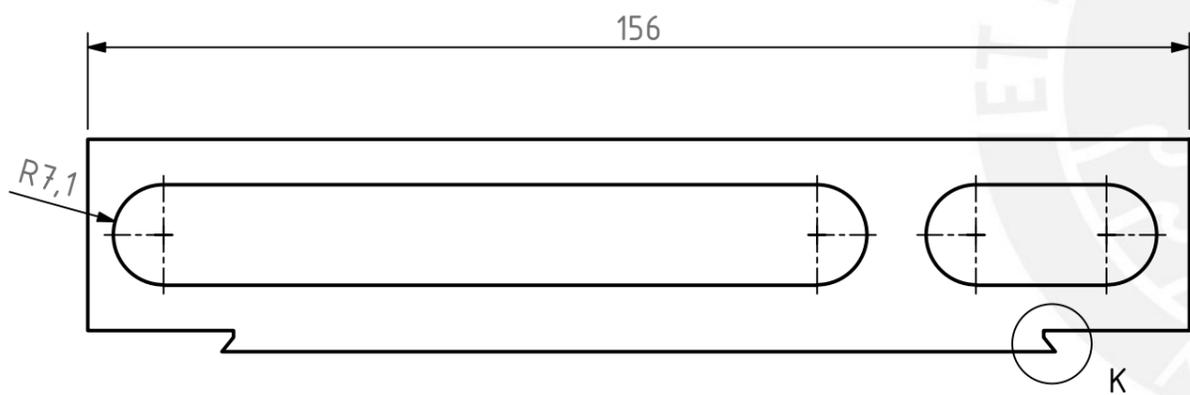
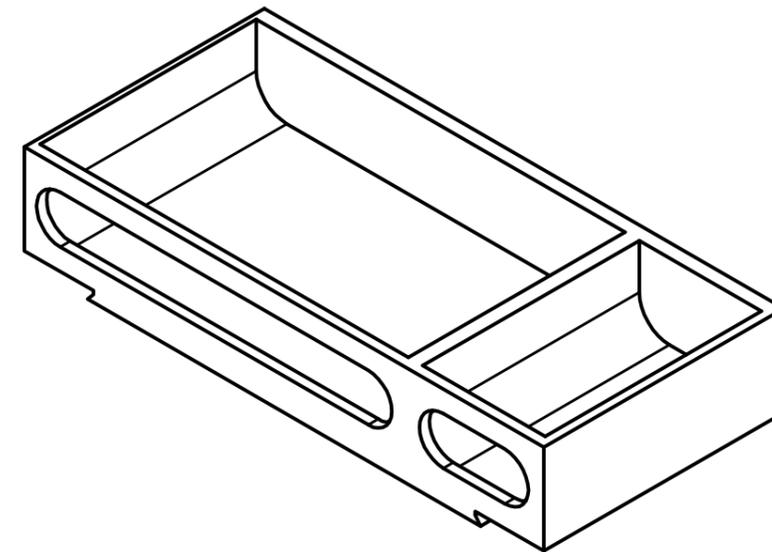
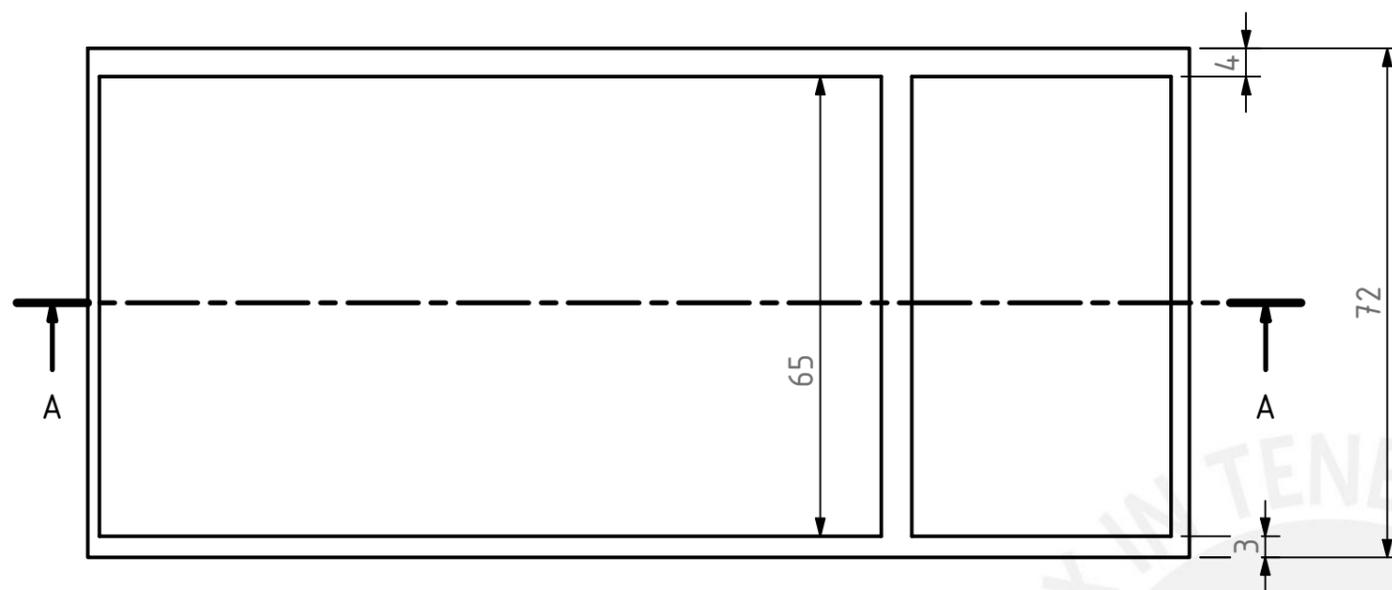
A-A



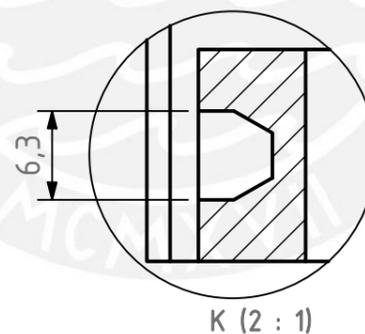
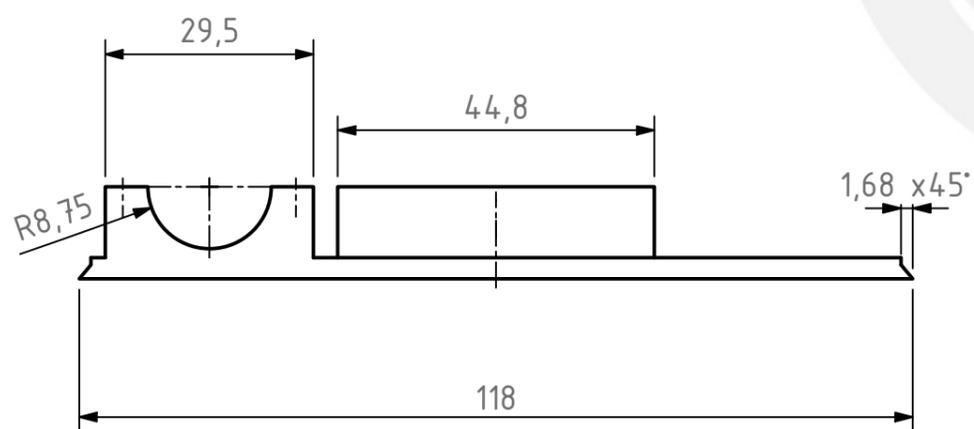
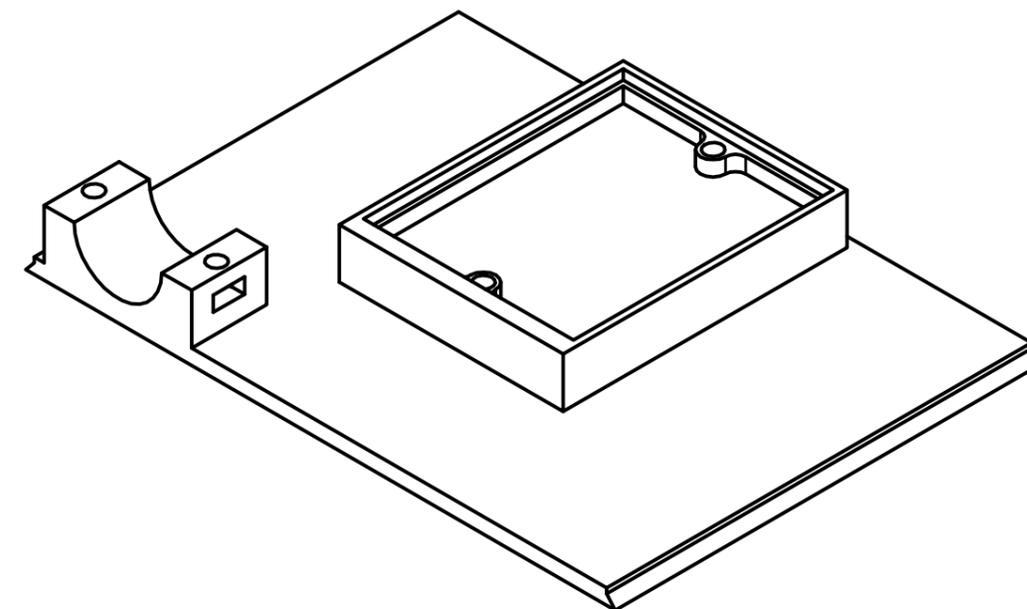
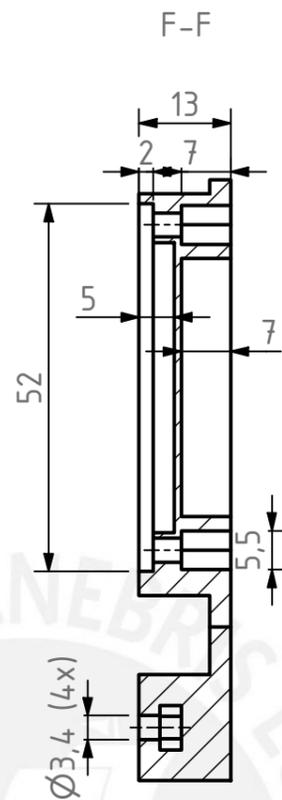
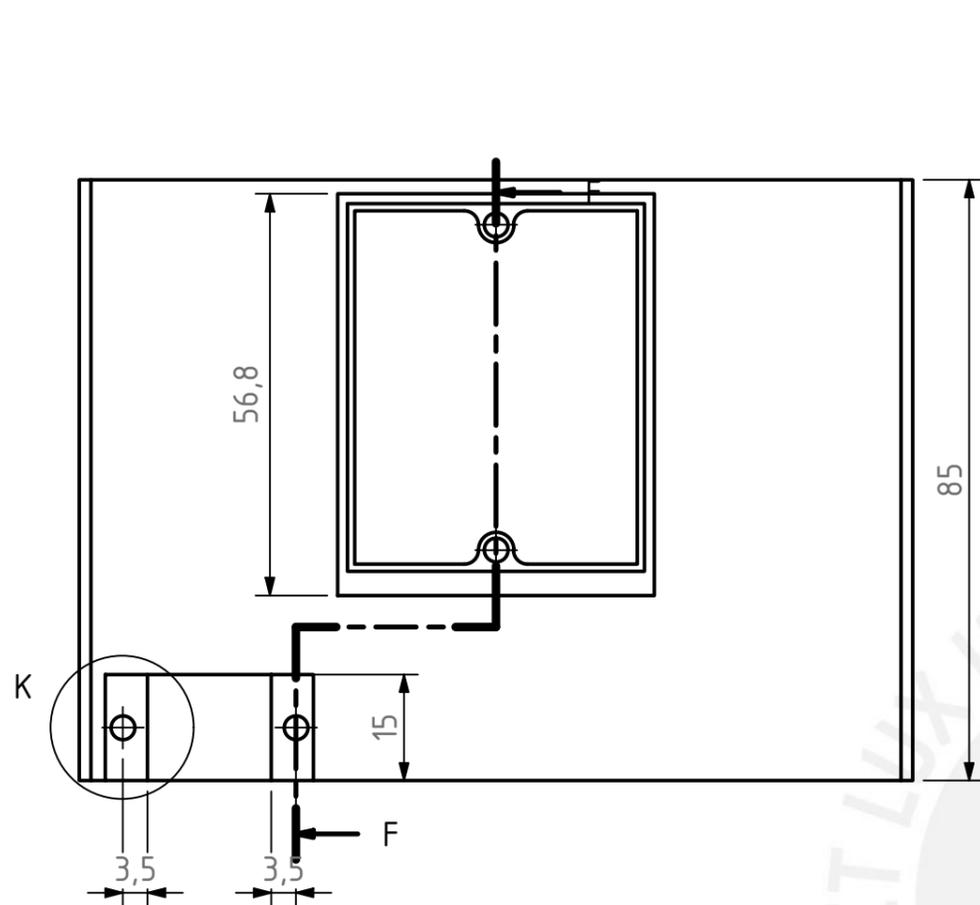
G (2 : 1)



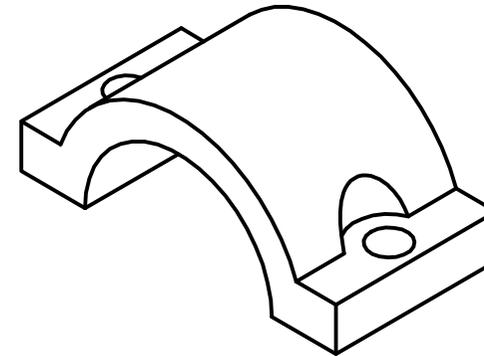
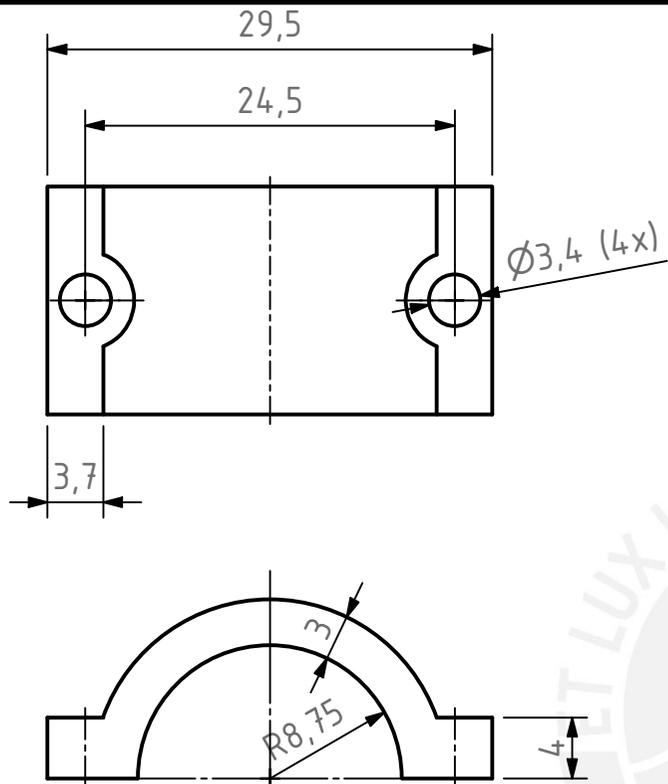
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	CASE NUCLEO	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0034-A3



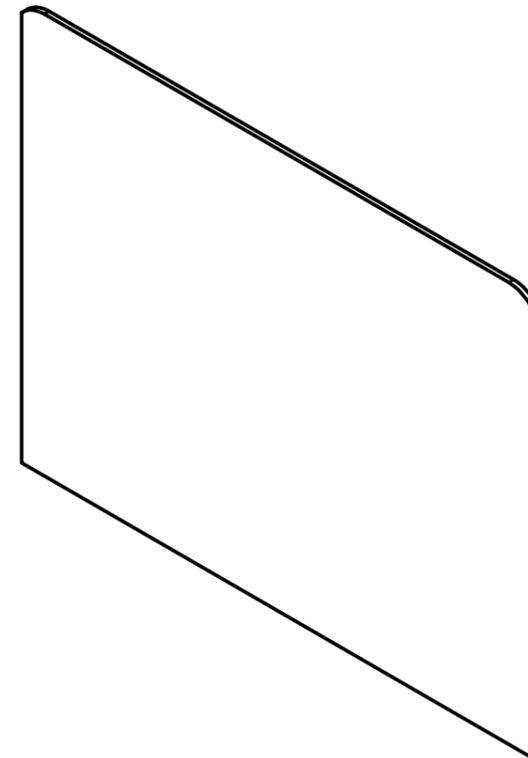
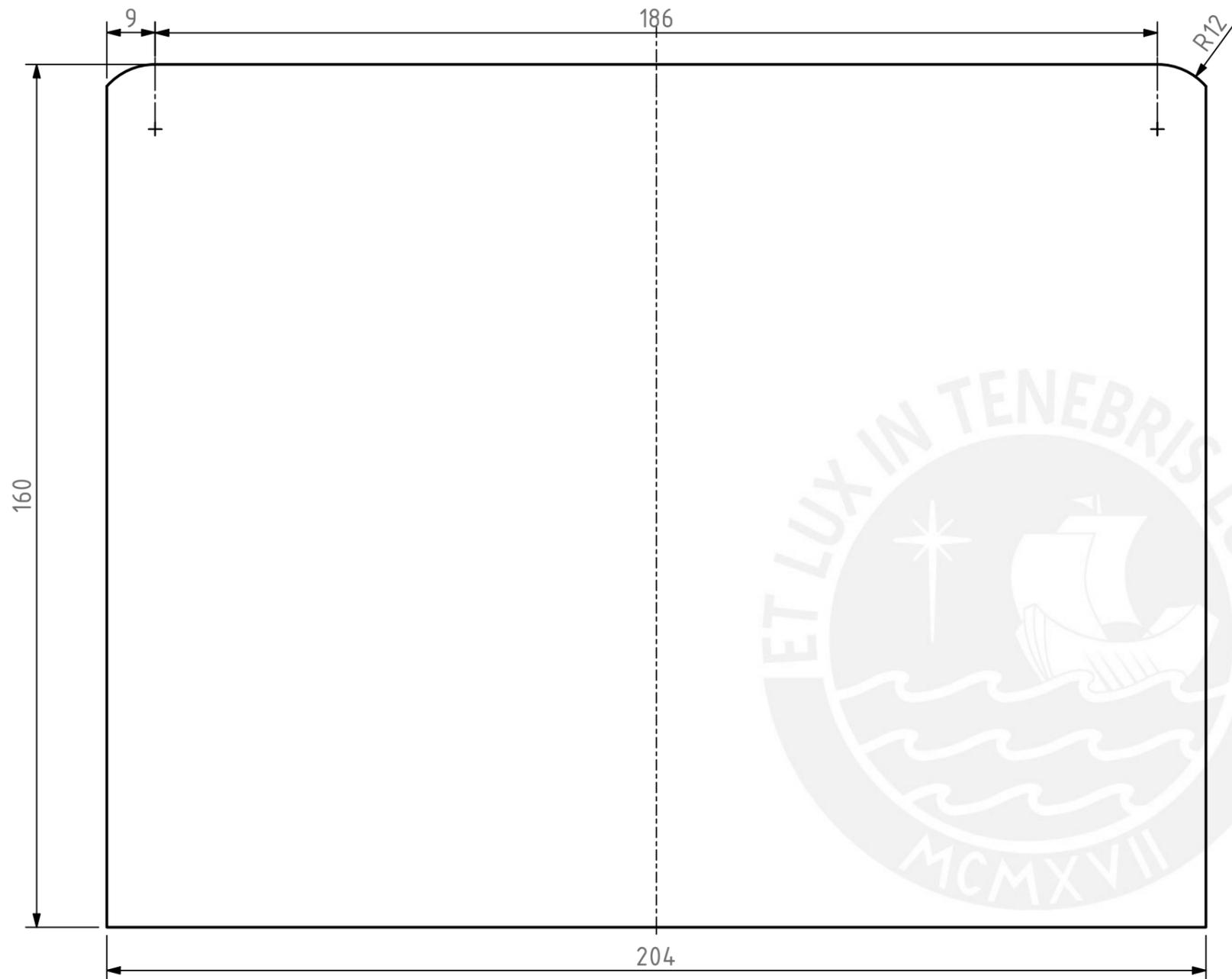
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	CASE BATERÍAS	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0036-A3



ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
	± 0,3mm	Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1	ESCALA
	CASE PCB DISTRIBUCIÓN	1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA	FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN	CÓDIGO D-0037-A3

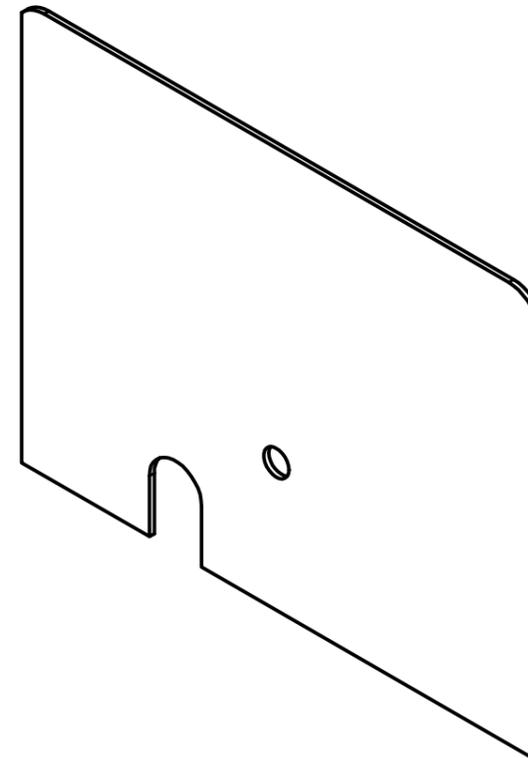
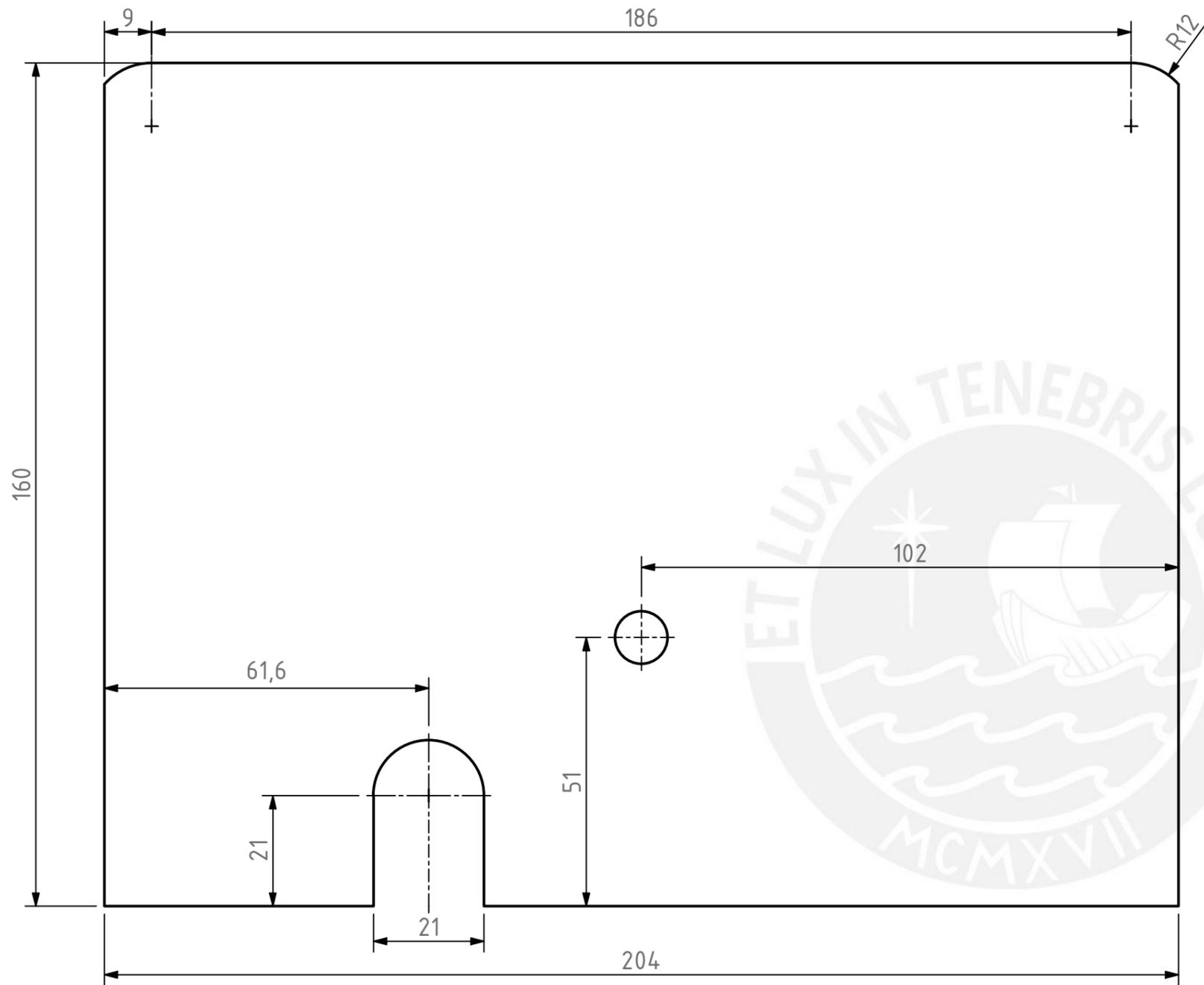


ACABADO SUPERFICIAL		TOLERANCIA GENERAL		MATERIAL
		± 0,3mm		Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA				
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - - HORARIO 10M1			ESCALA
	ABRAZADERA			1:1
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA			FECHA: 2021.09.30
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN			CÓDIGO D-0037-A3



ESPESOR 2 mm

ACABADO SUPERFICIAL		TOLERANCIA GENERAL		MATERIAL
		± 0,3mm		Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA				
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1		ESCALA	
	TAPA FRONTAL		1:1	
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA		FECHA: 2021.09.30	
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN		CÓDIGO D-0039-A3	

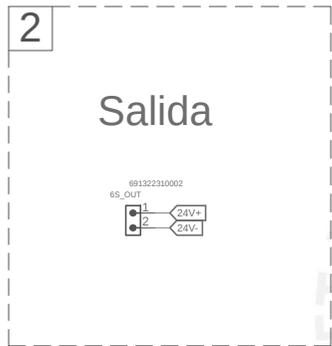


ESPESOR 2 mm

ACABADO SUPERFICIAL		TOLERANCIA GENERAL		MATERIAL
		± 0,3mm		Impresión de PLA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA				
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M1		ESCALA	
	TAPA POSTERIOR		1:1	
20170133	URBINA GARRO, FIORELLA ADRIANNA		FECHA: 2021.09.30	
REVISADO POR:	ARGE CIGÜEÑAS, DIEGO MARTIN		CÓDIGO D-0040-A3	

ANEXO L: Planos Electrónicos





1	1	1	CONECTOR WR-TBL	1X2	6S	C2
2	2	1	CONECTOR WR-TBL	1X2	6S_OUT	C3
3	3	8	CONECTOR WR-TBL	1X2	M1,M2,M3,M4,M5,M6,M7,M8	C5,C6,C7
N	Item	CANT.	DESCRIPCION	CÓDIGO/VALOR	OBSERVACIONES	LOCALIZACION

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
 FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ESPECIALIDAD: ING. MECATRÓNICA

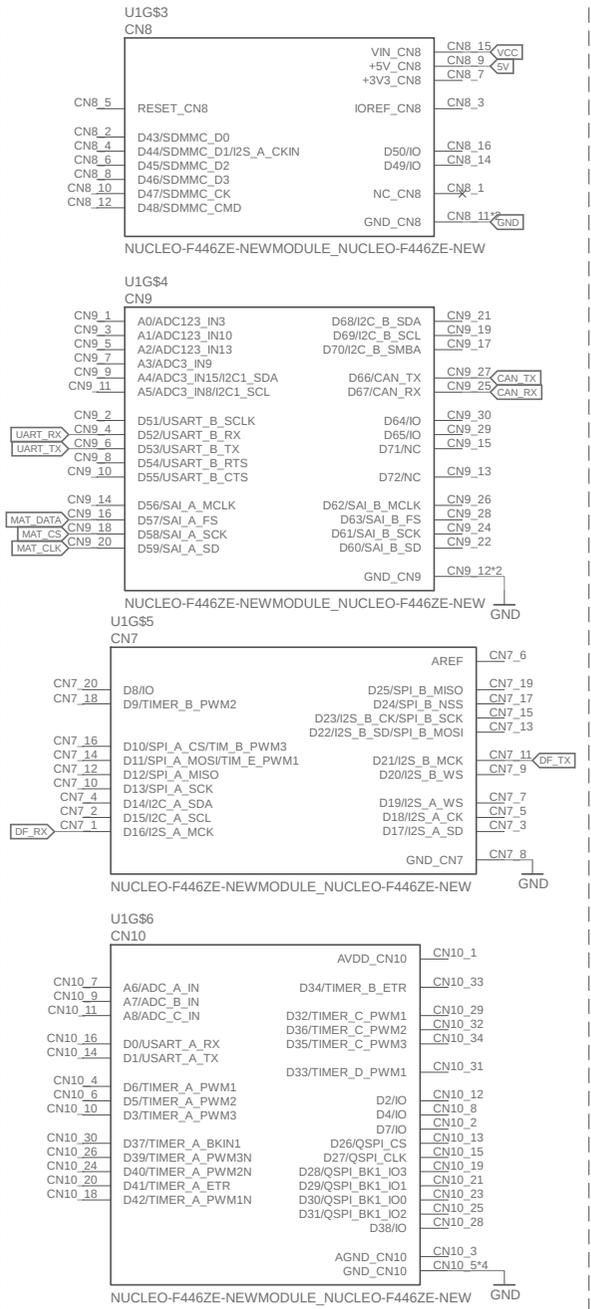
TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 2021-2

DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA

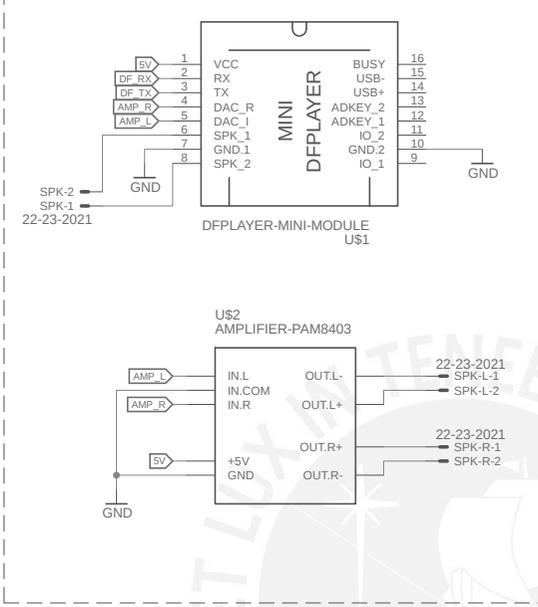
ESCALA
1:1

DISEÑADO:	URBINA GARRO, FIORELLA	FECHA: 2021.9.30
APROBADO:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO	LÁMINA: P-0001-A3

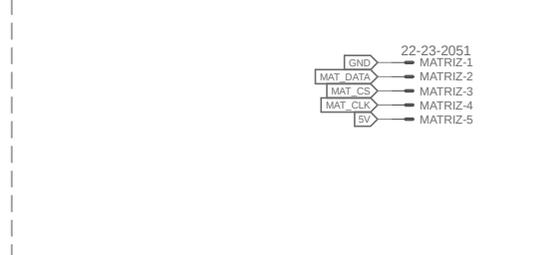
1 Nucleo STM32 F446ZE



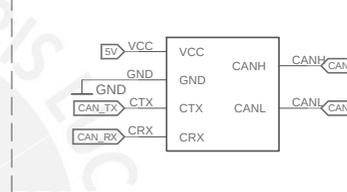
2 Módulo reproductor MP3



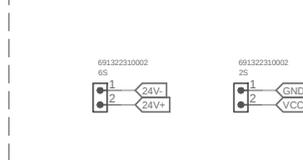
3 Matrices LED



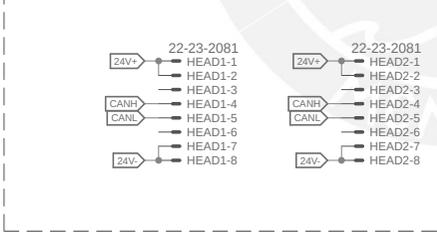
5 Módulo CAN



6 Entradas de alimentacion



4 Motores RMD S9015



8 Conectores de comunicacion



N	Item	CANT.	DESCRIPCION	CÓDIGO/VALOR	OBSERVACIONES	LOCALIZACION
1	13	1	ESPADINES	2X8	CN8	A1
1	12	1	ESPADINES	2X15	CN9	B1
1	11	1	ESPADINES	2X10	CN7	C1
1	10	1	ESPADINES	2X17	CN10	D1
2	9	2	ESPADINES	1X8	DFPLAYER MINI-MODULE	A4
2	8	3	CONECTOR JST XH	1X2	SPK, SPK-L, SPK-R	A3
2	7	3	ESPADINES	1X2	5V,GND,OUT.L,OUT.R	B4
2	6	1	ESPADINES	1X3	IN-L,IN-COM,IN-R	B4
3	5	3	CONECTOR JST XH	1X5	MATRIZ	A7
4	4	2	CONECTOR JST XH	1X8	HEAD1, HEAD2	B3, B4
5	3	1	ESPADINES	1X6	MCP2551	D3
6	2	2	CONECTOR WR-TBL	1X2	6S,2S	E3
8	1	3	CONECTOR JST XH	1X2	CAN_IZQ,CAN_DER,UART	E5

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ESPECIALIDAD: ING. MECATRÓNICA

TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 2021-2

SHIELD NUCLEO

ESCALA
1:1

DISEÑADO:	URBINA GARRO, FIORELLA	FECHA: 2021.9.30
APROBADO:	ARCE CIGÜEÑAS, DIEGO	LÁMINA: P-0002-A4