

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**ROBOT CUADRÚPEDO CON LOCOMOCIÓN HÍBRIDA AUTÓNOMO  
PARA MONITOREO DE GASES NOCIVOS EN GALERÍAS  
SUBTERRÁNEAS MINERAS**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecatrónico**

**AUTOR:**

Luis Jans Solano Vega

**ASESOR:**

Diego Eduardo Quiroz Velásquez

Lima, Enero, 2026

## Informe de Similitud

Yo, Diego Eduardo Quiroz Velasquez, 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

ROBOT CUADRÚPEDO CON LOCOMOCIÓN HÍBRIDA AUTÓNOMA PARA MONITOREO DE GASES NOCIVOS EN GALERÍAS SUBTERRÁNEAS MINERAS

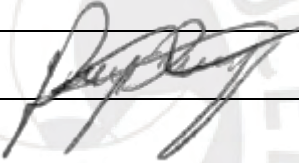
del/de la autor(a)/ de los(as) autores(as)

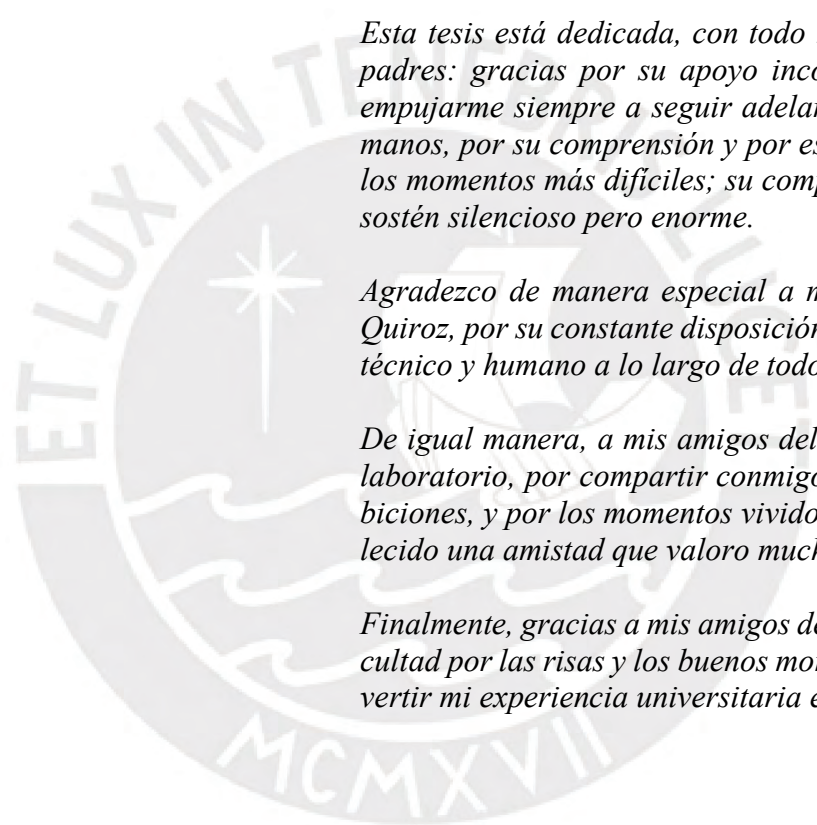
LUIS JANS SOLANO VEGA

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 14%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 21/12/2025.
- 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, 29 de Diciembre del 2025

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>Quiroz Velasquez, Diego Eduardo</u>	
DNI: 45872538	Firma 
ORCID: 0000-0001-8505-3045	



*Esta tesis está dedicada, con todo mi cariño, a mis padres: gracias por su apoyo incondicional y por empujarme siempre a seguir adelante. Y a mis hermanos, por su comprensión y por estar a mi lado en los momentos más difíciles; su compañía ha sido un sostén silencioso pero enorme.*

*Agradezco de manera especial a mi asesor, Diego Quiroz, por su constante disposición y por el soporte técnico y humano a lo largo de todo este proceso.*

*De igual manera, a mis amigos del grupo Chaska y laboratorio, por compartir conmigo intereses y ambiciones, y por los momentos vividos, que han fortalecido una amistad que valoro mucho.*

*Finalmente, gracias a mis amigos del colegio y la facultad por las risas y los buenos momentos; por convertir mi experiencia universitaria en algo único.*

## RESUMEN

En zonas mineras, la emisión de gases nocivos representa un riesgo significativo para la salud de los trabajadores, quienes podrían inhalarlos y desarrollar problemas respiratorios. Asimismo, estos entornos son de difícil acceso y presentan en su mayoría de extensión, terrenos altamente abruptos. Ante ello, el presente trabajo de investigación se fundamenta en el desarrollo de un robot con locomoción híbrida para monitoreo de gases en terrenos mineros con superficie irregular.

El trabajo se basa en la combinación de dos sistemas de locomoción: patas y ruedas. La locomoción por patas permite al robot navegar en terrenos accidentados y sortear obstáculos, mientras que la incorporación de ruedas le brinda mayor velocidad y eficiencia en superficies planas. Asimismo, con el fin de asegurar la mayor estabilidad posible, se eligieron actuadores con mecanismos de flexibilidad en las articulaciones que le permitirá al robot absorber impactos y adaptarse a suelos abruptos.

El diseño conceptual óptimo contempla un total de 3 grados de libertad por pata y una rueda que permite realizar la transición de locomoción mediante el accionamiento del freno. Con respecto al ámbito electrónico, el cuadrúpedo cuenta con un sistema de monitoreo para medir la concentración de gases tóxicos en tiempo real, transmitirlos y enviar una señal de alerta en caso excedan los umbrales máximos permisibles.

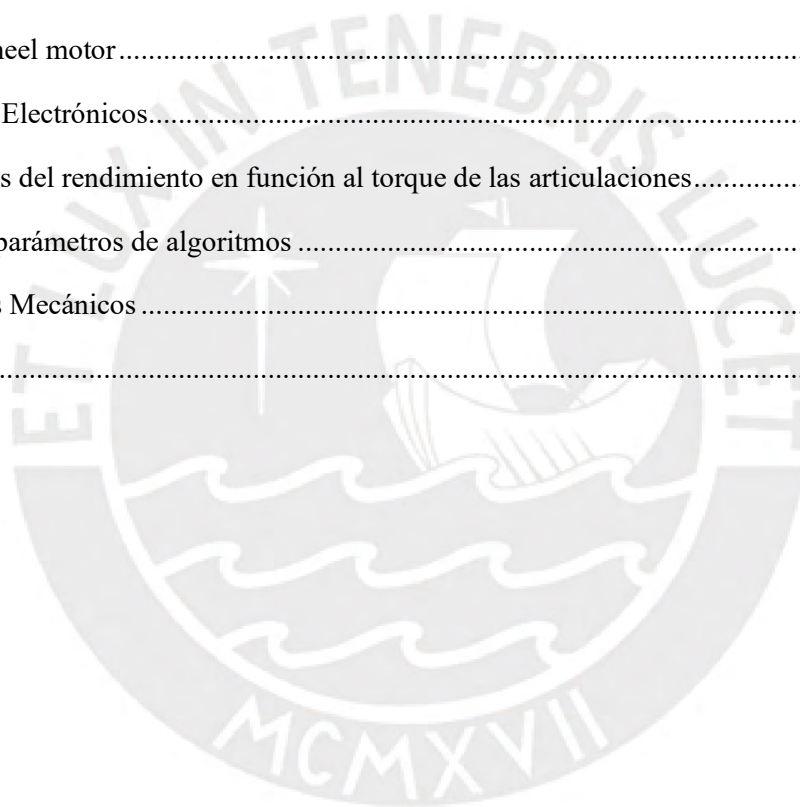
Finalmente, en términos de percepción y control, el robot puede navegar autónomamente empleando una cámara de profundidad y técnicas como Reconstrucción 3D y Visual SLAM. Además, según el modo de locomoción activo, el sistema acciona las articulaciones o las ruedas para desplazarse con eficiencia. Se usó Reinforcement Learning para lograr comportamientos robustos del robot, de manera que sea capaz de sobrellevar terrenos altamente irregulares y recuperar su estabilidad de manera autónoma en situaciones extremas, como una caída.

## INDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1 : ANTECEDENTES AL DISEÑO.....	3
1.1 Problemática.....	3
1.2 Presentación de la propuesta.....	7
1.3 Objetivos .....	8
1.4 Alcance.....	8
1.5 Metodología.....	9
CAPÍTULO 2 : ESTADO DEL ARTE.....	10
2.1 Sistemas integrales .....	10
2.2 Subsistema de patas .....	14
2.3 Subsistema de transición de locomoción .....	20
CAPÍTULO 3 : DISEÑO CONCEPTUAL.....	24
3.1 Requerimientos del sistema .....	24
3.2 Definición de entradas y salidas .....	26
3.3 Estructura de funciones.....	28
3.4 Matriz morfológica.....	36
3.5 Concepto de solución óptimo .....	41
CAPÍTULO 4 : DISEÑO MECATRÓNICO.....	44
4.1 Descripción del sistema integrado .....	44
4.2 Subsistema de patas .....	45
4.2.1 Elementos de transmisión y movimiento .....	46
4.2.2 Análisis de resistencia .....	52
4.3 Subsistema electrónico .....	58
4.3.1 Elección de componentes .....	59

4.3.2	Etapa de alimentación .....	61
4.3.3	Etapa de control .....	61
4.4	Subsistema de locomoción .....	63
4.4.1	Simulación .....	63
4.4.2	Transición de locomoción .....	65
4.4.3	Algoritmo de locomoción.....	66
4.4.4	Algoritmo de recuperación de caída .....	70
CAPÍTULO 5 : LOCOMOCIÓN Y RECUPERACIÓN DE CAÍDA .....		73
5.1	Control de posición y velocidad de articulaciones.....	73
5.2	Seguimiento de velocidad.....	73
5.3	Control de velocidad máxima.....	74
5.4	Locomoción en entornos irregulares.....	74
5.4.1	Pendientes.....	75
5.4.2	Obstáculos discretos.....	75
5.4.3	Escaleras .....	76
5.5	Eficiencia de recuperación de caída.....	76
5.6	Análisis dinámico de torques.....	77
5.7	Transición de locomoción.....	79
CAPÍTULO 6 : NAVEGACIÓN AUTÓNOMA .....		81
6.1	Simultaneous Localization and Mapping (SLAM).....	81
6.2	Reconstrucción 3D y Mapeo.....	83
6.3	Planificación de Ruta.....	84
6.4	Navegación Autónoma Visual.....	85
CAPÍTULO 7 : PRESUPUESTO .....		86
7.1	Costo de materiales.....	86
7.2	Costo de componentes .....	87
7.3	Presupuesto total.....	88
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		89

ANEXOS.....	91
ANEXO A: Lista de requerimientos .....	91
ANEXO B: Matriz morfológica.....	95
ANEXO C: Conceptos de solución.....	102
ANEXO D: Evaluación técnico-económica.....	108
ANEXO E: Motor RMD-X8 PRO .....	115
ANEXO F: Correa.....	116
ANEXO G: Poleas.....	117
ANEXO H: In-Wheel motor.....	118
ANEXO I: Planos Electrónicos.....	119
ANEXO J: Análisis del rendimiento en función al torque de las articulaciones.....	120
ANEXO K: Hiperparámetros de algoritmos .....	121
ANEXO L: Planos Mecánicos .....	122
BIBLIOGRAFÍA.....	146



## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO 1

Tabla 1.1: Principales gases mineros (Clavijo, s. f.).....	4
--	---

### CAPÍTULO 2

Tabla 2.1: Comparación de principales robots de locomoción híbrida (Elaboración propia).....	14
--	----

Tabla 2.2: Comparación de mecanismos de patas (Elaboración propia) .....	19
--	----

Tabla 2.3: Tabla comparativa de sistemas de transición de locomoción (Elaboración propia) ....	23
--	----

### CAPÍTULO 3

Tabla 3.1: Conceptos de solución para subsistema de control de movimiento (Elaboración propia) .....	36
---	----

Tabla 3.2: Conceptos de solución para subsistema de transición de locomoción (Elaboración propia).....	37
--	----

Tabla 3.3: Conceptos de solución para subsistema general (Elaboración propia) .....	38
---	----

Tabla 3.4: Conceptos de solución para subsistema de patas (Elaboración propia).....	40
---	----

Tabla 3.5: Conceptos de solución para subsistema de monitoreo de gases (Elaboración propia)	41
---	----

### CAPÍTULO 4

Tabla 4.1: Torques calculados para las articulaciones (Elaboración propia) .....	50
--	----

Tabla 4.2: Elección de motor para articulaciones (Elaboración propia) .....	51
---	----

Tabla 4.3: Elección de motor para ruedas (Elaboración propia).....	52
--	----

Tabla 4.4: Consumo de corrientes de motores (Elaboración propia) .....	59
--	----

Tabla 4.5: Elección de batería (Elaboración propia).....	60
--	----

Tabla 4.6: Consumo de potencia promedio (Elaboración propia) .....	60
--	----

Tabla 4.7: Elección de sensor de gas (Elaboración propia) .....	61
---	----

### CAPÍTULO 5

Tabla 5.1: Corrientes y tiempos según estado del robot. (Elaboración propia) .....	79
--	----

### CAPÍTULO 7

Tabla 7.1: Costos de materiales de fabricación (Elaboración propia).....	86
--	----

Tabla 7.2: Costos de componentes electrónicos (Elaboración propia) .....	87
--	----

Tabla 7.3: Costos de componentes mecánicos (Elaboración propia).....	88
--	----

Tabla 7.4: Costos totales (Elaboración propia) .....	88
--	----

## ANEXOS

Tabla D.1: Evaluación técnica de conceptos de solución (Elaboración propia) .....	111
Tabla D.2: Evaluación económica de conceptos de solución (Elaboración propia) .....	113
Tabla K.1: Escalas de recompensas de RL (Elaboración propia) .....	121
Tabla K.2: Parámetros de entrenamiento (Elaboración propia) .....	121

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

Figura 1.1: Gráfico estadístico de accidentes mortales en minas (Adaptado de MINEM, 2022)...	3
Figura 1.2: Detector monogas inalámbrico ToxiRAE Pro (RAE SYSTEMS SPAIN, s. f.) .....	5
Figura 1.3: Tabla comparativa de configuraciones de robots según terrenos (Adriana Torres-Pardo et al, 2022).....	6
Figura 1.4: Robot ANYmal (Bjelonic, s. f.).....	7

### CAPÍTULO 2

Figura 2.1: Robot móvil de rescate y búsqueda ASGUARD (Markus Eich et al., 2008).....	10
Figura 2.2: Robot móvil en ambientes regulares (Zbigniew Borkowicz et al., 2011).....	11
Figura 2.3: Robot móvil atravesando escalera (Zbigniew Borkowicz et al., 2011).....	11
Figura 2.4: Robot PAW a) Prototipo final b) Simulación (Sharf, 2010).....	12
Figura 2.5: Robot ANYmal atravesando terrenos complicados (Bjelonic et al., 2020).....	12
Figura 2.6: Implementación final del Roller-Walker (Gen Endo & Shigeo Hirose, 2000) .....	13
Figura 2.7: Transición entre modos de desplazamiento (Gen Endo & Shigeo Hirose, 2000) .....	13
Figura 2.8: Robot GMRI a) Diagrama cinemático b) Elevación del robot (Kasprzyczak et al., 2013) .....	15
Figura 2.9: CAD 3D – Mini Robot Dog (Bruton, 2020) .....	15
Figura 2.10: Mecanismo con Compliance (Bruton, 2020) .....	16
Figura 2.11: Cuadrúpedo TITAN-XIII (Kitano et al., 2016) .....	16
Figura 2.12: Mecanismo de pata (Kitano et al., 2016).....	17
Figura 2.13: MIT Chettah Quadruped Robot (Zhong et al., 2019).....	17
Figura 2.14: Actuador propioceptivo (Park & Kim, 2014).....	18

Figura 2.15: Rueda del ASGUARD. Las dimensiones mostradas son $a=18\text{cm}$ y $b=22\text{cm}$ (Babu et al., 2010).	18
Figura 2.16: Prototipo del robot (a) Locomoción por ruedas (b) Locomoción por patas (Sun et al., 2017)	20
Figura 2.17: Diagrama del mecanismo de transformación (Sun et al., 2017)	21
Figura 2.18: Rueda transformable (Bai et al., 2018)	21
Figura 2.19: Transición pasiva (a) Posición no transformable (b) Posición transformable (Bai et al., 2018)	22
Figura 2.20: Rueda activa (Bjelonic, s. f.)	22
Figura 2.21: Robot con ruedas pasivas (Bjelonic, s. f.)	23
<b>CAPÍTULO 3</b>	
Figura 3.1: Black Box (Elaboración propia)	28
Figura 3.2: Dominio mecánico (Elaboración propia)	28
Figura 3.3: Dominio de energía (Elaboración propia)	29
Figura 3.4: Dominio de sensores (Elaboración propia)	30
Figura 3.5: Dominio de procesamiento y control (Elaboración propia)	32
Figura 3.6: Dominio de actuadores (Elaboración propia)	33
Figura 3.7: Dominio de comunicaciones (Elaboración propia)	34
Figura 3.8: Interacción de dominios (Elaboración propia)	35
Figura 3.9: Dominio de comunicaciones (Elaboración propia)	42
<b>CAPÍTULO 4</b>	
Figura 4.1: Diseño CAD integral de concepto de solución óptimo (Elaboración propia)	44
Figura 4.2: Detalle de partes del sistema integral (Elaboración propia)	45
Figura 4.3: Diseño CAD de pata de concepto de solución óptimo (Elaboración propia)	45
Figura 4.4: Modelo topológico: a) Pata b) Global (Elaboración propia)	46
Figura 4.5: a) Vista lateral de modelo topológico simplificado b) DCL del sistema	47
Figura 4.6: A. Parámetros de simulación. Resultados de simulación: B. Deformación total, C. Esfuerzo equivalente, D. Factor de seguridad. (Elaboración propia)	53
Figura 4.7: A. Parámetros de simulación. Resultados de simulación: B. Deformación total, C. Esfuerzo equivalente, D. Factor de seguridad. (Elaboración propia)	54

Figura 4.8: A. Parámetros de simulación. Resultados de simulación: B. Deformación total, C. Esfuerzo equivalente, D. Factor de seguridad. (Elaboración propia) .....	55
Figura 4.9: Detalle de distribución de componentes electrónicos internos (Elaboración propia)	58
Figura 4.10: Diagrama esquemático de la etapa de potencia. (Elaboración propia).....	61
Figura 4.11: Diagrama esquemático de la etapa de control. (Elaboración propia).....	62
Figura 4.12: PCB de la etapa de control. (Elaboración propia) .....	62
Figura 4.13: Diagrama de conexiones de comunicación. (Elaboración propia).....	63
Figura 4.14: Validación de URDF del robot. (Elaboración propia).....	64
Figura 4.15: Simulación en Isaac Gym. (Elaboración propia).....	64
Figura 4.16: Simulación de colisiones en modelo URDF. a) Inicial b) Simplificado.....	65
Figura 4.17: Diagrama de flujo de sistema. (Elaboración propia).....	66
Figura 4.18: Arquitectura de control de algoritmo de locomoción (Elaboración propia).....	67
Figura 4.19: Lazo de control de algoritmo de locomoción (Elaboración propia).....	67
Figura 4.20: Arquitectura de control para recuperación de caída. (Elaboración propia).....	70
Figura 4.21: Lazo de control de algoritmo de recuperación de caída. (Elaboración propia).....	70
Figura 4.22: Colección de posiciones finales de caída. (Elaboración propia).....	71
<b>CAPÍTULO 5</b>	
Figura 5.1: Respuesta de articulaciones ante señal de referencia seno. (Elaboración propia).....	73
Figura 5.2: Mediciones del robot ante comandos de velocidad. (Elaboración propia).....	74
Figura 5.3: Mediciones del robot ante comandos de velocidad máximos. (Elaboración propia).	74
Figura 5.4: Tasa de éxito en terrenos con pendiente. (Elaboración propia).....	75
Figura 5.5: Tasa de éxito en terrenos con obstáculos discretos. (Elaboración propia) .....	75
Figura 5.6: Tasa de éxito en terrenos tipo escalera. (Elaboración propia).....	76
Figura 5.7: Secuencia de recuperación para posiciones aleatorias (Elaboración propia) .....	77
Figura 5.8: Secuencia de recuperación aleatoria con mayor torque. (Elaboración propia).....	77
Figura 5.9: Torque de articulaciones en (a) Terreno plano y (b) Recuperación de caída. (Elaboración propia) .....	78
Figura 5.10: Torque de articulaciones en terreno irregular. (Elaboración propia) .....	79
Figura 5.11: Secuencia de transición de locomoción. (Elaboración propia) .....	80
<b>CAPÍTULO 6</b>	
Figura 6.1: Diagrama general de navegación autónoma. (Elaboración propia) .....	81

Figura 6.2: Comparación de resultados de odometría. (Elaboración propia) .....	82
Figura 6.3: Localización en mapa de puntos en (a) Punto Inicial y (b) $x=1, y=0.5$ . .....	83
Figura 6.4: Overview de nvblox (Millane et al., 2023) .....	83
Figura 6.5: (a) Reconstrucción 3D (b) Mapa de costos local (c) SLAM + Reconstrucción 3D ...	84
Figura 6.6: (a) Occupancy grid map (b) Actores no presentes en el mapa .....	84
Figura 6.7: (a) Ruta Inicial (b) Ruta actualizada usando mapa de costos local .....	85
Figura 6.8: Secuencias de posiciones de la navegación autónoma (Elaboración propia).....	86

## ANEXOS

Figura C.1: Sistema integral del concepto de solución 1 (Elaboración propia).....	102
Figura C.2: Subsistema de patas a) Detalle de pata b) Transición de locomoción .....	103
Figura C.3: Mecanismo de articulación (Elaboración propia).....	103
Figura C.4: Sistema integral del concepto de solución 2 (Elaboración propia).....	104
Figura C.5: Detalle de mecanismo de las patas (Elaboración propia) .....	105
Figura C.6: Sistema integral del concepto de solución 3 (Elaboración propia).....	106
Figura C.7: Rueda transformada (Elaboración propia).....	106
Figura C.8: Mecanismo de transformación (Elaboración propia) .....	107
Figura C.9: Representación conceptual de mecanismo de transformación (Elaboración propia) .....	107
Figura D.10: Diagrama de evaluación técnica (Elaboración propia).....	111
Figura D.11: Diagrama de evaluación económica (Elaboración propia).....	113
Figura D.12: Gráfica de evaluación técnica-económica (Elaboración propia).....	114

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el contacto por inhalación, ingestión o absorción de sustancias tóxicas en áreas mineras se ha registrado como una de las causas más recurrentes de accidentes mortales. Ante esto, el uso de Equipos de Protección Personal (EPPs) y detectores de gas portátiles han supuesto una solución parcial ante este problema. Sin embargo, estos equipos de protección no son suficientes para garantizar la seguridad de los trabajadores debido a que pueden ser penetrados por algunos gases contaminantes, que su capacidad de protección está limitada a una serie de indicaciones que el trabajador debe cumplir y que no protegen ante situaciones impredecibles como explosiones.

En la actualidad, hay propuestas de robots móviles que realizan aquel monitoreo, previo a que los trabajadores ingresen a realizar sus labores, con el fin de alertar el contenido de gases nocivos y decidir el momento de ingresar a la mina. No obstante, la mayoría de estos robots utilizan una locomoción basada en ruedas, que, aunque les permite una alta eficiencia energética y velocidad en terrenos planos, no son adecuados para negociar obstáculos y terrenos abruptos como sí lo son los robots con patas.

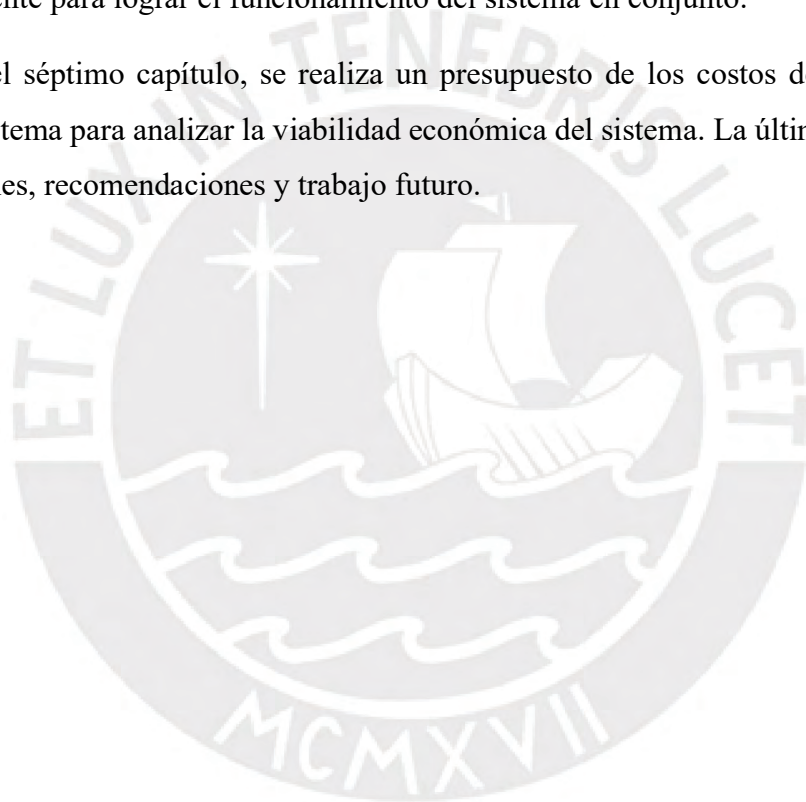
Como solución, este trabajo propone un robot móvil autónomo con locomoción híbrida basada en patas y ruedas, que integra técnicas de Reinforcement Learning para mejorar su robustez ante terrenos desafiantes. Las patas le permiten desplazarse por superficies irregulares y superar obstáculos, mientras que las ruedas ofrecen mayor velocidad y eficiencia en superficies planas. El sistema es capaz de recuperarse de una caída, lo que garantiza un monitoreo continuo incluso en entornos extremos. Asimismo, mediante el uso de percepción visual con una cámara de profundidad, el robot es capaz de navegar de forma autónoma, empleando técnicas de reconstrucción 3D y SLAM visual.

En el primer capítulo, se plantea la problemática y se presenta una propuesta para abordarla. Asimismo, se explica la metodología a emplear, y se delimitan los objetivos y alcance del trabajo. En el segundo capítulo, se realiza un estado del arte de sistemas integrales de locomoción híbrida y se hace un estudio similar para sus subsistemas que lo componen. En el tercer capítulo, se define la lista de exigencias del sistema, a partir de ello, se elabora una estructura de funciones y matriz morfológica. Posteriormente se elaboran tres conceptos de solución que son sometidos a una

evaluación técnica-económica para obtener uno óptimo, del cual se detallan sus diagramas de flujo, bloques y operaciones.

En el cuarto capítulo, se detalla el diseño mecatrónico de los subsistemas, evidenciando cálculos, selección de componentes y simulaciones correspondientes. En el quinto capítulo, se muestra la implementación y análisis respectivo de los algoritmos de control empleando Reinforcement Learning en simulación, tanto para el control de movimiento por comandos de velocidad como para la recuperación de caída. En el sexto capítulo, se detalla la implementación del sistema de navegación autónoma y su interacción con el capítulo anterior, para ello se muestran validaciones de cada componente para lograr el funcionamiento del sistema en conjunto.

Finalmente, en el séptimo capítulo, se realiza un presupuesto de los costos de componentes y materiales del sistema para analizar la viabilidad económica del sistema. La última sección consta de las conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro.



## CAPÍTULO 1 : ANTECEDENTES AL DISEÑO

En este capítulo se presenta la problemática y objetivos generales y específicos que enmarcan al presente trabajo y se escogerá una propuesta de solución que será detallada con profundidad en los siguientes capítulos.

### 1.1 Problemática

#### Problemática general:

La existencia de gases nocivos en minas supone un riesgo para los trabajadores que ingresan a esos espacios confinados. No sólo por el peligro de su inhalación, sino también debido a que alguno de estos puede ser inflamable y acrecentar el riesgo de una muerte por derrumbe o explosión. Precisamente, en la Figura 1.1 se muestra un gráfico estadístico del año 2022, y evidencia que las dos causas conocidas de muerte más comunes en áreas mineras son el derrumbe y el contacto por inhalación de gases nocivos con un 29% y 11% del total de casos, respectivamente (MINEM, 2022).

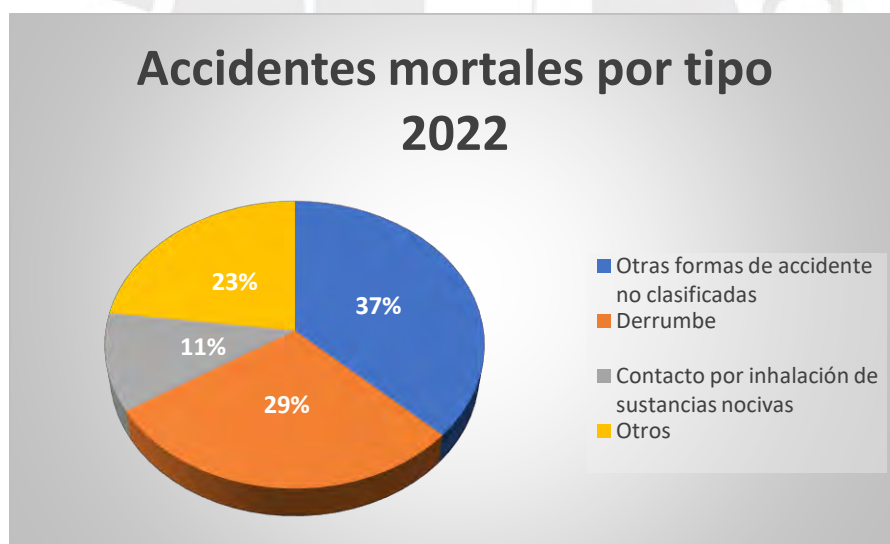


Figura 1.1: Gráfico estadístico de accidentes mortales en minas (Adaptado de MINEM, 2022)

Por otro lado, dichos gases pueden ser generados por diferentes medios, entre ellos las voladuras, emanaciones naturales y circulación de equipos Diesel (Gobierno Regional de Arequipa, s. f.), por lo que la emisión de estos gases es inevitable. De la Tabla 1.1 se puede resaltar que los principales gases que se encuentran en minas son mortales a altas concentraciones. Asimismo, gases como el monóxido de carbono y el metano son incoloros, inodoros e insípidos. Como consecuencia de ello, los trabajadores pueden inhalar dichos gases y no ser conscientes que están intoxicados (Crowcon

Detection Instruments Limited, 2022). Por otro lado, es observable que la mayoría de gases se liberan durante las actividades de los trabajadores dentro de la mina. Con lo cual no basta con un monitoreo de gases antes de ingresar a la mina, sino que es necesario realizarlo periódicamente.

Tabla 1.1: Principales gases mineros (Clavijo, s. f.)

Tipo de gas	Agente químico	Límite máximo permisible (ppm)	Causantes	Efectos	
				Baja concentración	Alta concentración
Asfixiante	Nitrógeno (N)	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lugares con ventilación deficiente y ausencia de oxígeno.</li> <li>• Desprendimiento de los estratos de rocas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sofocamiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muerte por asfixia.</li> </ul>
Tóxico	Anhídrido Sulfuroso (SO <sub>2</sub> )	5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voladuras en minerales que contienen azufre.</li> <li>• Combustión de azufre.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Irritación a los ojos.</li> <li>• Respiración dificultosa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muerte instantánea.</li> </ul>
Tóxico	Hidrógeno Sulfurado (H <sub>2</sub> S)	10	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voladuras en minerales que contienen azufre.</li> <li>• Descomposición de materia orgánica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Irritación del conducto respiratorio.</li> <li>• Conjuntivitis.</li> <li>• Intoxicación leve.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muerte por paro respiratorio.</li> <li>• Intoxicación aguda.</li> <li>• Pérdida del conocimiento.</li> </ul>
Tóxico	Monóxido de carbono (CO)	25	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Combustión incompleta de carburantes usados en maquinaria.</li> <li>• Uso de explosivos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Jaqueca.</li> <li>• Náuseas.</li> <li>• Pérdida del conocimiento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fatal después de una hora de exposición.</li> </ul>
Explosivo y asfixiante	Metano (CH <sub>4</sub> )	5000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Descomposición orgánica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificultad para respirar.</li> <li>• Mareos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fatal en caso de explosión.</li> </ul>

Ante esto una de las herramientas más usadas hoy en día son los monitores de gas portátiles y estáticos. Estos son dispositivos que pueden detectar la presencia de gases peligrosos y alertar en caso los niveles de estos exceden algún valor crítico. Asimismo, pueden permitir enviar una señal de alerta a una estación de control remota que permita al personal realizar los protocolos correspondientes.

En la Figura 1.2 se muestra un detector monogas inalámbrico que permite usar sensores intercambiables para controlar diferentes gases en distintas situaciones. Es ideal para zonas mineras por su resistencia al agua, polvo y golpes, y cuenta con un sistema inalámbrico remoto, que permite la transmisión de información hacia una estación central para una visibilidad de los datos en tiempo real (RAE SYSTEMS SPAIN, s. f.).



Figura 1.2: Detector monogas inalámbrico ToxiRAE Pro (RAE SYSTEMS SPAIN, s. f.)

Sin embargo, esta solución aún presenta ciertas limitaciones, que serán detalladas a continuación. En primer lugar, en caso de tratarse de un monitor portable requiere de intervención humana para el monitoreo con lo cual, aun usando equipos de protección personal, su uso es riesgoso para la salud de los trabajadores y genera limitantes de tiempo y recursos. Además, su alcance se reduce a cubrir áreas limitadas y no son capaces de llegar a zonas remotas y de difícil acceso.

Por otro lado, en caso se use una red de monitores estáticos ubicados estratégicamente en puntos específicos de la zona minera. Aún presentan la limitación de no poder acceder a zonas de difícil

acceso. Asimismo, se requieren un gran número para cubrir toda la mina, con lo cual los costos de instalación aumentan y la necesidad de un mantenimiento constante supone otro problema.

Ante esto, una solución robótica permite solventar las falencias de los monitores de gas. En primer lugar, a diferencia de un monitor portable, un robot puede acceder a zonas remotas con altas concentraciones de gas sin poner en riesgo la vida de los trabajadores. Asimismo, los robots pueden moverse más rápidamente, lo que implica cubrir una mayor área en menor tiempo. Por otro lado, a diferencia de una red de monitores, un robot puede acceder a zonas de difícil acceso y, además, a largo plazo, permite reducir el costo de mantenimiento.

**Problemática específica:**

El principal problema al que se enfrenta la industria minera es la necesidad de desarrollar una solución tecnológica que permita realizar un monitoreo de gases nocivos en toda la zona minera, incluso aquellas áreas de difícil acceso. Estos terrenos son en su mayoría altamente irregulares lo que genera la necesidad de un robot capaz de lidiar con estos problemas.

A continuación, se observan los distintos tipos de terrenos irregulares que se pueden presentar, donde para cada uno de ellos, una serie de modelos de robots son comparados según el tamaño del círculo en la celda. Además, el número dentro de la celda corresponde a la cantidad de publicaciones que se han hecho al respecto (Adriana Torres-Pardo et al, 2022).

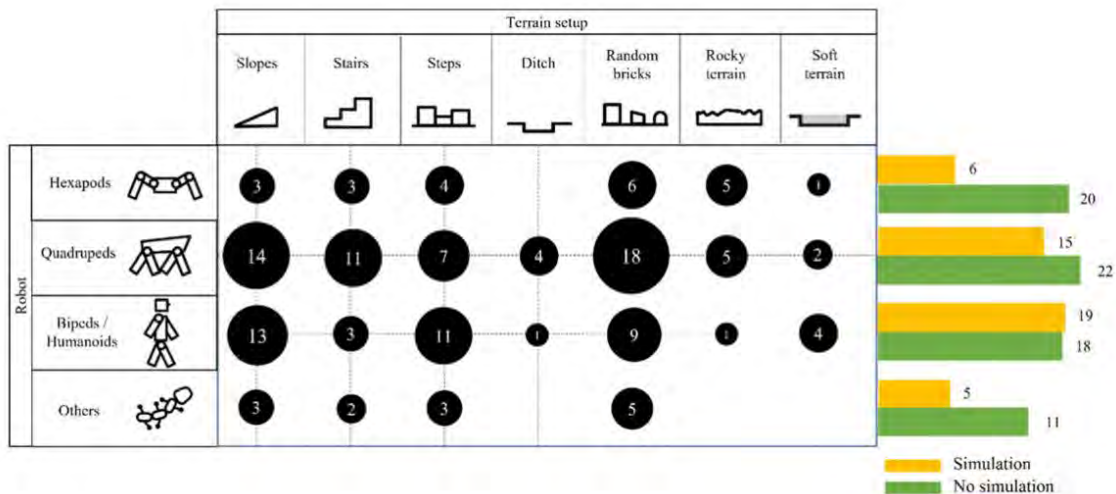


Figura 1.3: Tabla comparativa de configuraciones de robots según terrenos (Adriana Torres-Pardo et al, 2022)

Se puede observar que los robots con patas y especialmente los robots cuadrúpedos son los más empleados para estas tareas. Sin embargo, el principal problema de estos radica en su poca eficiencia energética y velocidad de locomoción, los cuales se acrecientan aún más en terrenos planos (Machado & Silva, 2006).

## 1.2 Presentación de la propuesta

En base a la problemática anteriormente expuesta, la presente tesis propone el diseño de un sistema cuadrúpedo de locomoción híbrida que permita el monitoreo de gases nocivos en galerías subterráneas mineras. En ese sentido, el robot será capaz de alertar a una estación de control en caso alguna de las concentraciones de los gases supere su valor permisible. En la Figura 1.4 se observa un sistema comercial como referencia a la presente propuesta de tesis.

El sistema de locomoción híbrida permitirá la transición entre una locomoción con ruedas y una con patas. Con el fin de aprovechar las ventajas de los robots con ruedas en terrenos planos, como la eficiencia y velocidad, y las de los robots con patas como la capacidad de sobrellevar terrenos abruptos y de difícil acceso. Esta transición es un comando que puede ser activado de manera remota por un operario.

Asimismo, el presente trabajo propone un algoritmo de control de las articulaciones del cuadrúpedo que le permita ejecutar movimientos bioinspirados. A partir de ello, el vehículo será capaz de ser teleoperado o navegar de manera autónoma por la zona minera a la vez que realiza las tareas de monitoreo.



Figura 1.4: Robot ANYmal (Bjelonic, s. f.)

## 1.3 Objetivos

### Objetivo general del trabajo de tesis

Desarrollar un robot cuadrúpedo con locomoción híbrida autónomo para el monitoreo de gases nocivos, capaz de operar en galerías mineras subterráneas con superficie irregular.

### Objetivos específicos del trabajo de tesis

- Realizar una revisión del estado del arte sobre sistemas robóticos de locomoción híbrida y tecnologías de monitoreo de gases en entornos mineros, identificando limitaciones, oportunidades de mejora y definiendo los requerimientos técnicos y operativos del sistema.
- Diseñar y simular el subsistema mecánico, garantizando la capacidad de desplazamiento en terrenos irregulares y la transición eficiente entre locomoción por patas y ruedas.
- Diseñar un subsistema eléctrico-electrónico que integre sensores para detectar gases tóxicos, monitorear el entorno, realizar auto-diagnósticos del estado interno y optimizar la autonomía energética en operaciones subterráneas.
- Desarrollar e implementar en simulación el subsistema de control, integrando técnicas de Reinforcement Learning y control clásico, que permita el control de movimiento del robot en su modo activo de locomoción, así como la recuperación autónoma ante caídas.
- Desarrollar e implementar en simulación el subsistema de navegación autónoma, combinando técnicas de percepción visual, tales como reconstrucción 3D y SLAM visual, con el algoritmo de control de movimiento desarrollado.
- Elaborar un reporte de costos del diseño, fabricación e implementación del robot con el fin de validar la viabilidad económica del sistema.

## 1.4 Alcance

En el presente trabajo de tesis se desarrolla un robot cuadrúpedo autónomo con locomoción híbrida para el monitoreo de gases nocivos en galerías subterráneas mineras que presenten terreno irregular. Debido a la complejidad que supone navegar en terrenos altamente abruptos, se considerarán terrenos con una pendiente no mayor a 30°(Focchi et al., 2016).

Asimismo, la tesis no desarrolla un sistema de detección que permita distinguir entre un terreno abrupto y uno regular debido a que se requeriría de un algoritmo que va más allá del alcance del presente trabajo. Sin embargo, el robot también podrá recibir esas instrucciones de un operario que pueda realizar la transición entre los modos de locomoción desde una estación de control.

Además, el trabajo contempla el desarrollo de un robot autónomo y el método de navegación requiere un mapeo previo del entorno que puede ser realizado teleoperando el robot. Para ello, un sistema de transmisión de video a largas distancias en tiempo real es necesario. Sin embargo, es una tarea que va más allá de los objetivos de esta tesis con lo cual se asumirá como una caja negra que funciona según los requerimientos del proyecto.

### **1.5 Metodología**

La metodología a emplear será basada en las normas de diseño de sistemas mecatrónicos VDI 2206 y VDI 2221. Las cuales, para la presente tesis, inician con una comprensión de la problemática de inhalación de gases nocivos en zonas mineras y la necesidad de un sistema capaz de sobrellevar terrenos irregulares. A partir de ello se procede con una investigación del estado del arte de sistemas integrales con locomoción híbrida y de sus correspondientes subsistemas como la locomoción basada en patas, transición de locomoción, monitoreo de gases y control.

Posteriormente se ejecuta un plan de trabajo a partir de la elaboración de una lista de exigencias del proyecto y se elabora una estructura de funciones para satisfacer las exigencias impuestas anteriormente. Se obtienen distintos conceptos de solución en función a las distintas tecnologías que pueden cumplir con las funciones. Finalmente, se debe realizar una evaluación técnica económica de cada uno de los conceptos de solución propuestos con el fin de obtener una solución óptima.

En base a este concepto óptimo se realiza el diseño mecatrónico mediante cálculos, simulaciones, selección de componentes y un modelado CAD del robot. Asimismo, se incluye un diagrama de flujo general que detalla el funcionamiento del sistema y un diagrama de operaciones, que permite ilustrar las acciones que debe realizar un operario. A partir de ello, se diseña, implementa y valida la autonomía de locomoción y navegación en un simulador físico.

## CAPÍTULO 2 : ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Sistemas integrales

En esta sección, se encuentra el estado del arte de robots con locomoción híbrida con el fin de tener un panorama general del sistema a desarrollar.

#### ASGUARD Robot

El robot ASGUARD fue diseñado para aplicaciones de rescate y búsqueda, aquellas misiones que implican tareas repetitivas y peligrosas para seres humanos. Por lo que tiene que ser capaz de lidiar con terrenos difíciles y abruptos, así como moverse rápido en terrenos planos. Como se muestra en la Figura 2.1, el robot hace uso de 20 patas múltiples rotativas montadas a lo largo de cuatro ejes cadera. Además, tiene un controlador adaptativo versátil que mediante una retroalimentación de la inclinación le permite cambiar su locomoción entre terrenos planos y difíciles (Markus Eich et al., 2008).

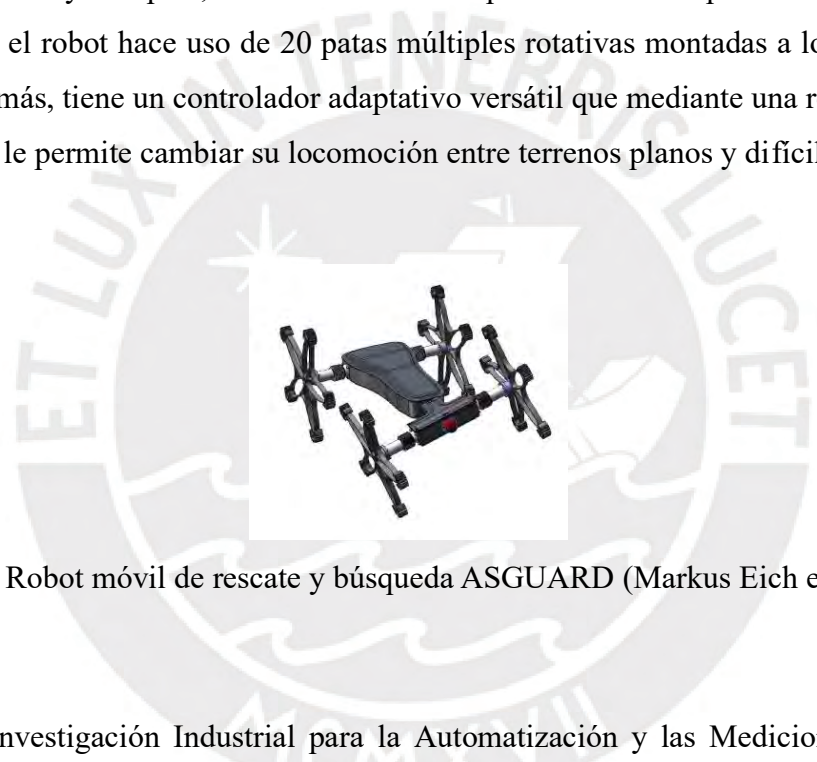


Figura 2.1: Robot móvil de rescate y búsqueda ASGUARD (Markus Eich et al., 2008)

#### GMRI Robot

El Instituto de investigación Industrial para la Automatización y las Mediciones en Varsovia diseñó un robot móvil para monitorear ambientes mineros riesgosos para el ser humano, donde se encuentra principalmente combinaciones de gases explosivos, tóxicos y sofocantes. El robot se mueve gracias a actuadores neumáticos lineales y frenos de perno, y fue diseñado para moverse óptimamente, es decir, con el menor consumo posible de nitrógeno comprimido (Leszek Kasprzyczak et al., 2012).



Figura 2.2: Robot móvil en ambientes regulares (Zbigniew Borkowicz et al., 2011)

El robot tiene la capacidad de extender independiente las ruedas traseras, subir/bajar el cuerpo del robot y levantar las ruedas delanteras utilizando las patas delanteras y un actuador especial neumático. Esto le permite, como se muestra en la Figura 2.3, cruzar/escalar cualquier obstáculo con las ruedas delanteras y no sólo atropellarlo.

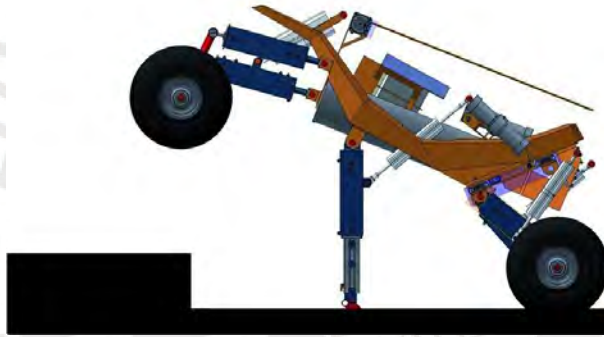


Figura 2.3: Robot móvil atravesando escalera (Zbigniew Borkowicz et al., 2011)

### **PAW Robot:**

Plataforma cuadrúpeda robótica diseñada por el Mechatronic Locomotion Laboratory de la universidad de McGill. El robot consta de cuatro patas elásticas con una articulación rotatoria en las caderas y ruedas montadas al final de las patas. Estas patas de dos grados de libertad son accionadas por un único motor en la articulación lo que le beneficia para lograr una estabilidad dinámica en la marcha. Por otro lado, a diferencia de otros robots cuadrúpedos, PAW es autónomo computacionalmente y energéticamente (Sharf, 2010).

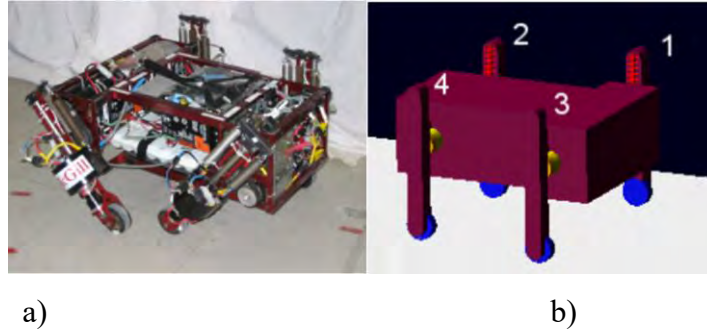


Figura 2.4: Robot PAW a) Prototipo final b) Simulación (Sharf, 2010)

### ANYmal Robot

El robot cuadrúpedo ANYmal utiliza ruedas y patas, dándole una movilidad híbrida que puede navegar en cualquier terreno. Fue desarrollado por ingenieros del laboratorio de sistemas robóticos del ETH Zúrich con fines de operaciones de rescate y búsqueda en áreas riesgosas, que puede incluir túneles, cuevas y áreas subterráneas. Está equipado con GPS, LIDAR, y cámaras de profundidad y gran angular, permitiéndole mapear el ambiente y su posición en determinada área (Bjelonic et al., 2020).



Figura 2.5: Robot ANYmal atravesando terrenos complicados (Bjelonic et al., 2020)

El robot fue desarrollado usando actuadores controlables por torque, que les permite a sus patas tener la capacidad suficiente de poder subir escaleras y atravesar otro tipo de obstáculos, como se puede observar en la Figura 2.5. Por otro lado, las ruedas también son de torsión y no son direccionables, es decir, no pueden girar a la derecha o izquierda; lo que le permite permanecer estable en diferentes terrenos.

### Roller-Walker

Vehículo con un mecanismo híbrido de movilidad desarrollado por investigadores del laboratorio de Hirose-Fukushima de Japón. Una de sus principales diferencias con otros vehículos híbridos es que usa ruedas pasivas en lugar de activas, lo que le permite disminuir el peso excesivo causado por los actuadores y mecanismos de movimiento y frenado. Por lo que, el uso de ruedas pasivas no limita el mecanismo de patas, por el bajo peso (Gen Endo & Shigeo Hirose, 2000).



Figura 2.6: Implementación final del Roller-Walker (Gen Endo & Shigeo Hirose, 2000)

Como se puede observar en la Figura 2.7, el robot tiene dos modos de desplazamiento, usa el modo con patas para terrenos abruptos y el modo con ruedas para terrenos planos y menos escabrosos. Para hacer la transición de ambos modos le basta rotar la planta de sus patas 90 grados.



Figura 2.7: Transición entre modos de desplazamiento (Gen Endo & Shigeo Hirose, 2000)

Su modo de locomoción con ruedas se basa en el patinado, en el cual las ruedas obtienen cierto grado de inclinación con respecto al eje de rotación debido al movimiento de las patas. A partir de ello, las ruedas no requieren ningún tipo de actuador, sino que el vehículo se mueve debido a la fuerza de empuje generada por el mecanismo de las patas (Gen Endo & Shigeo Hirose, 2000).

### **Tabla comparativa de sistemas integrales**

En la Tabla 2.1 se puede observar la comparación de los principales sistemas integrales que cuentan con locomoción híbrida para monitoreo en zonas de superficie irregular. Se encuentra que el mínimo número de grados de libertad es 5 y que la mayoría de estos presenta una velocidad

máxima de al menos 1 m/s usando la locomoción basada en ruedas. Asimismo, gran parte de los sistemas son eléctricos en lugar de neumáticos, esto se debe a la mayor eficiencia energética y precisión de control de movimiento.

Tabla 2.1: Comparación de principales robots de locomoción híbrida (Elaboración propia)

Robot	GMRI	ASGUARD	PAW	ANYmal	Roller-Walker
Imagen					
GDL	10	5	8	16	16
Peso(kg)	-	9.5	15.7	30	24
Dimensiones(cm)	175x110x50	95x50x44	49.4x16.6x17	80x60x70	60x50x25
Velocidad máxima(m/s)	-	2	1.3	6.26	2.2
Actuadores	Ruedas y patas: 24x Actuador neumático de dos estados	Ruedas o patas: 4x Motor brushed DC de 24V, 46:1, 83W	Cadera: 4x Motor brushed DC, 73.5:1, 90W Ruedas: 4x Motor brushed DC, 4.8:1, 20W	Caderas, rodillas y ruedas: 12x Anydrive actuator	Caderas, rodillas y mecanismo de transición: 12x Servomotor
Alimentación	Tanque de nitrógeno comprimido	Baterías LiPo, 30V/10Ah	3 Paquetes de baterías(30 NiMH D-Cells), 9.5Ah	Baterías Li-Ion 650Wh	-

## 2.2 Subsistema de patas

Si bien el objetivo es diseñar un robot con locomoción híbrida, el mecanismo de las patas requiere ser analizado de forma independiente con el fin de obtener referencias adicionales para el diseño mecánico. A continuación, se detallan distintos mecanismos de patas de robots cuadrúpedos que son empleados en terrenos irregulares.

### GMRI Robot

Este robot cuenta únicamente con actuadores neumáticos alimentados por nitrógeno comprimido. El mecanismo de patas consiste en dos actuadores lineales en la parte posterior y uno en la parte trasera que en conjunto representan las tres patas del robot (Kasprzyczak et al., 2013). Las dos

patas delanteras y la pata trasera que se muestran en el diagrama cinemático de la Figura 2.8, permiten al robot atravesar obstáculos. Para ello las delanteras cuentan con un sistema de dos actuadores lineales que permiten generar dos patas de soporte para que el robot se levante. Mientras que la pata trasera cuenta un único actuador lineal que permite aumentar aún más la inclinación del robot y, por tanto, la altura de obstáculo que puede maniobrar.

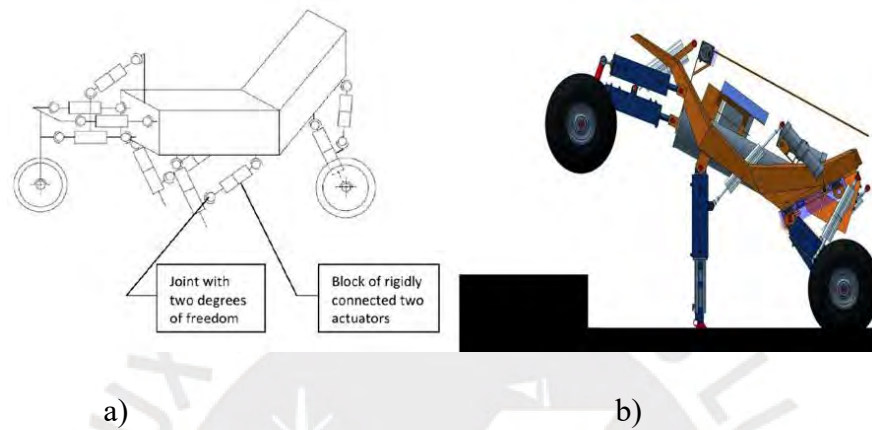


Figura 2.8: Robot GMRI a) Diagrama cinemático b) Elevación del robot  
(Kasprzyczak et al., 2013)

### Mini Robot Dog – James Bruton (XRobots)

Este robot cuadrúpedo mostrado en la Figura 2.9, fue diseñado con fines educativos y de pruebas para una locomoción dinámica eficiente, con lo cual cuenta con un diseño mayormente impreso en 3D y una electrónica económicamente accesible. Se puede observar que el robot cuenta con tres grados libertad por cada pata y cuenta con diversos mecanismos que serán explicados a continuación que mejoran su locomoción al caminar.



Figura 2.9: CAD 3D – Mini Robot Dog (Bruton, 2020)

Uno de los problemas que presenta el primer prototipo de XRobots, es que las articulaciones del cuadrúpedo eran demasiado rígidas con lo cual no era posible hacerlo dinámico. Ante esto se propuso el mecanismo mostrado en la Figura 2.10 para cada una de las articulaciones con el fin de absorber impactos y mejorar la estabilidad del robot mientras se mueve en superficies irregulares, donde puede observar el uso de un servomotor, resorte, imanes, engranajes y un sensor hall.

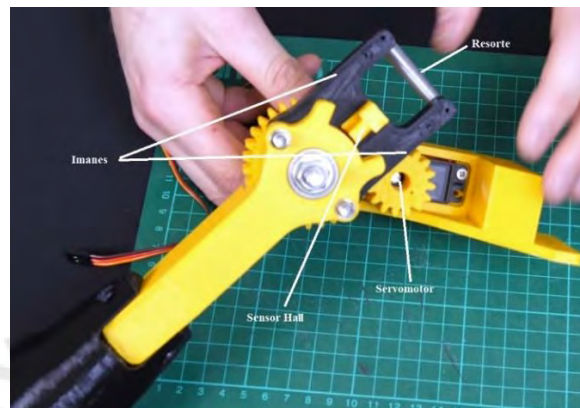


Figura 2.10: Mecanismo con Compliance (Bruton, 2020)

### TITAN-XIII

Este robot cuenta con una configuración *Sprawling*, con lo cual el eslabón de la pata que está directamente conectado al cuerpo mediante una articulación, está en posición horizontal mientras que el segundo eslabón se encuentra de forma vertical como posición estándar. Este cuadrúpedo se caracteriza por ser un diseño de bajo peso y compacto con lo cual le permite ser eficiente energéticamente, rápido y altamente estable.



Figura 2.11: Cuadrúpedo TITAN-XIII (Kitano et al., 2016)

La principal característica de esta pata, que se muestra en la Figura 2.12 es la inclusión de un mecanismo accionado por cuerda que consta de un motor DC Brushless, dos cables de fibra sintéticos, un sistema de engranajes planetarios y dos poleas. Lo cual permite accionar la

articulación de la rodilla sin la necesidad de ubicar un motor en esa zona y, en consecuencia, reduce su inercia (Kitano et al., 2016). Asimismo, los dos motores restantes de la cadera también son ubicados en la base de la pata y aledaño a estos se encuentra un mecanismo de correas síncronas que acciona la articulación *yaw* de la cadera mediante una transmisión por reducción.

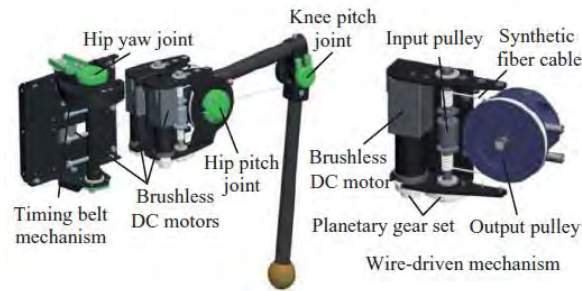


Figura 2.12: Mecanismo de pata (Kitano et al., 2016)

### MIT Cheetah Robot

El mecanismo de patas de este robot está inspirado en la estructura articular de un guepardo, pues presenta patas con articulaciones redundantes, es decir, presenta un número mayor de articulaciones en las patas que las necesarias para una locomoción básica, que son tres. Además, se empleó un material compuesto de fibra de carbono y como se observa en la Figura 2.13, los eslabones de las patas no son del todo sólidos. Sino que, son tubos huecos cubiertos de espuma, lo que simula los huesos y músculos de un ser vivo, y, por lo tanto, permite una estructura liviana y a la vez resistente (Zhong et al., 2019).



Figura 2.13: MIT Cheetah Quadruped Robot (Zhong et al., 2019)

Asimismo, como se observa en la Figura 2.14, las patas son accionadas por un actuador propioceptivo, es decir, un actuador que utiliza sensores integrados para medir su movimiento y ajustarlo autónomamente. El cual alberga un motor de alta densidad de torque en conjunto con un sistema de transmisión de engranajes de reducción, que permite poca pérdida por fricción y la

capacidad para mitigar impactos. Además, este método le da la capacidad de realizar una detección de contacto con el suelo, mediante un sensado de corriente y un encoder en la articulación (Park & Kim, 2014).

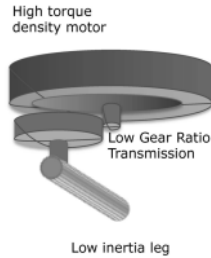


Figura 2.14: Actuador propioceptivo (Park & Kim, 2014)

### ASGUARD robot

Las patas del robot están dispuestas simétricamente alrededor de cada uno de los cuatro ejes del cuerpo como se puede observar en la Figura 2.15. Con esta configuración se obtienen cinco patas por cada eje separadas  $72^\circ$  entre sí, lo que le permite al robot tener una configuración estable pues tendrá al menos cuatro patas en el suelo en todo momento. Asimismo, una ventaja de esta configuración respecto a ruedas tradicionales es la capacidad de sobrellevar terrenos con una altura mayor al radio de la rueda. Mientras que su ventaja sobre los robots con patas únicamente, radica en que a altas velocidades las puntas de las patas serán las únicas que tendrán contacto con el suelo, con lo cual actuará como una locomoción con ruedas alcanzando velocidades máximas de 2m/s que es aproximadamente dos cuerpos del robot por segundo.

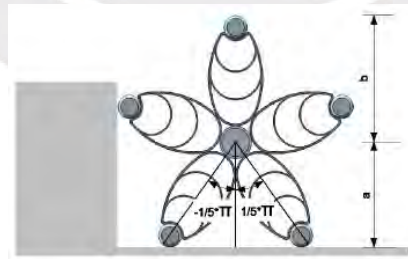


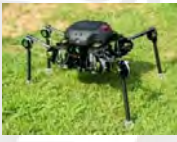




Figura 2.15: Rueda del ASGUARD. Las dimensiones mostradas son  $a=18\text{cm}$  y  $b=22\text{cm}$  (Babu et al., 2010).

### Tabla comparativa de subsistema de patas

En la Tabla 2.2 se puede observar la comparación de los principales mecanismos de locomoción empleados por robots cuadrúpedos. Se encuentra que el mínimo número de grados de libertad es 5 y que la velocidad más rápida es la del robot con topología redundante. Asimismo, se puede observar que algunos de estos emplean una transmisión por cable o en paralelo, con el fin de reducir la inercia de las patas al no ubicar todos los actuadores en cada articulación. Finalmente, se puede observar que algunos de estos robots cuentan con mecanismos de *compliance*, es decir, que son capaces de absorber y adaptarse a las fuerzas externas permitiéndole una mayor estabilidad.

Tabla 2.2: Comparación de mecanismos de patas (Elaboración propia)

Robot	GMRI	Mini Robot Dog	TITAN-XIII	MIT Cheetah	ASGUARD
Imagen					
Topología de pata	Prismática	Articular (Mammal type)	Articular (Scrawling type)	Redundante	Tipo rueda
GDL	10	12	12	16	5
Material	Aleaciones de metales ligeros y circonio	PLA	Plástico reforzado con fibra de carbono	Fibra de carbono y espuma	-
Velocidad máxima(m/s)	-	-	1.38	3.9	2
Actuador	Actuador neumático de dos estados	Servomotor metálico 11kg	Motor DC Brushless	Propioceptivo	Motor DC Brushed
Mecanismo de accionamiento de articulaciones inferiores	Individual	Individual	Transmisión por cable	Transmisión en paralelo	Individual
Compliance	No	Sí	Sí	Sí	Sí
Ventaja principal	Buena velocidad de respuesta y precisión de control	Bajo costo y buena estabilidad	Diseño mecánico liviano y compacto	Alta velocidad y eficiencia energética	Menor costo y mayor simplicidad
Desventaja principal	Mayor peso y complejidad	Mayor inercia	Mayor complejidad	Mayor costo y complejidad	Sobrelleva terrenos de baja pendiente

### 2.3 Subsistema de transición de locomoción

El sistema del presente proyecto cuenta con una locomoción híbrida, con lo cual es necesario poner énfasis en el mecanismo o dispositivo empleado para la transición de los modos de locomoción. En ese sentido, a continuación, se muestran y detallan diversas tecnologías empleadas en robots híbridos.

#### Transición activa para transformación de rueda

Este robot presenta un diseño híbrido con dos ruedas transformables a patas y un cuerpo en forma de paralelepípedo donde se ubica los componentes electrónicos, entre ellos tres motores son empleados. Dos de ellos permiten accionar las ruedas, mientras que el último acciona el mecanismo de transformación. Además, como se observa en la Figura 2.16 se cuenta con una pieza mecánica que actúa como tercer punto de apoyo y tiene la característica de poder ser reemplazable según las características del terreno a maniobrar (Sun et al., 2017).

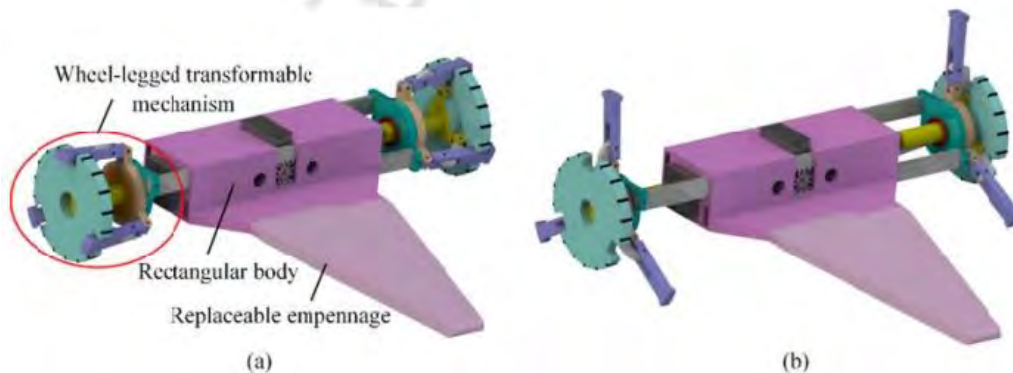


Figura 2.16: Prototipo del robot (a) Locomoción por ruedas (b) Locomoción por patas (Sun et al., 2017)

En la Figura 2.17, se observa un diagrama que ilustra el mecanismo de transformación empleado por la rueda. El proceso empieza mediante la potencia generada por el tercer motor anteriormente mencionado, que genera la fuerza  $F_{in}$ . A partir de ello, se generan las fuerzas de reacción  $F_n$  y fricción  $F_f$ , debido al contacto de las patas con el terreno. A medida que husillo se desplaza el ángulo  $\beta$  va aumentando y la distancia  $s$  va disminuyendo. Hasta que finalmente, las patas se posicionan verticalmente donde  $\beta = 90^\circ$  y  $s = 0$ .

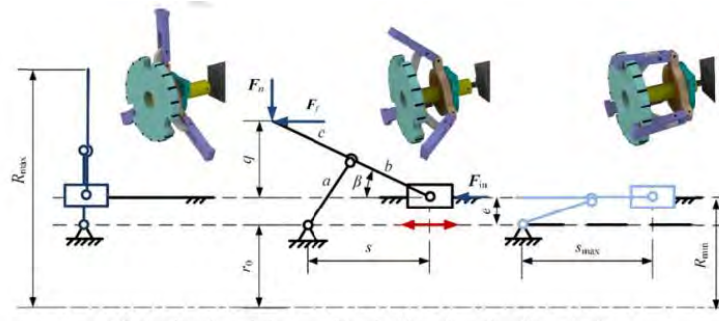


Figura 2.17: Diagrama del mecanismo de transformación (Sun et al., 2017)

### Transición de locomoción pasiva/activa

Este robot fue diseñado para operaciones de rescate y búsqueda en terrenos irregulares, con lo cual se basa en una locomoción híbrida. Para lograr ello una rueda transformable con un mecanismo de enganche múltiple de cuatro barras fue diseñada, de modo que puede permitir la transición hacia tres patas de un modo eficiente. Como se observa en Figura 2.18, El mecanismo consta de tres patas en forma de rueda, tres eslabones, y barras internas y externas. Y una de sus ventajas es que fue diseñado para que sea activo y pasivo, para ello, con el fin de obtener una transformación confiable y evitar actuadores adicionales, los componentes son conectados por una bisagra (Bai et al., 2018).

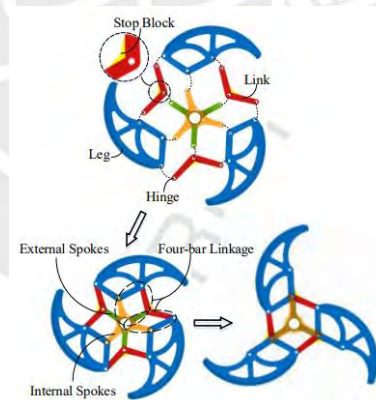


Figura 2.18: Rueda transformable (Bai et al., 2018)

A continuación, se observa el proceso de transformación de la rueda cuando alcanza un obstáculo. Por una parte, en la Figura 2.19a se observa que, aunque la rueda entró en contacto con el obstáculo, debido al ángulo de  $90^\circ$  entre la superficie de contacto y el eslabón central, no puede transformarse al modo de locomoción por patas. Por otro lado, en la Figura 2.19b si hay una transformación debido a que el ángulo pertenece al rango entre  $0^\circ$  y  $30^\circ$ .

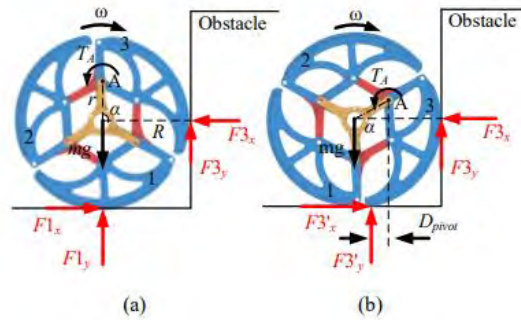


Figura 2.19: Transición pasiva (a) Posición no transformable (b) Posición transformable (Bai et al., 2018)

### Anymal Robot: Ruedas pasivas o activas

Este robot fue diseñado para distintas tareas de inspección en plantas industriales y para aplicaciones de rescate, pues su modo de locomoción híbrida le permite manejar terrenos altamente abruptos y a su vez terrenos planos. Una de las versiones de este sistema cuenta con una transición de locomoción que se basa en ruedas activas. Es decir, una rueda que tiene un motor integrado en su estructura, como se observa en la Figura 2.20. Lo que le permite mayor estabilidad, capacidad de carga y maniobrabilidad en terrenos complicados, a su vez la complejidad del control se reduce, por la posibilidad de realizar el control mediante una configuración diferencial.



Figura 2.20: Rueda activa (Bjelonic, s. f.)

Por otro lado, también cuenta con un sistema que consta de ruedas pasivas permitiendo reducir el costo y peso por la reducción de actuadores. Como se observa en la Figura 2.21, el modo de locomoción se basa en el patinaje, de modo que mediante el movimiento de las patas el robot se puede impulsar y movilizarse.



Figura 2.21: Robot con ruedas pasivas (Bjelonic, s. f.)

### Tabla comparativa de subsistema de transición de locomoción

En la Tabla 2.3 se puede observar la comparación de los principales sistemas de transición de locomoción. De dónde se puede destacar la complejidad de diseño de ruedas transformables a patas en comparación a ruedas activas o pasivas como las tiene el Anymal Robot. Sin embargo, este último presenta una desventaja de peso y energética por el alto número de motores que tiene para controlar sus articulaciones.

Tabla 2.3: Tabla comparativa de sistemas de transición de locomoción (Elaboración propia)

Sistema	Robot para evasión de obstáculos	Robot de rescate y búsqueda	Anymal Robot
Imagen			
Cantidad de ruedas	2	2	4
Actuador de transición	Motor DC	Ninguno o motor DC	Rueda con motor incorporado
Componentes adicionales del mecanismo	Piñón y cremallera, cojinete de cambio y engranaje de dirección	Embrague electromagnético	Ninguno
Tipo de rueda	Activa	Pasiva y activa	Pasiva o activa
Ventaja	Reducción de actuadores	Ningún actuador para ciertos casos	Simplicidad de diseño
Desventaja	Complejidad de diseño	Complejidad de diseño	Alto número de actuadores

## **CAPÍTULO 3 : DISEÑO CONCEPTUAL**

En este capítulo se definirá un concepto de solución óptimo del robot cuadrúpedo con locomoción híbrida para monitoreo de gases. Para ello se incluye una lista de exigencias y se elabora una estructura de funciones. Para posteriormente proponer y realizar un análisis técnico-económico de tres alternativas de solución

### **3.1 Requerimientos del sistema**

En la descripción de a continuación se realiza un breve resumen de las exigencias más relevantes. Por otro lado, en el Anexo A, se listan todos los requerimientos del presente proyecto.

#### **Función principal**

Monitorear concentraciones de gases nocivos y alertar en caso alguna de estas supere su valor máximo permisible. Además, se debe diseñar un sistema capaz de navegar en terrenos irregulares.

#### **Geometría**

Tomando en cuenta los robots con locomoción híbrida revisados en el estado del arte, el vehículo a diseñar deberá tener dimensiones máximas (L x W x H) de 1 x 0.75 x 1 m.

#### **Transporte**

Según la resolución ministerial RM 375-2008-TR emitida por el Ministerio de Trabajo y Promoción de Empleo (2009), la carga máxima que debería levantar una persona es de 25 Kg. Considerando que debe ser posible transportar el robot por dos personas, debe tener una masa máxima de 50 Kg.

#### **Cinemática**

Las patas del cuadrúpedo tendrán al menos 3 grados de libertad. Además, considerando las tecnologías revisadas en el estado del arte, la velocidad del robot usando la locomoción con ruedas y patas únicamente, debe ser de al menos 1.5 y 0.75 m/s, respectivamente.

#### **Señales**

El robot deberá poder ser teleoperado, con lo cual las señales de ingreso al robot son las velocidades y órdenes de encendido y apagado principalmente. Además, se deberá poder enviar comandos para activar la transición de los modos de locomoción.

Por otro lado, el robot deberá poder enviar los valores medidos por los sensores de gases y alertas en caso alguno de estos supere un valor máximo permisible y, además, deberá ser posible verificar el nivel de carga de las baterías desde una estación remota. Por otro lado, es necesario que el robot capture imágenes en tiempo real para su posterior envío al operario que lo esté teleoperando.

### **Operación**

El robot deberá poder navegar en terrenos con una pendiente muy alta o escarpada debido a la irregularidad en terrenos mineros. Según la escala definida por Medina & Calderón (2016), corresponde a la escala 5, con un rango de pendiente máximo de 25 a 45°. Con lo cual, considerando los robots cuadrúpedos visto en el estado del arte, se definió que el vehículo debe navegar en terrenos con pendiente no mayor a 30°. De esta revisión del estado del arte, también se definió que la altura máxima de obstáculo que el robot deberá poder maniobrar es de 18 cm.

Por otra parte, según estudios recientes, Ancash es la región con mayor contaminación de áreas mineras, lo cual afecta a sus recursos naturales y la vida de comunidades humanas (MINEM, 2014). Con lo cual, se desea que el robot realice el monitoreo en galerías subterráneas mineras de dicha región. Además, las condiciones ambientales de operación deberán ser de temperatura y humedad relativa en el rango de 0°C a 50°C y 30% a 90%, respectivamente, con el fin de evitar la oxidación, corrosión y daños en los componentes electrónicos.

### **Procesamiento y control**

Este subsistema deberá realizar un control de posición y velocidad, para el movimiento de las articulaciones de las patas y las ruedas, respectivamente. Asimismo, dependiendo de los comandos de velocidad enviados por el operario de teleoperación, el robot deberá ser capaz de generar las trayectorias de las patas para lograr una caminata. Por otro lado, se desea que el cuadrúpedo pueda ejecutar al menos 1 movimiento bioinspirado mediante un control por Reinforcement Learning, como puede ser, una corrección de postura o recuperación ante caída, que le permitirá mejorar su comportamiento en terrenos irregulares.

Además, el operario se encargará de enviar un comando que permita activar la transición de locomoción. De esta forma, cuando el operario visualice un terreno irregular activará el modo de locomoción basada en patas, caso contrario, su locomoción de ruedas.

### **Electrónica (Hardware)**

El robot debe ser capaz de medir los gases más riesgosos que se encuentran en galerías subterráneas mineras. De acuerdo a la información presentada en el Anexo A, se delimitó que se debe realizar el monitoreo de al menos 4 gases: H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y CO. Asimismo, con el fin de obtener retroalimentación para el control de las articulaciones, sensores de posición angular son necesarios.

Por otro lado, el robot deberá contar con un sensor inercial (IMU), pues brinda información relevante para realizar el control del movimiento bioinspirado usando Reinforcement Learning. Asimismo, es deseable contar con un sensor de percepción 3D en caso el robot tenga navegación autónoma. Su uso no es tan primordial para el control pues aumenta excesivamente el costo computacional de la simulación y, por tanto, el tiempo de entrenamiento. Sin embargo, es necesario que el robot capture una imagen del ambiente para su posterior transmisión.

El robot deberá contar con actuadores que le permitan realizar el movimiento de sus articulaciones y su sistema de locomoción basada en ruedas. Por otro lado, actuadores que le permitan realizar la transición entre los dos sistemas pueden ser necesarios según el diseño mecánico del robot.

### **Seguridad**

El robot deberá contar con un botón de emergencia, que le permita detenerse de forma rápida y segura ante cualquier malfuncionamiento y situación imprevista o peligrosa. Asimismo, debido al peligro latente de explosión en zonas mineras, el sistema deberá alertar a la estación base cuando detecte una fuga de metano, para posteriormente retirarse de la zona.

Por otro lado, es deseable que el robot cuente una protección contra polvo y agua IP54, es decir, el equipo podrá soportar salpicaduras de agua en cualquier dirección y podrá soportar en grado 5, entrada de polvo.

### **3.2 Definición de entradas y salidas**

A continuación, se describen las entradas y salidas del sistema, con el fin de explicar su funcionamiento e interacción con su entorno. Para posteriormente ser agregadas en un diagrama de Black Box, como se ilustra en la Figura 3.1.

#### **ENTRADAS**

- Encendido: Señal activada de forma manual o por software que permite iniciar el sistema.
- Parada de emergencia: Señal activada por botón físico que suspende la alimentación al sistema.

- Modo de operación: Comando de activación de modos de locomoción o recuperación de caída.
- Velocidad del vehículo: Comandos de velocidad lineal y angular para teleoperación del robot.
- Energía Eléctrica: Fuente de energía eléctrica (220 VAC / 60 Hz) que permitirá la carga de las baterías que se encuentran dentro del robot.
- Entorno minero: Ambiente dentro de una galería minera subterránea que puede contener gases nocivos y presentar irregularidades en su superficie.

## **SALIDAS**

- Imagen del entorno: Captura de imagen del ambiente que permita la visualización de la perspectiva del robot a distancia.
- Niveles de concentración de gases: Señal que muestra al operario las concentraciones de los gases SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub> y CO en partes por millón (ppm).
- Alertas del sistema: Señal que muestra al operario una alerta en caso alguno de las concentraciones de gases supere los valores máximos permisibles para el ser humano, detallados en la Figura 3.1, o en caso las baterías estén a punto de descargarse
- Nivel de carga: Señal que muestra al operador el nivel de carga de las baterías.
- Vibraciones: Procedente de la vibración del motor y el impacto del robot con superficies duras.
- Ruido: Procedente de la locomoción del robot en terrenos irregulares.

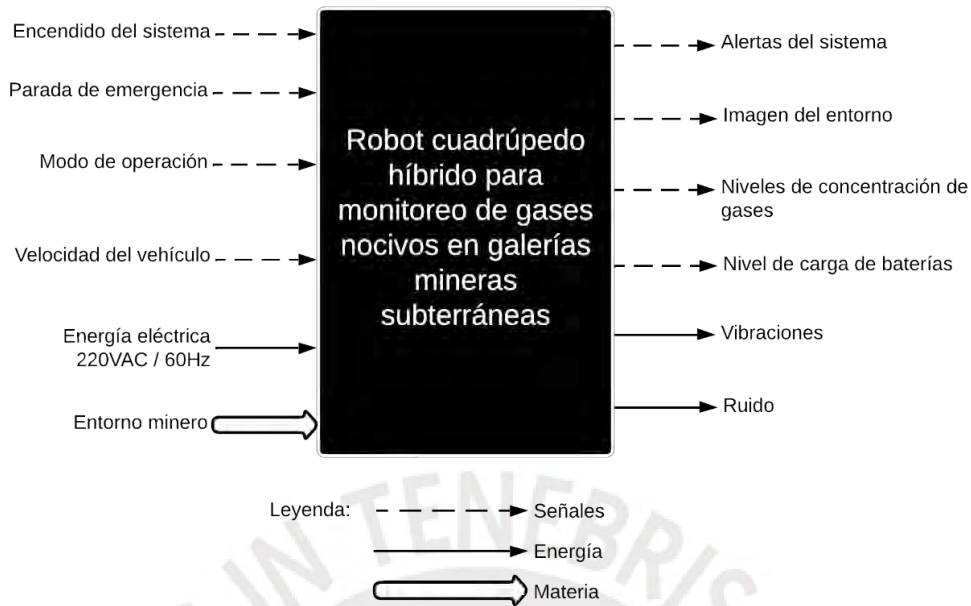


Figura 3.1: Black Box (Elaboración propia)

### 3.3 Estructura de funciones

En esta sección se detallan cada una de las funciones de los dominios de mecánica, energía, procesamiento y control, sensores, actuadores y comunicaciones. Asimismo, en la Figura 3.33 se observa el diagrama general de estructura de funciones donde se observan los dominios anteriormente mencionados, sus entradas, salidas y conexiones con otros dominios.

**Dominio mecánico:** El dominio mecánico se muestra en la Figura 3.2 y se observa la presencia de funciones de los subsistemas de monitoreo de gases, de ruedas, de transición de locomoción y general. Asimismo, se observa la salida de ruido y vibraciones en forma de energía. Por otro lado, se obtiene una salida hacia el dominio de sensores desde el bloque mecánico del cuerpo central y entrada desde el dominio de actuadores al bloque de modos de locomoción.

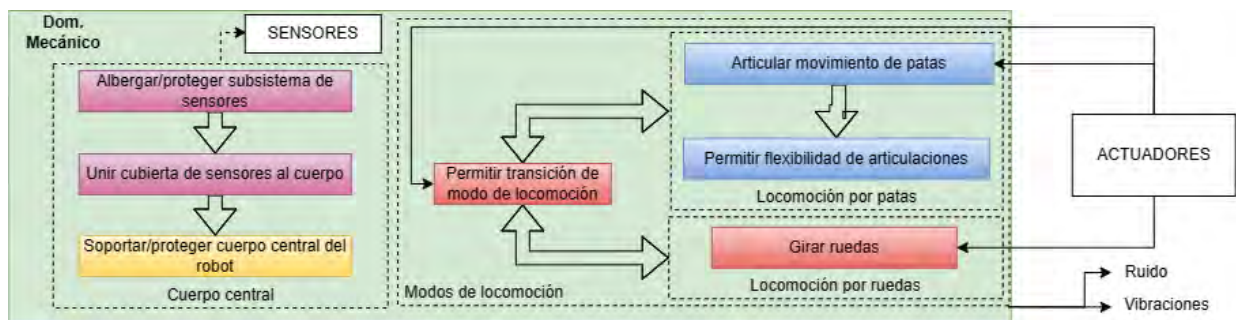


Figura 3.2: Dominio mecánico (Elaboración propia)

- **Albergar/proteger subsistema de sensores:** El conjunto de sensores para la medición de concentraciones de gases, toma de imágenes y detección de obstáculos debe estar en contacto con el exterior, pero debidamente protegido.
- **Unir cubierta de sensores al cuerpo:** Se encarga de unir la cubierta de sensores mencionada en el apartado anterior al tórax del robot. De modo que, sea un componente modular fácil de añadir y quitar del robot.
- **Albergar/soportar/proteger cuerpo central del robot:** El tórax del robot debe albergar, proteger y soportar componentes electrónicos y mecánicos
- **Permitir transición de modo de locomoción:** Se encarga realizar la transición entre el modo de locomoción por ruedas, una vez el actuador haya recibido la señal de control.
- **Articular movimiento de patas:** Se encarga de realizar el giro de las articulaciones de las patas, una vez los actuadores hayan recibido las señales de control.
- **Permitir flexibilidad de articulaciones:** Otorga a las patas la capacidad de absorber choques y vibraciones al ejecutar la locomoción en terrenos irregulares.
- **Girar ruedas:** Permite la transmisión de potencia entre el actuador y la rueda, con el fin del giro de este último.

**Dominio de energía:** El dominio energético se muestra en la Figura 3.3 y se observa la presencia de funciones del sistema integral e interacción con los demás subsistemas. Asimismo, se observa la entrada de energía eléctrica y señales de encendido y parada de emergencia.

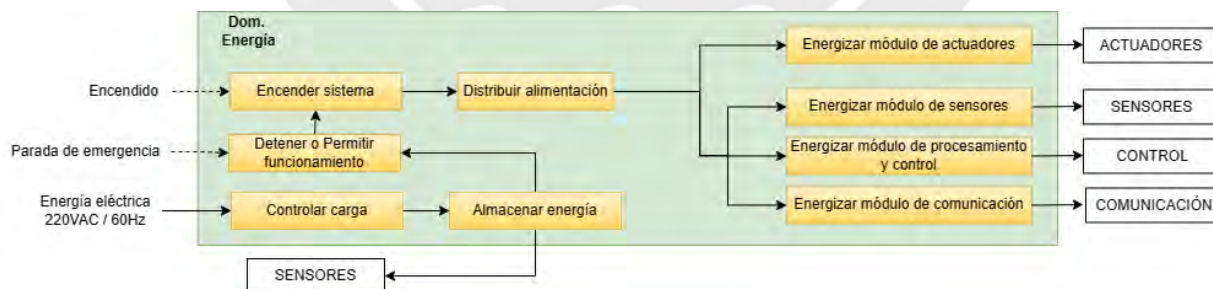


Figura 3.3: Dominio de energía (Elaboración propia)

- **Controlar carga:** Se encarga de emplear la energía eléctrica AC para controlar y monitorear la carga de las baterías.
- **Almacenar energía:** Se encarga de contener la energía mediante baterías recargables para el funcionamiento del robot y recibe energía eléctrica en caso estén descargas. Además, la salida de esta función permite medir el nivel de carga de baterías.

- **Detener o permitir funcionamiento:** Se encarga de detener o permitir el funcionamiento del robot en función de si se encuentra con una emergencia o situación de peligro.
- **Encender sistema:** Recibe la señal de encendido y activa el funcionamiento del robot.
- **Distribuir alimentación:** Proporcionar conexión segura y estable de los componentes electrónicos, lo que reduce la probabilidad de cortocircuitos o conexiones flojas.
- **Energizar módulo de actuadores:** Recibe la alimentación directa de las baterías para energizar los actuadores de las articulaciones y ruedas.
- **Energizar módulo de sensores:** Recibe la alimentación y la acondiciona para energizar los sensores que permiten la detección de terreno irregular, medición de gases y carga de batería e información de retroalimentación para el sistema de control.
- **Energizar módulo de procesamiento y control:** Recibe la alimentación y la acondiciona para energizar los sistemas embebidos encargados de ejecutar los algoritmos de control.
- **Energizar módulo de comunicación:** Recibe la alimentación y la acondiciona para energizar los módulos de telemetría que permiten transmisión y recepción de información a la estación remota.

**Dominio de sensores:** El dominio de sensores se muestra en la Figura 3.4 y se observa la presencia de funciones del subsistema integral, control y monitoreo de gases. Asimismo, se observan entradas de energía eléctrica y del entorno minero en forma de materia. Las salidas son parámetros medidos que ingresan a un bloque de procesamiento para su posterior envío a la estación base.

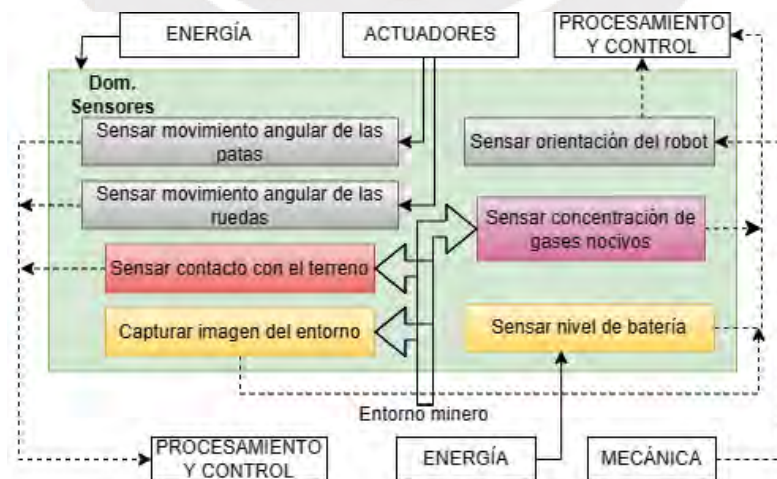


Figura 3.4: Dominio de sensores (Elaboración propia)

- **Sensar posición angular de las patas:** Se encarga de medir la posición angular de cada una de las articulaciones de las patas con el fin de obtener retroalimentación para el control de posición.
- **Sensar posición angular de las ruedas:** Se encarga de medir la posición angular de cada una de las ruedas con el fin de obtener retroalimentación para el control de velocidad del vehículo.
- **Sensar irregularidad de terreno:** Se encarga de medir la irregularidad del donde se encuentra el robot para que este pueda realizar la transición del modo de locomoción.
- **Capturar imagen del entorno:** Su función es la de capturar imágenes en tiempo real para luego realizar su transmisión a una estación remota que permitirá a un operario teleoperar el robot a largas distancias. Asimismo, estas imágenes suponen una solución alternativa a la detección de tipo de terreno.
- **Sensar orientación del robot:** Se encarga de realizar la medición de la orientación del cuerpo central del robot que proporcionan información relevante para el control del movimiento bioinspirado.
- **Sensar concentración de gases nocivos:** Su función es la de medir concentraciones de al menos 4 gases nocivos: H<sub>2</sub>S, CO, CH<sub>4</sub> y SO<sub>2</sub>.
- **Sensar nivel de batería:** Se encarga de medir el nivel de carga de las baterías para el posterior envío de esta información a la estación base.

**Dominio de procesamiento y control:** El dominio de procesamiento y control se muestra en la Figura 3.4 y se observa la presencia de funciones del subsistema integral, de patas, transición de locomoción y control. Asimismo, se observas entradas de energía eléctrica y de señales del dominio de sensores y comunicaciones. Las salidas son los comandos para accionar los actuadores.

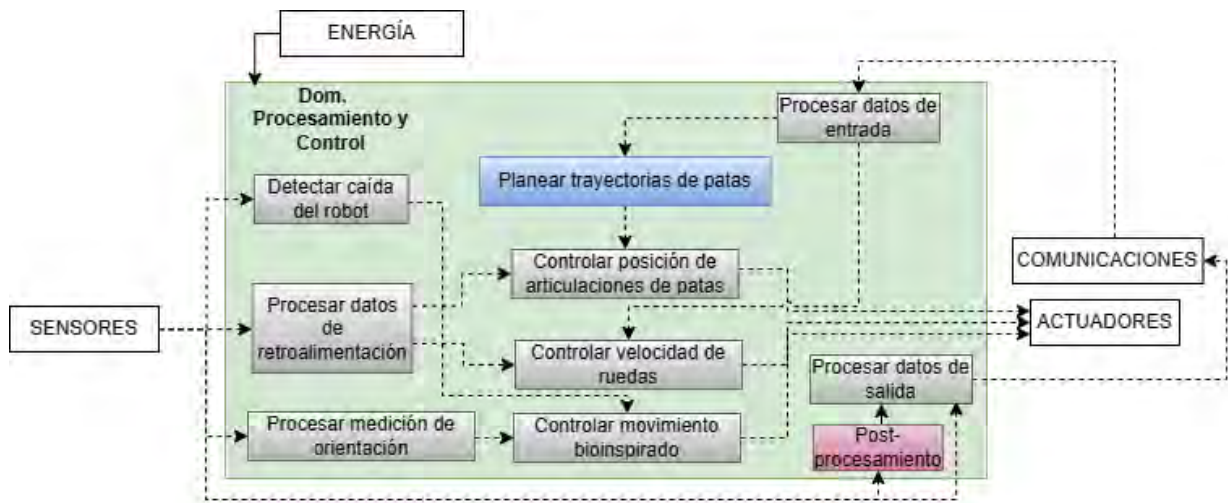


Figura 3.5: Dominio de procesamiento y control (Elaboración propia)

- **Detectar caída del robot:** Se encarga de la etapa algorítmica de la detección de caída del robot a partir de la información brindada por los sensores.
- **Planear trayectorias de patas:** Dependiendo de la irregularidad del terreno y los comandos de velocidad y dirección del robot se generan las trayectorias que seguirán las patas, para posteriormente realizar los cálculos de cinemática inversa y obtener las posiciones deseadas de las articulaciones.
- **Controlar posición de articulaciones de patas:** Se encarga de controlar las posiciones de las articulaciones según las trayectorias generadas en el bloque anterior.
- **Controlar velocidad de ruedas:** Su función es la de realizar un control para las ruedas con el fin de desplazar el vehículo a la velocidad recibida desde la estación de control.
- **Controlar movimiento bioinspirado:** Se encarga de realizar un control por DRL para que el robot se recupere de una caída, tomará como información la orientación del robot y las posiciones de las articulaciones.
- **Procesar datos de retroalimentación:** Su función es realizar los cálculos necesarios para obtener la velocidad de cada una de las ruedas y la posición de las articulaciones a partir de la información brindada por los encoders.
- **Procesar medición de orientación:** Se encarga de aplicar los filtros necesarios o técnicas de fusión de sensores para solventar las limitaciones de robustez en medir orientación que presentan sensores como acelerómetros, giroscopios o magnetómetros.

- **Post-procesamiento:** Se encarga de realizar el procesamiento necesario para a partir de la información obtenida por los sensores de gas obtener indicadores de calidad de gas que serán transmitidos a la estación remota.
- **Procesar datos de entrada:** Se encarga de procesar la información recibido desde la estación de control.
- **Procesar datos de salida:** Se encarga de procesar la información medida por los sensores para su envío a la estación de control.

**Dominio de actuadores:** El dominio de actuadores se muestra en la Figura 3.6 y se observa la presencia de funciones del subsistema de patas y transición de locomoción. Asimismo, se observan entradas de energía eléctrica y de señales del dominio de procesamiento y control. Las salidas permiten el giro de las articulaciones y ruedas.

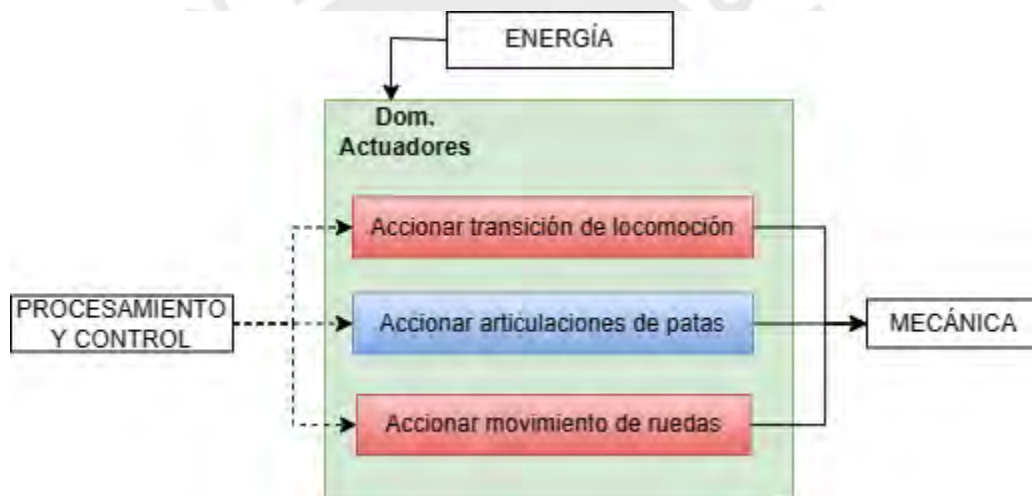


Figura 3.6: Dominio de actuadores (Elaboración propia)

- **Accionar transición de locomoción:** Se encarga de accionar el cambio del modo de locomoción de uno basado en ruedas a otro en patas o viceversa.
- **Accionar articulaciones de patas:** Se encarga de accionar las articulaciones de las patas según los comandos recibidos por el algoritmo de control de recuperación de caída y el de las patas.
- **Accionar movimiento de ruedas:** Se encarga de activar el movimiento de las ruedas según los comandos recibidos por el control de velocidad del vehículo.

**Dominio de comunicaciones:** El dominio de comunicaciones se muestra en la Figura 3.7 y se observa la presencia de funciones del subsistema general. Asimismo, se observan entradas de

energía eléctrica y salidas de señales hacia el dominio de procesamiento y control. Las entradas por su parte permiten el envío de información como nivel de carga, imagen del entorno, concentraciones de gases y alertas del sistema hacia una estación remota.



Figura 3.7: Dominio de comunicaciones (Elaboración propia)

- **Enviar información:** Se encarga de transmitir la información procesada por el dominio de control a una estación remota.
- **Recibir información:** Se encarga de recibir los comandos ingresados por un operario desde la estación remota.

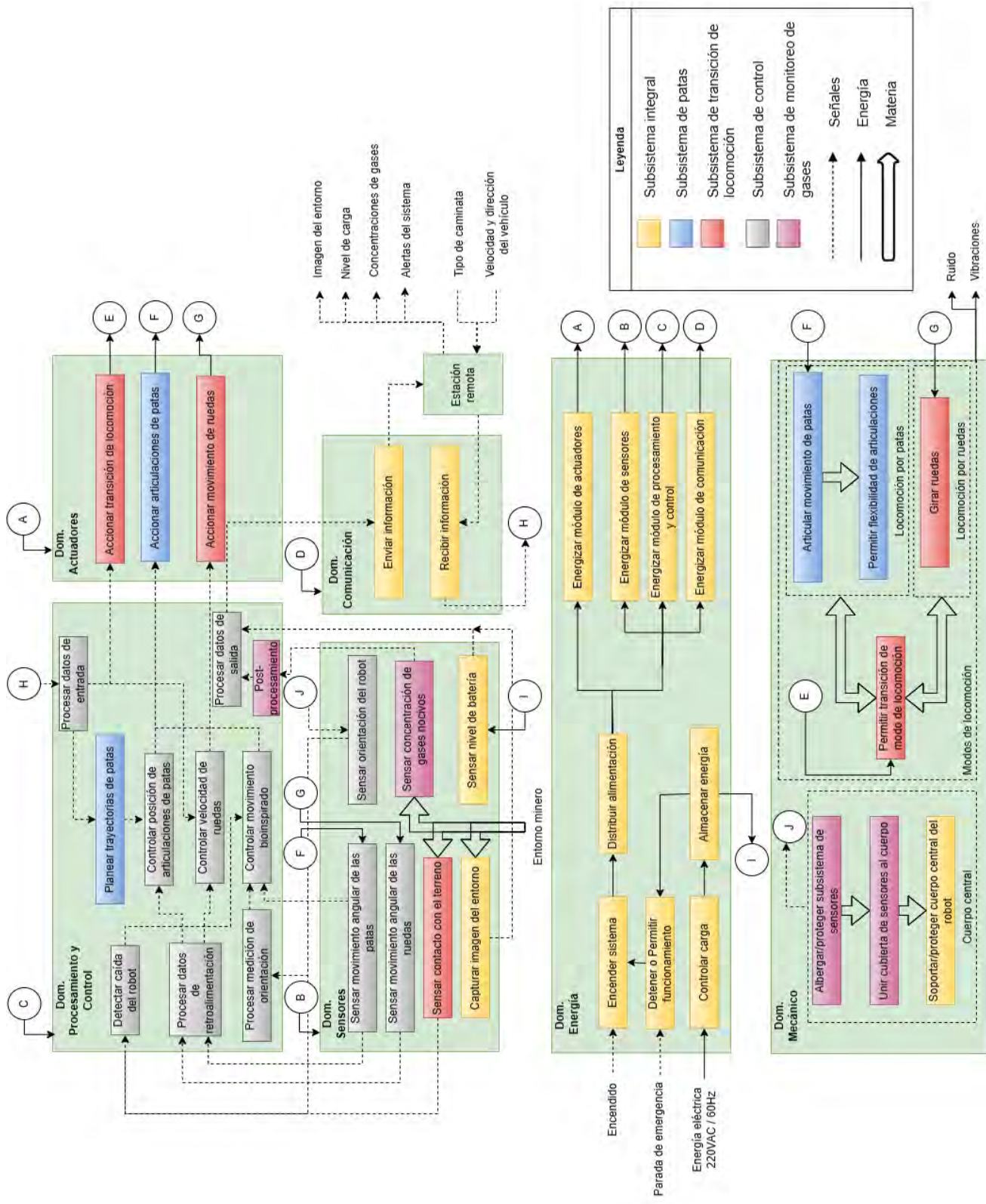


Figura 3.8: Interacción de dominios (Elaboración propia)

### 3.4 Matriz morfológica

En el Anexo B se ilustran cada una de las posibles alternativas por cada función de la estructura de funciones de la Figura 3.33. A continuación, en las tablas se muestran los conceptos de solución propuestos que incluyen las diferentes tecnologías elegidas para cada función según cada dominio.

**Subsistema de control de movimiento:** El subsistema de control de movimiento se encarga de realizar las mediciones y procesamiento necesario para ejecutar las tareas de control de movimiento del cuadrúpedo. En ese sentido, la Tabla 3.1 contiene funciones del dominio de sensores pues provee retroalimentación para el control de estabilidad del robot y un espacio de estados más amplio para el algoritmo de Reinforcement Learning. Asimismo, contiene funciones del dominio de procesamiento y control relacionadas con el filtrado, procesamiento de las mediciones y algoritmos de control.

Tabla 3.1: Conceptos de solución para subsistema de control de movimiento (Elaboración propia)

Subsistema de control de movimiento				
Función		Solución 1	Solución 2	Solución 3
SENSORES	Sensar orientación del robot	Acelerómetro + Giroscopio + Magnetómetro	Acelerómetro + Giroscopio	Acelerómetro + Magnetómetro
	Sensar posición angular de las patas	Encoder capacitivo	Encoder óptico	Encoder magnético
	Sensar posición angular de las ruedas			
	Procesar datos, controlar articulaciones de las patas y velocidad de las ruedas (Hardware)	FPGA	Microcontrolador	<i>Single Board Computer (SBC)</i>
	Controlar movimiento bioinspirado	Mini-PC	<i>Single Board Computer (SBC)</i>	Microcontrolador
	Procesar orientación medida	Filtro complementario	Filtro de Kalman	Filtro de Kalman Extendido (EFK)
	Procesar datos de retroalimentación	Cálculo directo por los encoders	Cálculo directo por los encoders	Estimación por observador

<b>PROCESAMIENTO Y CONTROL</b>	Controlar posición de articulaciones de las patas	Control PID	Control Predictivo	Control adaptativo
	Controlar velocidad de ruedas	Control LQR	Control PID	Lazo abierto
	Controlar movimiento bioinspirado	Algoritmos genéticos	Deep Reinforcement Learning	Control LQR

**Subsistema de transición de locomoción:** El subsistema de transición de locomoción se encarga de la etapa de transformación entre modos de locomoción y además contiene funciones relacionadas al modo de locomoción basado en ruedas. En ese sentido, la Tabla 3.2 contiene funciones del dominio de actuadores y actuadores pues proveen los mecanismos para la transición y los componentes necesarios para activarlos. Asimismo, contiene funciones del dominio de sensores y procesamiento y control, pues el robot deberá detectar la regularidad del terreno para en función de ello activar un modo de locomoción en específico.

Tabla 3.2: Conceptos de solución para subsistema de transición de locomoción (Elaboración propia)

<b>Subsistema de transición de locomoción</b>				
	<b>Función</b>	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>
<b>MECÁNICA</b>	Permitir transición de locomoción	Mecanismo activo por giro de rueda	Bloqueo de rueda activa	Mecanismo activo transformable
	Girar ruedas	Configuración pasiva de ruedas	Conexión directa al motor	Transmisión de potencia por engranajes
	Accionar transición de locomoción	Servomotor DC	Frenado para motor	Servomotor DC

<b>ACTUADORES</b>	Accionar movimiento de ruedas	Sin actuador (Debido a movimiento de articulaciones)	Motor DC Brushless	Motor DC Brushed
<b>SENSORES</b>	Sensar contacto con el terreno	Transductor de fuerza para rueda	Sensor de fuerza	Sensor de fuerza
<b>PROCESAMIENTO Y CONTROL</b>	Detectar tipo de terreno (Hardware)	Mini-PC	Single Board Computer (SBC)	Microcontrolador

**Subsistema general:** El subsistema general se encarga de las funciones referentes al sistema energético del robot, de comunicaciones y electrónica adicional relevante. En ese sentido, Tabla 3.3 contiene funciones del dominio de sensores y comunicaciones pues el robot debe realizar las mediciones correspondientes antes de enviar información hacia la estación remota. Sin embargo, cabe resaltar que, como se detalló en el alcance, una transmisión de video inalámbrica no será incluida en el desarrollo de la presente tesis, en lugar de ello se enfoca en la transmisión y recepción de comandos y estados relevantes del robot. Finalmente, contiene funciones del dominio de energía que se encargan de la energización de todos los subsistemas, control de encendido, carga del robot y distribución de alimentación.

Tabla 3.3: Conceptos de solución para subsistema general (Elaboración propia)

<b>Subsistema general</b>
---------------------------

	<b>Función</b>	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>
<b>SENSORES</b>	Capturar imagen del entorno	Cámara de profundidad	Cámara 2D	Cámara 2D
	Sensar nivel de batería	Sensor de corriente	Sensor de voltaje	Circuito basado en OpAmp
<b>COMUNICACIÓN</b>	Enviar y recibir información	Módulo de radiofrecuencia		
<b>ENERGÍA</b>	Almacenar energía y energizar módulo de actuadores	Batería LiPo	Paquete de baterías Li-ion	Batería de plomo ácido
	Controlar carga	Cargador según tipo de batería		
	Distribuir alimentación	Terminal Strip	Terminal Blocks	Bus Bar
	Parada de emergencia	Liberación con llave	Liberación por giro	Empuje-tracción
	Encender sistema	Relé de estado sólido	Relé de estado sólido	Relé electromagnético
	Energizar módulo de sensores, procesamiento y control y comunicación	Regulador de tensión según especificaciones de circuito		
<b>MECÁNICA</b>	Soportar/proteger cuerpo central del robot	Planchas metálicas	Plástico	Plástico

**Subsistema de patas:** El subsistema de patas se encarga de las funciones referentes al modo de locomoción basado en patas únicamente. En ese sentido, la Tabla 3.4 contiene funciones del dominio mecánico y de actuadores correspondientes al diseño y movimiento de las articulaciones,

además, se incluyó una función que permitirá flexibilidad en las articulaciones ante terrenos irregulares mediante la inclusión de resortes y amortiguadores virtuales o físicos. Asimismo, previo a realizar el control de movimiento del robot se debe realizar el planeamiento de trayectoria de patas del cuadrúpedo, con lo cual se consideró esta función para el dominio de control.

Tabla 3.4: Conceptos de solución para subsistema de patas (Elaboración propia)

<b>Subsistema de patas</b>				
<b>Función</b>		<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>
<b>CONTROL</b>	Planear trayectoria de patas	Dinámica inversa	Máquina de estados y cinemática inversa	Máquina de estados y cinemática inversa
	Accionar articulaciones de patas	Servomotor DC	Motor DC Brushless	Motor DC Brushed
<b>MECÁNICA</b>	Articular movimiento de patas	Accionamiento individual – Scrawling	Accionamiento por faja – Mammal	Transmisión por cremallera para rueda transformable
	Permitir flexibilidad de articulaciones	Resorte físico y amortiguador virtual	Resorte y amortiguador virtual	Resortes y amortiguadores físicos

**Subsistema de monitoreo de gases:** El subsistema de monitoreo de gases se encarga de las funciones referentes al sensado de los diferentes gases nocivos. En ese sentido, la Tabla 3.5 contiene funciones del dominio de sensores y de procesamiento, pues los valores crudos medidos por los sensores requieren de un post-procesamiento para posteriormente ser enviados a la estación remota. Asimismo, se incluyen funciones del dominio mecánico pues el módulo de sensores deberá ser acoplable al chasis principal del robot.

Tabla 3.5: Conceptos de solución para subsistema de monitoreo de gases (Elaboración propia)

Subsistema de monitoreo de gases				
Función		Solución 1	Solución 2	Solución 3
SENORES	Sensar concentración de gases nocivos	Sensor de gas óptico	Sensor de gas electroquímico	Sensor de gas infrarrojo
	Post-Procesamiento (Hardware)	FPGA	Microcontrolador	Microcontrolador
PROCESAMIENTO	Post-Procesamiento (Software)	Imagen detectada	Cálculo de IMEI	Cálculos de concentraciones de gas
	Albergar/proteger subsistema de sensores	Acrílico	Plástico	Planchas metálicas
MECÁNICA	Unir cubierta de sensores al cuerpo	Unión atornillada	Unión atornillada	Unión por forma

### 3.5 Concepto de solución óptimo

Luego de realizar la evaluación técnica y económica de los tres conceptos de solución planteados (Anexos C y D), se obtiene que el concepto de solución 2 es el de mejor. El concepto de solución óptimo está basado en ese sistema y tendrá mejoras en los aspectos en los cuales tuvo peor rendimiento. Por lo cual, se mantiene la cantidad de GDL y la topología de las patas.

#### Análisis de mejora técnica de solución óptima

En ese sentido, en primer lugar, se observa que la solución 2 presenta el mejor resultado en los criterios de función principal y estabilidad, que corresponden al diseño mecánico del robot. Por lo que, se mantendrá la transmisión por faja para la rodilla, cabe resaltar, que la relación de reducción es de 1:1.5 con el fin de no afectar el mecanismo de *compliance*. Asimismo, como se observa en la Figura C.0.2, se cuentan con tres motores Brushless propioceptivos para activar las

articulaciones de las patas y otro motor con freno para el modo de locomoción basado en ruedas. Es importante mencionar, que los actuadores cuentan con controladores y encoders magnéticos integrados, la elección de estos últimos se debe a su resistencia en entornos en los cuales abunda el polvo, como el minero.

Por otro lado, los componentes electrónicos están embebidos en una PCB con la inclusión de un sensor inercial de 9 ejes, módulo de telemetría, sensor de voltaje y un espacio para realizar las conexiones con los demás componentes. Por otro lado, respecto al tema energético, cuenta con un paquete de baterías Li-Ion con cargador, debido a su beneficio económico respecto a las baterías LiPo, regulares de tensión y un relé de estado sólido. Finalmente, se observa un Single Board Computer que se encarga del procesamiento y control con DRL, mientras que el Microcontrolador se comunica con los sensores y controla las articulaciones.

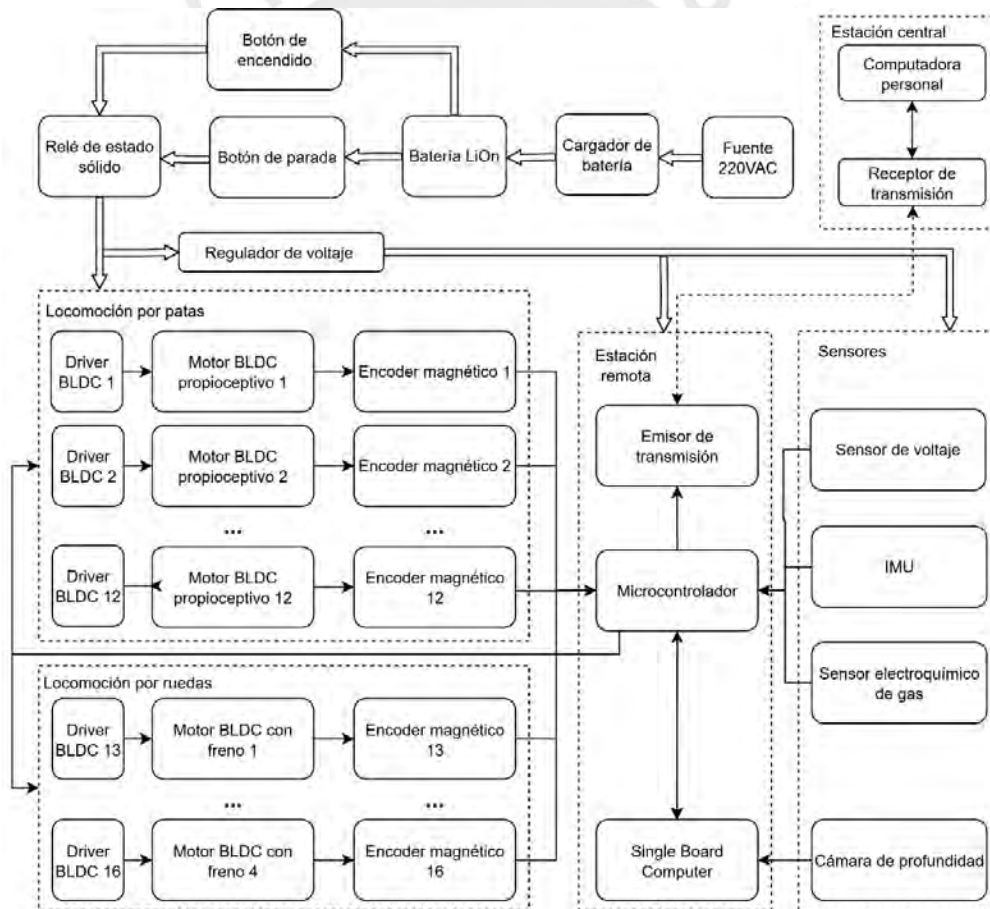


Figura 3.9: Dominio de comunicaciones (Elaboración propia)

Asimismo, respecto a la arquitectura de software, el concepto de solución 2 presenta resultados intermedios en el criterio técnico de simplicidad. Esto en parte se debe a la inclusión de un gran

número de algoritmos de control y percepción. No obstante, son totalmente necesarios dado que se busca lograr un sistema con navegación autónoma. En ese sentido, un microcomputador con GPU es fundamental para ejecutar en tiempo real los algoritmos basados en Inteligencia Artificial.

Además, se considera indispensable el control de posiciones de las articulaciones para la caminata con lo cual se mantiene. Finalmente, con el fin de lograr el comportamiento de recuperación se escoge un algoritmo de Deep Reinforcement Learning, que, para los efectos del comportamiento deseado, supone la alternativa de mejor rendimiento y mayor simplicidad. Puesto a que diferencia de un control clásico, en el cual se debe modelar la dinámica del sistema, en un algoritmo de DRL, un agente aprende por medio de la prueba y error, mediante la ejecución de acciones en entornos que pueden ser a priori, inciertos o desconocidos.

### **Análisis de mejora económica de solución óptima**

Respecto al análisis económico, se observa que la solución 2 presenta los mejores resultados en los criterios de facilidad de mantenimiento y adquisición de materiales. Además, en el criterio de costo de tecnología tiene un resultado regular, debido a la inclusión de un gran número de actuadores. Sin embargo, debido a que la estabilidad y la capacidad de atravesar terrenos adversos es uno de los objetivos del robot, se mantendrá ese diseño.

Por otro lado, en el criterio de costo de manufactura, la solución 2 presenta resultados intermedios, esto es debido al tamaño de la propuesta de solución. No obstante, se considera necesario implementar un robot de esas dimensiones para sobrellevar el tamaño de obstáculos impuestos en la lista de requerimientos, con lo que se mantendrá.

## CAPÍTULO 4 : DISEÑO MECATRÓNICO

En el presente capítulo se explica el diseño mecatrónico desarrollado de la tesis. En primer lugar, se detalla el sistema integrado y luego, el diseño de los subsistemas correspondientes: patas, control y transición de locomoción. Finalmente se presentan los planos electrónicos y mecánicos del sistema.

### 4.1 Descripción del sistema integrado

En la Figura 0.1 se presenta el diseño CAD de la solución óptima propuesta. El sistema consta de cuatro patas, cada una con tres grados de libertad (3GDL), y un motor que integra una rueda en cada pata. En cuanto a las dimensiones generales del robot, estas cumplen con los requisitos de diseño establecidos, ya que en su posición estable mide 354 x 670 x 504 mm, valores que se encuentran por debajo del máximo permitido de 500 x 750 x 750 mm.



Figura 0.1: Diseño CAD integral de concepto de solución óptimo (Elaboración propia)

La Figura 0.2 presenta los principales componentes externos del robot, como el conector de carga, los botones de encendido y emergencia, diversos sensores, y la ubicación de la batería. La estructura del robot está compuesta por cuatro barras de fibra de carbono, complementadas con soportes y conectores fabricados mediante manufactura aditiva en PLA, los cuales brindan soporte a los componentes electrónicos.

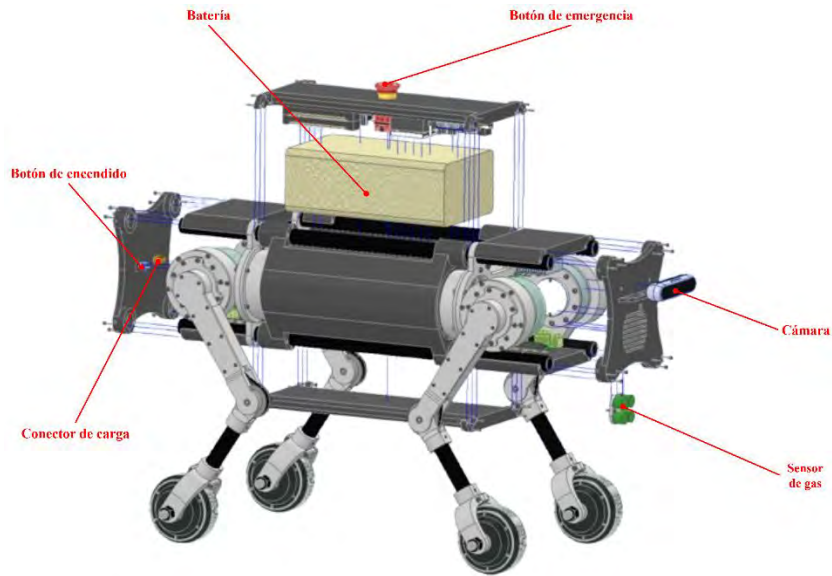


Figura 0.2: Detalle de partes del sistema integral (Elaboración propia)

#### 4.2 Subsistema de patas

A continuación, se presenta el modelo 3D de la pata diseñada, que integra tres motores propioceptivos y un motor con freno. Para optimizar el peso en la parte inferior del robot, se incorpora una transmisión por correa en la articulación de la rodilla. Además, se incluye una barra de fibra de carbono, fijada con prisioneros, que conecta la rodilla con la rueda. En el diseño de la rodilla se destacan el uso de un eje de acero SAE 1020, rodamientos para facilitar el movimiento de la articulación y para mantener la tensión de la correa. A continuación, se realizan los cálculos respectivos para la elección de los actuadores y elementos de transmisión.

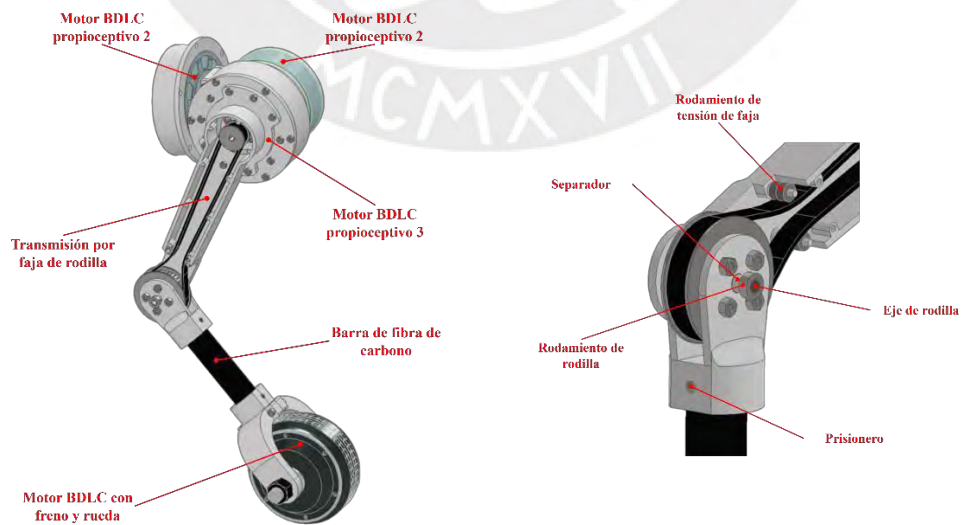


Figura 0.3: Diseño CAD de pata de concepto de solución óptimo (Elaboración propia)

### 4.2.1 Elementos de transmisión y movimiento

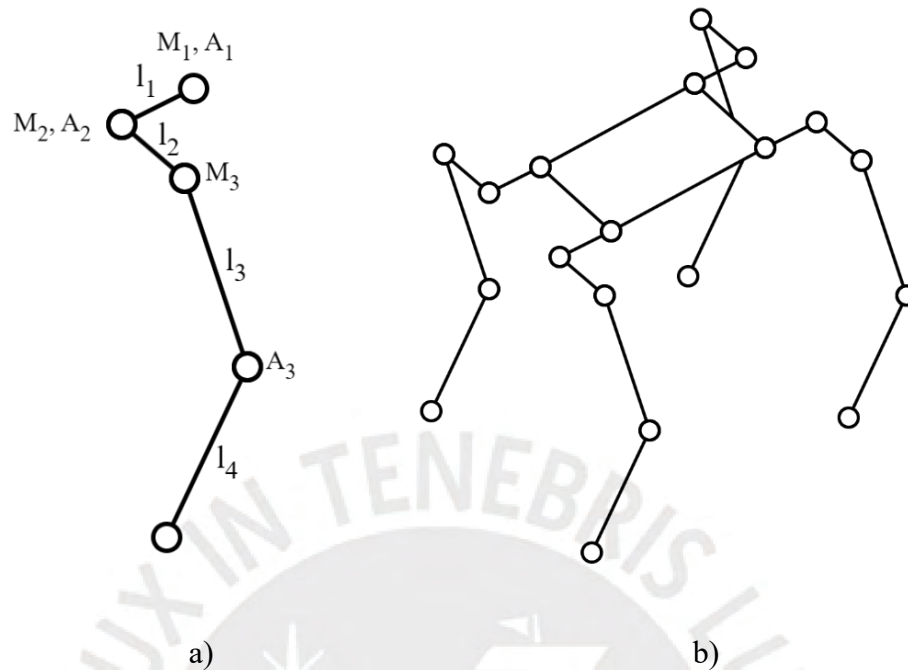


Figura 0.4: Modelo topológico: a) Pata b) Global (Elaboración propia)

Para la simplificación de los cálculos matemáticos, se asume  $l_1 = l_2 = 0$ . Al ser distancias pequeñas en comparación a los demás eslabones de la pata. Asimismo, se asumirá que el peso de los eslabones es despreciable en comparación a el peso de los actuadores en las articulaciones.

**Estabilidad estática:** Para el modo de locomoción de caminata, el robot debe satisfacer las condiciones de estabilidad estática. Es decir, el robot debe mantener la proyección de su centro de masa dentro del polígono  $R$  que forman los puntos de contacto con el suelo. Para el caso de un cuadrúpedo y para la locomoción de caminata, tres puntos de contacto son suficientes para permitir estabilidad, con lo cual, si el centro de masa se proyecta fuera del triángulo formado, el robot caerá.

#### Caso crítico

Para el caso crítico se tiene que una pata está extendida, dejando que las tres patas restantes soporten todo el peso como se observa la Figura 0.5. Asimismo, para computar la extensión máxima de la pata, se toma en cuenta un obstáculo de longitud  $l_{o-m}$ .

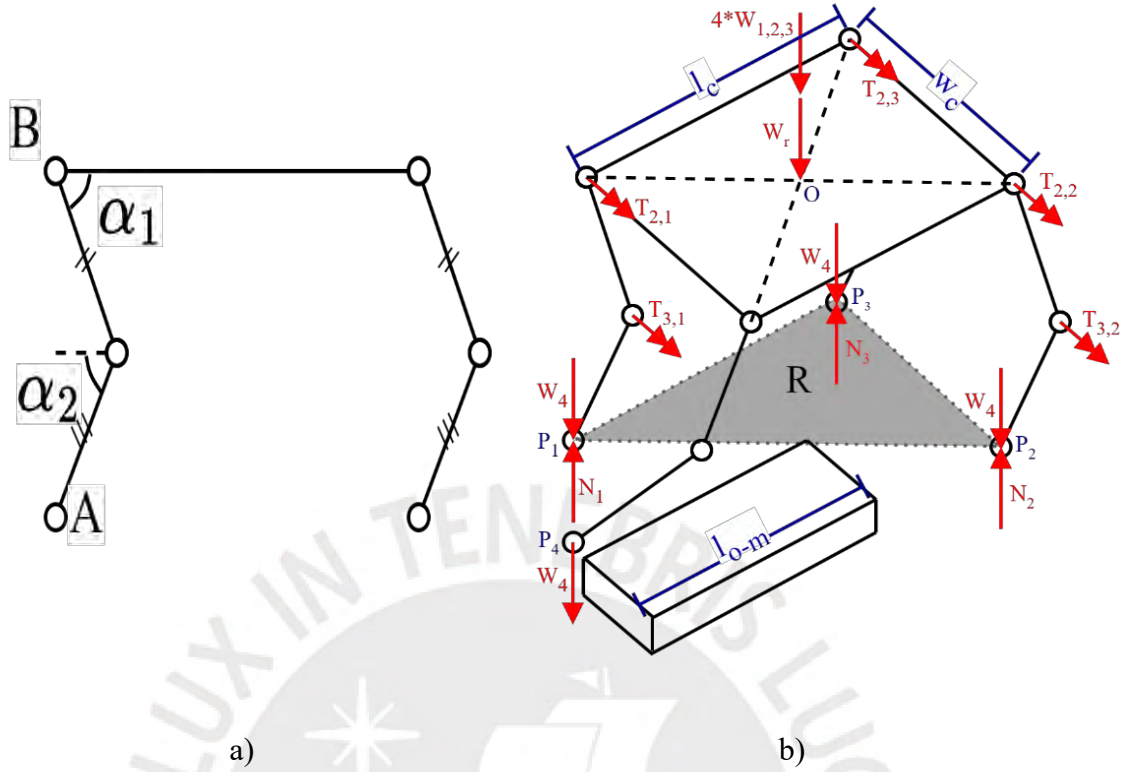


Figura 0.5: a) Vista lateral de modelo topológico simplificado b) DCL del sistema  
(Elaboración propia)

### Cálculo de torques en cadera y rodilla

$$\vec{r}_{B/A} = (-l_4 \cos \alpha_2 + l_3 \cos \alpha_1, 0, l_4 \sin \alpha_2 + l_3 \sin \alpha_1)$$

$$\sum F_z = 0$$

$$W_r + 4 * W_{1,2,3} = N_1 + N_2 + N_3$$

$$\sum \vec{M}_{P_1} = 0$$

$$\vec{N}_2 \times \vec{r}_{P_2/P_1} + \vec{N}_3 \times \vec{r}_{P_3/P_1} + \vec{W}_4 \times (\vec{r}_{P_2/P_1} + \vec{r}_{P_3/P_1} + \vec{r}_{P_4/P_1}) + (\vec{W}_O) \times \vec{r}_{O/P_1} = 0$$

$$\vec{r}_{P_2/P_1} = (-l_c, w_c, 0)$$

$$\vec{r}_{P_3/P_1} = (-l_c, 0, 0)$$

$$\vec{r}_{P_4/P_1} = (l_{o-m}, w_c, 0)$$

$$\vec{r}_{O/P_1} = \vec{r}_{\frac{B}{A}} + \left( \frac{-l_c}{2}, \frac{w_c}{2}, 0 \right)$$

Obtenemos que:

$$N_1 = W_4(2l_c + l_{o-m}) - W_T$$

$$N_2 = 2 * W_4 + \frac{W_O}{2} = 155.5N$$

$$N_3 = -W_4(l_{o-m}) + W_T$$

Luego, debido al peso de la pata que está siendo levantada. La pata el mismo lado, es decir la 2, será la que efectúe mayor torque en sus articulaciones. De esta forma, calculando con un Factor de Seguridad (F.S.) de 1.5:

$$T_{3,2} = -(N_2 - W_4)l_4 \cos\alpha_2 = 26.33 N.m$$

$$T_{2,2} = ((N_2 - W_4)(-l_4 \cos\alpha_2 + l_3 \cos\alpha_1) + T_{3,2}) = 16.13 N.m$$

### Cálculo de correa

Debido a la transmisión existente, a continuación, se valida la elección de una correa con poleas de dimensiones  $D_2 = 0.808 in$  y  $D_3 = 1.9 in$  mostradas en el Anexo G.

$$T_{motor\_knee} = T_{3,2} * \frac{D_2}{D_3} = 11.26 N.m$$

Analizando la resistencia a ruptura para una correa de  $width = \frac{3}{8} in$ :

$$F_{peak} = 2 * \frac{T_{motor\_knee}}{D_2} = 1096.95 N$$

De la hoja de datos del Anexo F se obtiene que la resistencia de ruptura es de 158 N por mm de ancho, con lo cual se observa que la correa resistirá y no se romperá.

$$F_{ruptura\_peak} = 158 * width = 1504.95 N$$

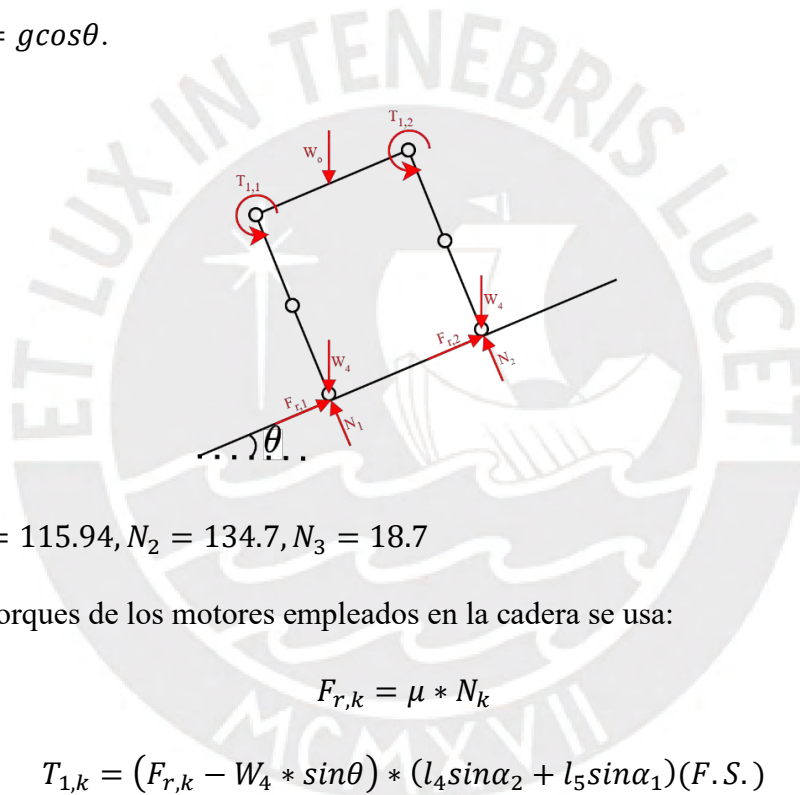
Para el cálculo de la longitud de paso, se obtiene de la hoja de datos que la tensión de trabajo es  $T_{working} = 102 N/in$ . Con lo cual para lograr la fuerza requerida la longitud de paso debe ser de al menos:

$$Pitch - length > \frac{F_{peak}}{T_{working}} = 10.75 \text{ in}$$

Con lo cual se elige la puela de longitud 13.00 in, pues corresponde al mínimo valor disponible del fabricante.

### Cálculo de torques en hombro

Para seleccionar los actuadores del hombro, el caso crítico cambia. En este caso se dará cuando el robot esté sobre un terreno inclinado con ángulo máximo  $\theta$ . Para hallar las normales, se consideran las mismas ecuaciones anteriores, con la diferencia de que se toma en cuenta una gravedad específica  $g_{esp} = g \cos \theta$ .



Obtenemos:  $N_1 = 115.94, N_2 = 134.7, N_3 = 18.7$

Luego, para los torques de los motores empleados en la cadera se usa:

$$F_{r,k} = \mu * N_k$$

$$T_{1,k} = (F_{r,k} - W_4 * \sin \theta) * (l_4 \sin \alpha_2 + l_5 \sin \alpha_1) (F.S.)$$

Para la pata con caso crítico, es decir la pata 2, se obtiene:  $T_{1,2} = 13.94 \text{ N.m}$

### Caso nominal

En este caso, las cuatro patas están apoyadas en el suelo, con lo cual las normales son iguales. Al tratarse de un caso no crítico, se considera un F.S. de 1.2:

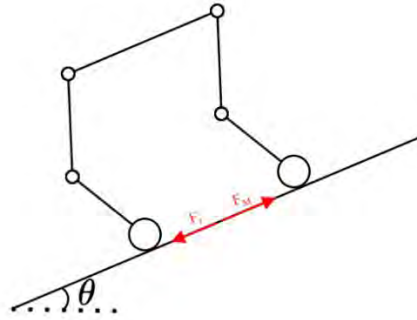
### Cálculo de torques en articulaciones

$$N = \frac{W_t}{4} = 65.04 \text{ N}$$

$$T_3 = -(N - W_4)(F.S.)l_4\cos\alpha_2 = 12.93 \text{ N.m}$$

$$T_2 = \left( (N - W_4)(-l_4\cos\alpha_2 + l_5\cos\alpha_1) + T_{3,2} \right) (F.S.) = 8.62 \text{ N.m}$$

$$T_1 = (\mu * N - W_4 * \sin\theta) * (l_4\sin\alpha_2 + l_5\sin\alpha_1)(F.S.) = 0.82 \text{ N.m}$$



### Cálculo de torques para motor de rueda

Finalmente, para calcular la fuerza tangencial máxima de la rueda, se considera la máxima pendiente, una aceleración máxima de  $a_{max} = 0.4 \text{ m/s}^2$ , un coeficiente de fricción  $\mu = 0.1$ , se toma al robot como cuerpo puntual y calculando con un Factor de Seguridad (F.S.) de 1.5, se obtiene:

$$F_M = F_f + m_T \cdot a$$

$$F_M = W_t \cdot \cos(\theta) \cdot \mu + m_T \cdot a$$

$$F_M = 47.73 \text{ N}$$

Luego, se calcula la velocidad angular y torque máximo:

$$T_4 = F_M \cdot (F.S.) \cdot r_{wheel} = 1.19 \text{ N.m}$$

$$\omega = v \frac{60}{2 \cdot r_{wheel} \cdot \pi} = 143.24 \text{ rpm}$$

De los cálculos anteriores se concluyen los siguientes requerimientos para los motores de las articulaciones.


Tabla 0.1: Torques calculados para las articulaciones (Elaboración propia)

Ubicación de motor	Torque nominal (N.m)	Torque pico (N.m)
--------------------	----------------------	-------------------

<b>Hombro (<math>A_1</math>)</b>	0.82	13.94
<b>Cadera (<math>A_2</math>)</b>	12.93	24.19
<b>Rodilla (<math>A_3</math>)</b>	8.62	16.88
<b>Rueda (<math>A_4</math>)</b>	1.19	1.19




En la Tabla 0.2, se puede observar que se eligió el motor RMD X8-Pro V2 para las articulaciones de las patas debido a su precio, peso y que satisface las condiciones de torque.

Tabla 0.2: Elección de motor para articulaciones (Elaboración propia)

Modelo	Requisitos	AK70-10	RMD X8-Pro V2	GIM 6010 - 36
				
Fabricante	-	Cubemars	Gyems	Gimbal
Voltaje nominal	48 V	48 V	48 V	24V
Corriente nominal	-	7.2 A	5 A	4 A
Torque nominal	12.93 N.m	10 N.m	13 N.m	18 N.m
Torque máximo	24.19 N.m	24.8 N.m	28 N.m	45 N.m
Velocidad nominal	-	310 rpm	122 rpm	130 rpm
Dimensiones	-	90 x 90 x 50 mm	100 x 100 x 50 mm	68 x 68 x 62 mm
Peso	-	521 g	440 g	574 g
Precio	-	\$398.90	\$399.00	\$315.99

Asimismo, en la Tabla 0.3 se observa que se eligió el motor Zltech para las ruedas, pues satisface todas las condiciones de torque y velocidad angular. Además, en cuanto a tamaño es adecuado para la aplicación.

Tabla 0.3: Elección de motor para ruedas (Elaboración propia)

Modelo	Requisitos	Zitech ZLLG40ASM100	Waveshare DDSM115	Keenso electrical scooter
				
Voltaje nominal	24 - 48 V	24 V	12 - 24 V	24 V
Corriente nominal	-	2 - 8 A	1.5 A	15 A
Torque nominal	1.19 N.m	3 N.m	0.96 N.m	-
Torque máximo	1.19 N.m	-	2 N.m	-
Velocidad nominal	143.24 rpm	280 rpm	115 rpm	-
Freno	Sí	Sí, eléctrico	No	Sí, buje
Dimensiones	-	210 x 225cm x 250 mm	42 x 42 x 33 mm	200 x 200 x 50 mm
Peso	-	1450 g	765 g	4140 g
Precio	-	\$100.00	\$66.01	\$142.31

#### 4.2.2 Análisis de resistencia

Para el diseño del acople del motor ubicado en la zona del hombro, se eligió el material Nylon 66 debido a su resistencia y versatilidad de impresión 3D. En la Figura 0.6, se observa una deformación máxima de 2.22 mm y un esfuerzo máximo equivalente de 28.53 MPa. Cabe resaltar que, si bien la deformación máxima no es despreciable, las uniones atornilladas al motor permiten reducir su influencia pues justamente soporta la región crítica. Finalmente, se observa un factor de seguridad mínimo de 2.28, que asegura un correcto funcionamiento.

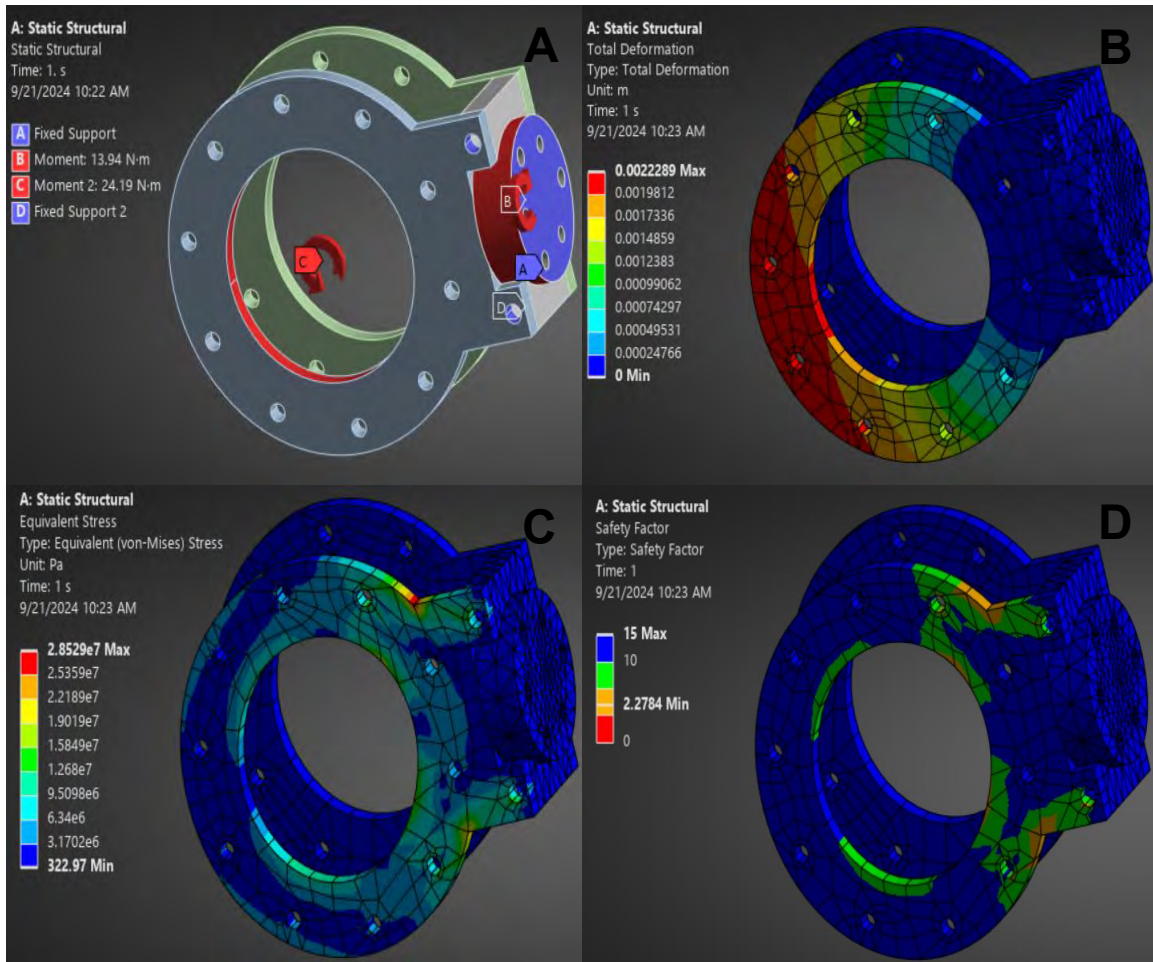


Figura 0.6: A. Parámetros de simulación. Resultados de simulación: B. Deformación total, C. Esfuerzo equivalente, D. Factor de seguridad. (Elaboración propia)

Para el diseño de la pieza que une los motores de la cadera y la rodilla, se eligió el material Aluminio 6061-T6 debido a su resistencia y ligereza. En la Figura 0.7, se observa una deformación máxima de 0.16 mm y un esfuerzo máximo equivalente de 53.33 MPa, donde se puede resaltar que la deformación es prácticamente despreciable. Finalmente se obtuvo un factor de seguridad mínimo de 5.25, que asegura una correcta resistencia.

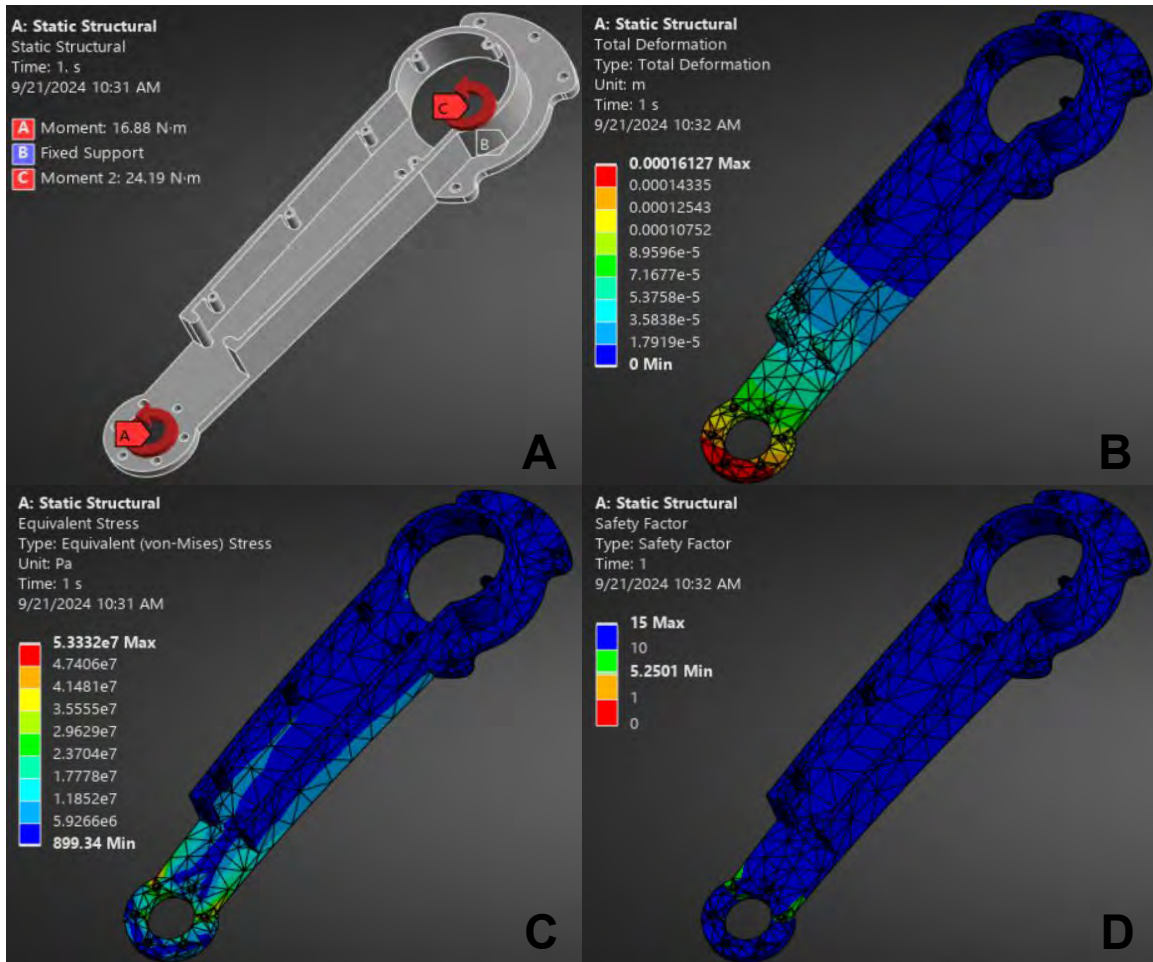


Figura 0.7: A. Parámetros de simulación. Resultados de simulación: B. Deformación total, C. Esfuerzo equivalente, D. Factor de seguridad. (Elaboración propia)

Para el diseño de las piezas que unen los motores de la rodilla y la rueda, se eligió nuevamente el material Nylon 66, a excepción de la barra que une dichos componentes, que es de fibra de carbono. En la Figura 0.8, se observa una deformación máxima de 1.42 mm y un esfuerzo máximo equivalente de 40.94 MPa. Cabe resaltar que, de igual forma al caso del hombro, si bien la deformación máxima no es despreciable, las uniones al motor permiten reducir su influencia. Finalmente, se observa un factor de seguridad mínimo de 2.33, que asegura un correcto funcionamiento.

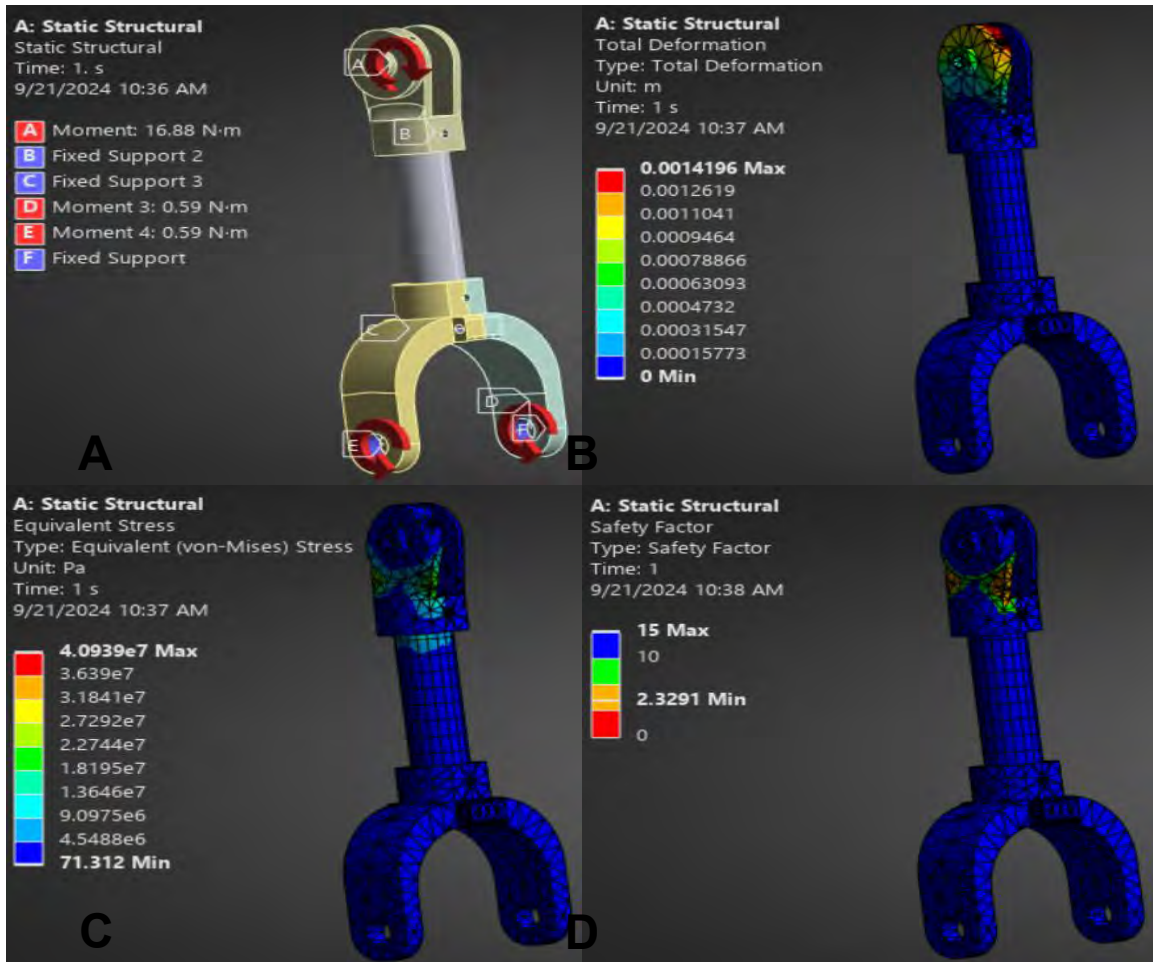
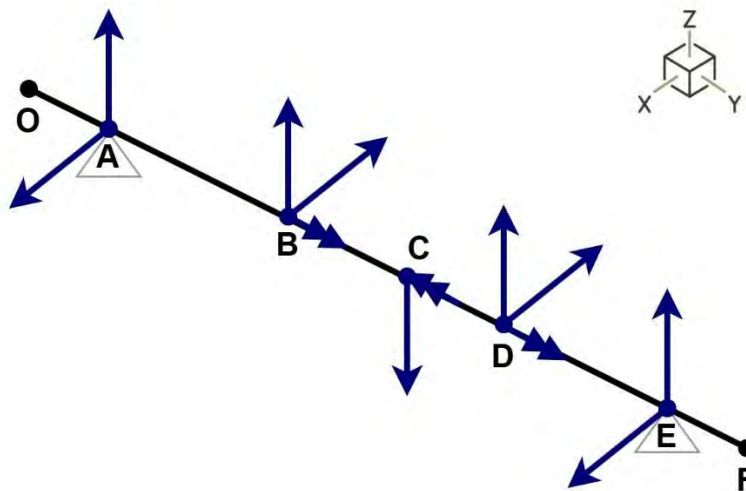


Figura 0.8: A. Parámetros de simulación. Resultados de simulación: B. Deformación total, C. Esfuerzo equivalente, D. Factor de seguridad. (Elaboración propia)

### Cálculo de diámetro de eje de rodilla



Por simetría tomando las reacciones normales y de fricción en la pata 2,

$$R_{B,x} = R_{D,x} = \frac{f_r}{2} = 8.11 \text{ N}$$

$$R_{B,z} = R_{D,z} = \frac{N_1 - W_4}{2} = 70.64 \text{ N}$$

Considerando el torque de la polea en la rodilla.

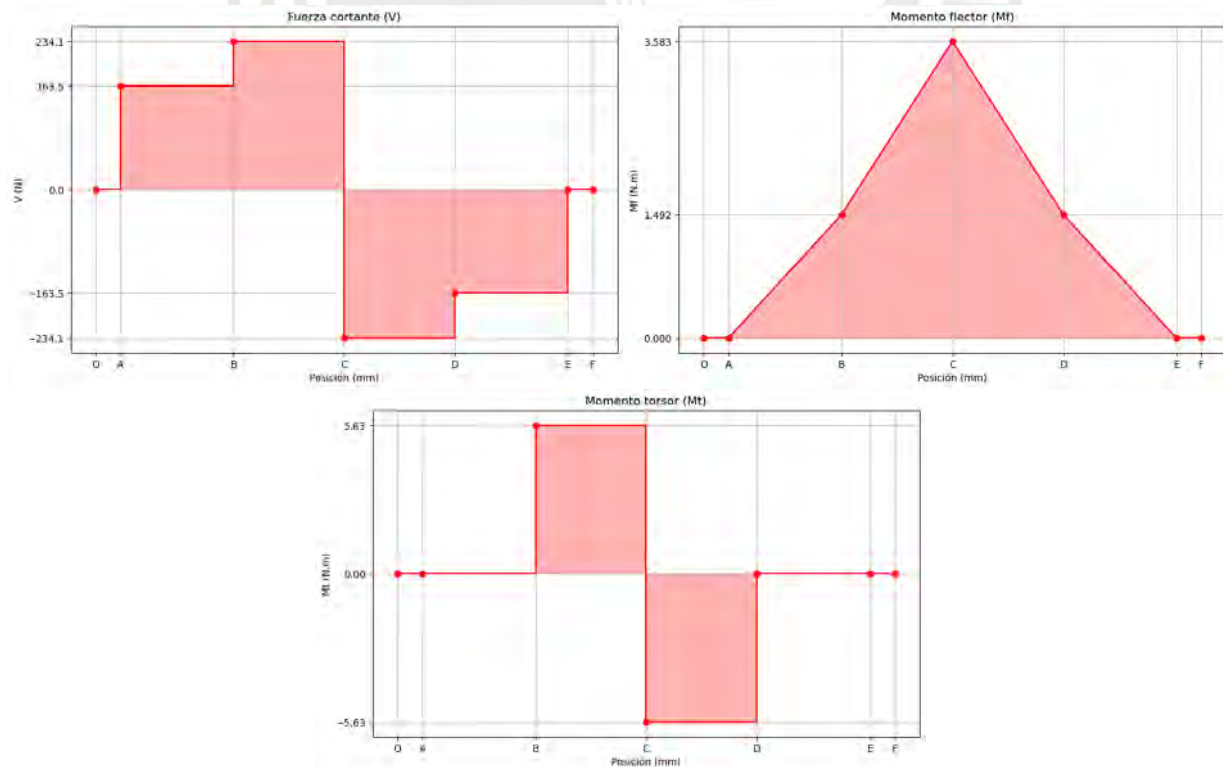
$$r_{polley} = 24 \text{ mm}, W_{polley} = 0.907 \text{ N}, T_{knee} = 11.26 \text{ N.m}$$

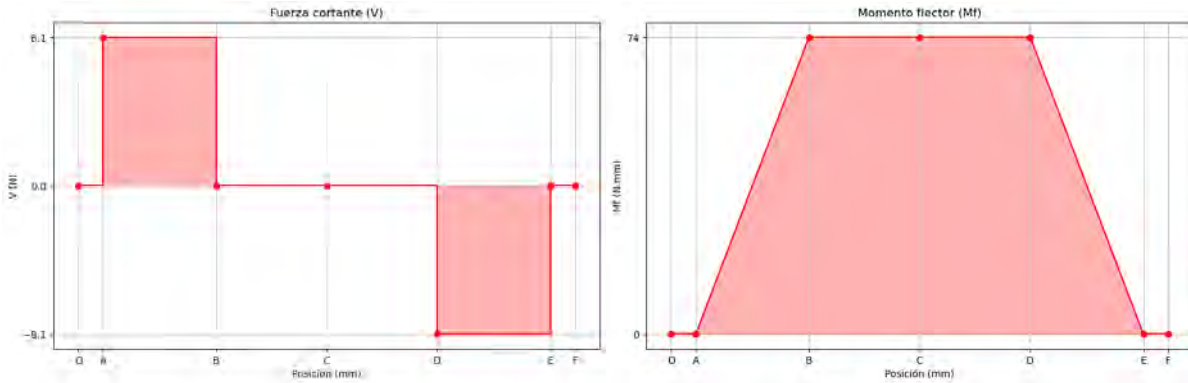
$$R_{C,z} = \frac{T_{knee}}{r_{polley}} - W_{polley} = 468.26 \text{ N}$$

Por equilibrio,

$$R_{A,z} = R_{E,z} = \frac{R_{C,z} - 2 * R_{B,z}}{2} = 163.49 \text{ N}$$

$$R_{A,x} = R_{E,x} = R_{B,x} = 8.11 \text{ N}$$





Por la teoría de Von Misses y analizando el punto C por ser más crítico,

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_f^2 + 3 * (\tau_t^2 + \tau_c^2)}$$

$$M_{f-R} = 3.583 \text{ N.m}, M_t = 5.63 \text{ N.m}, V_R = 234.13 \text{ N}, \sigma_F = 270 \text{ MPa (SAE 1020)}$$

$$\sigma_f = 32 * \frac{M_{f-R}}{\pi * d^3} = 72.972 \text{ MPa}$$

$$\tau_t = 16 * \frac{M_t}{\pi * d^3} = 57.325 \text{ MPa}$$

$$\tau_c = 4 * \frac{V_R}{\pi * d^2} = 4.681 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eq} = 123.487 \text{ MPa} < \frac{270}{F.S} = 135 \text{ MPa}$$

Se observa que el diámetro de 7.94mm satisface la condición con un factor de seguridad de 2.

### Resistencia a fatiga del eje de rodilla

Se toman como secciones críticas el cambio de sección de 5 a 7.94 mm y la sección con momento flector máximo.

Se toman los siguientes coeficientes para una temperatura media de 30°C y una confiabilidad estadística del 99%,

$$C_s = 0.86, C_{temp} = 1, C_{carg} = 1, C_c = 0.814$$

- Para el cambio de sección solo actúa el momento flector que es alternante y se obtiene:

$$C_t = 1, K_t = 1.1, \sigma_{a-max} = 91.425 \text{ MPa}, \sigma_{a-min} = -91.425 \text{ MPa}$$

Usando los coeficientes, se obtiene:

$$\sigma_{a1-eq} = 143.66 \text{ Mpa}, \sigma_{m-eq} = 0 \text{ Mpa}$$

Con lo que,  $F.S. = 1.74$

- Para la sección con momento flector máximo, se tiene además un momento torsor que es una carga pulsante:

$$C_t = 1, K_t = 1, M_{f-max} = 3.58 \text{ N.m}, M_{f-min} = -3.58 \text{ N.m}$$

$$\tau_{max} = 57.28 \text{ MPa}, \tau_{min} = 0 \text{ MPa}$$

Usando los coeficientes, se obtiene:

$$\sigma_{a1-eq} = 125.97 \text{ Mpa}, \sigma_{m-eq} = 49.61 \text{ Mpa}$$

Con lo que,  $F.S. = 1.59$

### 4.3 Subsistema electrónico

La Figura 0.9 muestra la distribución de los componentes internos del robot. En la parte central destacan principalmente los elementos de la etapa de potencia, como los terminal strips, los reductores de voltaje y el relé. Además, se observa el Arduino con el Shield CAN junto al microcomputador, mientras que en la parte izquierda se encuentra la PCB de control. A continuación, se presentan los cálculos realizados para la selección de la batería, así como una descripción detallada de las etapas de potencia y control.

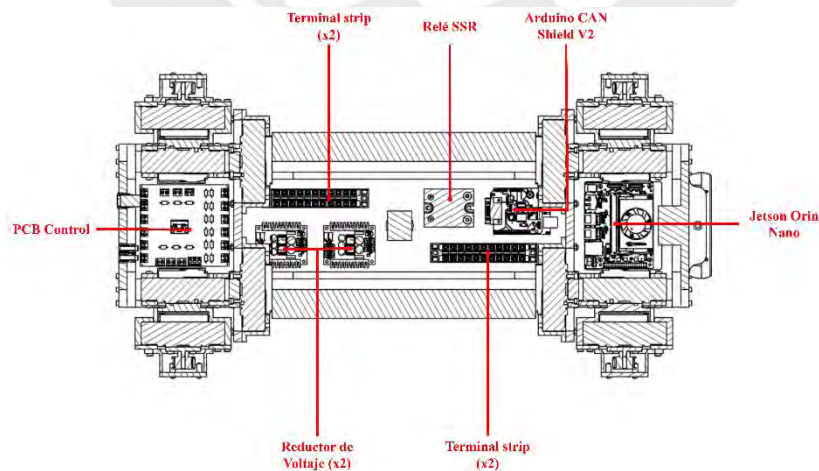


Figura 0.9: Detalle de distribución de componentes electrónicos internos (Elaboración propia)

### 4.3.1 Elección de componentes




Para el cálculo de energía, se toma en cuenta que el robot debe tener una autonomía de 45 minutos. Asimismo, el cálculo de corrientes se basa en los torques calculados y las hojas de datos de los componentes. A continuación, se muestran los valores de corriente para los motores de las articulaciones. Cabe resaltar que, para el cálculo de corriente de la rueda, se usó la constante de Torque igual a  $0.37 \text{ N.m/A}$  del datasheet mostrado en el Anexo H. Por otro lado, el consumo aproximado para los demás componentes electrónicos será de  $3 \text{ A}$  aproximadamente.

Tabla 0.4: Consumo de corrientes de motores (Elaboración propia)

Ubicación de motor	Corriente nominal (A)	Corriente pico (A)
<b>Hombro (<math>A_1</math>)</b>	0.40	3.80
<b>Cadera (<math>A_2</math>)</b>	3.80	6.91
<b>Rodilla (<math>A_3</math>)</b>	2.65	4.82
<b>Rueda (<math>A_4</math>)</b>	3.22	3.22

Con lo cual se obtiene un consumo total de corriente nominal ponderado de  $34.7 \text{ A}$ , con lo cual se requiere una batería de al menos  $26.1 \text{ Ah}$  para el tiempo de funcionamiento deseado. Por otro lado, el consumo de corriente pico instantáneo es de  $78.6 \text{ A}$ . En base a dichos valores, se escoge la batería BtrPower Ebike pues es la única que satisface todos los requerimientos.

Tabla 0.5: Elección de batería (Elaboración propia)

Modelo	Requisitos	BtrPower Ebike	Akku 48V	Freedoh 48V
				
<b>Voltaje nominal</b>	48 V	48 V	48V	48V
<b>Corriente descarga nominal</b>	34.7 A	50 A	60 A	-
<b>Corriente descarga pico</b>	78.6 A	100 A	180 A	-
<b>Capacidad</b>	26.1 Ah	30 Ah	30 Ah	30 Ah
<b>Dimensiones</b>	< 170 x 100 x 300 mm	165 x 100 x 280 mm	310 X 250 x 70 mm	295 x 130 x 75 mm
<b>Precio</b>	-	\$372.10	\$674.38	\$380.13

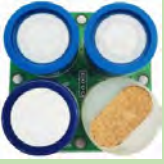


Con el fin de calcular el tiempo de funcionamiento total, se considera los 30Ah y se obtiene una autonomía de 55.6 min.

Tabla 0.6: Consumo de potencia promedio (Elaboración propia)

Componentes	Corriente (A)	Cantidad	Corriente total (A)	Potencia (W)
<b>Motores de articulaciones</b>	6.9	4	27.4	1315.2
<b>Motores de ruedas</b>	3.2	4	12.8	308.8
<b>Microcomputador</b>	2	1	2	38
<b>Electrónica restante</b>	1	1	1	5
<b>Ponderado</b>			34.73	1550.2

Por otro lado, respecto al sensor de gas se elige el módulo ZCE04B debido a sus dimensiones y versatilidad para usar con un microcontrolador. Asimismo, es relativamente menos costoso en comparación a los demás sensores.

Tabla 0.7: Elección de sensor de gas (Elaboración propia)

Modelo	Requisitos	ZCE04B	XA-4000II	Teledyne MUVE C360
				
Gases	CO, H2S, CH4	CO, H2S, CH4, O2	CO, H2S, CH4, O2	O, Cl2, O2, NO2, H2S, SO2, LEL
Voltaje nominal	-	3.5-5 V	Recargable	24V
Corriente nominal	-	100 mA		-
Temperatura	< 40 °C	-20 a 50 °C	0 a 40 °C	-20 a 50 °C
Dimensiones	< 70 x 70 x 50 mm	46 x 46 x 22 mm	127 X 127 x 50 mm	165 x 58 x 51 mm
Precio	-	\$137.19	\$797.00	-

### 4.3.2 Etapa de alimentación

En la etapa de potencia, debido a la alta corriente que se requiere suministrar, se optó por emplear *terminal strips* para las conexiones. Asimismo, en la Figura 0.10, se pueden observar las conexiones de la batería a los botones de parada, emergencia y el relé de estado sólido. Que posteriormente, alimenta a los motores de las articulaciones directamente o se usa un reductor de voltaje para alimentar el microcomputador y los motores de las ruedas.

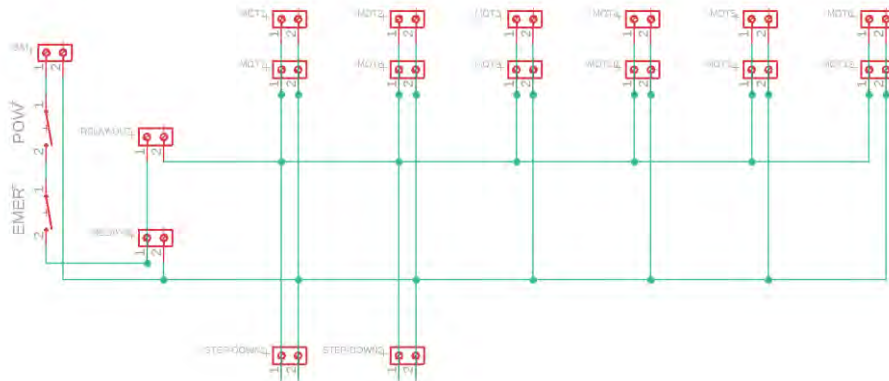


Figura 0.10: Diagrama esquemático de la etapa de potencia. (Elaboración propia)

### 4.3.3 Etapa de control

La Figura 0.11 muestra el diagrama de conexiones de la etapa de control. Donde se puede destacar los terminales CAN para cada uno de los motores de las articulaciones y de los drivers. Cabe resaltar que se añadieron dos resistencias de 120 Ohmios en los extremos físicos del bus CAN

según solicitado por el estándar, en este caso, en las borneras correspondientes al shield CAN del Arduino y las borneras del segundo driver a controlar. Por otro lado, se cuenta con un divisor de voltaje para realizar la medición de nivel de batería y las conexiones correspondientes al sensor inercial. Finalmente, en la Figura 0.12 se muestra el ruteado para obtener la PCB de control.

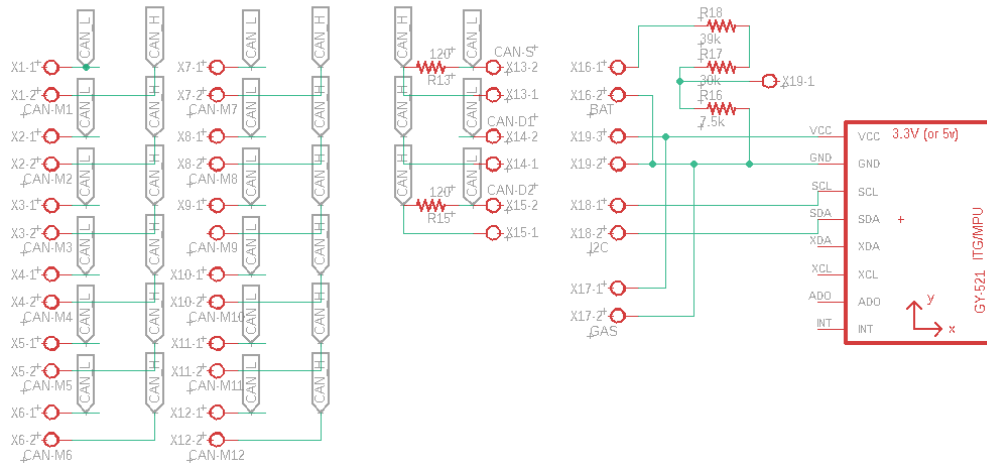


Figura 0.11: Diagrama esquemático de la etapa de control. (Elaboración propia)

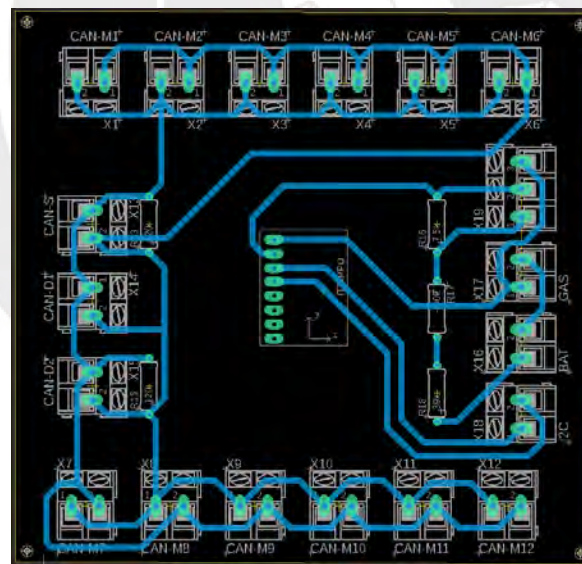


Figura 0.12: PCB de la etapa de control. (Elaboración propia)

En la Figura 0.13 se presenta el diagrama de conexiones asociado a los protocolos de comunicación utilizados en el sistema. En primer lugar, se destacan las señales CANL y CANH, correspondientes al protocolo CAN, las cuales se conectan directamente a la PCB y, posteriormente, a cada uno de los 12 motores de las articulaciones, así como a los drivers de los motores de las ruedas. Por otro

lado, la medición de la batería se extrae de la PCB como una señal de voltaje analógico. En cuanto a los sensores, el sensor inercial opera mediante el protocolo I2C y está conectado directamente al shield del microcontrolador. El sensor de gas utiliza el protocolo RS485, para el cual se empleó un conversor a USB. Finalmente, la comunicación entre el microcontrolador y el microcomputador se realiza a través de un puerto serial.

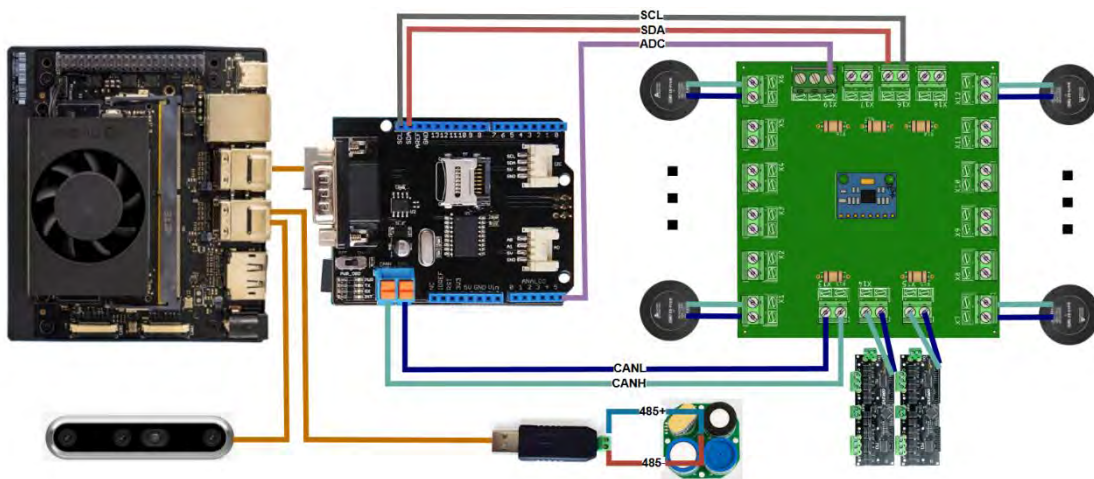


Figura 0.13: Diagrama de conexiones de comunicación. (Elaboración propia)

## 4.4 Subsistema de locomoción

### 4.4.1 Simulación

Debido a la complejidad que supone modelar la dinámica del robot para un algoritmo de locomoción robusto, se implementará un algoritmo usando técnicas de Reinforcement Learning. Para ello se requiere un ambiente simulado por lo costoso que es entrenar este tipo de algoritmos. A continuación, se observa el robot en RVIZ para validar la conversión a modelo URDF.

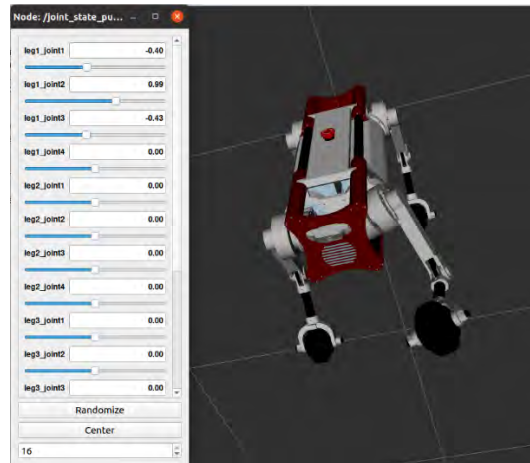


Figura 0.14: Validación de URDF del robot. (Elaboración propia)

Se escogió el simulador Isaac Gym de Nvidia debido a su integración y eficiencia para entrenar algoritmos de Reinforcement Learning. Asimismo, otros simuladores como Mujoco o Bullet fueron diseñados para correr en CPUs con limitada capacidad de paralelismo, lo cual no permite aprovechar las máximas capacidades de la GPU en un computador (Rudin et al., 2021). A continuación, se observa la integración de una serie de robots en el simulador para validar el URDF creado.

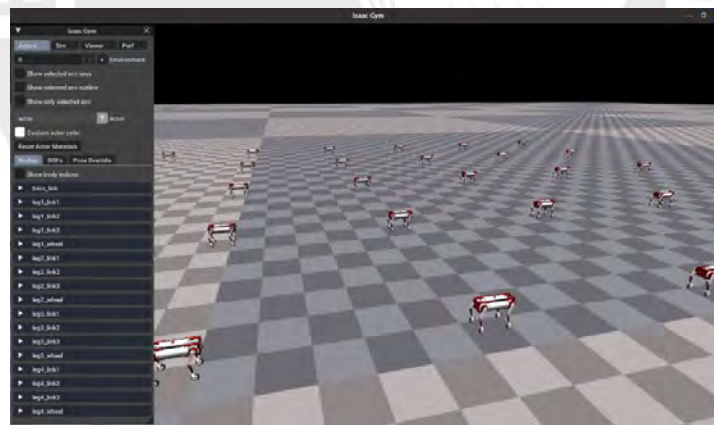
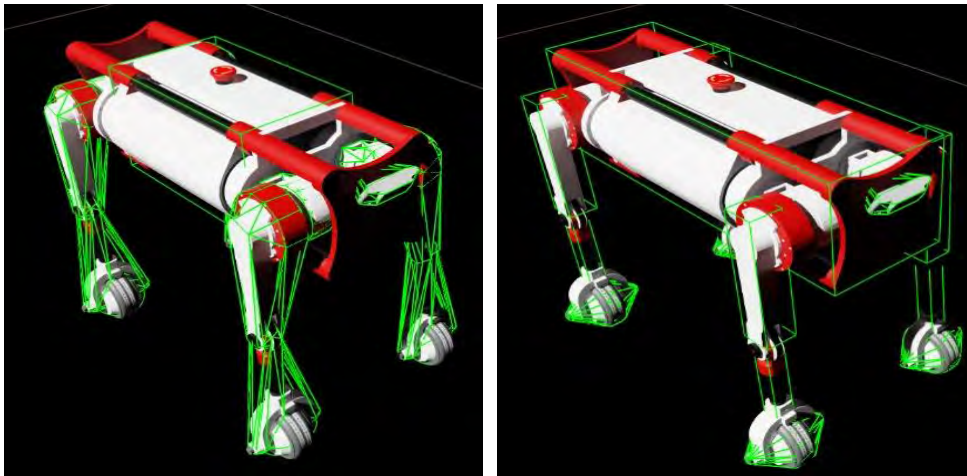


Figura 0.15: Simulación en Isaac Gym. (Elaboración propia)

Debido a que el algoritmo de locomoción penaliza colisiones entre los links y con el ambiente, asegurarse de que los meshes sean lo más precisos posibles es fundamental. Sin embargo, meshes de tipo STL en baja calidad, tienden a ser imprecisos pues ocupan mayor volumen que el modelo 3D, generando colisiones. Por lo cual se rediseñó manualmente con el fin de evitar dicho problema y a su vez simplificar el URDF para acelerar la simulación.



(a)

(b)

Figura 0.16: Simulación de colisiones en modelo URDF. a) Inicial b) Simplificado

(Elaboración propia)

#### 4.4.2 Transición de locomoción

El robot cuenta con dos estados dependiendo del terreno de navegación. En caso, se tenga un terreno plano se aplica un control PID a las articulaciones en su posición estable del robot. Por otro lado, en caso se trate de un terreno irregular se aplica un control PID de velocidad cero para simular el efecto de los frenos mecánicos de las ruedas. Cabe resaltar que, como se observa en la Figura 0.17, la activación de un modo determinado y de la transición de locomoción se realiza mediante el envío de comandos a la estación a excepción de la recuperación de caída que es automático.

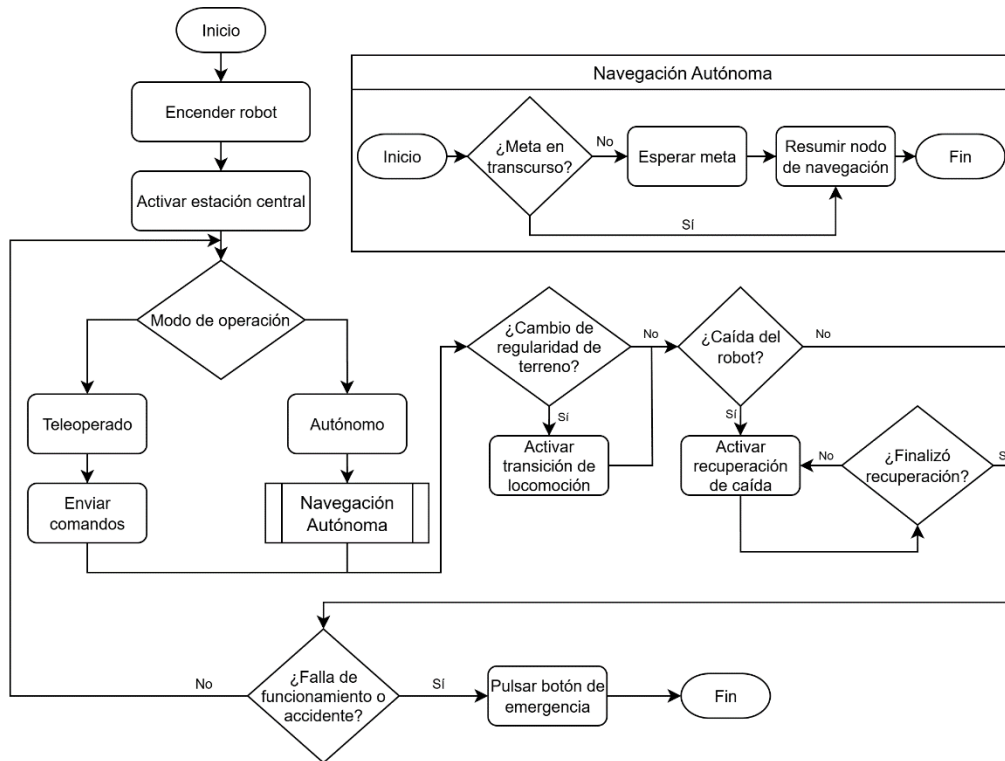


Figura 0.17: Diagrama de flujo de sistema. (Elaboración propia)

Para el modo de locomoción basado en patas los ángulos deseados en las articulaciones para cada instante de tiempo serán la salida de la red neuronal entrenada con Reinforcement Learning. Por otro lado, para la locomoción basada en ruedas, las velocidades de sus motores serán calculadas usando los comandos de teleoperación y asumiendo velocidades iguales de las ruedas delanteras y traseras del mismo lado del robot, como se muestra a continuación.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_{fl} \\ \dot{\theta}_{fr} \\ \dot{\theta}_{rl} \\ \dot{\theta}_{rr} \end{bmatrix} = \frac{1}{r} * \begin{bmatrix} 1 & -b \\ 1 & b \\ 1 & -b \\ 1 & b \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix}$$

#### 4.4.3 Algoritmo de locomoción

En la Figura 0.18 se muestra la arquitectura de control para el algoritmo de locomoción. El cual emplea información de los *encoders*, sensor inercial para la retroalimentación. Cabe resaltar que en terrenos irregulares se requiere también información del terreno. Para efectos de validación se empleó un mapa de alturas del suelo que provee el simulador, esto debido a la limitación de entrenar en *Isaac Gym* con información renderizada como la de cámaras de profundidad.

Finalmente, los comandos de teleoperación en tiempo real proveen, en conjunto con los sensores, la entrada al algoritmo de locomoción que entrega las posiciones deseadas de las articulaciones.

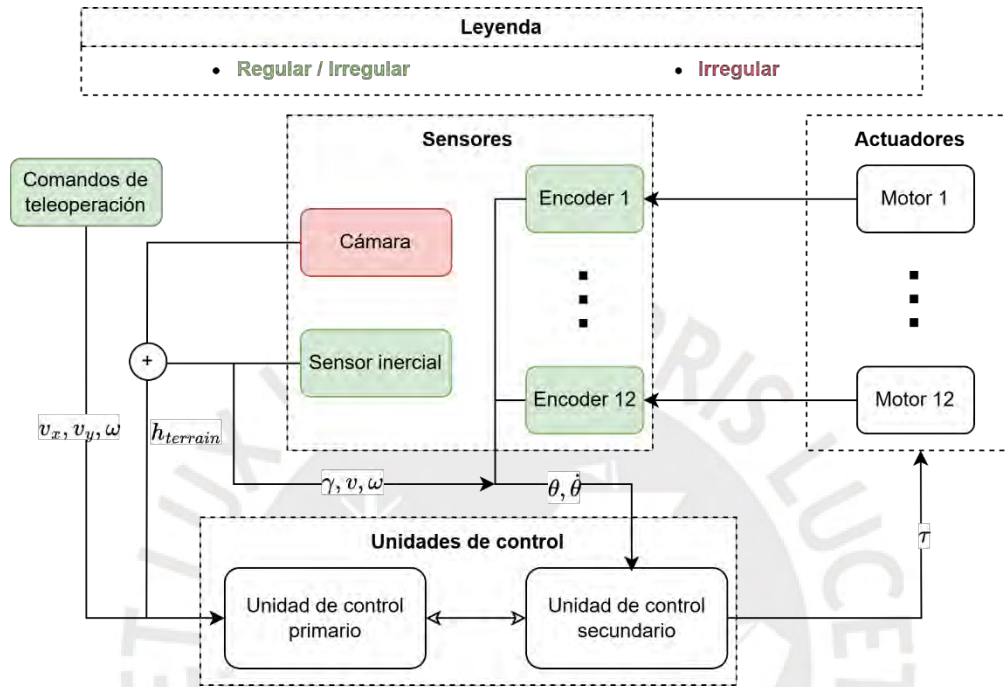


Figura 0.18: Arquitectura de control de algoritmo de locomoción (Elaboración propia)

En Isaac Sim Omniverse, cada articulación requiere un controlador individual. En este trabajo, se implementa un controlador proporcional doble: uno para minimizar el error de posición y otro para el error de velocidad. Las ganancias de estos controladores se denominan *stiffness* y *damping*, respectivamente, y determinan el torque  $\tau$  aplicado sobre cada articulación. La expresión general del controlador es:

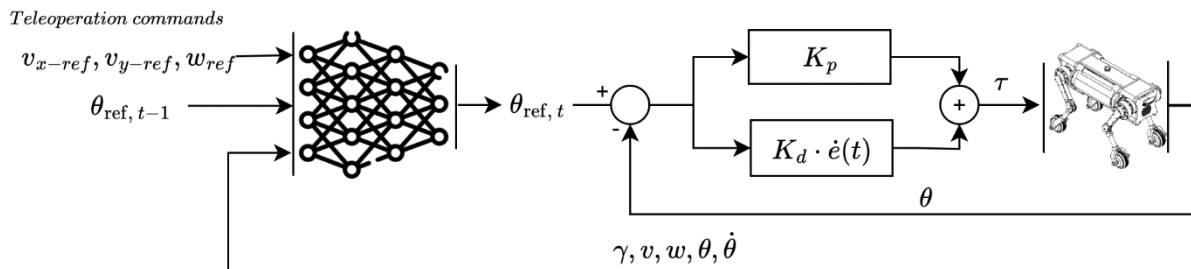


Figura 0.19: Lazo de control de algoritmo de locomoción (Elaboración propia)

$$\tau = stiffness * (q_{target} - q) + damping * (\dot{q}_{target} - \dot{q})$$

Para este caso particular, las acciones generadas por la red neuronal estarán referidas a desviaciones respecto a una posición estable del robot, y se asumirá una velocidad angular deseada nula. Por tanto, el esfuerzo aplicado se calcula como:

$$\tau = stiffness * (\theta_{action} + \theta_{stable} - \theta) - damping * (\dot{\theta})$$

A continuación, se detalla el algoritmo de locomoción empleado. Se empezará explicando el tipo de algoritmo elegido (*PPO*), para luego entrar en detalle en la propuesta de entrenamiento en paralelo (*Curriculum*) y finalmente mencionar el espacio de observaciones, acciones y recompensas del algoritmo.

- **Proximal Policy Optimization (PPO)**

Algoritmo desarrollado por OpenAI que consta de dos componentes un *actor* y *critic*. El primero está encargado de decidir las acciones a tomar, mientras el segundo evalúa qué tan buenas son las acciones del actor. Asimismo, su arquitectura le permite mejorar la estabilidad de entrenamiento del agente al evitar cambios bruscos en las actualizaciones de la política. Para ello emplea un factor que mide la diferencia entre la política actual y anterior y se asegura que este valor esté en un rango mediante *clipping* (Schulman et al., 2017).

Cabe resaltar que se usó el algoritmo desarrollado por NVIDIA y ETH (Rudin et al., 2021), puesto que las operaciones están optimizadas para la GPU, lo que permite acelerar el tiempo de entrenamiento. Asimismo, en su trabajo encontraron que el número de pasos si está debajo de cierto umbral imposibilita al algoritmo converger a la solución óptima. Finalmente, también demostraron que tener tamaños de *mini-batch* mayores a lo que se considera buena práctica mejora el proceso de entrenamiento sin incrementar el tiempo.

- **Curriculum**

El robot inicia en la parte central de un terreno determinado y es comandado por velocidades lineales y angulares aleatorias con el fin de que supere los terrenos. Similar a como aprenden los humanos, empezar por tareas más sencillas permiten mejorar el proceso de aprendizaje, a este método se le conoce como *curriculum*. En el caso del robot, se inicia con terrenos planos y se va incrementando la dificultad del terreno progresivamente, siempre y cuando el robot sea capaz de

pasar los bordes de su terreno actual. Una vez estos logren sobrepasar el último nivel, son asignados aleatoriamente a otro nivel con el fin de evitar pérdida de aprendizaje.

- **Observaciones, acciones y recompensas:**

Para terrenos planos, el robot tiene como espacio de observaciones: la velocidad linear y angular del chasis, velocidades y posiciones de las articulaciones, proyección de la gravedad y acciones previas tomadas por el actor. Por otro lado, para terrenos irregulares se requiere además 108 mediciones de alturas respecto al chasis del terreno. Mientras que las acciones son las posiciones articulares deseadas, que mediante un control PD son convertidas a torques.

Respecto a las recompensas, se penalizan torques elevados, aceleraciones bruscas y cambios rápidos en las posiciones objetivo de las articulaciones, con el fin de obtener un movimiento más fluido y estable. También se penalizan contactos no deseados, especialmente en el chasis, ya que pueden provocar reinicios del entorno. Por otro lado, se recompensa el tiempo en el aire de las patas, lo cual incentiva patrones de caminata más amplios y eficientes.

Las recompensas implementadas se basan en (Rudin et al., 2021), sin embargo, se cambiaron los pesos de las recompensas de seguimiento de velocidades lineales y angulares para el presente robot debido a la diferencia de torques y dinámica del sistema.

- $rew_{linear-vel-track} = \exp\left(-\frac{[(v_{xcmd} - v_x)^2 + (v_{ycmd} - v_y)^2]}{\sigma}\right)$ , recompensa seguimiento de  $v_{x,ycmd}$
- $rew_{ang-vel-track} = \exp\left(-\frac{(\omega_{zcmd} - \omega_z)^2}{\sigma}\right)$ , recompensa seguimiento de  $\omega_{zcmd}$
- $rew_{action-rate} = \sum(\Delta action)^2$ , que penaliza cambios bruscos entre acciones consecutivas.
- $rew_{torque} = \sum(torques)^2$ , que penaliza aceleraciones articulares elevadas.
- $rew_{dof-acc} = \sum\left(\frac{\Delta v}{dt}\right)^2$ , que penaliza valores altos de torque.
- $rew_{lin-vel-z} = v_z^2$ , penaliza movimientos verticales
- $rew_{ang-vel-xy} = \omega_x^2 + \omega_y^2$ , penaliza inclinaciones en x e y
- $rew_{feet\_air\_time} = (\|v\_cmd, xy\| > 0.1) \cdot \sum_i (t_i - 0.5) \cdot \delta_i$ , recompensa patas en el aire.

Donde:

- $v_{x_{cmd}}, v_{y_{cmd}}$ , comandos de velocidad lineal en x e y
- $w_{z_{cmd}}$ , comando de velocidad angular en z
- $t_i$ , tiempo en el aire de la pata i
- $\delta_i$ , indicador binario: 1 si el pie i hace contacto tras estar en el aire, 0 en otro caso.

#### 4.4.4 Algoritmo de recuperación de caída

En la Figura 0.20 y Figura 0.21 se muestra la arquitectura y lazo de control, respectivamente, para el algoritmo de recuperación de caída. El cual emplea información de los *encoders* y sensor inercial para la retroalimentación. Cabe destacar que, a diferencia del algoritmo de locomoción, no se emplean la cámara como sensor y los comandos de teleoperación como entradas al algoritmo. Por otro lado,

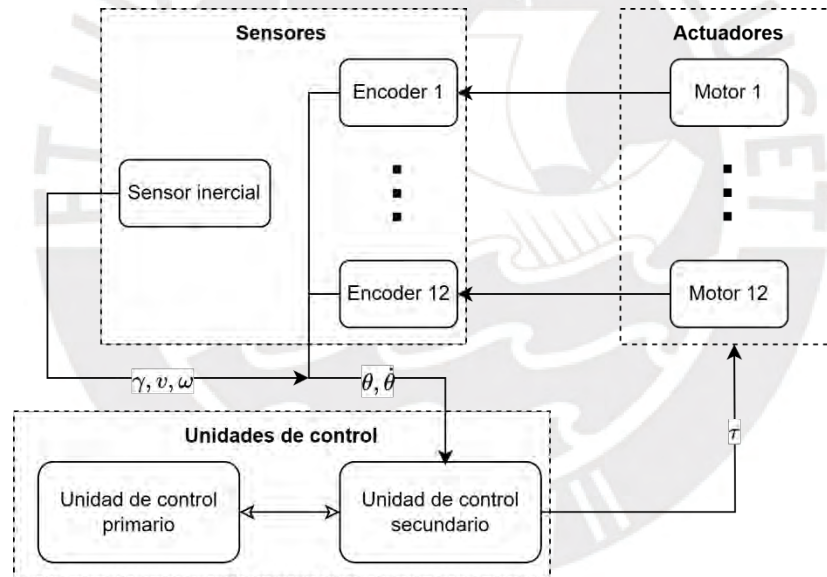


Figura 0.20: Arquitectura de control para recuperación de caída. (Elaboración propia)

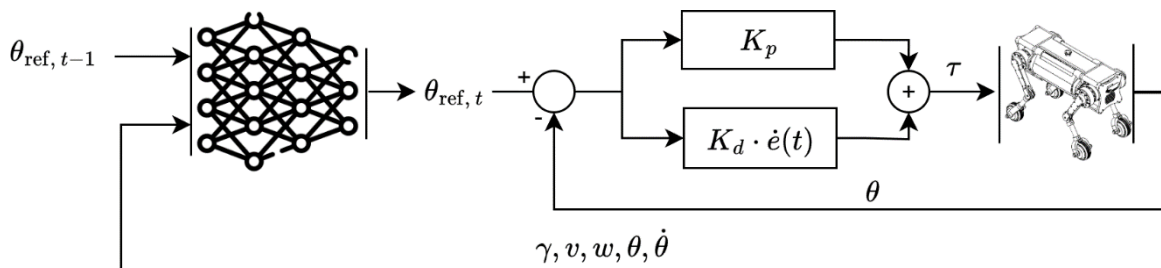


Figura 0.21: Lazo de control de algoritmo de recuperación de caída. (Elaboración propia)

A continuación, se detalla en el algoritmo de recuperación de caída. Se empezará explicando la recolección de poses iniciales como medio de obtener estados de reinicio para el entrenamiento, y además, se explicará el diseño del algoritmo, mencionando el espacio de observaciones, acciones y recompensas propuestos.

- Recolección de poses iniciales:

Con el fin de obtener un estado inicial para el robot, se simularon caídas de 1 m con una orientación de la base y articulaciones aleatoria, como se puede observar en la Figura 0.22. Posteriormente, se repitió este procedimiento 10, 000 veces en paralelo y se esperaron 4 segundos hasta que las articulaciones tengan una posición fija y finalmente, se guardaron estas posiciones iniciales.

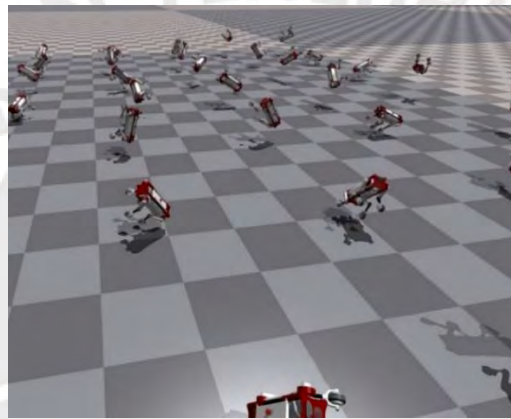


Figura 0.22: Colección de posiciones finales de caída. (Elaboración propia)

- Diseño del algoritmo de DRL

Respecto al espacio de observaciones, la principal diferencia con referencia al algoritmo anterior es que no se cuentan con los comandos de teleoperación. Asimismo, se destaca que se utilizaron posiciones relativas respecto a una configuración articular estable, en lugar de posiciones absolutas. El espacio de acciones se mantuvo inalterado, correspondiendo a las posiciones objetivo de las articulaciones.

En cuanto al diseño de la función de recompensa, se conservaron tres términos provenientes del algoritmo de locomoción previo, debido a su efectividad para promover movimientos suaves y evitar variaciones abruptas en los torques articulares. Los pesos asociados a estos términos fueron modificados con respecto a la implementación anterior, tal como se detalla en el Anexo K. Estos términos son:

- $rew_{action-rate} = \sum(\Delta action)^2$ , que penaliza cambios bruscos entre acciones consecutivas.
- $rew_{torque} = \sum(torques)^2$ , que penaliza aceleraciones articulares elevadas.
- $rew_{dof-acc} = \sum\left(\frac{\Delta v}{dt}\right)^2$ , que penaliza valores altos de torque.

Adicionalmente, se incorporaron tres nuevos componentes a la función de recompensa, el primero,  $rew_{joint-track}$ , que recompensa la similitud entre las posiciones de las articulaciones actuales con respecto a las posiciones con el robot estable, siempre y cuando la proyección de la gravedad sea menor a -0.7. Mientras que el segundo término,  $rew_{up}$ , recompensa si la orientación del robot se alinea con la normal del suelo. Finalmente, una recompensa terminal otorgada al finalizar el episodio si el robot alcanza la posición objetivo de manera satisfactoria.

$$rew_{up} = e^{-g_{proy-z}-1}$$

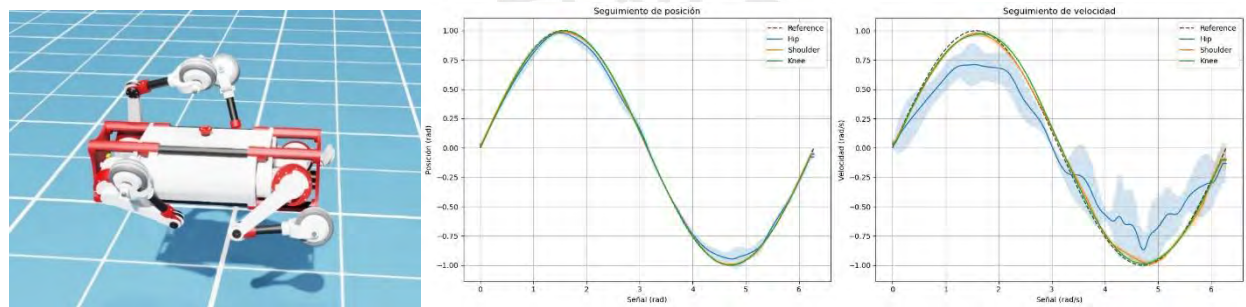
$$rew_{joint-track} = \begin{cases} e^{-\sum|\Delta dof_{pos}|}, & \text{Si } g_{proy-z} < -0.7 \\ 0, & \text{Otro caso} \end{cases}$$

$$rew_{termination} = \begin{cases} 1, & \text{Si alcanzó pose estable} \\ 0, & \text{Otro caso} \end{cases}$$

## CAPÍTULO 5 : LOCOMOCIÓN Y RECUPERACIÓN DE CAÍDA

### 5.1 Control de posición y velocidad de articulaciones

A continuación, se muestra la respuesta del sistema con el torso fijo ante una señal de referencia tipo sinusoidal después del tuneo, donde se promediaron las señales dependiendo del tipo de articulación. Las ganancias con las que se obtuvieron mejores resultados fueron  $stiffness=100$  y  $damping=4$ . Asimismo, es observable que el tracking de posición es bastante preciso para todas las articulaciones excepto la cadera, este error se propaga incluso más para la velocidad. Ello se debe a que la prueba consistió en realizar el movimiento simultáneo de las tres articulaciones, con lo cual, debido a la inercia, la más afectada es la más cercana al torso.



(a) Simulación

(b) Tracking de posición

(c) Tracking de velocidad

Figura 5.1: Respuesta de articulaciones ante señal de referencia seno. (Elaboración propia)

### 5.2 Seguimiento de velocidad

Para esta prueba, se consideró un terreno totalmente plano y se comandaron velocidades constantes aleatorias en el rango de  $-1$  a  $1$  m/s o rad/s. El robot parte del centro de un área rectangular y se toman 1000 mediciones hasta que salga de la zona. Cabe resaltar que en este caso no se requiere percepción visual del terreno en el robot para la teleoperación. En la Figura 5.2, se pueden mostrar los resultados, donde se puede observar una correlación bastante alta entre la velocidad comandada y medida para las velocidades lineales. No obstante, la velocidad angular cuenta con una correlación más baja, esto debido a que el torque requerido para ejecutar la maniobra de giro es mayor. En el Anexo J, se observa un estudio comparativo entre el seguimiento de la velocidad angular al permitir mayor torque en las articulaciones, de donde se confirma la hipótesis.

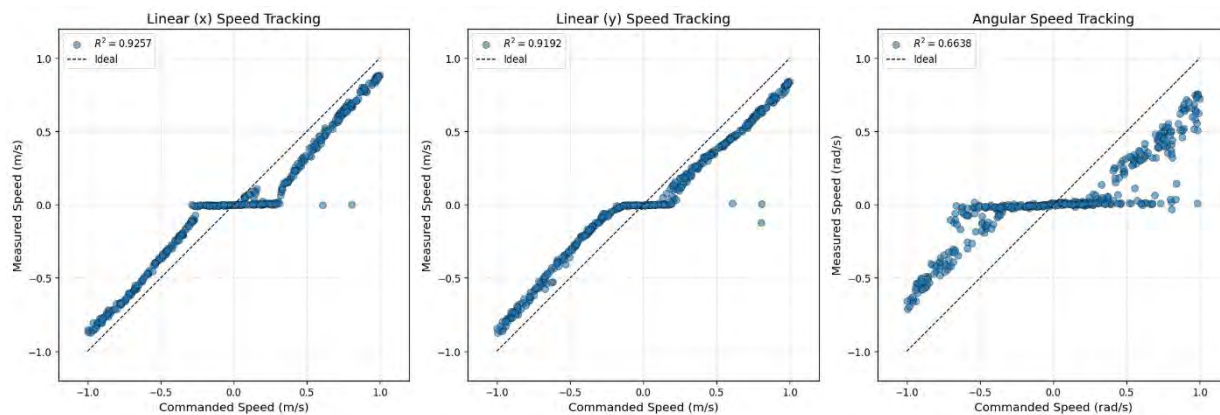


Figura 5.2: Mediciones del robot ante comandos de velocidad. (Elaboración propia)

### 5.3 Control de velocidad máxima

Esta prueba se realiza de manera similar al experimento 5.2, con la diferencia que ahora las velocidades en cada uno de los experimentos son las máximas que el robot puede alcanzar en cierto eje, y en los demás restantes, es cero. Se puede notar, que la velocidad angular presenta menor valor en estado estable, esto se debe también al límite de torque en los motores. Por otra parte, el tiempo de establecimiento es similar para los tres casos. Sin embargo, hay una diferencia notable en el sobreimpulso, con valores de 1.8, 4.0 y 32.1% para x, y, w respectivamente.

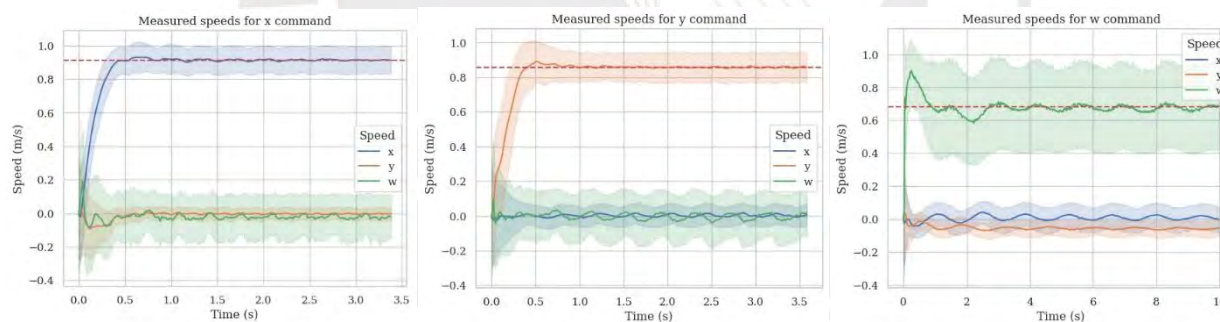


Figura 5.3: Mediciones del robot ante comandos de velocidad máximos. (Elaboración propia)

### 5.4 Locomoción en entornos irregulares

En este caso se validó el modelo para distintos terrenos irregulares con dificultad creciente. Para los distintos casos, se crearon aleatoriamente 400 tipos de terrenos con pendiente o altura variable en el rango de 0 a 60° o 0.05 a 0.40 m, respectivamente. Para cada uno de los terrenos se tomaron 50 muestras y se calcularon la efectividad con la que el robot era capaz de atravesar el terreno. Cabe resaltar que se consideraron terrenos ascendentes y descendentes para pendientes y escaleras. Asimismo, en este caso sí se requiere un mapa de puntos del terreno.

### 5.4.1 Pendientes

En la Figura 5.4 se observa que para terrenos ascendentes el robot puede escalar hasta una pendiente de  $40^\circ$  satisfactoriamente, mientras que para terrenos descendentes este valor se reduce a  $35^\circ$  aproximadamente. Esto se debe principalmente a que en terrenos descendentes el resbalamiento es un factor que genera caídas en el robot, al tener diferentes puntos de apoyo de las patas en contacto con la superficie. Ello mismo, genera una mejora para mayores pendientes pues el factor gravitatorio juega en favor.

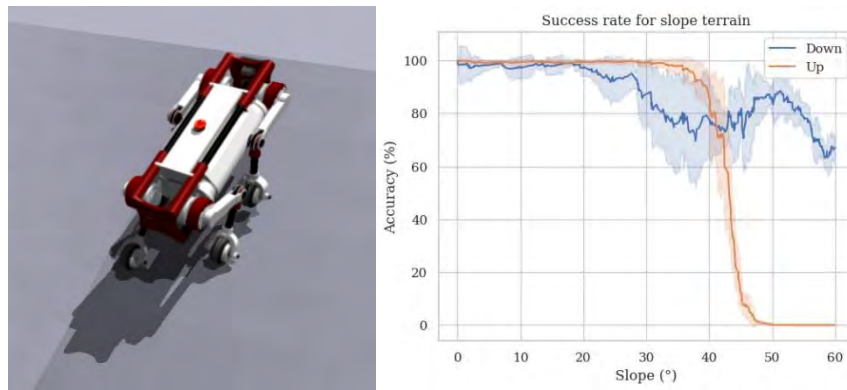


Figura 5.4: Tasa de éxito en terrenos con pendiente. (Elaboración propia)

### 5.4.2 Obstáculos discretos

En la Figura 5.5 se concluye que el robot puede atravesar satisfactoriamente terrenos con una altura de 0.2 aproximadamente. Asimismo, se observa una mayor desviación estándar que en casos anteriores, esto se debe principalmente a la aleatoriedad del terreno.

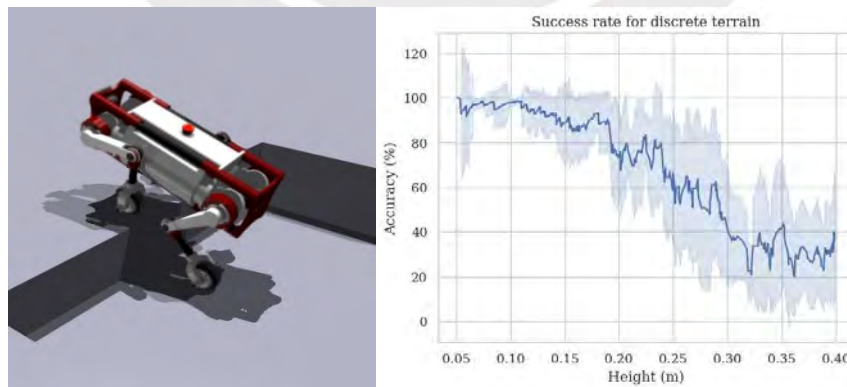


Figura 5.5: Tasa de éxito en terrenos con obstáculos discretos. (Elaboración propia)

### 5.4.3 Escaleras

En la Figura 5.6 se observa que para terrenos ascendentes el robot puede escalar hasta una altura de 0.2m satisfactoriamente, mientras que para terrenos descendentes este valor se reduce a 0.1m aproximadamente. A diferencia de las pendientes, en dónde la tasa de éxito se mantiene aproximadamente constante a partir de cierto umbral, en este caso disminuye hasta 0. Esto se debe principalmente a que, en caso de resbalamiento o efectos gravitatorios, la superficie de contacto es menor debido a los escalones a diferencia de una pendiente.

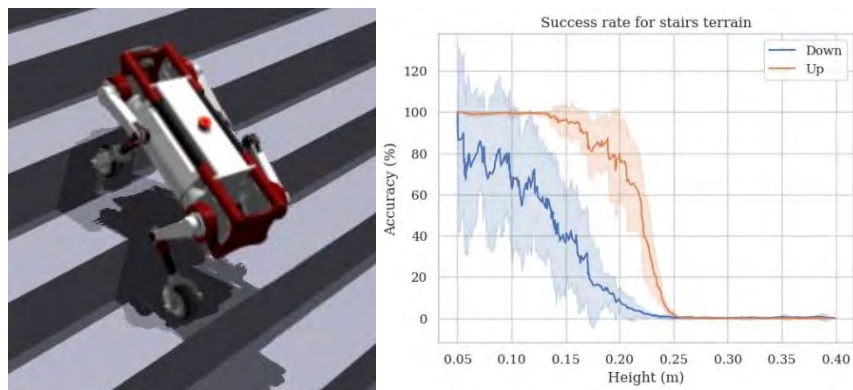


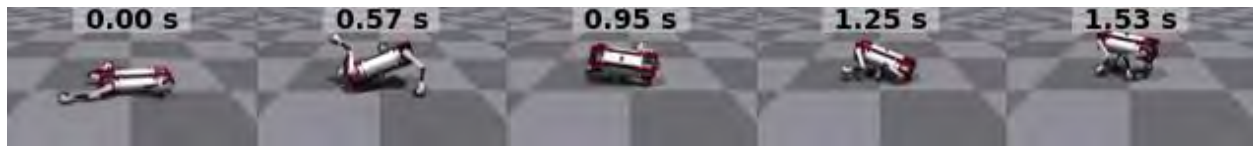
Figura 5.6: Tasa de éxito en terrenos tipo escalera. (Elaboración propia)

### 5.5 Eficiencia de recuperación de caída

Para la validación del algoritmo de recuperación de caída se tomaron 1000 muestras con posiciones aleatorias de caída, con lo cual la posición y orientación del robot, y los ángulos iniciales de las articulaciones son también aleatorias. Se obtuvo un porcentaje de efectividad de recuperación del 93.8%, donde se considera que el robot está recuperado si en promedio el error de las articulaciones respecto a la posición estable es de menos de 0.1 radianes. Por otro lado, se obtuvo un promedio de 1.55 segundos para el tiempo de recuperación.

A continuación, se presentan secuencias aleatorias de recuperación ante caídas. Vale la pena mencionar que la secuencia más común es análoga a la mostrada en la Figura 5.7 (a), donde una pata impulsa el giro de todo el cuerpo. Otro tipo de recuperación, similar a la Figura 5.7 (b), consiste en girar el cuerpo sin el impulso directo de una pata, sino mediante un movimiento progresivo del torso. Por otro lado, si el robot se encuentra en una posición lateral, la recuperación más típica se asemeja a la Figura 5.7 (c), donde el robot extiende las patas traseras para luego contraerlas y así generar el impulso necesario para levantarse. Finalmente, si el robot ya está

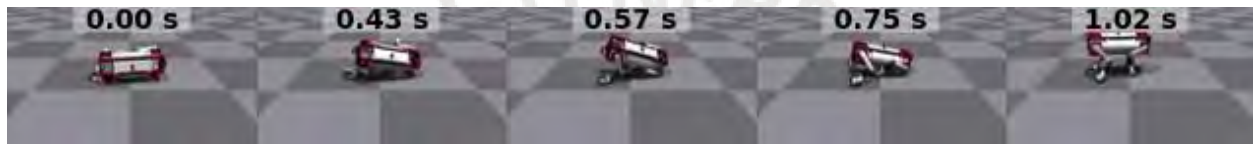
orientado correctamente, generalmente utiliza nuevamente las patas traseras, pero en este caso para contraerlas, extenderlas y volver a contraerlas, como en la Figura 5.7 (d).



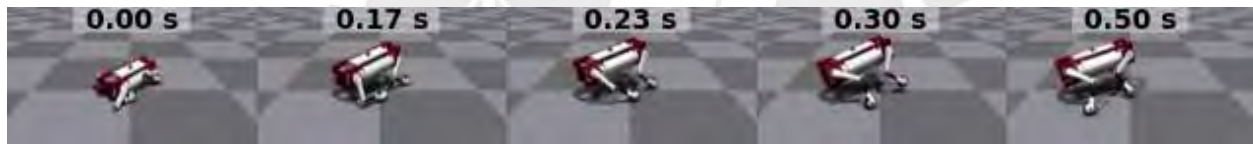
(a) Posición aleatoria 1



(b) Posición aleatoria 2



(c) Posición aleatoria 3



(d) Posición aleatoria 4

Figura 5.7: Secuencia de recuperación para posiciones aleatorias (Elaboración propia)

Un tipo de recuperación adicional, que solo se logró incrementando el torque más allá del límite de  $25 \text{ N}\cdot\text{m}$ , es el *side flip*. Este consiste en generar un impulso suficiente para girar todo el cuerpo en el aire y estabilizarse durante la caída, como se muestra en la Figura 5.8.

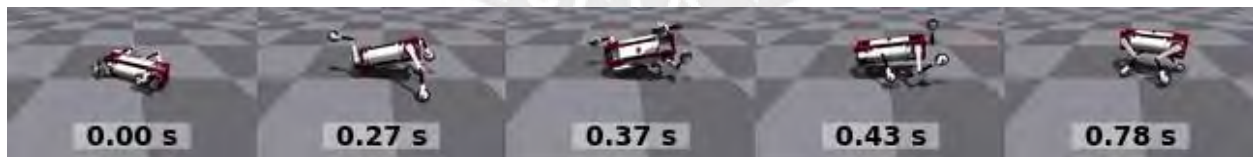


Figura 5.8: Secuencia de recuperación aleatoria con mayor torque. (Elaboración propia)

## 5.6 Análisis dinámico de torques

El cálculo de torques realizado en la sección 4.2.1 sirvió para elegir los motores de las articulaciones. Si bien es un análisis en estado estacionario, los valores obtenidos, junto con un factor de seguridad adecuado, permitieron obtener un modelo de locomoción dinámico funcional

incluso en terrenos irregulares, y además estimar preliminarmente el tiempo de funcionamiento del robot. En la presente sección, se expone un análisis dinámico de torques durante la locomoción, considerando la velocidad del robot, dificultad y tipo de terreno, y durante la recuperación de caída, considerando el tiempo en lograr el estado estable. Este análisis permitirá mostrar de forma integral el comportamiento del torque según el tipo de articulación, su relación con las variables mencionadas y estimar un cálculo más preciso del tiempo de funcionamiento.

En la Figura 5.9 se muestra el comportamiento del torque para los tres tipos de articulaciones de la pata del robot. Por un lado, en la izquierda se muestran los torques para locomoción en un terreno regular dependiendo la de la escala de velocidad del robot, ya sea angular o lineal. Se puede observar que, en este caso, la rodilla presenta el mayor torque. Además, para todos los tipos de articulaciones, el torque se mantiene relativamente constante frente al incremento de velocidad, a excepción del hombro, cuyo torque aumenta a velocidades más altas. Por otro lado, en la derecha se presentan los torques durante la recuperación de caída dependiendo de la etapa temporal de recuperación. En este caso, se observa que la rodilla presenta en promedio el menor torque, lo cual se puede deber potencialmente a que el impulso necesario para girar el torso es principalmente ejecutado por las articulaciones superiores. Finalmente, se observa que los torques durante la recuperación son considerablemente altos, lo cual se debe a los movimientos bruscos que deben ejecutarse para lograr dicha maniobra.

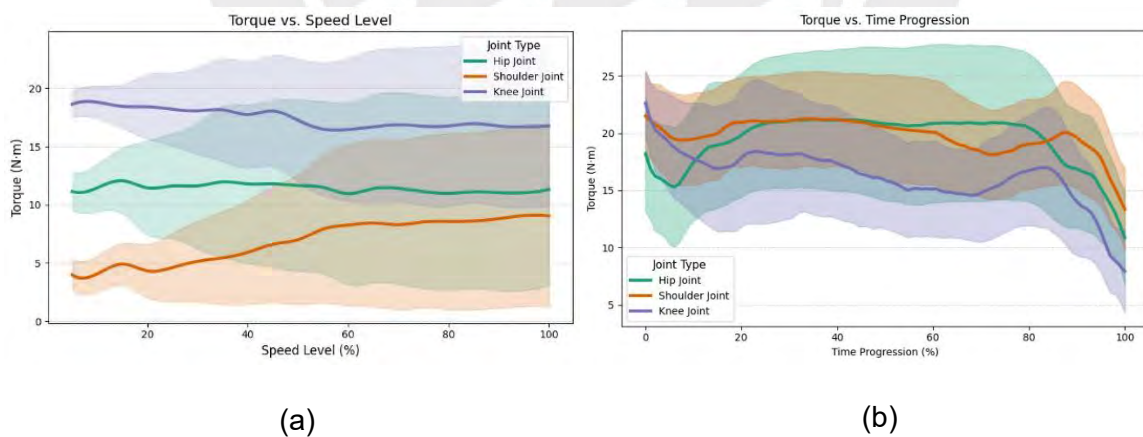


Figura 5.9: Torque de articulaciones en (a) Terreno plano y (b) Recuperación de caída. (Elaboración propia)

En la Figura 5.10 se presenta el comportamiento de los tres tipos de articulaciones en función de la dificultad del terreno, la ubicación frontal o trasera de la pata, y si el terreno es en subida o bajada. Al igual que en la locomoción sobre terrenos planos, se observa que los torques en las

rodillas, especialmente en las traseras, son los más altos tanto en terrenos ascendentes como descendentes. Además, estos torques se mantienen aproximadamente constantes a medida que aumenta la dificultad del terreno. Por otro lado, en terrenos ascendentes se aprecia que el torque en la cadera y en los hombros delanteros disminuye con la dificultad, mientras que el torque en el hombro trasero tiende a aumentar. Asimismo, en terrenos descendentes, el torque en el hombro delantero incrementa conforme se incrementa la dificultad. Ambas conclusiones son potencialmente debido a que el peso del robot yace mayormente sobre las patas delanteras o traseras dependiendo de la inclinación del terreno.

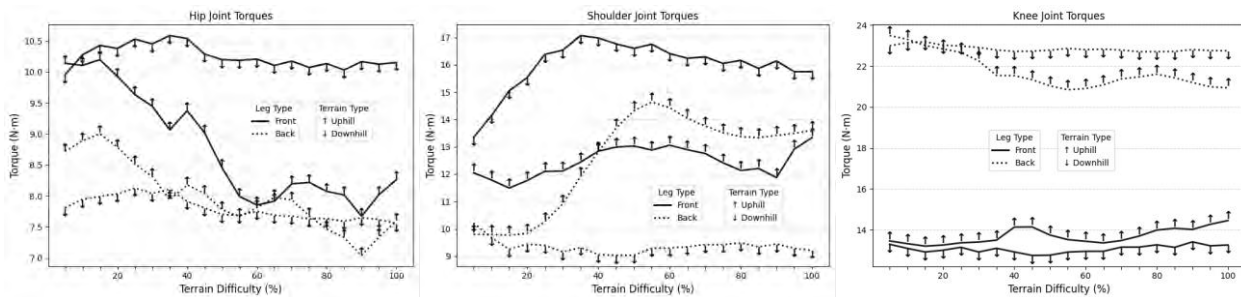


Figura 5.10: Torque de articulaciones en terreno irregular. (Elaboración propia)

Finalmente, a partir de los torques promedio obtenidos en las gráficas presentadas anteriormente, se calculó la corriente ponderada de manera similar a lo descrito en la Sección 4.3.1. Para ello, se consideraron los porcentajes del tiempo total de operación correspondientes a cada estado del robot, los cuales se utilizaron para estimar la duración aproximada de la batería. Como resultado, se obtuvo una duración final de 43.43 minutos.

Tabla 5.1: Corrientes y tiempos según estado del robot. (Elaboración propia)

	Estático	Locomoción en terreno		Post caída	
		Plano	Irregular		
			Discreto		Inclinado
Porcentaje de tiempo (%)	9	15	40	35	1
Corriente ponderada (A)	34.73	38.72	42.7	42.32	62.27

## 5.7 Transición de locomoción

Para la transición entre los modos de locomoción, en el modo basado en patas las ruedas permanecen fijas gracias al sistema de frenado de los motores. Sin embargo, dado que en el simulador NVIDIA Isaac Sim no es posible aplicar un freno mecánico a las articulaciones, se

implementó un control proporcional de velocidad con referencia cero para mantenerlas inmobilizadas. En el modo de locomoción por ruedas, se utiliza el mismo esquema de control de doble lazo empleado para las articulaciones, con la diferencia de que las acciones se fijan en cero, permitiendo que el robot adopte una postura estable.

La Figura 5.11 muestra una secuencia de movimientos que ilustra el comportamiento híbrido del robot. De (a) a (b), el desplazamiento se realiza mediante locomoción por ruedas; en (b) inicia la transición entre modos, que concluye en (c). Finalmente, de (c) a (d), el robot se desplaza empleando locomoción basada en patas.



(a) (b) (c) (d)

Figura 5.11: Secuencia de transición de locomoción. (Elaboración propia)

## CAPÍTULO 6 : NAVEGACIÓN AUTÓNOMA

La presente tesis busca proponer un robot que realice las tareas de inspección de gases en entornos inciertos y de superficie compleja. Generalmente un operario debería comandar velocidades al robot para realizar sus funciones. Sin embargo, ello generaría gastos adicionales y además no se aprovecharían al máximo los sensores de percepción de entorno, que a su vez pueden llegar a ser bastante costosos. En ese sentido, en este capítulo se desarrollará la navegación autónoma del robot usando solamente una cámara de profundidad como sensor de percepción, logrando así un diseño de bajo costo y funcional.

En la Figura 6.1, se muestra un esquema general de la navegación autónoma, donde se puede destacar el uso de ROS2 NAV2 (*Nav2 — Nav2 1.0.0 Documentation, 2025*) como eje principal. Por otro lado, se tienen algoritmos de percepción visual como Reconstrucción 3D mediante NVBLOX (Millane et al., 2023) y SLAM visual por medio de CuVSLAM (Korovko et al., 2025) para obtener el mapa de costos local y localizar el robot respectivamente. Finalmente, NAV2 genera los comandos de velocidad que ingresan a la red neuronal entrenada en el capítulo anterior con Reinforcement Learning.

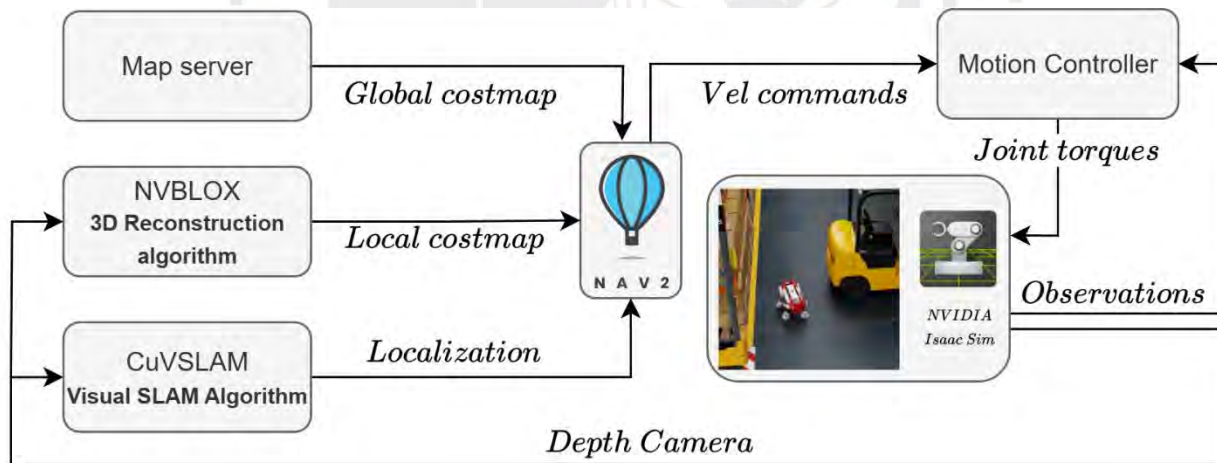


Figura 6.1: Diagrama general de navegación autónoma. (Elaboración propia)

### 6.1 Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)

El algoritmo de Visual SLAM empleado da la posibilidad de fusionar el IMU para mejorar los resultados de localización. Sin bien es cierto la cámara tiene un movimiento constante en todas las direcciones debido a la naturaleza de la locomoción por patas, lo que puede indicar que no funcionará adecuadamente. En la Figura 6.2, se realizó una comparación para verificar dicha proposición, en la cual se comandaron velocidades al robot para siga una trayectoria circular.

Además, se compara en ambientes vacíos y con obstáculos, puesto que, en un ambiente vacío, el algoritmo visual contara con menos puntos claves con el que puede estimar el flujo óptico entre imágenes y por tanto, estimar la posición. Se evidencia, que el IMU mejora sutilmente los resultados, además como era esperable, un ambiente con obstáculos presenta menor error.

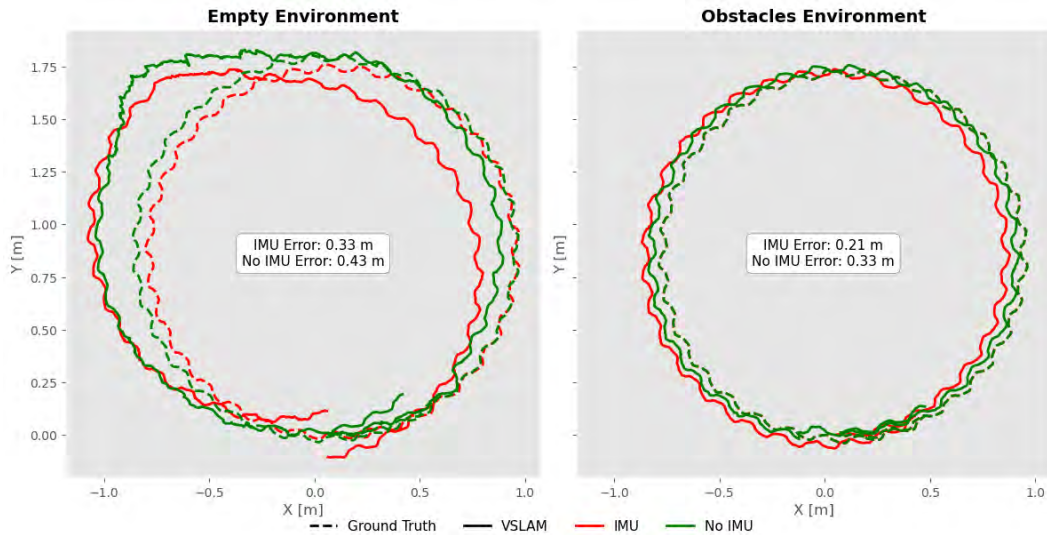


Figura 6.2: Comparación de resultados de odometría. (Elaboración propia)

Cabe destacar que, si bien en un ambiente vacío el error es bastante alto, ese error se puede corregir usando la localización del algoritmo visual en conjunto con un mapa de puntos 3D previamente obtenido. En la Figura 6.3 se puede observar la localización en el mapa de puntos 3D, identificado de color blanco, los puntos locales detectados por el sensor con el color azul y en color ojo potencia métricas para *loop closure*. Las estimaciones de posiciones del algoritmo (0.07, -0.05, 0.04) y (1.02, 0.50, 0.04) fueron similares a los valores reales, no obstante, cabe resaltar que debido a que el algoritmo de SLAM corrige la posición mediante landmarks vistos durante el mapeo, este último debe hacerse de manera adecuada con el fin de obtener diversos puntos representativos.

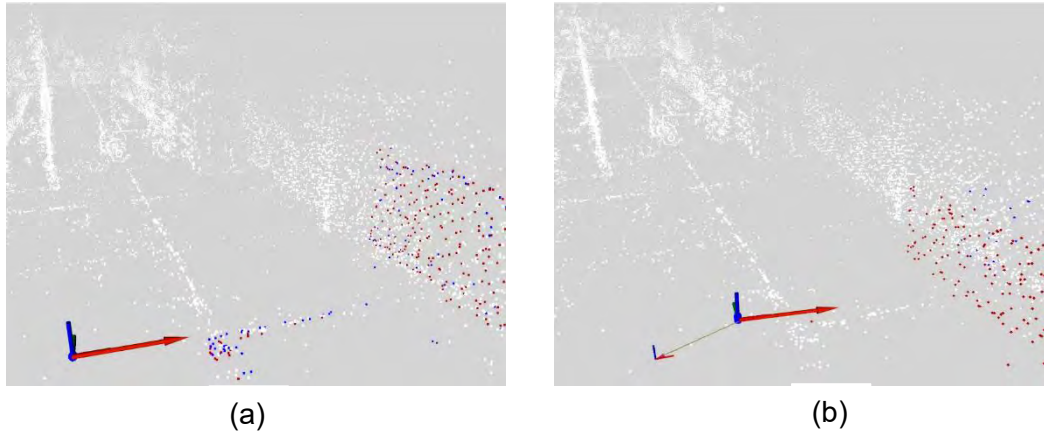


Figura 6.3: Localización en mapa de puntos en (a) Punto Inicial y (b)  $x=1, y=0.5$ .

(Elaboración propia)

## 6.2 Reconstrucción 3D y Mapeo

En la Figura 6.4 se muestra el esquema del algoritmo NVBLOX. Esta emplea una estructura llamada TSDF (*Truncated Signed Distance Function*) para representar el entorno en una rejilla 3D de pequeños vóxeles y cada vóxel almacena la distancia al punto más cercano de una superficie. Donde la distancia cero representa la superficie del objeto y se puede generar una malla 3D del entorno. Asimismo, genera el mapa local mediante un ESDF (*Euclidean Signed Distance Function*) que representa el campo de distancias completo y sirve para el planeamiento de rutas.

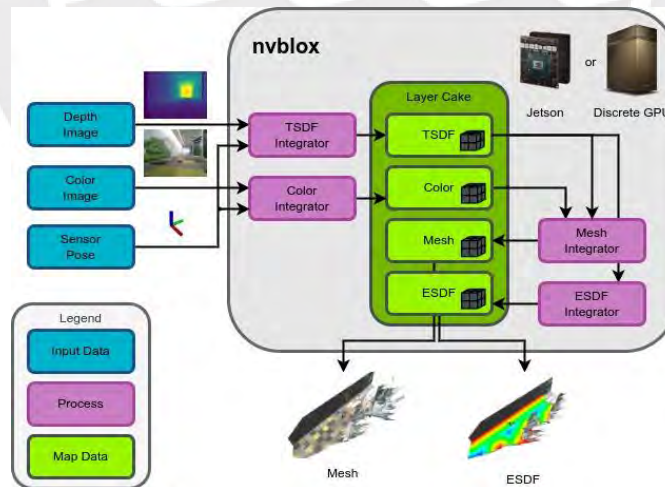


Figura 6.4: Overview de nvlbox (Millane et al., 2023)

Este algoritmo de reconstrucción 3D es usado para obtener una representación local del entorno usando la cámara de profundidad. Ello permite otorgar al algoritmo de navegación un mapa de costos de posiciones libres de obstáculos alrededor del robot. En la Figura 6.5 (a) y (b) se ilustra

el funcionamiento del algoritmo para la reconstrucción 3D y creación de un mapa de costos local. Mientras que en la Figura 6.5 (c) se muestra la fusión con el algoritmo de visual SLAM explicado en 6.1., donde se emplea para localizar y crear un mapa de nube de puntos, mientras que la reconstrucción 3D permite crear un mapa de ocupaciones global.

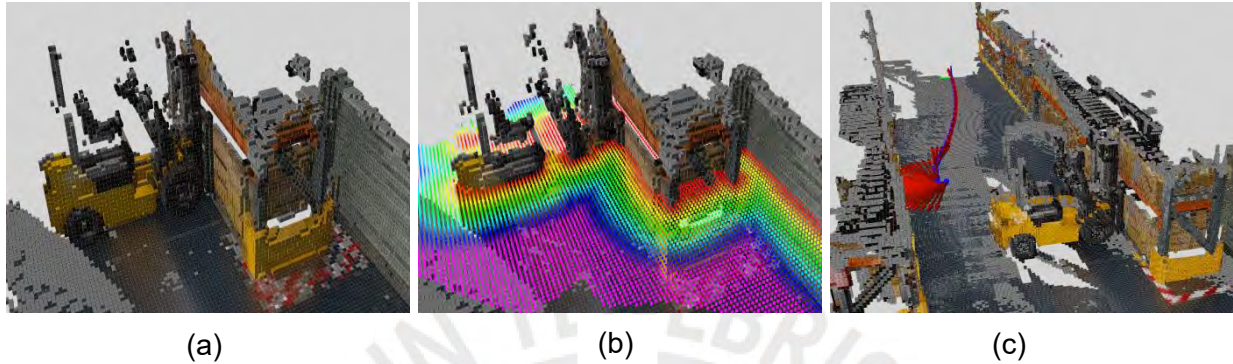


Figura 6.5: (a) Reconstrucción 3D (b) Mapa de costos local (c) SLAM + Reconstrucción 3D

(Elaboración propia)

### 6.3 Planificación de Ruta

Una vez definido el entorno la navegación autónoma requiere la secuencia de puntos que debe seguir para llegar a determinada meta. A continuación, en la Figura 6.6, se muestra una referencia de cómo debe lucir el mapa de costos haciendo una proyección con el simulador. Dicho mapa servirá principalmente para el planeamiento global que en NAV2 es empleado por un algoritmo basado en A\*. Asimismo, se agregaron objetos no presentes en el mapa, para validar el planeamiento local.

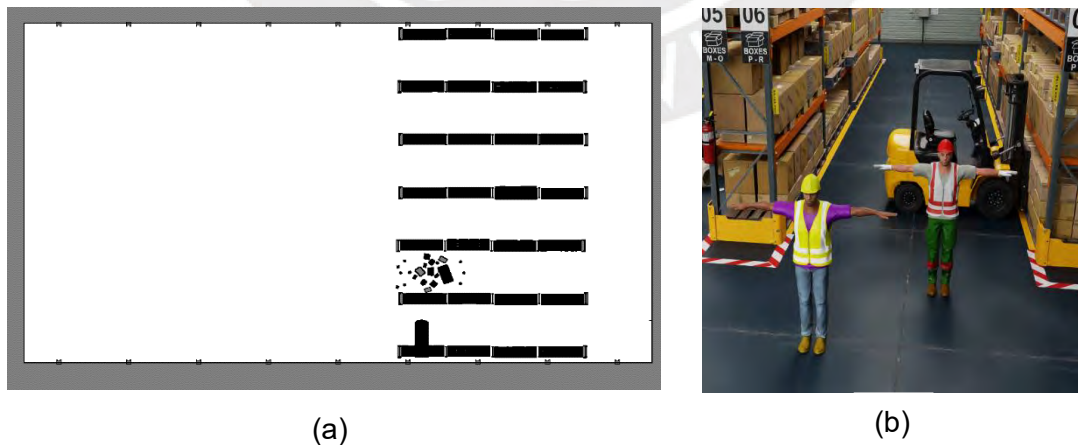


Figura 6.6: (a) Occupancy grid map (b) Actores no presentes en el mapa

(Elaboración propia)

El planeador local tiene acceso a una representación local del ambiente (en este caso brindada por NVBLOX) y ejecuta una ruta óptima local que debe seguir. En este caso el algoritmo empleado es MPPI (Williams et al., 2016), el cual genera muchas trayectorias de control simuladas de manera paralela, evaluando su costo para obtener el comando de velocidad óptimo. Este comando es enviado a la política entrenada con *Reinforcement Learning* en el capítulo anterior. En la Figura 6.7, se ilustra la ruta inicial generada por el planeador global y la ruta en constante actualización debido al planeador local y agentes no presentes en el mapa.

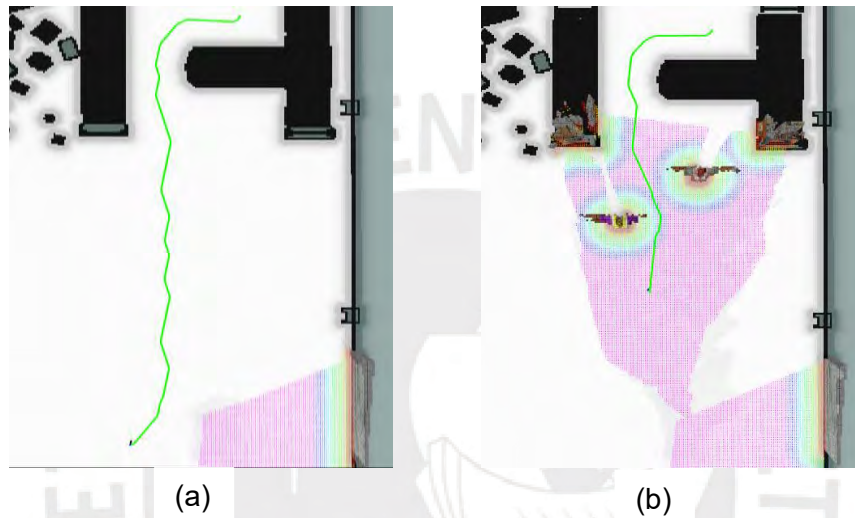
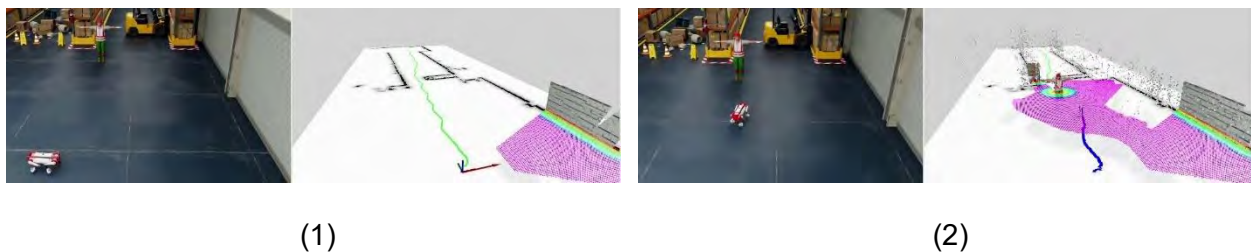


Figura 6.7: (a) Ruta Inicial (b) Ruta actualizada usando mapa de costos local  
(Elaboración propia)

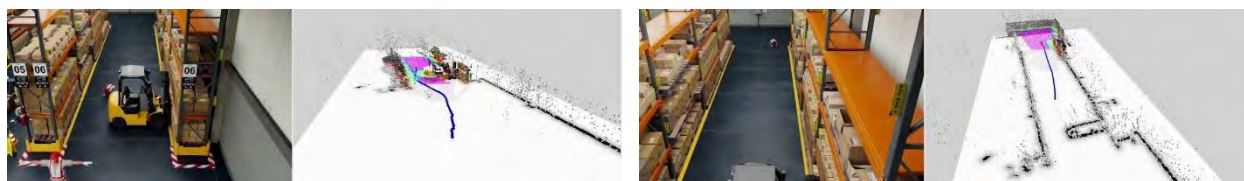
#### 6.4 Navegación Autónoma Visual

A continuación, se muestra la interacción de las secciones anteriormente descritas. En primer lugar, la imagen ubicada a la derecha de las subfiguras muestra el mapa de ocupación y la nube de puntos generados mediante el algoritmo de SLAM y reconstrucción 3D, tal como se explicó en la Sección 6.2. Por otro lado, se visualiza la localización en tiempo real del robot, obtenida a partir del mapa de nube de puntos y el SLAM visual. Finalmente, se ilustra una secuencia de 4 posiciones hasta llegar a la meta asignada en (1).



(1)

(2)



(3)

(4)

Figura 6.8: Secuencias de posiciones de la navegación autónoma (Elaboración propia)

## CAPÍTULO 7 : PRESUPUESTO

En este capítulo se muestran los precios estimados para cada uno de los componentes que conforman el sistema mecatrónico. Cabe resaltar que según la lista de requerimientos el monto total debe estar entre S/35,000 y S/45,000. Con el fin de simplificar el cálculo, se realiza separadamente un análisis de costo de materiales de fabricación y otro de componentes mecánicos y electrónicos. Asimismo, para la conversión de moneda se tomará el cambio actual al 15 de Noviembre del 2024, equivalente a (1 USD = 3.81 PEN).

### 7.1 Costo de materiales

En la Tabla 7.1 se muestran los principales elementos y su respectivo material de fabricación. Se emplearán dos materiales para impresión 3D: Nylon 66 y PLA; dependiendo de la función de la pieza, como fue calculado en la sección 4.2.2. Para ello se calculó un estimado del peso total de las piezas. Por otro lado, para los elementos que tiene como material algún metal, se cotizó la fabricación del material incluyendo el mecanizado CNC.

Tabla 7.1: Costos de materiales de fabricación (Elaboración propia)

Cantidad	Descripción	Material	Precio Unitario		Envío (\$)	Precio total (\$/)	Detalles
			S/	\$			
4	Barras	Fibra de Carbono	-	38.96	7.33	621.68	Longitud total: 3.04m
10	Rollo filamento	PLA	60.00	-	0	600.00	Peso estimado: 9.7 kg
2	Rollo filamento	Nylon 66	100.00	-	0	200.00	Peso estimado: 1.1 kg
5	Soporte rodilla-hombro	Aluminio 6061	-	80.35	0	1,530.71	Incluye mecanizado CNC
5	Eje rodilla	Acero SAE 1020	-	27.16	0	517.44	Incluye mecanizado CNC
<b>Subtotal</b>						PEN	
						3,469.82	

## 7.2 Costo de componentes

En la Tabla 7.2 y Tabla 7.3, se muestran los costos de los componentes electrónicos y mecánicos. Para ambos casos se listan los precios de envío en caso los productos no se encuentren en medios locales.

### Electrónicos

Tabla 7.2: Costos de componentes electrónicos (Elaboración propia)

Canti- dad	Item	Proveedor	Precio Unitario		Envío (S)	Precio total (S/)
			S/	\$		
12	RMD X8-Pro V2	MyActuator	-	470.00	40.00	21,640.80
2	ODrive V3.6	ODrive	-	259.00	59.56	2,200.50
1	Jetson Orin Nano	Amazon	-	500.00	127.70	2,391.54
4	ZLTECH ZLLG40ASM100	ZLTECH	-	95.00	90.25	1,791.65
1	CAN-BUS Shield V2.0	Ubuy	190.00	-	0.00	190.00
1	Arduino Uno	HIFI Electrónica	20.70	-	0.00	20.70
1	MPU6050	SAISAC	15.00	-	0.00	15.00
1	BtrPower Ebike 48V 30AH	Ubuy	1,853.00	-	0.00	1,853.00
1	Realsense D455	Amazon	-	407.12	141.08	2,088.64
1	ZCE04B Sensor	Win Sensors	-	137.19	0.00	522.69
1	Conversor USB a RS485	Naylamp Mechatro- nics	12.00	-	0.00	12.00
4	Terminal Block 10A	Ubuy	65.00	-	0.00	65.00
1	SSR 80DD	Amazon	-	8.99	16.70	97.88
1	Fulree DC-DC, Out 24V	Aliexpress	7.55	-	14.58	84.32
1	Teyleten 100W 6A	Amazon	12.88	-	16.33	111.29
1	Botón de encendido	Bracsan	15.50	-	0.00	15.50
1	Botón de emergencia	HIFI Electrónica	9.70	-	0.00	9.70
2	Resistencia 120 Ohm	HIFI Electrónica	3.00	-	0.00	6.00
1	Conector XT90	Naylamp Mechatro- nics	6.00	-	0.00	6.00
1	PCB Control	PCBWAY	24.14	-	14.80	148.36
19	Terminal Blocks 2 Pin	HIFI Electrónica	0.70	-	0	13.30
					<b>Subto- tal</b>	<b>PEN 33,283.87</b>

### Mecánicos

Tabla 7.3: Costos de componentes mecánicos (Elaboración propia)

Can-tidad	Item	Proveedor	Precio Unitario		Envío (\$)	Precio total (S/)
			S/	\$		
24	Perno M4x20	MSK	-	2.36	0.00	8.99
3	Perno M3x12	MSK	-	2.86	0.00	10.90
3	Tuerca M3	Electromania	0.30	-	0.00	0.90
24	Tuerca M4	MT LAB	0.12	-	0.00	2.88
1	Tornillo 6x15.75	MSK	-	3.30	0.00	12.57
48	Tornillo 3x30	MSK	-	3.00	0.00	11.43
50	Tornillo 3x10	MSK	-	3.00	0.00	11.43
8	Rodamiento B022 5x11x4	Zoladi	20.00	-	0.00	160.00
16	Rodamiento NSK 8x3x4	Pyrodrome	-	2.00	20.04	197.97
4	Correa A 6R 3-065037	SDP-SI	-	7.81	32.65	1,115.61
4	Polea A 6H 3-13DF03706	SDP-SI	-	35.97		
4	Polea A 6A 3-30H3712	SDP-SI	-	21.26		
16	Prisionero M4x8	MSK	-	1.56	0.00	5.94
					<b>Subto-tal</b>	<b>PEN 1,538.62</b>

### 7.3 Presupuesto total

Según lo calculado anteriormente, se hace la suma respectiva y se obtiene un total de S/38,292.31, que se encuentra el rango planteado en la lista de requerimientos. Por otro lado, se puede resaltar que el costo más alto se debe a los motores, pues su precio es relativamente alto respecto a los demás compontes y se requiere un gran número de ellos.

	<b>Materiales</b>	S/. 3,469.82
<b>Subtotal</b>	<b>Electrónica</b>	S/. 33,283.87
	<b>Mecánica</b>	S/. 1,538.62
	<b>Total</b>	S/. 38,292.31

Tabla 7.4: Costos totales (Elaboración propia)

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base a los capítulos presentados se valida el diseño e implementación de un robot cuadrúpedo con locomoción híbrida para monitoreo de gases nocivos en superficie irregular. El presente trabajo de tesis inicia con el diseño mecánico con cálculos y simulaciones respectivas. Posteriormente, se realiza el diseño electrónico que cuenta con cálculos, la elección de componentes y el diseño de la PCB. Finalmente, se implementaron algoritmos de locomoción usando DRL tanto para terrenos regulares como irregulares; además de un algoritmo de recuperación de caída que permita mayor robustez en terrenos altamente abruptos. Este sistema robótico propone una solución que tiene alto impacto nacional, pues permite salvaguardar la integridad de trabajadores mineros y consta de aportes tecnológicos poco desarrollados en el país.

El estado de arte permitió investigar sobre robots con locomoción híbrida y de cada uno de sus subsistemas, como el sistema de locomoción por patas, transición de locomoción, algoritmos de control y monitoreo de gases. Siendo la flexibilidad de las articulaciones, *compliance*, un aspecto fundamental para la estabilidad de los robots en terrenos irregulares cuando emplean la locomoción basada en patas. Por otro lado, dentro del subsistema de transición de locomoción se revisaron robots con bloqueo de rueda activa y otros que emplean actuadores para transformar las patas en una rueda pasiva. Finalmente, debido a la complejidad que supone modelar la dinámica de movimientos bioinspirados, se revisaron el empleo de algoritmos basados en inteligencia artificial para el control.

Las exigencias del proyecto fueron definidas según la lista de requerimientos elaborada. Siendo las más importantes, la cinemática, electrónica y operación. En primer lugar, respecto a la cinemática, el robot tendrá al menos 3 GDL por pata y debe ser capaz de alcanzar velocidades máximas de al menos 1.5 y 0.75 m/s en la locomoción basada en ruedas y patas, respectivamente. En segundo lugar, respecto a la electrónica, el robot debe contar con sensores de concentración de al menos 4 gases (SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>, CO), sensores inerciales, cámara y deseable, un sensor de fuerza. Finalmente, respecto a la operación, el sistema debe ser capaz de funcionar en terrenos de hasta 30° de pendiente, con obstáculos de máximo 18 cm.

Para el diseño mecánico, en primera instancia, se realizaron los cálculos de estabilidad estática para seleccionar los motores según el torque requerido. Dicho tipo de estabilidad asegura que, de ser parado en el robot en cualquier momento de su locomoción, no caerá. Si bien es cierto, no asegura estabilidad dinámica, asumiendo movimientos del robot lentos y tomando en cuenta un

Factor de Seguridad determinado, se puede simplificar el análisis sin comprometer la viabilidad del diseño. Asimismo, se hicieron los cálculos necesarios para validar y definir las dimensiones de algunos componentes críticos y, además, se hicieron simulaciones para verificar la resistencia. Obteniéndose F.S. mayores a 1 en todos los casos, y deformaciones que, si bien es cierto en algunos casos no son despreciables ( $>1\text{mm}$ ), la inclusión de uniones atornilladas permite reducir su influencia.

Para el diseño electrónico, se tomaron en cuenta los torques máximos soportados por las articulaciones. Según ello se definieron los motores a emplear y, en consecuencia, la corriente que manejan. Estos últimos valores, se definió que el tiempo de funcionamiento del robot es mayor al definido en la lista de requerimientos (45 min). Por otro lado, para la etapa de potencia se emplearon *terminal strips* para distribuir la corriente, mientras que, para la etapa de control, se diseñó una PCB que contiene principalmente conexiones con el protocolo CAN y la etapa de sensado. Finalmente, el sensor de gases elegido es capaz de medir los 4 gases exigidos en la lista de requerimientos.

Para el diseño algorítmico, se validó que el robot puede navegar autónomamente tanto en terrenos planos, como en terrenos altamente irregulares. Asimismo, según la lista de requerimientos, el robot debería ser capaz de alcanzar una velocidad de 0.75 m/s en el modo de locomoción basado en patas, aspecto que se validó en la sección 5.2. En el modo de locomoción basado en ruedas el robot puede alcanzar una velocidad de 3 m/s considerando la cinemática del sistema. Además, una de las exigencias fue la de atravesar pendientes de hasta  $30^\circ$ , y en la sección 5.3.1 se validó que el robot puede atravesar pendientes de  $30^\circ$  en subida y bajada con una eficacia cercana al 100%. Por otro lado, el robot puede navegar en terrenos con obstáculos de hasta 20 cm con buena tasa de éxito, superando el requisito inicial de 18 cm. Finalmente, el robot es capaz de recuperarse ante una caída aleatoria con una eficiencia del 94%, como se demostró en la sección 5.4.

Finalmente, en el desarrollo de este proyecto de tesis se observó que para sistemas robóticos con gran número de articulaciones. El cálculo y la elección de motores es un problema, por la iteración recurrente necesaria, costo y alto consumo energético. Por esta razón, se recomienda investigar diseños que permitan reducir el número de actuadores, como pueden ser mecanismos pasivos. Por otro lado, como futuro trabajo se piensa incluir un algoritmo de visión que permita automatizar aún más el sistema, de manera que la transición de locomoción no sea manual, sino más bien automática.

## ANEXOS

### ANEXO A: Lista de requerimientos


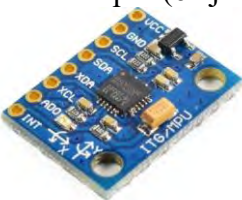

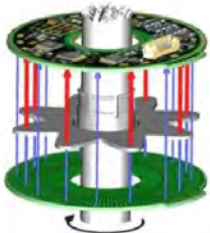
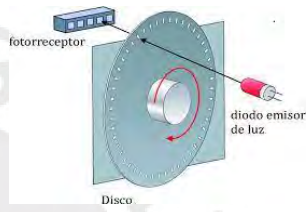
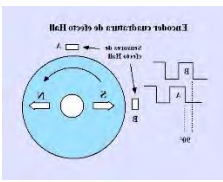




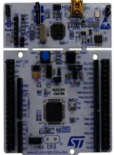
<b>LISTA DE REQUERIMIENTOS</b>			Edición: 1
Proyecto	Robot cuadrúpedo con locomoción híbrida para monitoreo de gases en galerías subterráneas mineras		Fecha: 21/04/2023
			Revisado: Diego Quiroz Velásquez
			Elaborado: Luis Jans Solano Vega
Fecha: (Cambios)	Deseo o exigencia	Descripción	Responsable
<b>Función principal</b>			
21/04/2023	Exigencia	Monitorear concentraciones de gases nocivos y alertar en caso alguna de estas supere su valor máximo permisible	Luis Jans Solano Vega
21/04/2023	Exigencia	Diseñar un sistema capaz de navegar en terrenos irregulares.	
<b>Geometría</b>			
21/04/2023	Exigencia	El robot con el sistema de sensores para el monitoreo de gases acoplado, debe presentar dimensiones máximas de 0.5 x 0.75 x 0.75 m.	Luis Jans Solano Vega
<b>Cinemática</b>			
21/04/2023	Exigencia	Las patas del cuadrúpedo tendrán al menos 3 grados de libertad	Luis Jans Solano Vega
21/04/2023	Exigencia	Velocidad máxima del robot usando la locomoción con ruedas y patas únicamente, debe ser de como máximo 1.5 y 0.75 m/s, respectivamente	
<b>Señales</b>			
21/04/2023	Exigencia	<b>Señales de entrada:</b> - Encendido / apagado del sistema. - Parada de emergencia	Luis Jans Solano Vega


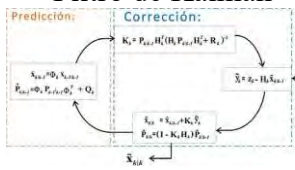
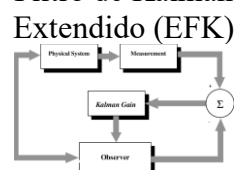
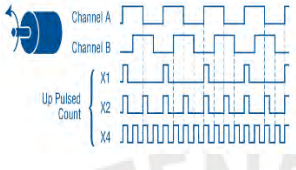
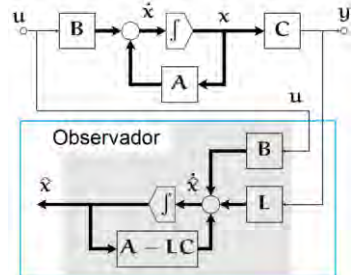
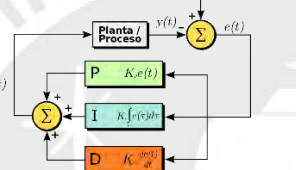
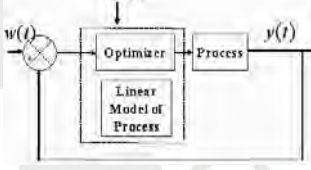
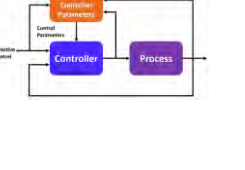
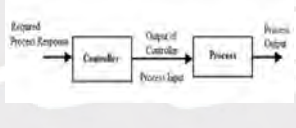
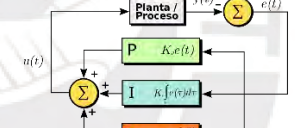
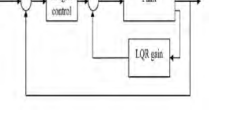
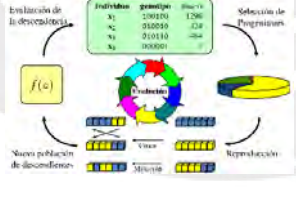
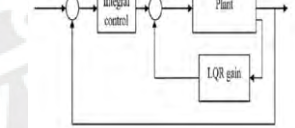
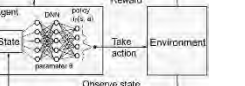
		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Velocidad y dirección de desplazamiento del vehículo,</li> <li>- Modo de locomoción</li> </ul>	
21/04/2023	Deseo	<b>Señales de entrada:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Activación de comportamiento bioinspirado (recuperación ante caída, atravesar escaleras, etc).</li> </ul>	
21/04/2023	Exigencia	<b>Señales de salida:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Niveles de concentración de gases y alertas.</li> <li>- Nivel de carga de baterías.</li> <li>- Alertas del sistema de sensores.</li> <li>- Imagen en tiempo real.</li> </ul>	Luis Jans Solano Vega
<b>Energía</b>			
21/04/2023	Exigencia	Se requiere una autonomía energética de al menos dos horas.	Luis Jans Solano Vega
21/04/2023	Exigencia	Funcionamiento mediante baterías recargables.	
<b>Procesamiento y control</b>			
21/04/2023	Exigencia	Control de posición y velocidad para las el movimiento de las articulaciones y ruedas, respectivamente.	Luis Jans Solano Vega
21/04/2023	Exigencia	Planeador de trayectorias de patas según comandos de velocidad.	
21/04/2023	Deseo	Control de al menos 1 movimiento bioinspirado (recuperación de caída) usando DRL.	
21/04/2023	Exigencia	Algoritmo de detección de caída.	
<b>Electrónica (Hardware)</b>			
21/04/2023	Exigencia	<b>Sensores:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sensores de concentración de al menos 4 gases nocivos (O2, H2S, CH4, CO).</li> <li>- Sensor de movimiento angular para los actuadores.</li> <li>- Sensor para medición de orientación del robot.</li> </ul>	Luis Jans Solano Vega

		- Sensor de nivel de batería - Cámara RGB.	
21/04/2023	Deseo	<b>Sensores:</b> - Sensor de fuerza. - Cámara de profundidad	
21/04/2023	Exigencia	<b>Actuadores:</b> - Actuadores que permiten el movimiento de las ruedas y articulaciones de las patas. - Actuadores que permitan activar la transición entre la locomoción basada en ruedas y patas.	Luis Jans Solano Vega
<b>Software</b>			
21/04/2023	Deseo	Interfaz para envío de comandos de teleoperación y visualización de parámetros medidos.	Luis Jans Solano Vega
<b>Comunicaciones</b>			
21/04/2023	Exigencia	Comunicación inalámbrica para envío de datos de al menos 1Km.	Luis Jans Solano Vega
21/04/2023	Exigencia	Envío de nivel de carga de baterías.	
21/04/2023	Exigencia	Recepción de comandos de teleoperación.	
21/04/2023	Deseo	Envío de imagen en tiempo real.	
<b>Seguridad</b>			
21/04/2023	Exigencia	Botón de emergencia.	Luis Jans Solano Vega
21/04/2023	Exigencia	Retiro automático de la zona en caso se detecte una fuga de metano.	


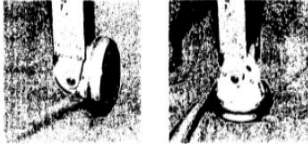

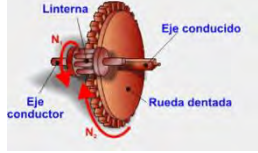





21/04/2023	Deseo	Protección para los componentes contra polvo y salpicaduras (IP54).	
<b>Operación</b>			
21/04/2023	Exigencia	El robot podrá desplazarse en superficies de pendiente menor a 30°.	Luis Jans Solano Vega
21/04/2023	Exigencia	El robot podrá atravesar obstáculos de hasta 18 cm de altura.	
21/04/2023	Exigencia	El robot funcionará en áreas con temperatura y humedad en el rango de 0°C a 50°C y 30% a 90%, respectivamente.	
21/04/2023	Deseo	Zona de monitoreo: Ancash	
<b>Fabricación</b>			
21/04/2023	Deseo	Técnicas de prototipado rápido: Impresión 3D, corte láser y mecanizado en CNC.	Luis Jans Solano Vega
21/04/2023	Deseo	Componentes de fácil acceso en el mercado peruano.	
<b>Costo</b>			
21/04/2023	Exigencia	Presupuesto total entre S/35 000 y S/45 000.	Luis Jans Solano Vega
<b>Plazos</b>			
21/04/2023	Exigencia	Diseño de concepto solución óptimo para el 28 de Junio 2023.	Luis Jans Solano Vega

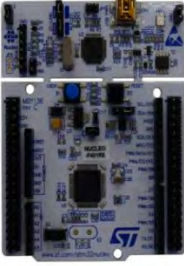


**ANEXO B: Matriz morfológica**

		Subsistema de control de movimiento			
SENSORES	Sensar orientación del robot	IMU de 9 ejes 	Acelerómetro+ Giroscopio (6 ejes) 	Acelerómetro+ Magnetómetro (6 ejes) 	
	Sensar posición angular de las patas	Encoder capacitivo 	Encoder óptico 	Encoder magnético 	
	Sensar posición angular de las ruedas				
HARDWARE	Procesar datos de retroalimentación	Microcontrolador 	FPGA 		
	Procesar orientación				
	Procesar datos de entrada y salida				
	Controlar articulaciones de las patas				
	Controlar velocidad de ruedas				
	Controlar movimiento bioinspirado	Single Board Computer (SBC) 	Mini-PC 	Microcontrolador 	



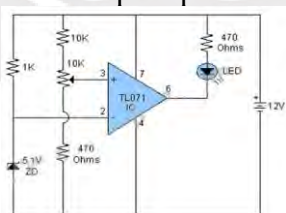


<p>Procesar orientación medida</p>	<p><b>Filtro complementario</b></p>  <p><small>Figura 2. Filtro complementario acelerómetro y girómetro. (Fuente Propia 2018)</small></p>	<p><b>Filtro de Kalman</b></p> 	<p><b>Filtro de Kalman Extendido (EFK)</b></p> 
<p>Procesar datos de retroalimentación</p>	<p><b>Cálculo directo por los encoders</b></p> 	<p><b>Estimación por observador</b></p> 	
<p>Controlar posición de articulaciones de las patas</p>	<p><b>Control PID</b></p> 	<p><b>Control Predictivo</b></p> 	<p><b>Control adaptativo</b></p> 
<p>Controlar velocidad de ruedas</p>	<p><b>Lazo abierto</b></p> 	<p><b>Control PID</b></p> 	<p><b>Control LQR</b></p> 
<p>Controlar movimiento bioinspirado</p>	<p><b>Algoritmos genéticos</b></p> 	<p><b>Control LQR</b></p> 	<p><b>Deep Reinforcement Learning</b></p> 


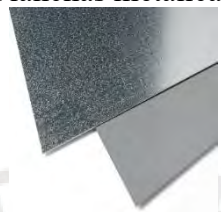





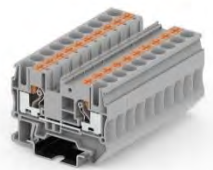





Subsistema de transición de locomoción





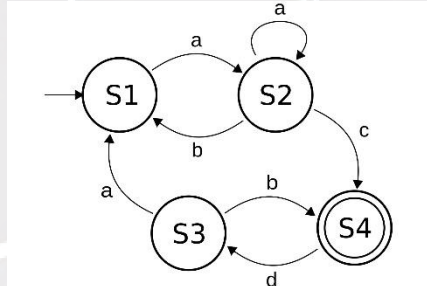
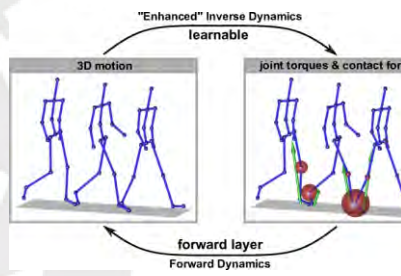


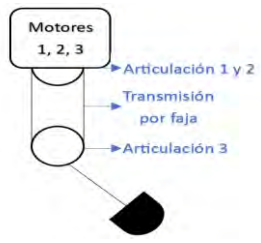
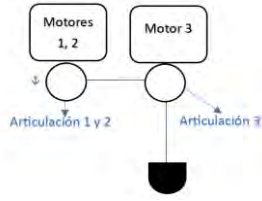
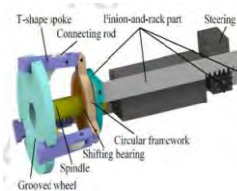
MECÁNICA	Permitir transición de locomoción	Bloqueo de rueda activa 	Mecanismo activo por giro de rueda 	Mecanismo activo transformable 
	Girar ruedas	Configuración pasiva de ruedas 	Conexión directa a motor 	Transmisión de potencia por engranajes 
ACTUADORES	Accionar transición de locomoción	Frenado para motor 	Servomotor DC 	
	Accionar movimiento de ruedas	Motor DC Brushless 	Sin actuador (Debido a movimiento de articulaciones) 	Motor DC Brushed 
SENSORES	Sensar contacto con el terreno	Transductor de fuerza en rueda 		Sensor de fuerza  <small>www.pololu.com</small>



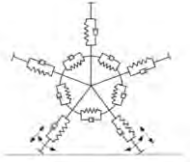



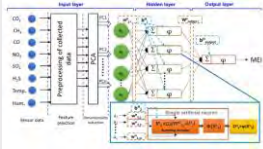
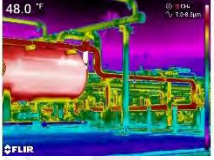
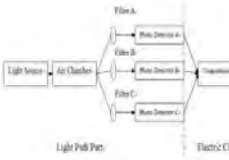


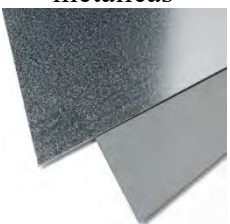

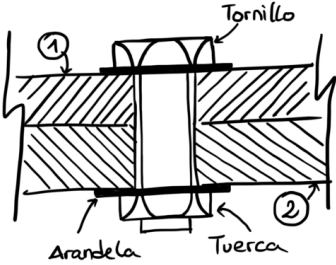
PROCESAMIENTO Y CONTROL	HARDWARE	Detectar caída del robot	Microcontrolador	Single Board Computer (SBC)	Mini-PC
					

Subsistema general

SENSORES	Capturar imagen del entorno	Cámara 2D	Cámara de profundidad	
				
	Sensar nivel de batería	Circuito basado en OpAmp	Divisor de voltaje	Contador de Coulumb
				

COMUNICACIÓN	Enviar información	Módulo de radiofrecuencia		
	Recibir información			
MECÁNICA	Soportar/proteger cuerpo central del robot	Planchas metálicas	Plástico	
				
ENERGÍA	Almacenar energía	Batería LiPo	Paquete de baterías Li-ion	Batería plomo ácido
	Energizar módulo de actuadores			
	Controlar carga	Cargador según tipo de batería		
				
	Distribuir alimentación	Terminal Blocks	Terminal Strip	Bus Bar
				
	Parada de emergencia	Empuje-Tracción	Liberación por giro	Liberación con llave
				

	Encender sistema	Relé electromagnético 	Relé de estado sólido 	
	Energizar módulo de sensores	Regulador de tensión según especificaciones de circuito  		
	Energizar módulo de procesamiento y control			
	Energizar módulo de comunicación			
Subsistema de patas				
PROCESAMIENTO Y CONTROL	Planear trayectorias de patas	Máquina de estados y cinemática inversa 	Dinámica inversa 	
	ACTUADORES	Accionar articulaciones de patas	Motor DC Brushless 	Motor DC Brushed 
MECÁNICA	Articular movimiento de patas	Accionamiento por faja – Mammal 	Accionamiento individual – Scrawling 	Transmisión por cremallera para rueda transformable 

	Permitir flexibilidad de articulaciones	Resorte físico y amortiguador virtual 	Resorte y amortiguador virtual 	Resortes y amortiguadores físicos 
Subsistema de monitoreo de gases				
SENSORES	Sensar concentración de gases nocivos	Sensor de gas electroquímico 	Sensor de gas óptico 	Sensor de gas infrarrojo 
	Post-procesamiento	Cálculo de IMEI 	Imagen detectada 	Cálculo de concentraciones de gas 
MECÁNICA	Albergar/proteger subsistema de sensores	Acrílico 	Plástico 	Planchas metálicas 
	Unir cubierta de sensores al cuerpo	Unión por forma 	Unión atornillada 	

## ANEXO C: Conceptos de solución

A continuación, se detallarán los conceptos de solución mostrados anteriormente, para ello se incluirán bosquejos de los principales subsistemas de cada propuesta.

### Concepto de solución 1

El concepto de solución 1 se observa en la Figura C.0.1, y destaca por ser un cuadrúpedo con configuración de patas del tipo arácnido. Asimismo, cuenta con un sensor LiDAR 3D para realizar el análisis de irregularidad del terreno, una cámara de profundidad para captar las imágenes que serán visualizadas en la estación terrena y un sensor de gas óptico que mide diferentes concentraciones mediante la toma de imágenes. Además, cuenta con una batería recargable del tipo LiPo con cargador incorporado, que le permite ser recargada por una fuente externa sin problemas. Finalmente, se emplea un módulo de radiofrecuencia para la transmisión de los comandos de teleoperación y un botón de parada de emergencia con llave, para apagar el robot en caso de algún imprevisto.

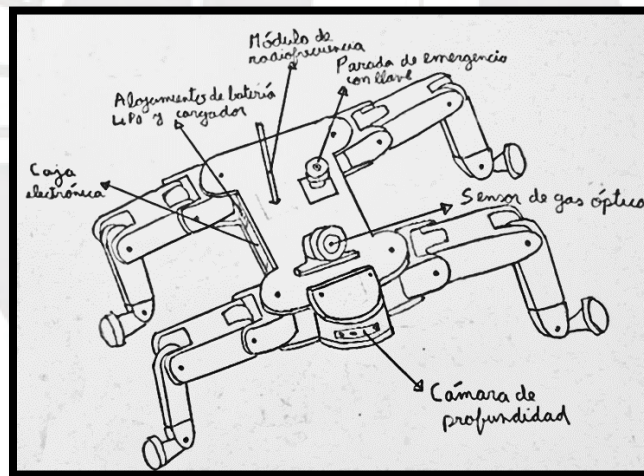
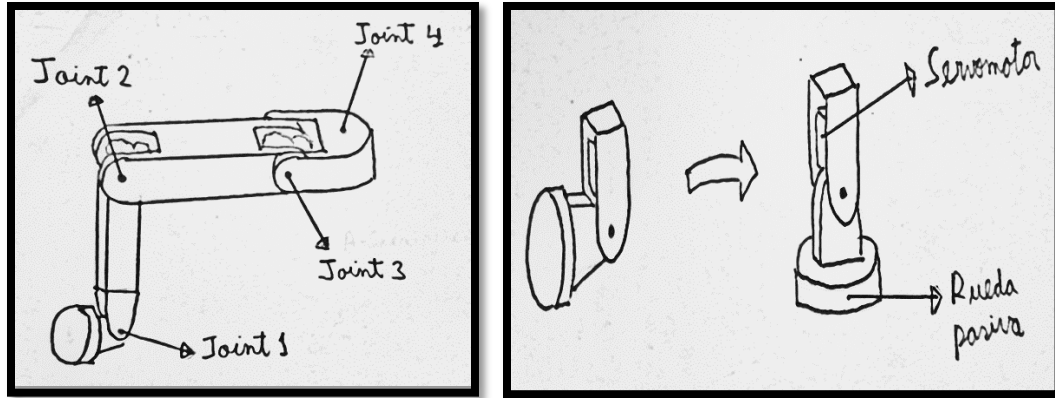


Figura C.0.1: Sistema integral del concepto de solución 1 (Elaboración propia)

Respecto al subsistema de patas, cuentan con 3 grados de libertad para la movilidad y una articulación adicional para la transición de locomoción, como se observa en la Figura C.0.2. Por otro lado, se emplean servomotores DC para accionar estas articulaciones y el mecanismo de transición de locomoción permite hacer uso de una rueda pasiva pues el robot se moverá mediante el movimiento de las patas, similar al principio de patinaje.



a)

b)

Figura C.0.2: Subsistema de patas a) Detalle de pata b) Transición de locomoción

(Elaboración propia)

Como se ilustra en la Figura C.0.3, cada una de las articulaciones cuenta con una transmisión por engranajes para aumentar el torque de los servomotores y un mecanismo de *compliance* que permite flexibilidad de articulaciones y, por lo tanto, adaptabilidad ante terrenos abruptos. Este mecanismo consta de dos imanes, un resorte y un sensor Hall, donde dependiendo de la posición de los imanes el sensor Hall otorgará determinado valor de distancia. Cuando este valor exceda un umbral, se hará retornar a la posición inicial del mecanismo. Además, se crea un amortiguador virtual mediante un filtro de primer orden que permite reducir la desaceleración cuando los imanes retornan a su posición inicial.

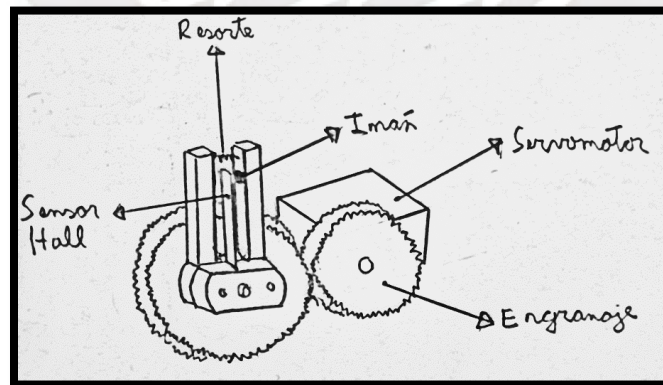


Figura C.0.3: Mecanismo de articulación (Elaboración propia)

## Concepto de solución 2

El concepto de solución 2 se observa en la Figura C.0.4, y destaca por ser un cuadrúpedo con locomoción híbrida y configuración de patas de tipo mamífero. Además, cuenta una cámara RGB 2D para captar las imágenes que serán visualizadas en la estación terrena y un sensor de gas electroquímico que mide concentraciones de gases nocivos. Asimismo, tiene un paquete de baterías LiOn con cargador incorporado, que le permite ser recargada por una fuente externa sin problemas. Finalmente, se emplea un módulo de radiofrecuencia para la transmisión de los comandos de teleoperación y un botón de parada de emergencia que se activa mediante el giro.

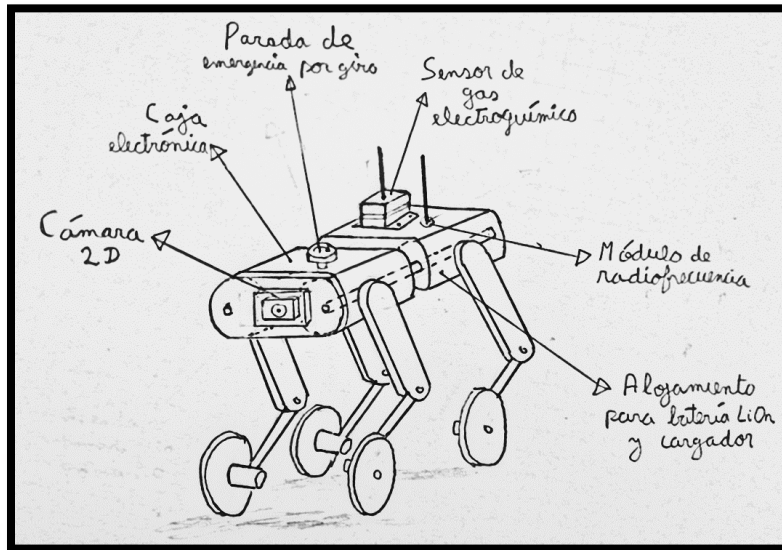


Figura C.0.4: Sistema integral del concepto de solución 2 (Elaboración propia)

Como se ilustra en la Figura C.0.5, el subsistema de patas se destaca por tener tres grados de libertad, dos para la cadera y uno para la rodilla. Asimismo, cuenta con cuatro motores Brushless DC y cabe resaltar, que, con el fin de reducir la inercia, estos motores son ubicados en la zona de la cadera mediante mecanismos de transmisión de potencia por faja. Además, se busca que las articulaciones tengan un alto grado de estabilidad, con lo que se diseña un mecanismo de *compliance* mediante la implementación de resortes y amortiguadores virtuales, para lo cual un control de corriente es necesario.

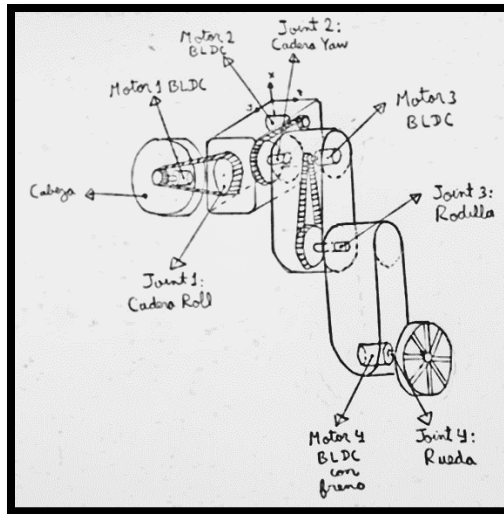


Figura C.0.5: Detalle de mecanismo de las patas (Elaboración propia)

Cabe resaltar que cada articulación tiene un actuador propioceptivo integrado. Es decir, un motor del tipo *quasi direct drive* que permite la flexibilidad en las articulaciones. En el presente concepto se empleó una reducción por faja y según recomendaciones del diseño de estado de arte, se consideró una relación de reducción menor a 1:10, lo que mejora la eficiencia en el *backdriving* del motor. Por otro lado, mediante este motor se busca crear un resorte virtual mediante la limitación de corriente. Y un amortiguador virtual, mediante un control que permita generar oposición en la elasticidad mediante el seguimiento del motor a la articulación, para ello se empleará un encoder para medir la posición angular del motor y en caso de la articulación, se realizarán cálculos de corriente.

### Concepto de solución 3

El concepto de solución 3 se observa en la Figura C.0.6, y destaca por ser un cuadrúpedo con ruedas transformables a patas. Además, cuenta una cámara RGB 2D para captar las imágenes que serán visualizadas en la estación terrena y un sensor de gas que mide diferentes concentraciones mediante haces infrarrojas. Asimismo, tiene una batería recargable del tipo plomo ácido con cargador incorporado, que le permite ser recargada por una fuente externa sin problemas. Finalmente, se emplea un módulo de radiofrecuencia para la transmisión de los comandos de teleoperación y un botón de parada de emergencia que se activa mediante empuje y tracción.

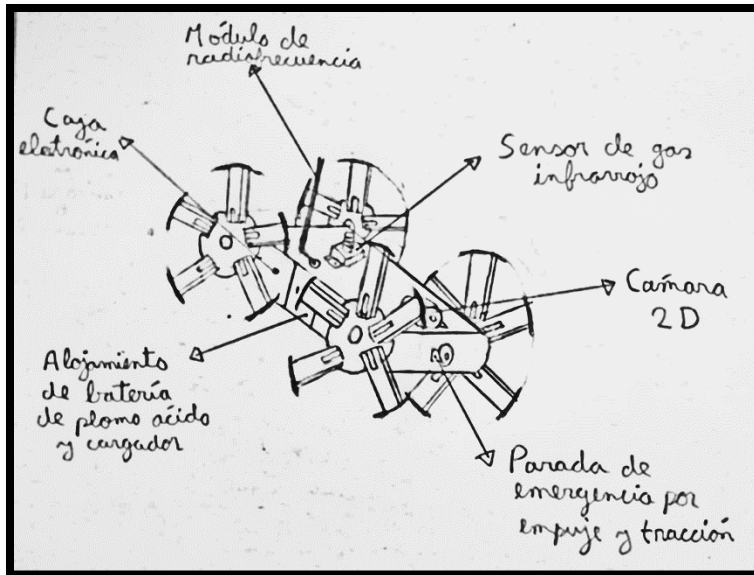


Figura C.0.6: Sistema integral del concepto de solución 3 (Elaboración propia)

Respecto al subsistema de patas, cuentan con 1 grado de libertad para la movilidad y mediante la transformación activa se obtiene una rueda con 5 patas distribuidas simétricamente con el fin de asegurar la estabilidad, como se puede observar en la Figura C.0.7. Asimismo, cuenta con sensores de fuerza ubicados en los extremos de cada pata para realizar el análisis de irregularidad del terreno mediante procesamiento de señales.

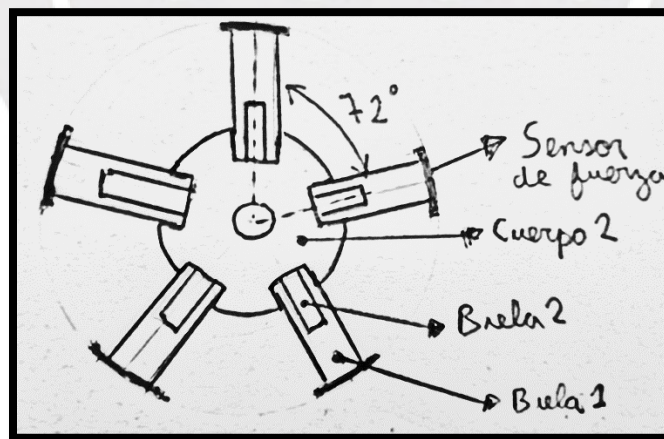


Figura C.0.7: Rueda transformada (Elaboración propia)

El mecanismo de transformación cuenta con un piñón y cremallera que permiten la transmisión de movimiento lineal. Asimismo, el actuador encargado del movimiento rotatorio para el piñón es un servomotor DC, mientras que la cremallera está fija al deslizador móvil mostrado en la Figura C.0.8 con el nombre de Cuerpo 1.

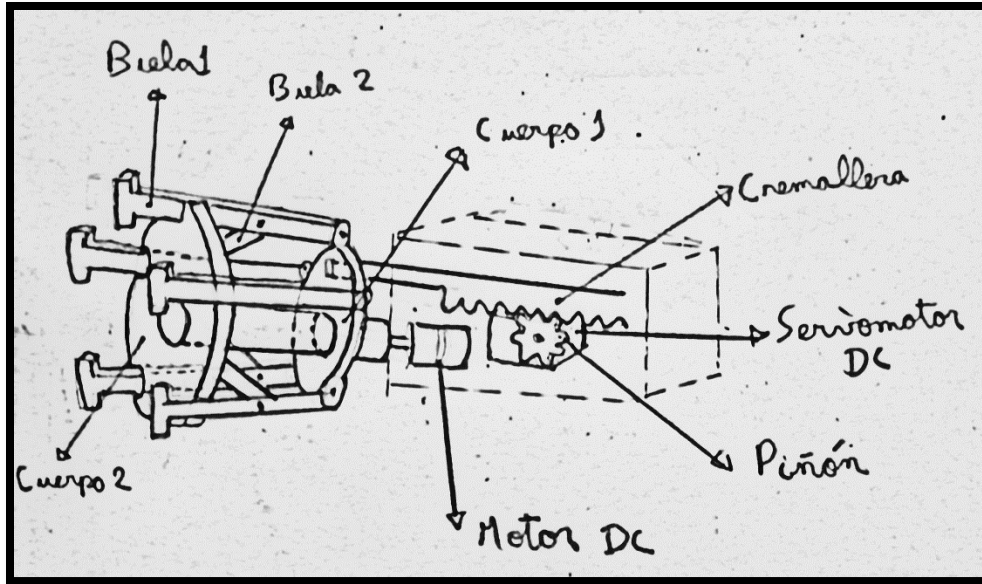


Figura C.0.8: Mecanismo de transformación (Elaboración propia)

El mecanismo se basa en un sistema dinámico de bielas como se puede mostrar en la Figura C.0.9. Que consta de dos bielas que permiten la variación del ángulo de 0 a 90°, dependiendo del avance del Cuerpo 1 y la cremallera.

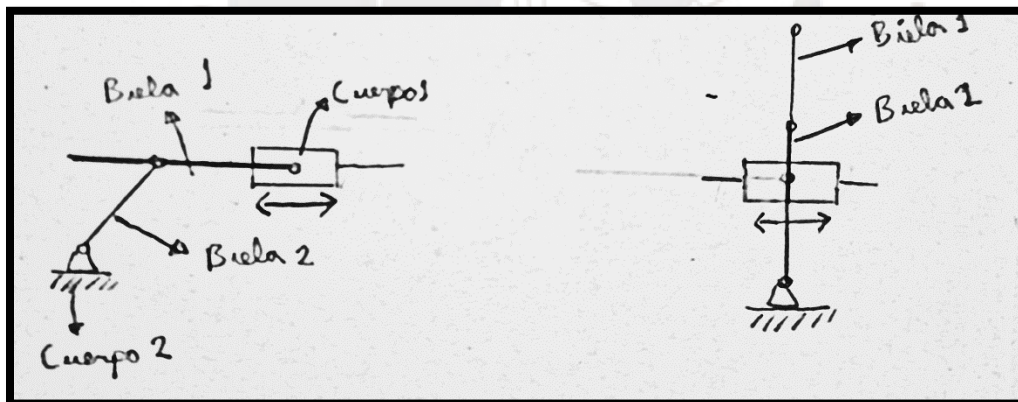


Figura C.0.9: Representación conceptual de mecanismo de transformación (Elaboración propia)

## **ANEXO D: Evaluación técnico-económica**

Con el fin de obtener un concepto de solución óptimo, a continuación, se evalúan los tres conceptos de solución bajo criterios técnicos y económicos.

### **Evaluación técnica**

#### **A. Función principal**

El sistema mecatrónico tiene como función principal navegar en terrenos adversos a la vez que realiza mediciones de gases nocivos. En ese sentido, se le asigna un peso de 4 debido a su relevancia para el proyecto.

En primer lugar, el concepto de solución 1 hace uso de un sensor óptico de gas, que presenta limitaciones para realizar la medición de algunos tipos de gases distintos al metano. Sin embargo, presenta patas de tres grados de libertad que le permitirán sobrellevar obstáculos y entornos abruptos sin problemas, y además cuenta con un mecanismo de transición de locomoción que permitirá altas velocidades en terrenos planos mediante ruedas pasivas, con lo cual se le asigna un peso de 3.

El concepto de solución 2 hace uso de un sensor electroquímico de gas, que es bastante robusto para realizar la medición de distintos gases con alta precisión. Asimismo, cuenta con patas de tres grados de libertad y un mecanismo de transformación mediante bloqueo de rueda activa que permitirá la navegación eficiente en distintos terrenos.

El concepto de solución 3 hace uso de un sensor infrarrojo de gas que destaca por ser altamente selectivo y no verse influenciado por otros gases de la atmósfera. Asimismo, cuenta con ruedas con un mecanismo de transformación a patas. Sin embargo, están sujetas al problema de estancarse y sobrellevar obstáculos de poca altura.

#### **B. Simplicidad**

Si bien la simplicidad beneficia la rapidez en la que pueda ser desarrollado el proyecto, se prioriza la robustez del sistema mecatrónico. Por lo cual, se le asigna un peso de 2.

El concepto de solución 1 cuenta con un diseño mecánico complejo debido a la inclusión de gran cantidad de actuadores en cada pata. Asimismo, se piensa emplear algoritmos genéticos para implementar la recuperación de caída y algoritmos de control clásico para el control de la velocidad

de ruedas y articulaciones. Finalmente, cuenta con ruedas pasivas, con lo cual el control de movimiento del modo de locomoción por ruedas también involucra a las patas, por lo que, se le asigna un peso de 1.

El concepto de solución 2 cuenta con un diseño mecánico complejo debido a la inclusión de gran cantidad de actuadores en cada pata. Asimismo, se piensa emplear un algoritmo de Deep Reinforcement Learning para implementar la recuperación de caída y algoritmos de control clásico para el control de la velocidad de ruedas y articulaciones. Por lo que, se le asigna un peso de 2.

El concepto de solución 3 cuenta con un diseño mecánico no tan complejo debido a que cuenta con poca cantidad de actuadores, sin embargo, presenta un mecanismo de transformación de ruedas a patas. Por otro lado, este sistema hace uso de un lazo abierto para el control de velocidad y control clásico para el control de patas y del movimiento bioinspirado. Por lo que, se le asigna un peso de 3.

### **C. Estabilidad**

El sistema mecatrónico debe ser capaz de navegar en terrenos adversos con gran estabilidad debido a la irregularidad de las superficies de galerías subterráneas mineras, por lo que se le asigna un peso de 4.

El concepto de solución 1 cuenta con un sistema de recuperación de caída basado en inteligencia artificial con algoritmos genéticos, lo cual lo hace bastante estable. Sin embargo, su mecanismo de *compliance* en las articulaciones no es del todo robusto y eficiente según fuentes revisadas. Con lo cual se le asigna un peso de 2.

El concepto de solución 2 cuenta con un sistema de recuperación de caída basado en inteligencia artificial con DRL, lo cual lo hace bastante estable. Y además según información basada en el estado del arte, la implementación de resortes y amortiguadores virtuales para mejorar la flexibilidad de las articulaciones mediante un control de corriente, es un método bastante empleado por su efectividad. Con lo cual se le asigna un peso de 4.

El concepto de solución 3 cuenta con un sistema de recuperación de caída basado en un control clásico, que según fuentes revisadas no es el que presenta mejores resultados. Por otro lado, debido a que cuenta con ruedas transformables a patas, el diseño es altamente estable. Por lo cual se le asigna un peso de 3.

#### **D. Eficiencia energética**

El sistema mecatrónico debe cumplir las condiciones de autonomía energética impuestas en la lista de requerimientos. Sin embargo, que el sistema sea eficiente energéticamente no es un requisito indispensable con lo cual se le asigna un peso de 1.

El concepto de solución 1 cuenta con baterías LiPo, que son altamente eficientes, pues brindan una elevada cantidad de energía para su reducido tamaño. Sin embargo, cuenta con 16 actuadores en total, lo cual lo hace ineficiente. Por lo que, se le asigna un peso de 2.

El concepto de solución 2 cuenta con un paquete de baterías LiOn, que son similares a las LiPO en cuanto a la eficiencia energética. Asimismo, cuenta con 16 actuadores en total, lo cual lo hace ineficiente. Por lo que, se le asigna un peso de 2.

El concepto de solución 3 cuenta con baterías de plomo ácido, que no son eficientes debido a su elevado peso. No obstante, cuenta con 6 actuadores en total, lo cual lo hace eficiente en cuestión de uso de actuadores. Por lo que, se le asigna un peso de 3.

#### **E. Seguridad**

Uno de los objetivos de la presente tesis es salvaguardar la salud de los trabajadores de zonas mineras mediante un sistema de monitoreo de gases. Con lo cual, es un requisito relevante que el robot presente adecuadas medidas de seguridad y los componentes sean adecuados para los ambientes en los cuales será expuesto. Con lo cual se le asigna un peso de 3.

Los tres conceptos de solución cuentan con parada de emergencia. Sin embargo, la solución 2 emplea baterías de ion de Litio que son más propensas a inflamarse, con lo cual se le asigna un peso de 3.

#### **F. Resistencia a intemperie**

El ambiente al cual estará sometido el sistema robótico será no controlable, con lo cual existirá la presencia de polvo, agua, entre otros. Ante esto es un requerimiento que el robot sea resistente al menos a salpicaduras y polvo, como se detalla en la lista de requerimientos. Con lo cual se le asigna un peso de 2.

Los tres conceptos de solución cuentan con carcasas de protección, sin embargo, el concepto de solución 2 hace uso de encoders ópticos que son sensibles a la acumulación de polvo y suciedad,

pues pueden bloquear la luz o difuminar señales. Lo cual puede afectar a su funcionamiento y precisión, por lo que se le asigna un peso de 3.

Tabla D.1: Evaluación técnica de conceptos de solución (Elaboración propia)

Soluciones			S1		S2		S3		Ideal	
Nº	Criterio de evaluación	g	p1	g*p1	p2	g*p2	p3	g*p3	pIdeal	g*pIdeal
1	Función principal	4	3	12	4	16	2	8	4	16
2	Simplicidad	2	1	2	2	4	3	6	4	8
3	Estabilidad	4	2	8	4	16	3	12	4	16
4	Eficiencia energética	1	2	2	2	2	3	3	4	4
5	Seguridad	3	4	12	3	9	4	12	4	12
6	Resistencia a intemperie	2	4	8	3	6	4	8	4	8
<b>Total</b>				44		53		49		64
<b>Valor técnico</b>				<b>0.69</b>		<b>0.83</b>		<b>0.77</b>		<b>1</b>
Valores de p: 0 (No satisface), 1 (Apenas aceptable), 2 (Suficiente), 3 (Bien), 4 (Muy bien)										

A continuación, se muestra un gráfico con los pesos por cada concepto de solución normalizados según cada criterio para una mejor visualización de la comparación.

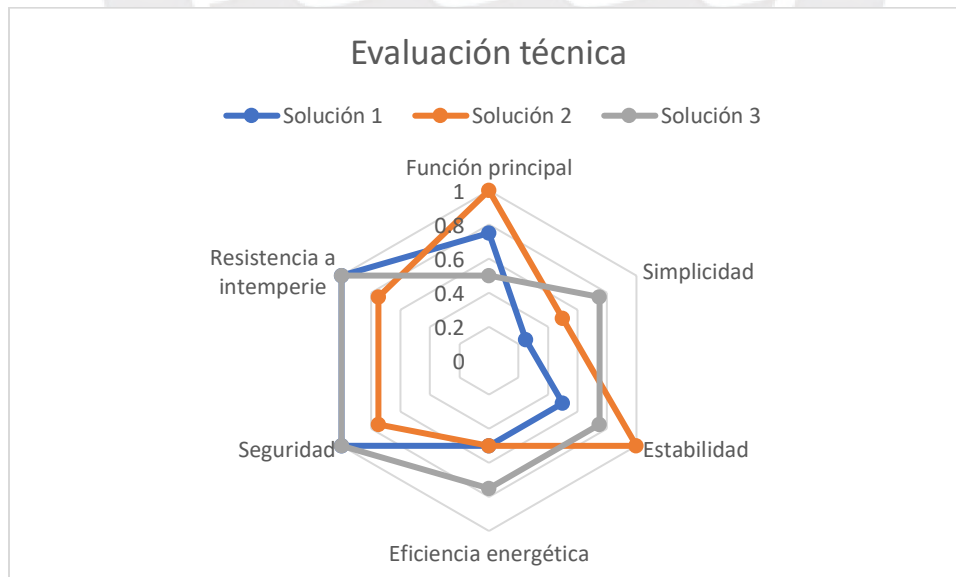


Figura D.0.10: Diagrama de evaluación técnica (Elaboración propia)

### Evaluación económica

### **A. Costo de tecnología**

Debido a las limitaciones que presuponen implementar un robot de alto costo, se optó por otorgarle un peso de 3 a este aspecto. En ese sentido, el concepto de solución 1 se destaca por contar con componentes electrónicos de buenas especificaciones, pero de elevado costo. Caso totalmente opuesto al concepto de solución 3 que cuenta con las tecnologías más accesibles del mercado. Por otro lado, la solución 2 cuenta con tecnologías variadas dentro de un rango promedio. Con lo cual se les otorga pesos de 1, 4 y 3, respectivamente.

### **B. Costo de manufactura**

Similarmente al costo de tecnología, se optó por otorgarle un peso de 3 a este aspecto. En ese sentido, los conceptos de solución 1 y 2 son de dimensiones mayores y debido al gran número de articulaciones se requieren mayor número de piezas y, por tanto, mayor costo de manufactura, por lo que se le asigna un costo de 2. Por otro lado, si bien es cierto el concepto de solución 3 cuenta con menores dimensiones, presenta la limitación de que las ruedas transformables tendrán un costo de fabricación elevado pues deben satisfacer condiciones de resistencia y flexibilidad para asegurar la estabilidad del robot, con lo cual se le asigna un costo de 3.

### **C. Facilidad de mantenimiento**

El robot estará en operación durante un largo periodo de tiempo en una zona de difícil acceso y que presenta condiciones adversas, con lo cual es un requisito fundamental que sea de fácil mantenimiento para que cualquier trabajador técnico de la zona pueda solucionar alguna falla que se presente, por lo que se le asigna un peso de 3. En base a ello, se obtiene que el concepto de solución 1 es de difícil mantenimiento pues en caso fallase el mecanismo de *compliance*, debido a la gran cantidad de componentes por cada articulación, sería de difícil mantenimiento. Un caso similar ocurre en el concepto de solución 3, ya que cuenta con un mecanismo de transformación con un gran número de piezas. Por otro lado, el concepto de solución 2 tiene un diseño más modular y el mecanismo de *compliance* es por software, por lo que el mantenimiento sería menos complejo.

### **D. Facilidad de adquisición de materiales**

Si bien es cierto, la facilidad de adquisición de componentes es deseable no es un requisito indispensable con lo que se asigna un peso de 2. En base a ello, los tres conceptos de solución presentan componentes que comúnmente se hallan en el mercado local. Sin embargo, el concepto

de solución 1 presenta un sensor de gas óptico que es difícil de adquirir incluso en el mercado internacional, con lo cual se le asigna un peso de 2.

Tabla D.2: Evaluación económica de conceptos de solución (Elaboración propia)

Soluciones			S1		S2		S3		Ideal	
Nº	Criterio de evaluación	g	p1	g*p1	p2	g*p2	p3	g*p3	pIdeal	g*pIdeal
1	Costo de tecnología	3	1	3	3	9	4	12	4	12
2	Costo de manufactura	3	2	6	2	6	3	9	4	12
3	Facilidad de mantenimiento	3	2	6	4	12	2	6	4	12
4	Facilidad de adquisición de materiales	2	2	2	4	8	4	8	4	8
<b>Total</b>				17		35		35		44
<b>Valor técnico</b>				<b>0.39</b>		<b>0.80</b>		<b>0.80</b>		<b>1</b>
Valores de p: 0 (No satisface), 1 (Apenas aceptable), 2 (Suficiente), 3 (Bien), 4 (Muy bien)										

A continuación, se muestra un gráfico con los pesos por cada concepto de solución normalizados según cada criterio para una mejor visualización de la comparación.

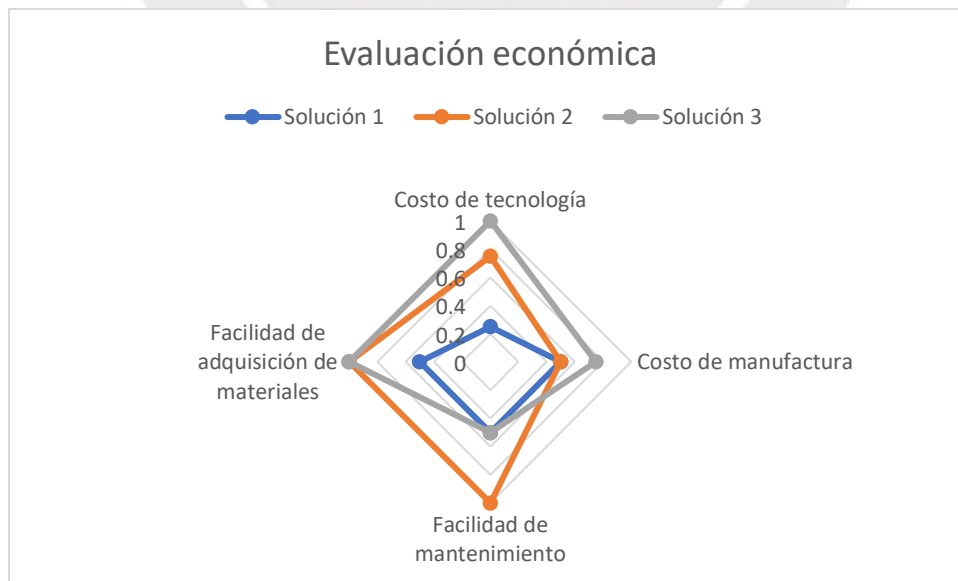


Figura D.0.11: Diagrama de evaluación económica (Elaboración propia)

Finalmente, de la Figura D.0.12, se puede observar que a priori ningún concepto de solución es descartable, pues no se encuentran dentro de la zona roja. Por otro lado, tanto el concepto de solución 2 y 3 están a distancias muy similares respecto a la línea óptima, con lo cual se considera el criterio técnico como el predominante para la elección de una alternativa. En ese sentido, la solución 2, al presentar un valor técnico más cercano a 1, es la elegida.

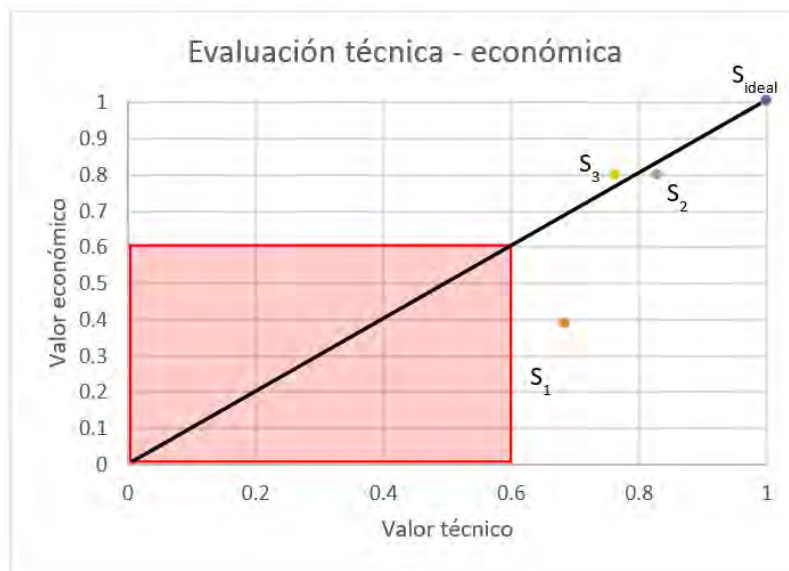
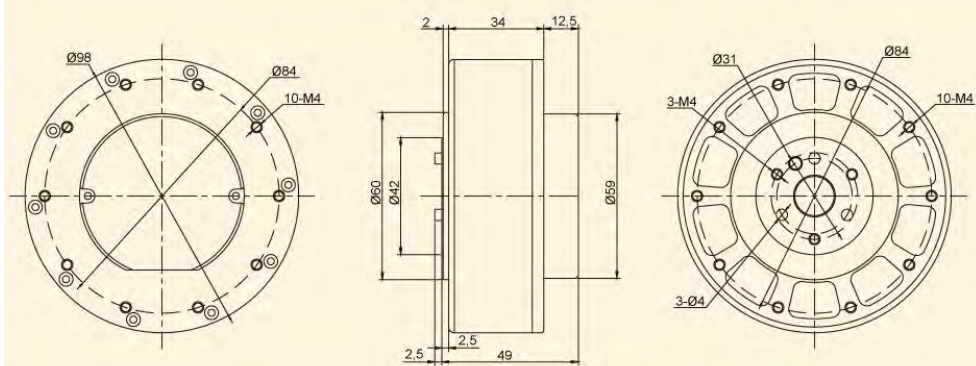


Figura D.0.12: Gráfica de evaluación técnica-económica (Elaboración propia)

## ANEXO E: Motor RMD-X8 PRO

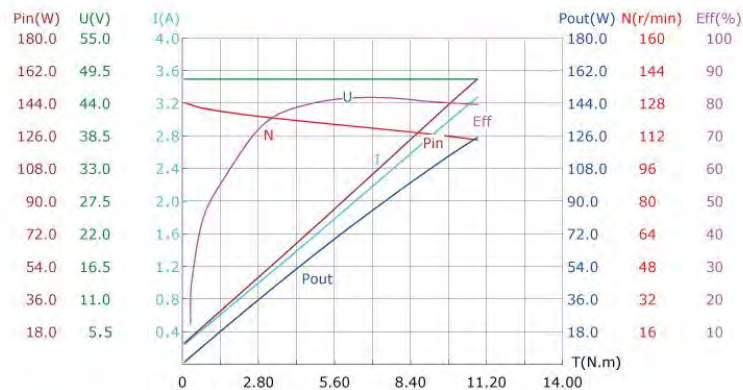
### 尺寸安装图INSTALLATION DRAWING



### 产品参数 PRODUCT PARAMETERS

参数/型号	RMD-X8 PRO	
货品编码	A00085	
减速机电速比 (Reducer ratio)	9:1	
输入电压 (Input voltage)	V	24-48
最大空载转速 (No-load Speed)	rpm	160 @48V
额定转速 (Nominal Speed)	rpm	122
额定电流 (Nominal current)	A	5
额定功率 (Nominal power)	W	166
额定扭矩 (Nominal torque)	N.M	13
电机效率 (Motor efficiency)	%	77%
线电阻 (Resistance)	$\Omega$	0.54
接线方式 (Wire connect)	Y	
相间电感 (Phase to phase inductance)	mH	0.28
转速常数 (Speed constant)	rpm/v	30
扭矩电流常数 (Torque constant)	N.M/A	2.60
轴向负载 (Axial direction payload)	N.M	985
径向负载 (Radial direction payload)	N.M	1250
转子惯量 (Rotor inertia)	gcm <sup>2</sup>	3400
极对数 (Number of pole pairs)	21	
电机重量 (Motor weight)	g	710
环境温度 (Environment temperature)	$^{\circ}\text{C}$	(-20 ~ 55 $^{\circ}\text{C}$ )
减速箱背隙 (Backlash)	Arc min	5

### 电机特性曲线MOTOR CHARACTERISTIC CURVE



# ANEXO F: Correa

## XL TIMING BELTS • 1/5" PITCH



PHONE: 516.328.3300 • FAX: 516.326.8827 • WWW.SDP-SI.COM

- BELT WIDTHS
- INCH - 1/4, 5/16 & 3/8
- NON-MARKING
- LOW DUST
- RoHS COMPLIANT
- PowerGrip® TruMotion®



› **MATERIAL:**

Cream-Colored Polymer Compound, Fiberglass Reinforced Body with Nylon Tooth Facing for Reduced Dust.

› **SPECIFICATIONS:**

**Breaking Strength:**

113 lbf per 1/8 in. (158 N per 1 mm) Belt Width; not representative of the load-carrying capacity of the belt.

**Working Tension:**

23 lbf for 1 in. belt (102 N for 25.4 mm Belt) For more information, see the technical section.

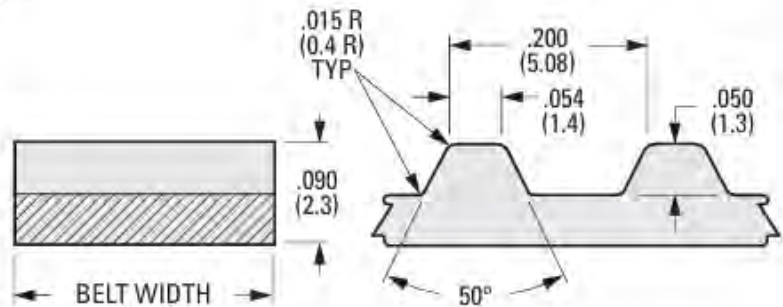
**Temperature Range:**

-40°F to +220°F (-40°C to +104°C)

› **MODIFICATIONS:**

Special Widths - cut to size from sleeves available from stock.

Pulleys are available with inch or metric standards.



**NOTE:** Dimensions in ( ) are mm.

### INCH COMPONENT CATALOG NUMBER

A 2 6 R 3 -

No. of Grooves Code

Belt Width Inch	Width Code
1/4	025
5/16	031
3/8	037

Groove Code	Pitch Length	
	Inch	mm
065	13.0	330.2
092	18.4	467.36
093	18.6	472.44
133	26.6	675.64

## ANEXO G: Poleas

### XL TIMING BELT PULLEYS • 1/5" PITCH

**SDPSI**

**FOR 3/8" BELTS**  
 MOLDED WITH FAIRLOC® HUB  
 DOUBLE FLANGE

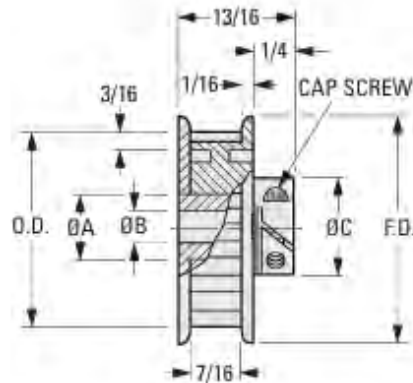
PHONE: 516.328.3300 • FAX: 516.326.8827 • WWW.SDP-SI.COM

➤ **MATERIAL:**

**Pulley** - Polycarbonate, Fiberglass Reinforced  
**Hub** - Aluminum Alloy, Overmolded

➤ **SPECIFICATION:**

Pulleys with 10 to 21 grooves do not have webs.



#### INCH COMPONENT

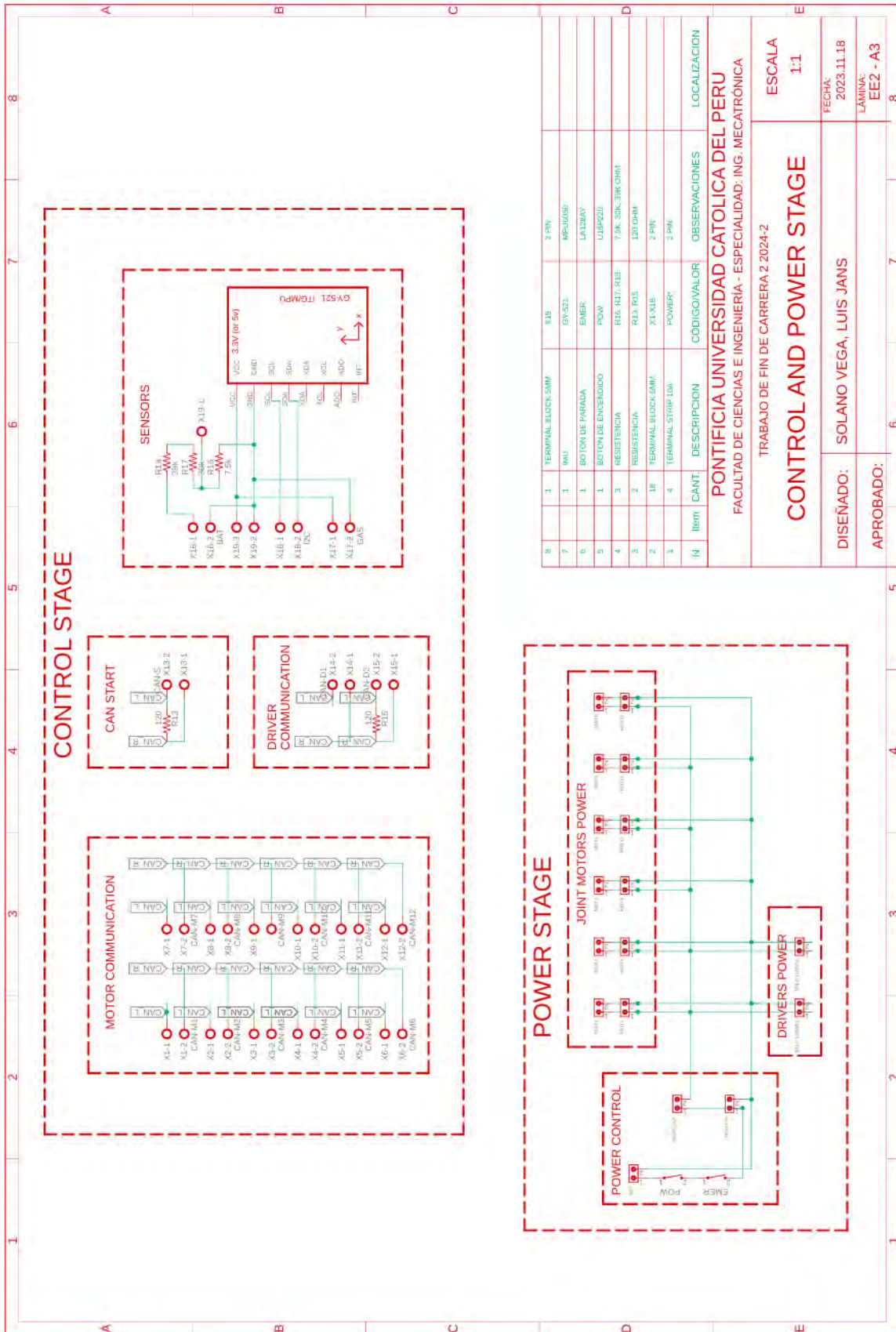
Catalog Number	No. of Grooves	P.D.	O.D.	F.D.	B Bore +.001 -.000	A Dia.	C Hub Dia.	Cap Screw
A 6H 3-10DF03706	10	.637	.617	.87	.1875	3/8	1/2	#2-56
A 6H 3-11DF03706	11	.700	.680	.93	.1875	3/8	1/2	#2-56
A 6H 3-12DF03706	12	.764	.744	.99	.1875	3/8	1/2	#2-56
A 6H 3-13DF03706	13	.828	.808	1.06	.1875	3/8	1/2	#2-56
A 6H 3-14DF03708	14	.891	.871	1.12	.250	1/2	3/4	#4-40
A 6H 3-15DF03708	15	.955	.935	1.19	.250	1/2	3/4	#4-40
A 6H 3-16DF03708	16	1.019	.999	1.24	.250	1/2	3/4	#4-40
A 6H 3-17DF03708	17	1.082	1.062	1.31	.250	1/2	3/4	#4-40
A 6H 3-18DF03708	18	1.146	1.126	1.38	.250	1/2	3/4	#4-40
A 6H 3-19DF03708	19	1.210	1.190	1.44	.250	1/2	3/4	#4-40
A 6H 3-20DF03708	20	1.273	1.253	1.51	.250	1/2	7/8	#4-40
A 6H 3-21DF03708	21	1.337	1.317	1.57	.250	1/2	7/8	#4-40
A 6H 3-22DF03708	22	1.401	1.381	1.63	.250	1/2	7/8	#4-40
A 6H 3-23DF03708	23	1.464	1.444	1.69	.250	1/2	7/8	#4-40
A 6H 3-24DF03708	24	1.528	1.508	1.76	.250	1/2	7/8	#4-40
A 6H 3-25DF03708	25	1.592	1.572	1.82	.250	1/2	7/8	#4-40
A 6H 3-26DF03708	26	1.655	1.635	1.89	.250	1/2	7/8	#4-40
A 6H 3-27DF03708	27	1.719	1.699	1.95	.250	1/2	7/8	#4-40
A 6H 3-28DF03708	28	1.783	1.763	2.02	.250	1/2	7/8	#4-40
A 6H 3-29DF03708	29	1.846	1.826	2.08	.250	1/2	7/8	#4-40
A 6H 3-30DF03710	30	1.910	1.890	2.14	.3125	5/8	7/8	#4-40

## ANEXO H: In-Wheel motor

### Parameters

Item	ZLLG40ASM100 V1.0
Size	4.0"
Tire	Rubber
Wheel Diameter(mm)	107
Shaft	Single/Double
Rated voltage (VDC)	24
Rated power (W)	100
Rated torque (N.m)	2
Peak torque (N.m)	6
Rated Phase current (A)	5
Peak current (A)	15
Rated speed (RPM)	450
Max speed (RPM)	550
Poles No (Pair)	10
Encoder	1024 Optical
Protection level	IP54
Back EMF Constant(V/RPM)	0.055
Wire Resistance( $\Omega$ ) 100HZ	0.58
Wire Inductance(mH) 10KHZ	0.57-0.89
Torque constant(N.m/A)	0.37
Rotor Inertia( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )	0.001
Lead wire (mm)	600 $\pm$ 50
Insulation voltage resistance (V/min)	AC1000V
Insulation voltage(V)	DC500V, >20M $\Omega$
Ambient temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	-20~+40
Ambient humidity (%)	20~80
Weight(KG)	Single shaft: 1.45 Double shaft: 1.50
Load(KG/2sets)	50
Move Speed(m/s)	1.5-2.2
Package	5pcs per carton, Weight7.2kg, Dimension 30.5*30.5*20
Price(USD)	USD99 for sample, USD74 for 200pcs/lot

# ANEXO I: Planos Electrónicos



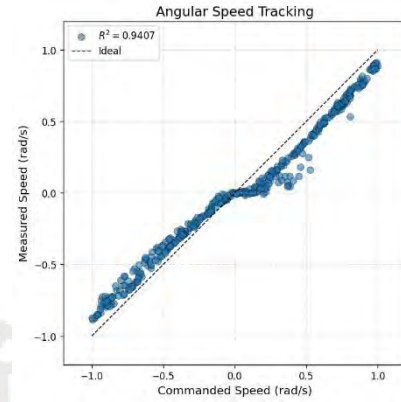
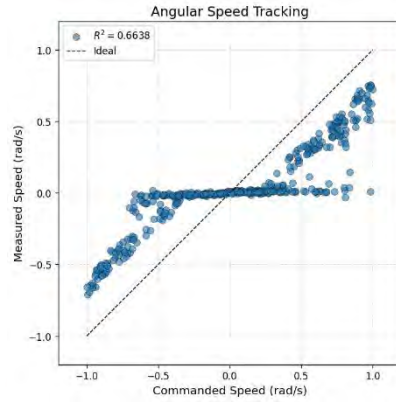
# ANEXO J: Análisis del rendimiento en función al torque de las articulaciones

## Límite de torque

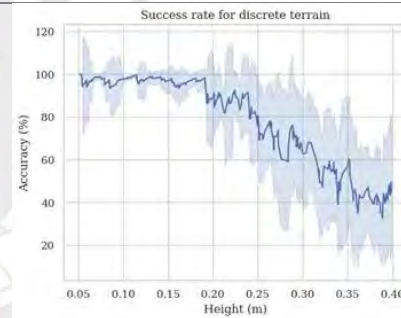
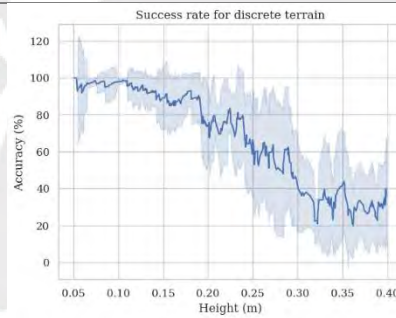
25 N.m

80 N.m

Seguimiento de  
velocidad

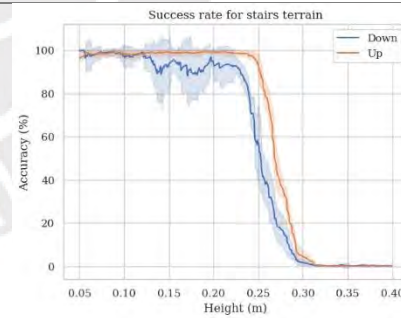
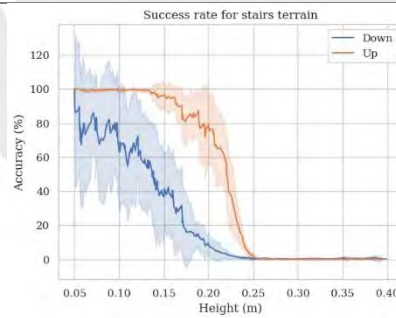


Discreto

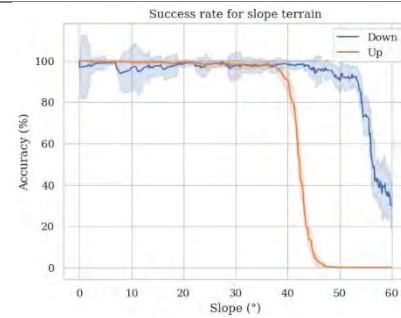
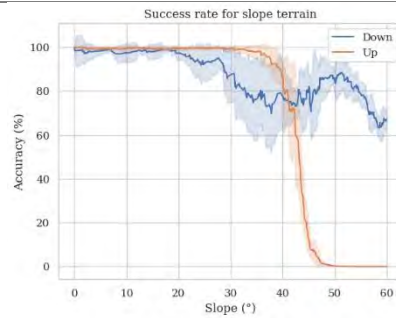


Tasa de  
éxito en  
terrenos

Escaleras



Pendiente



## ANEXO K: Hiperparámetros de algoritmos

Tabla K.1: Escalas de recompensas de RL (Elaboración propia)

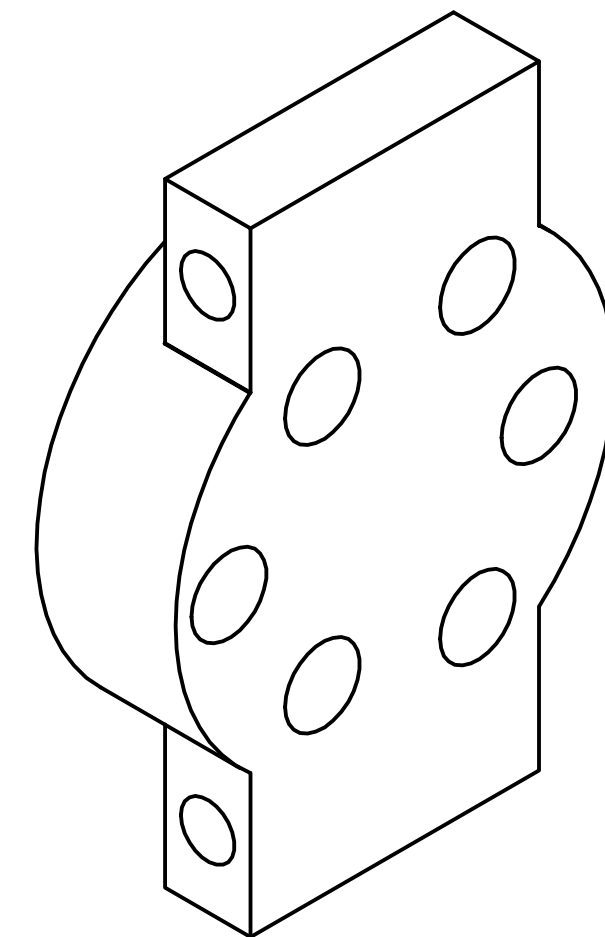
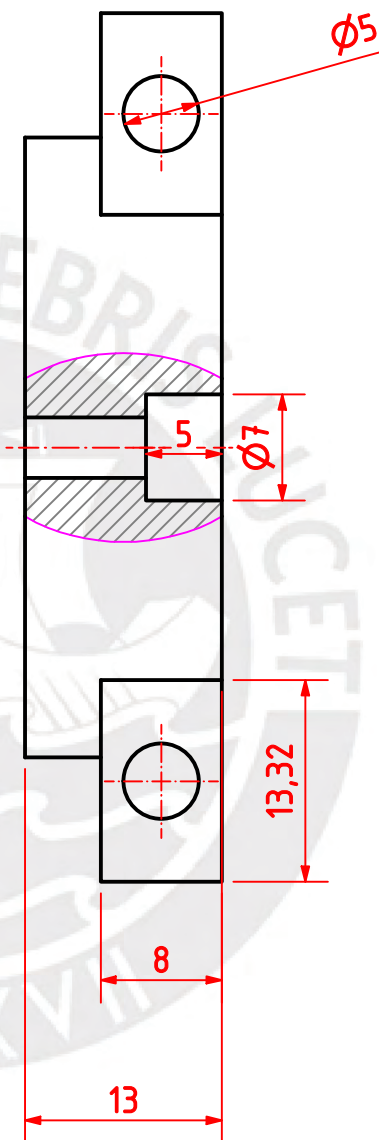
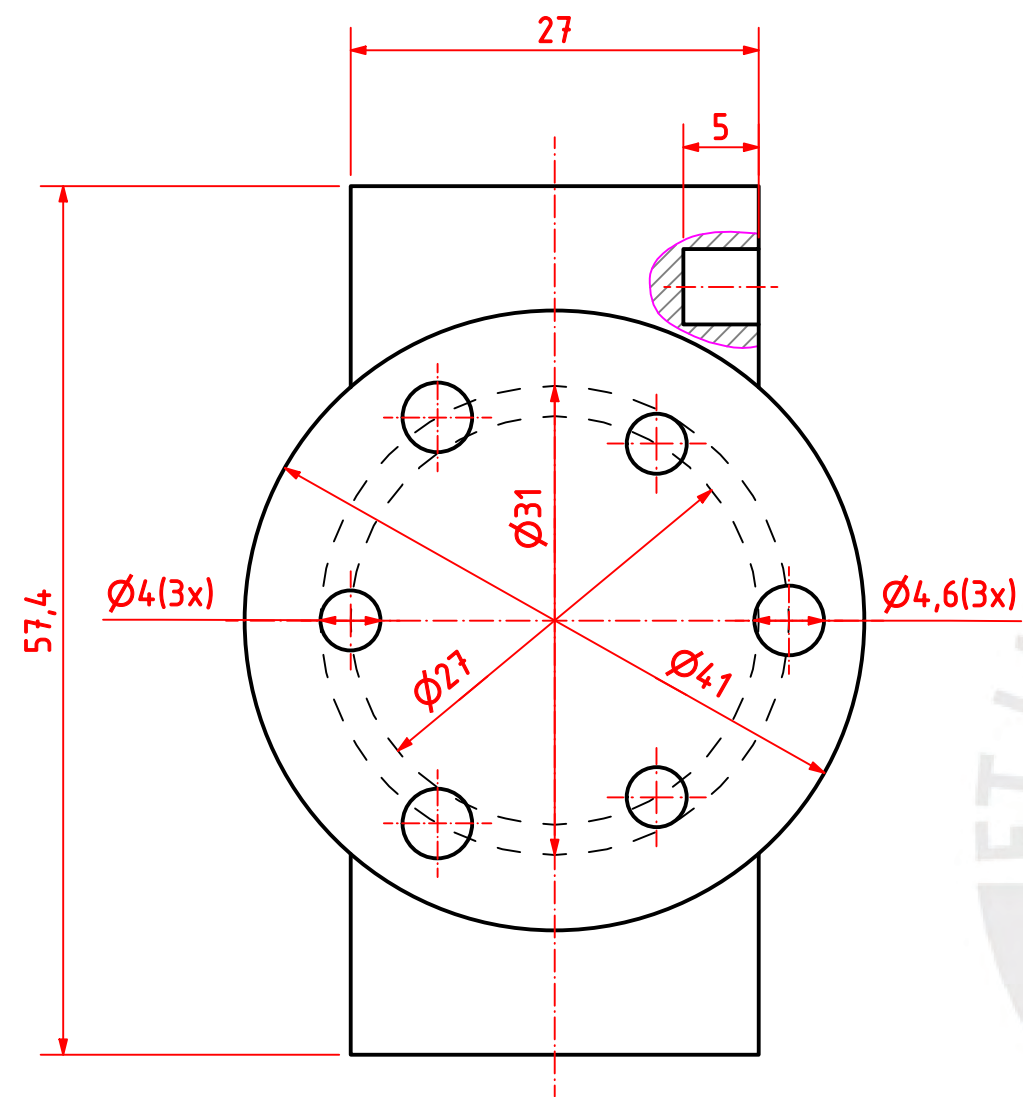
Recuperación de caída		Locomoción	
$rew_{termination}$	50	$rew_{linear-vel-track}$	1
$rew_{torque}$	-5e-5	$rew_{ang-vel-track}$	0.9
$rew_{dof-acc}$	-7.5e-7	$rew_{torque}$	-1e-5
$rew_{action-rate}$	-0.1	$rew_{dof-acc}$	-2.5e-7
$rew_{joint-track}$	10	$rew_{action-rate}$	-0.01
$rew_{up}$	5	$rew_{collision}$	-1
		$rew_{feet\_air\_time}$	1
		$rew_{lin-vel-z}$	-2
		$rew_{ang-vel-xy}$	-0.05

Tabla K.2: Parámetros de entrenamiento (Elaboración propia)

Dimensiones ocultas actor-critic	512, 256, 128
Función de activación	elu
Coefficiente de entropía	0.01
Learning rate	1e-3
Gamma	0.99
Número de épocas	2000 (Recuperación), 2500 (Locomoción)

**ANEXO L: Planos Mecánicos**





ACABADO SUPERFICIAL

TOLERANCIA GENERAL

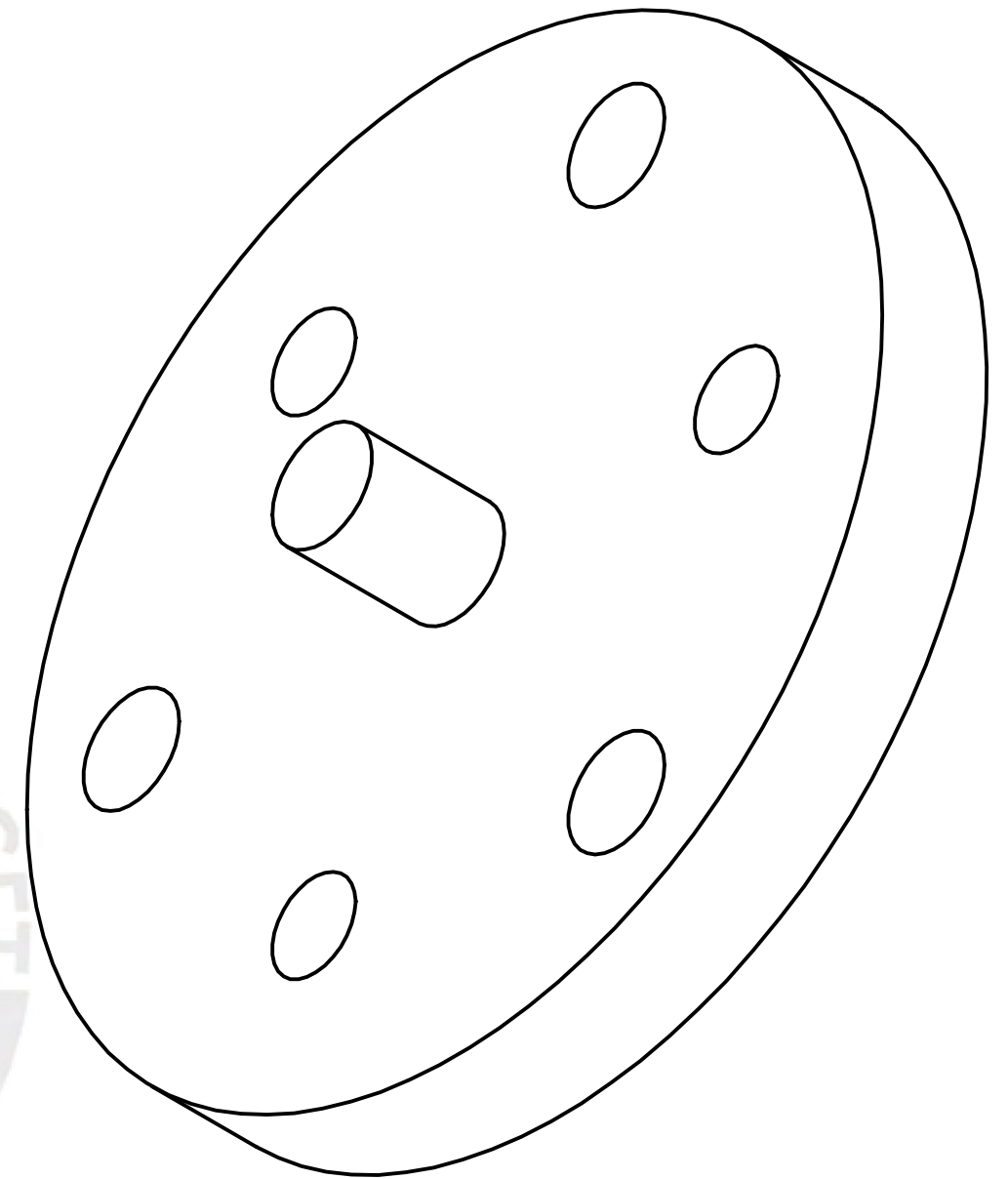
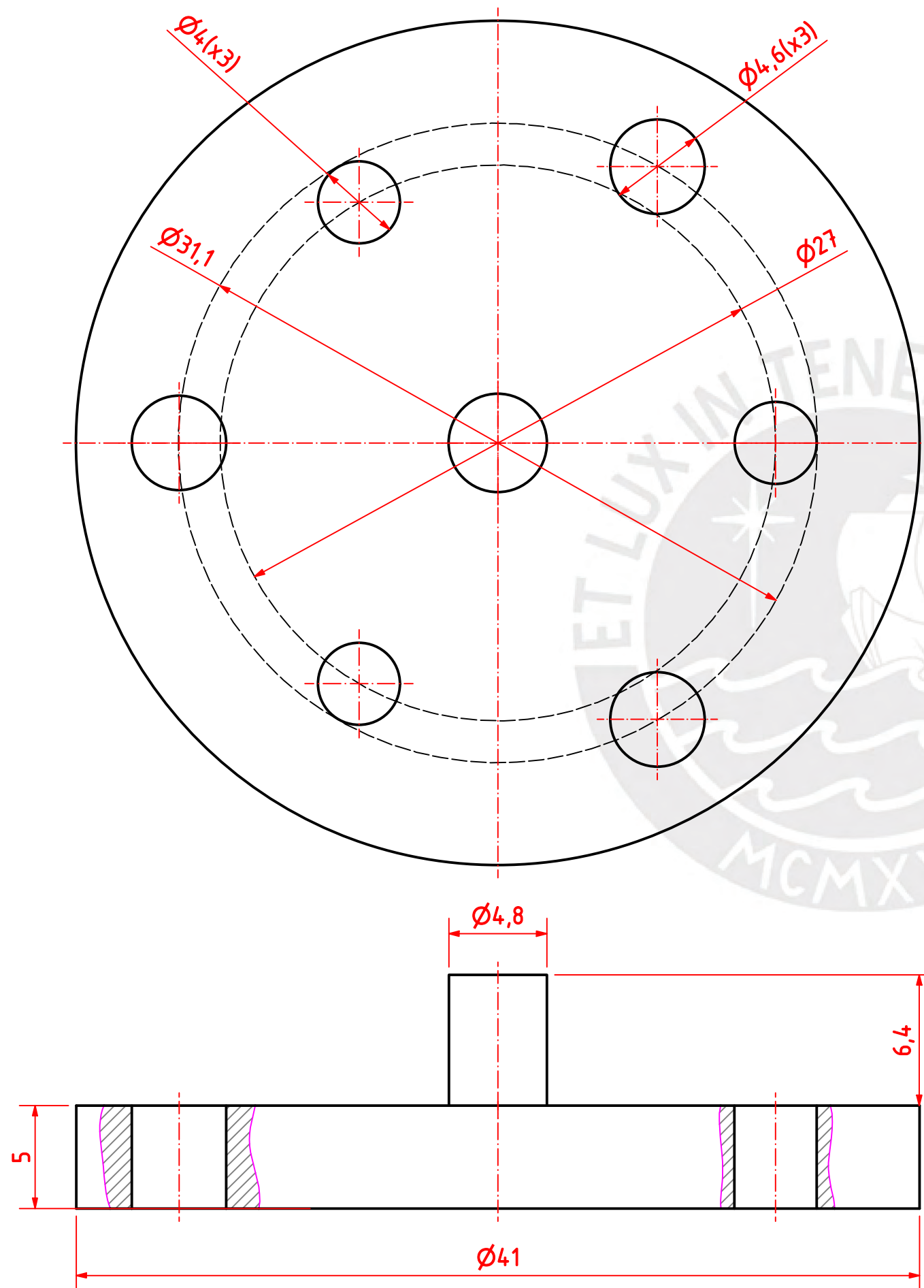
MATERIAL

+/- 0.15 mm

Impresión en Nylon

<b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ</b> FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 10M3	ESCALA <b>2:1</b>
20192223	SOLANO VEGA, LUIS JANS	FECHA: 2024.11.11
REVISADO POR:	QUIROZ VELASQUEZ, DIEGO EDUARDO	LÁMINA: D-01-A3





ACABADO SUPERFICIAL

TOLERANCIA GENERAL

MATERIAL

+/- 0.15 mm

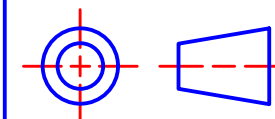
Impresión en PLA

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

MÉTODO DE PROYECCIÓN

TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 010M3

ESCALA



ACOPLE MOTOR 3

1:1

20192223

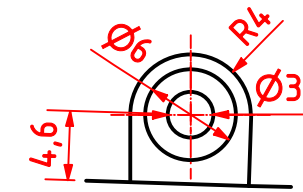
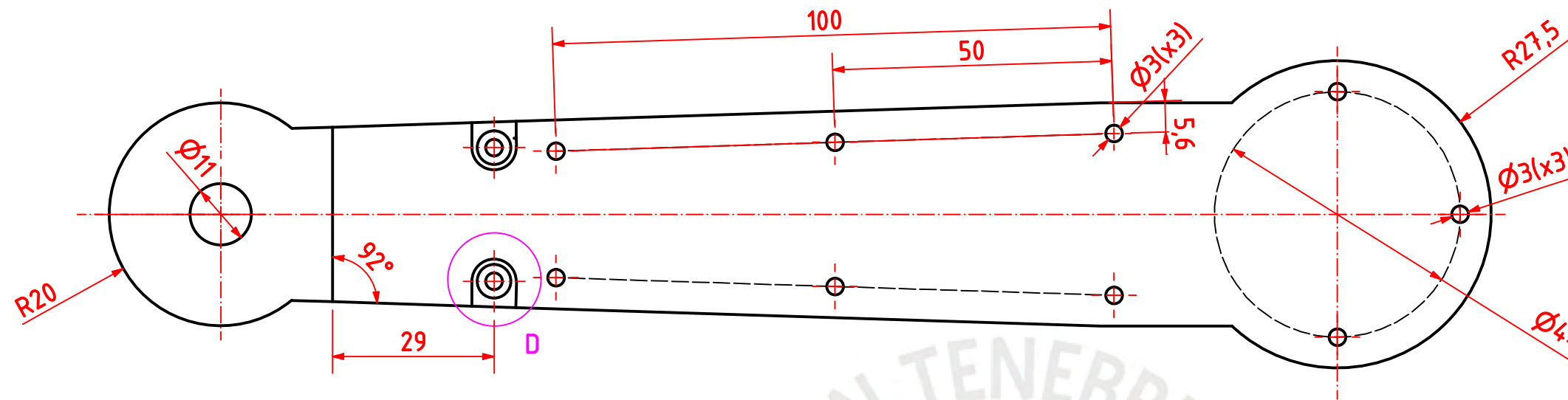
SOLANO VEGA, LUIS JANS

FECHA:  
2024.11.11

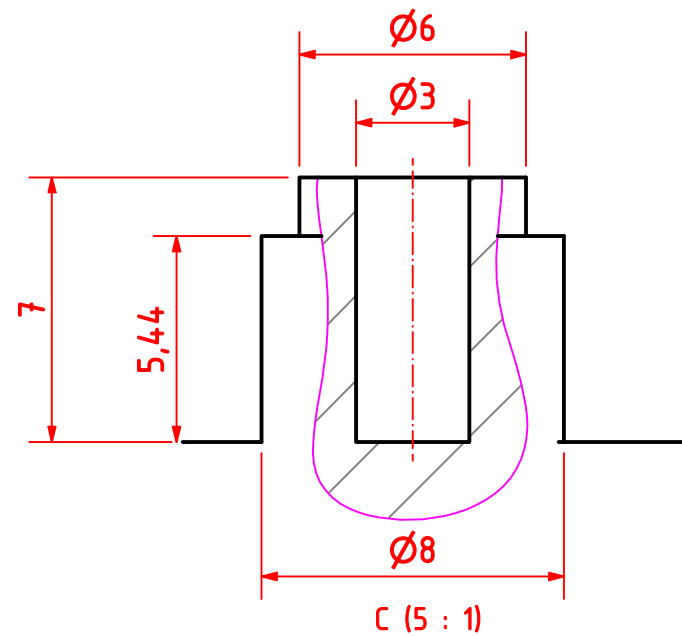
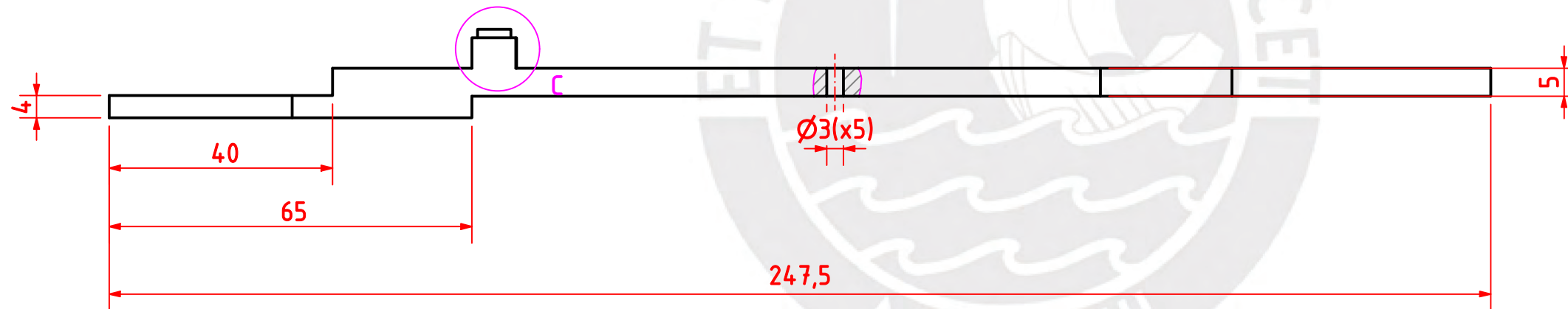
REVISADO POR:

QUIROZ VELASQUEZ, DIEGO EDUARDO

LÁMINA:  
D-03-A3



D (2 : 1)



C (5 : 1)

ACABADO SUPERFICIAL

TOLERANCIA GENERAL

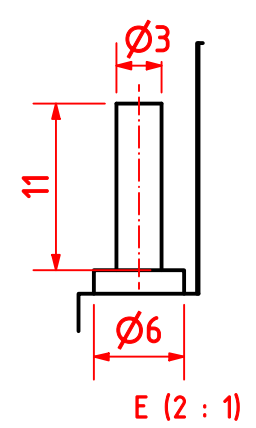
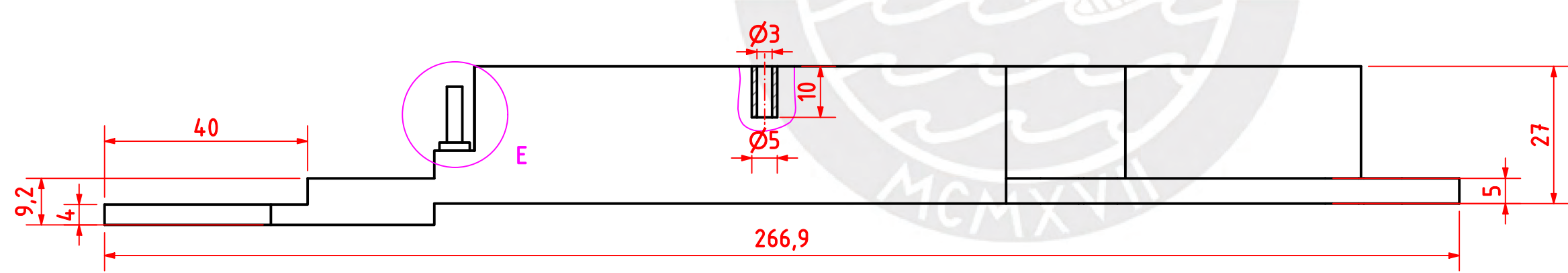
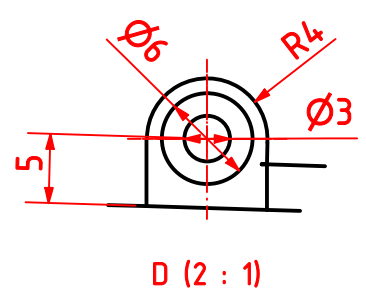
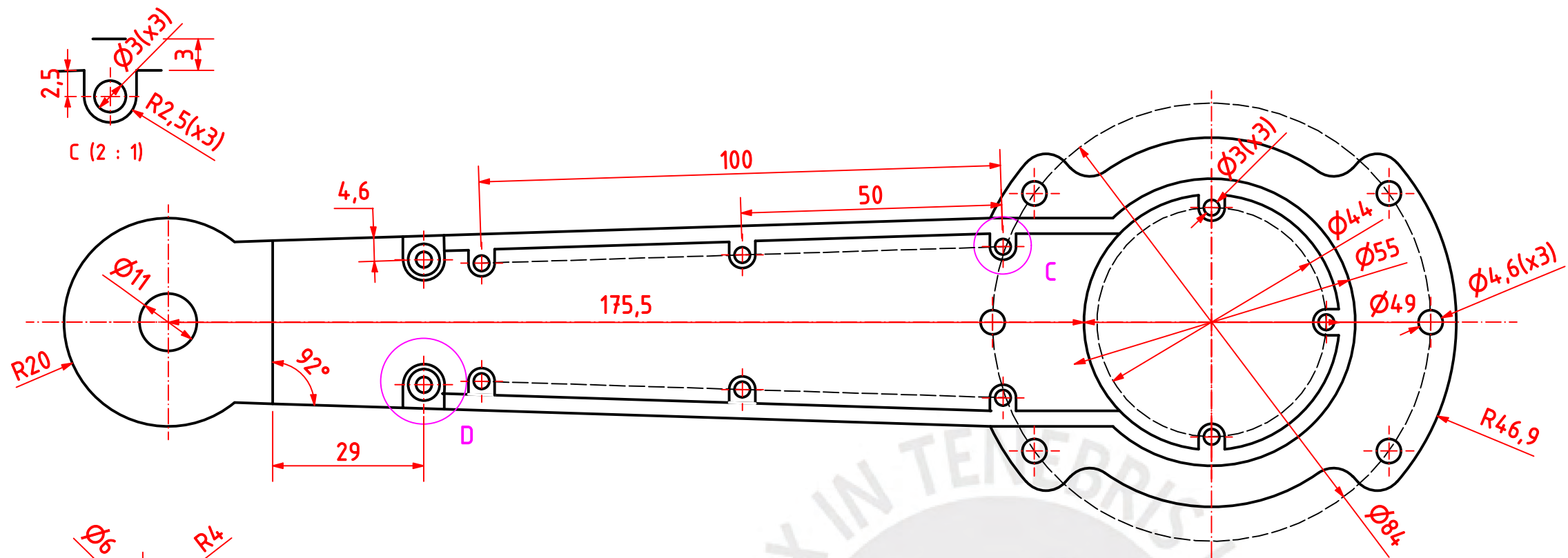
MATERIAL

+/- 0.15 mm

Impresión en PLA

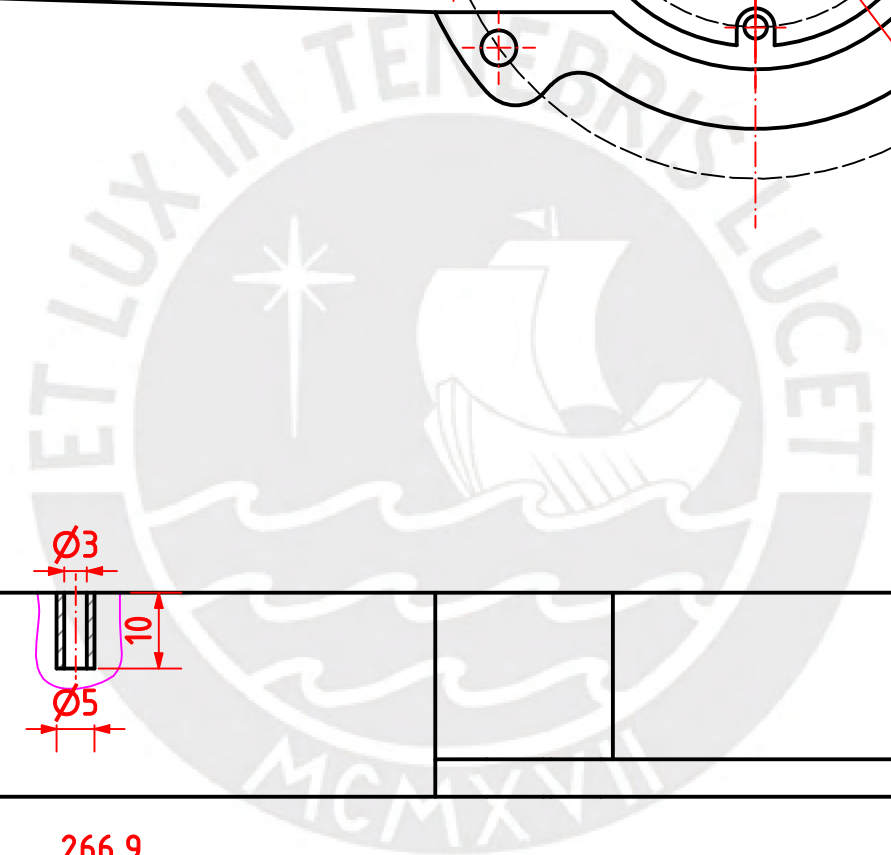
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA

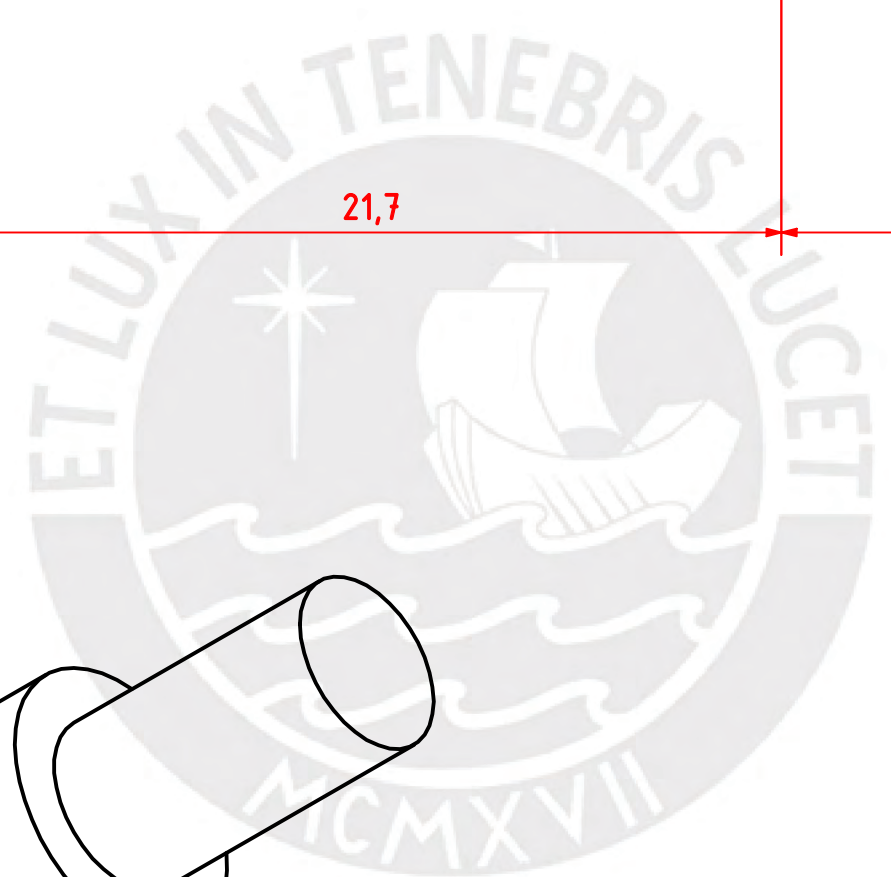
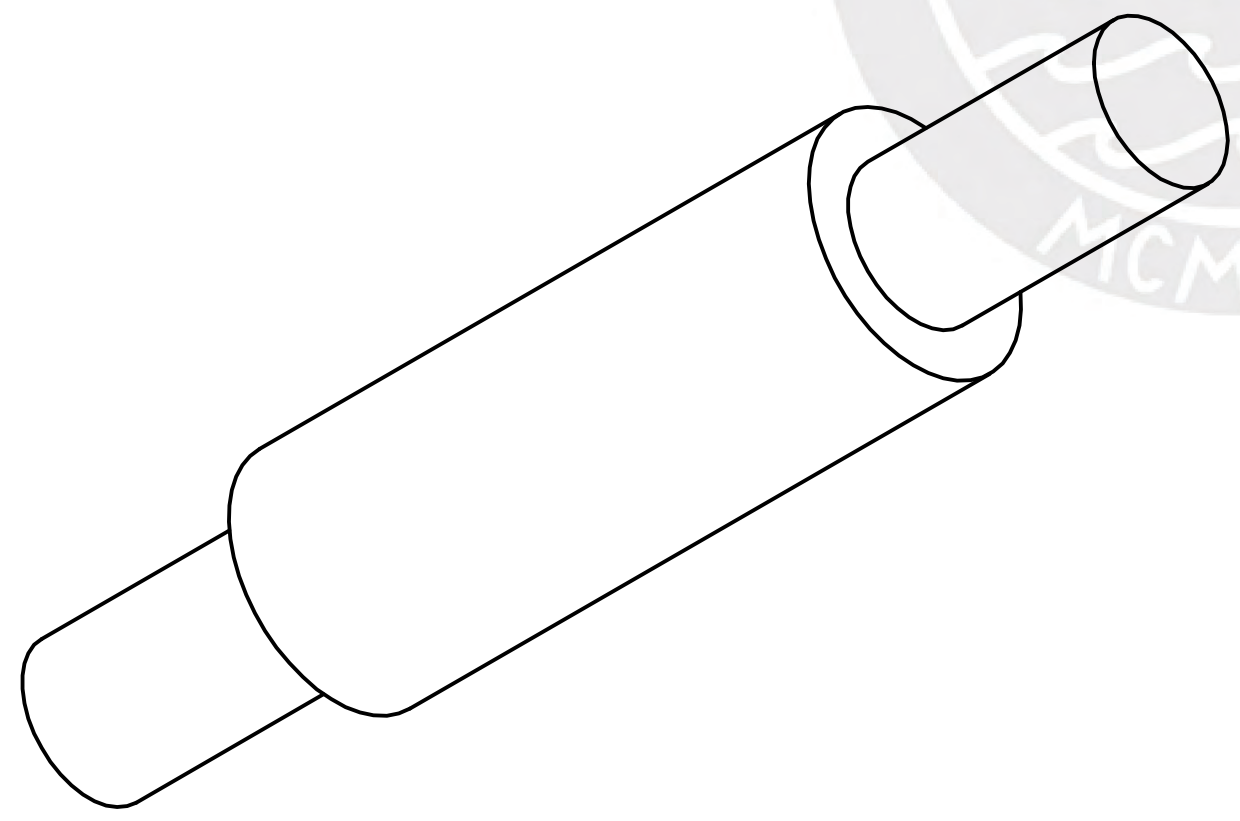
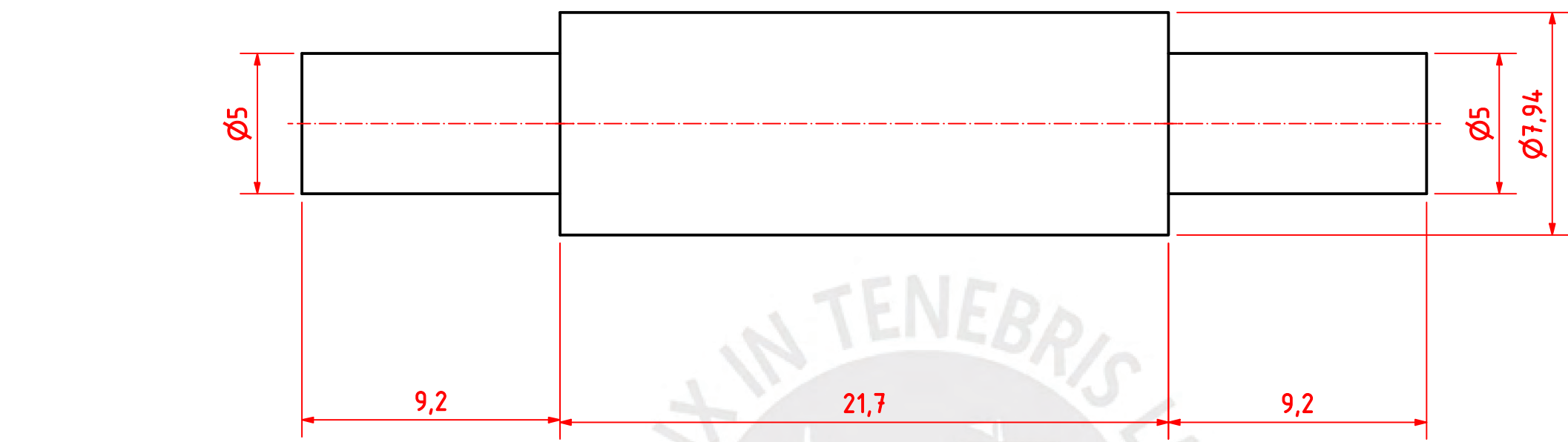
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 010M3	ESCALA
	<b>CARCASA MUSLO EXTERNO</b>	1:1
20192223	SOLANO VEGA, LUIS JANS	FECHA: 2024.11.11
REVISADO POR:	QUIROZ VELASQUEZ, DIEGO EDUARDO	LÁMINA: D-04-A3



ACABADO SUPERFICIAL TOLERANCIA GENERAL MATERIAL  
 +/- 0.15 mm Aluminio 6061

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 010M3	ESCALA 1:1
20192223	SOLANO VEGA, LUIS JANS	FECHA: 2024.11.11
REVISADO POR:	QUIROZ VELASQUEZ, DIEGO EDUARDO	LÁMINA: D-05-A3





ACABADO SUPERFICIAL

TOLERANCIA GENERAL

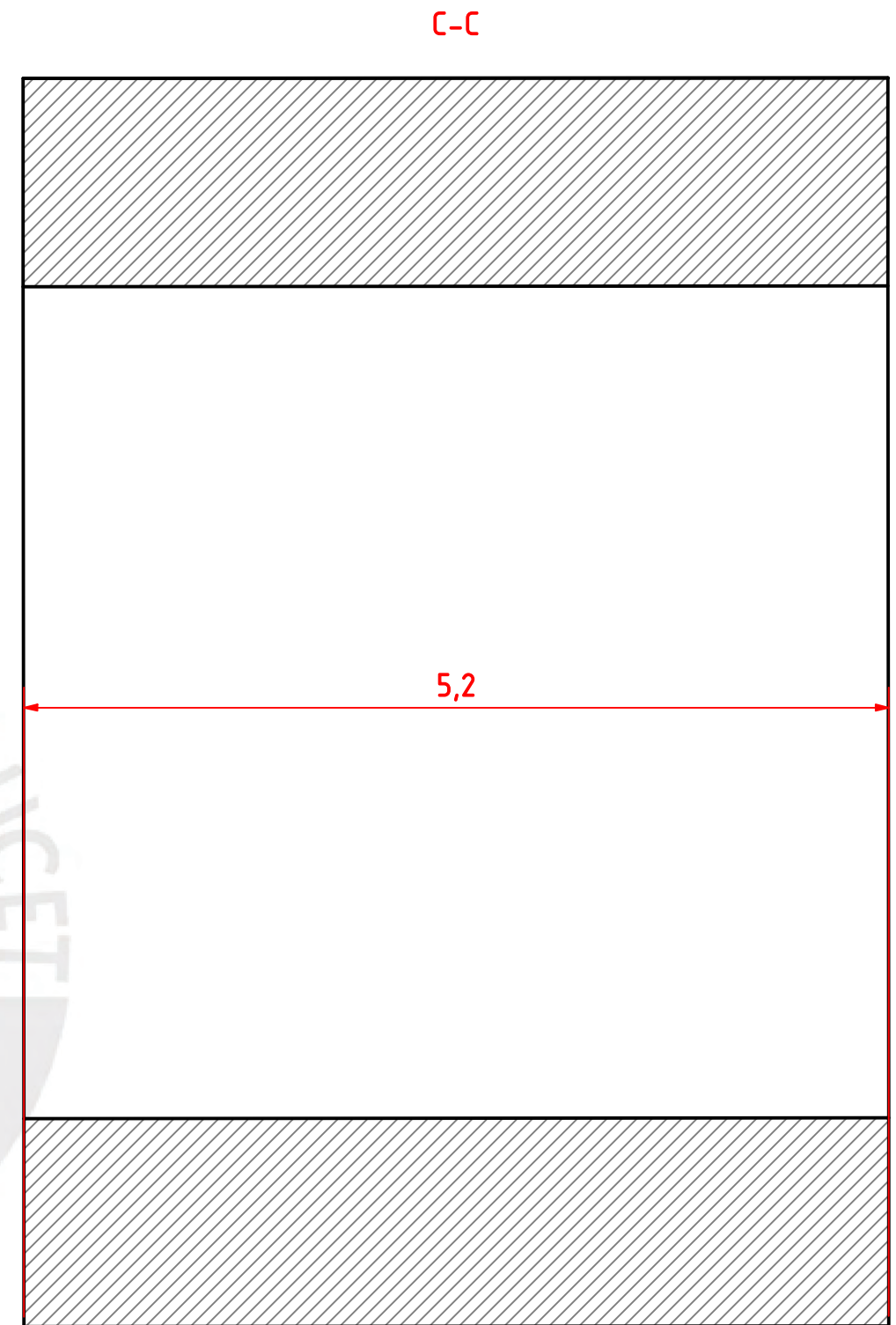
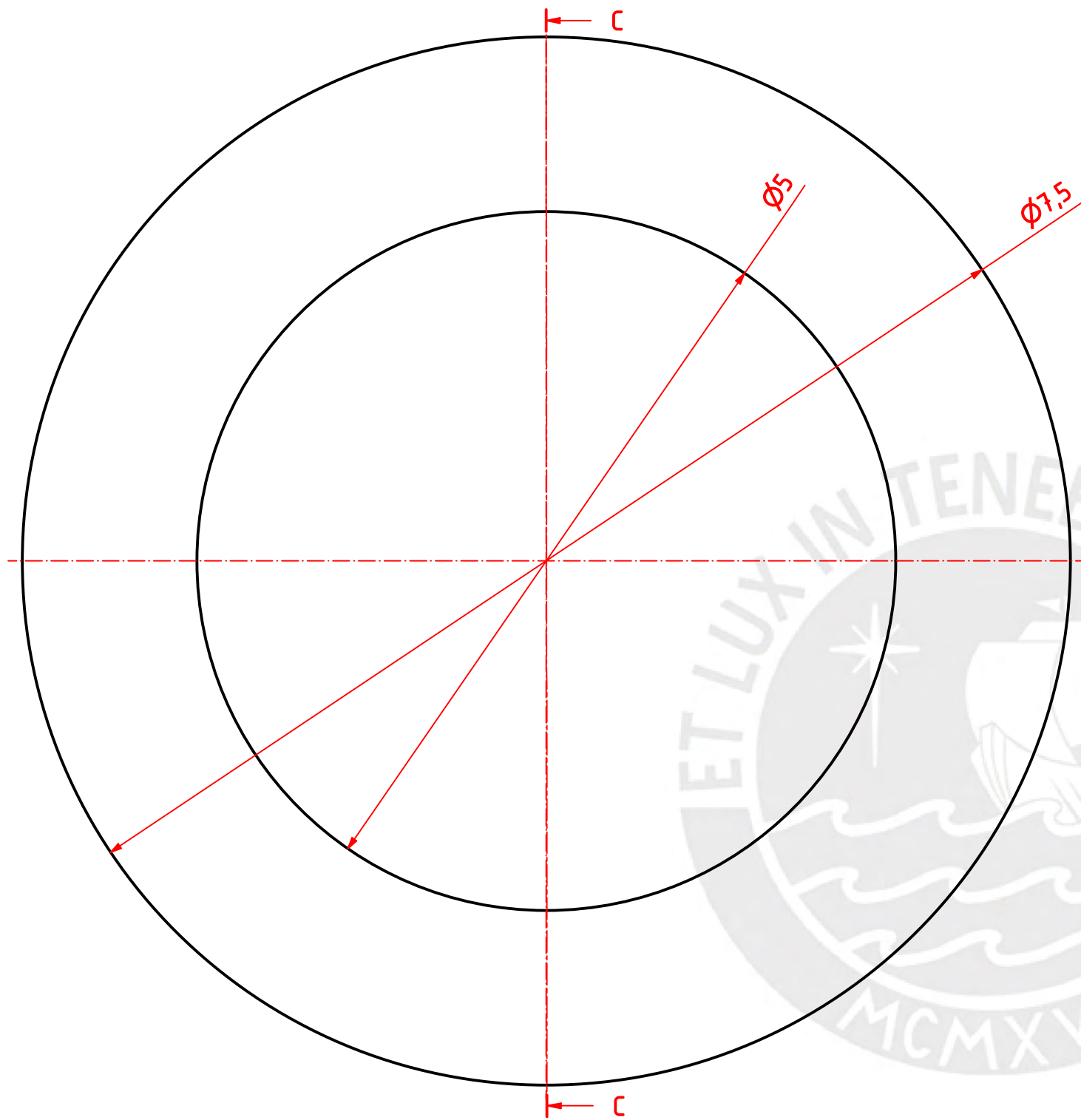
MATERIAL

+/- 0.15 mm

SAE 1020

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

MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 010M3	ESCALA
	<b>EJE RODILLA</b>	5:1
20192223	SOLANO VEGA, LUIS JANS	FECHA: 2024.11.11
REVISADO POR:	QUIROZ VELASQUEZ, DIEGO EDUARDO	LÁMINA: D-06-A3



ACABADO SUPERFICIAL

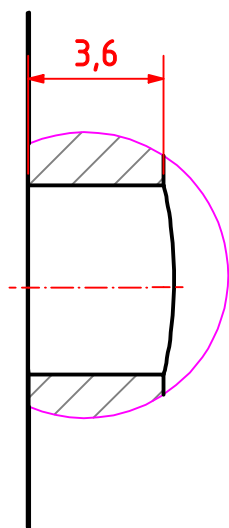
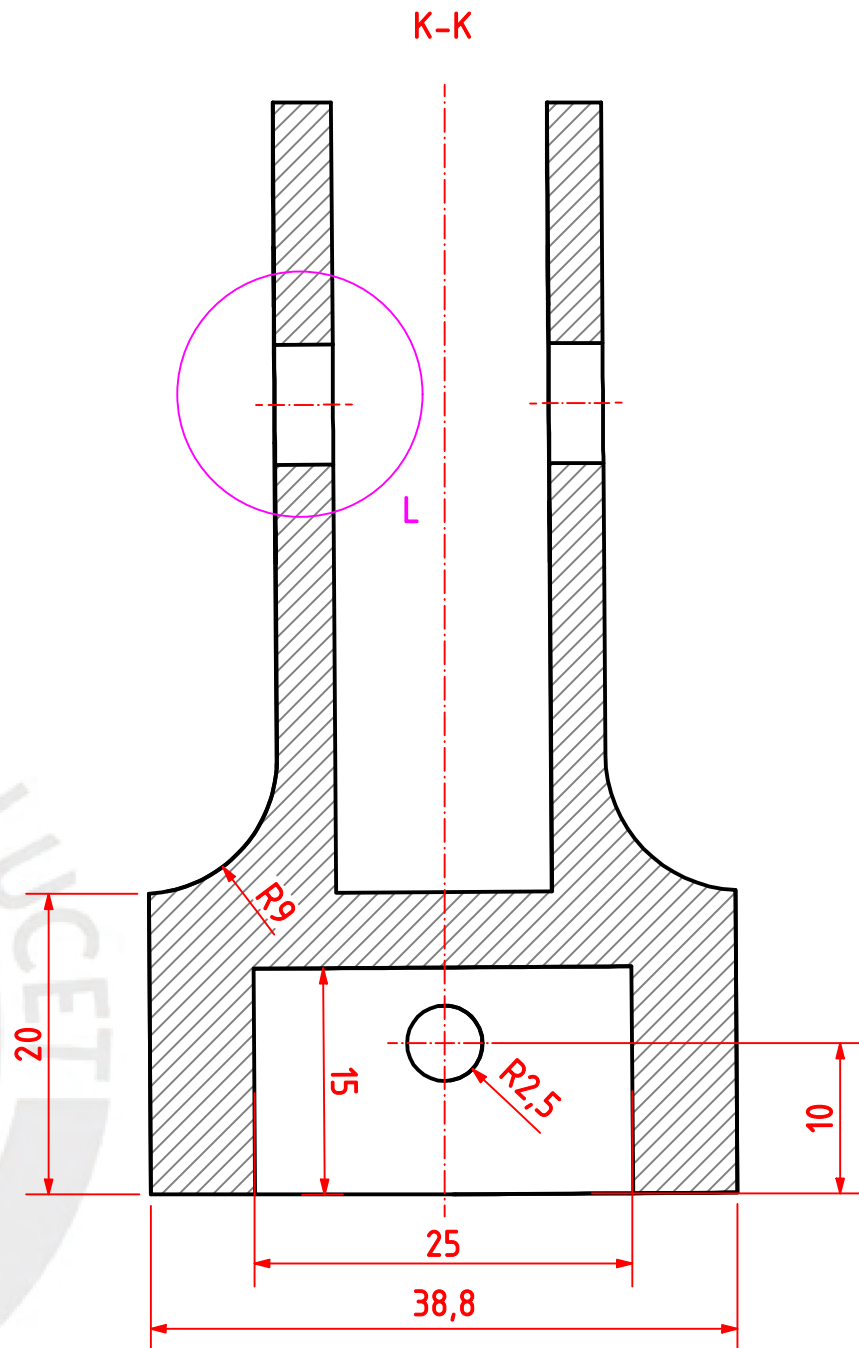
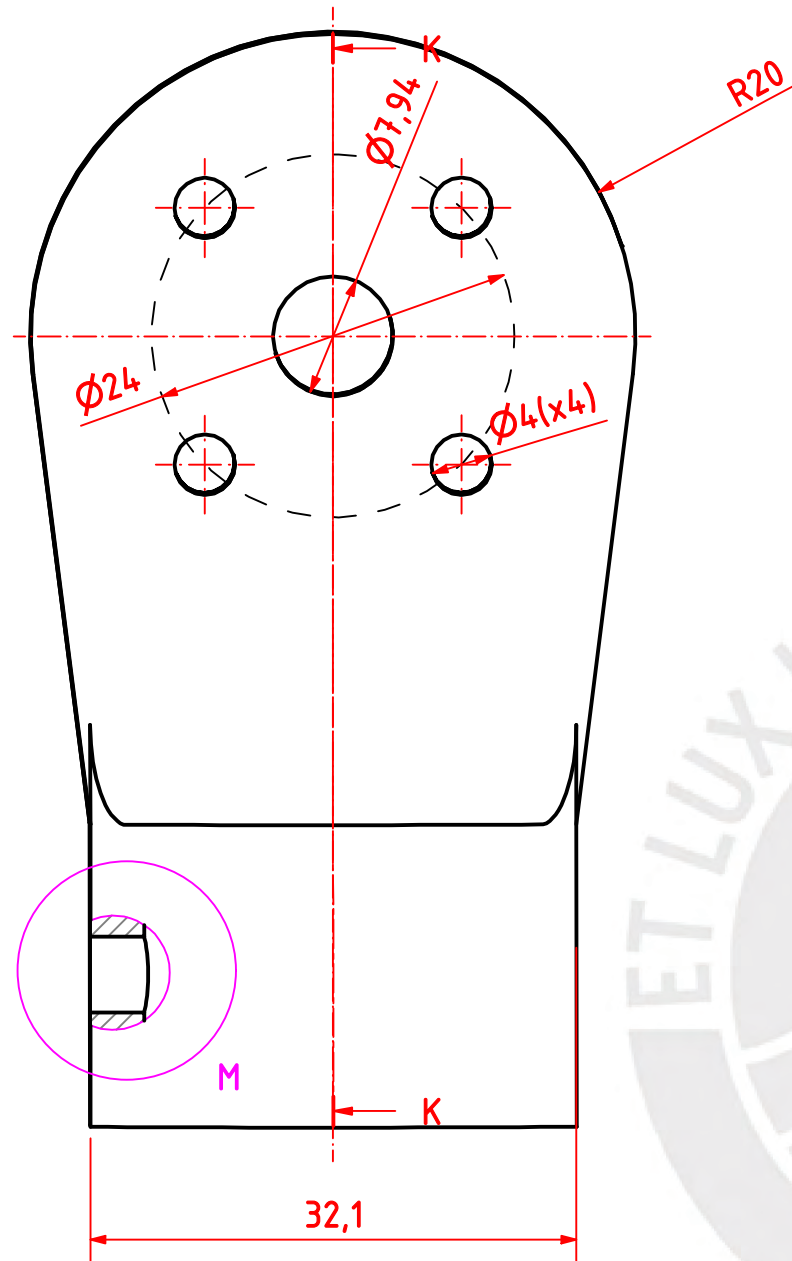
TOLERANCIA GENERAL

MATERIAL

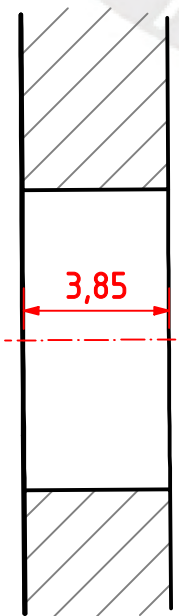
+/- 0.15 mm

Impresión en PLA

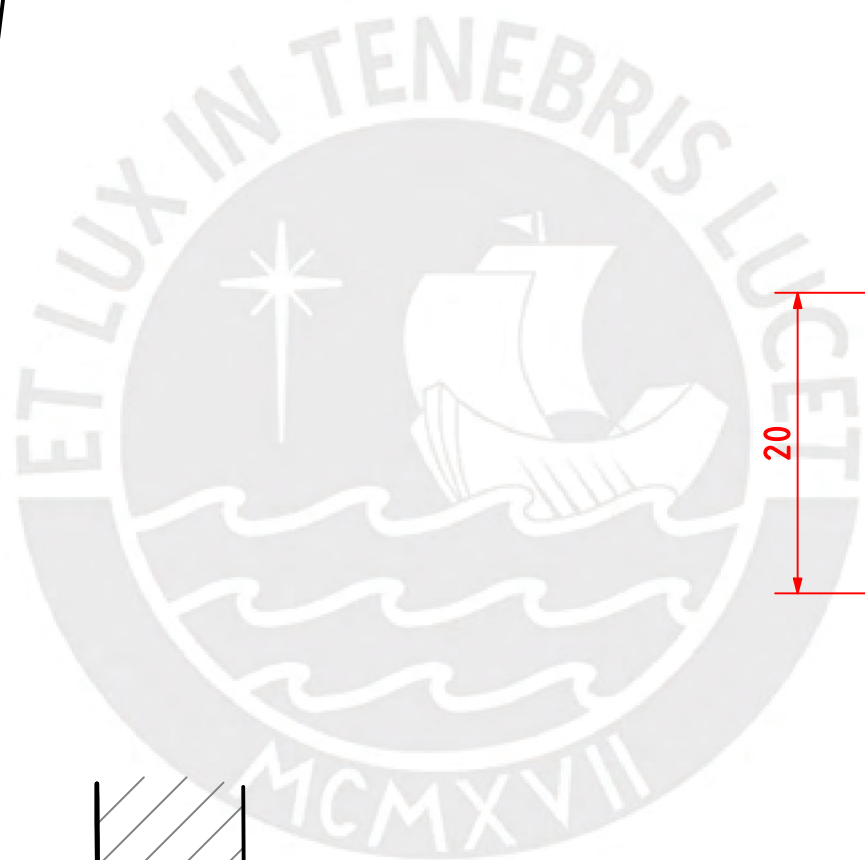
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 010M3	ESCALA
	<b>SEPARADOR RODILLA</b>	1:1
20192223	SOLANO VEGA, LUIS JANS	FECHA: 2024.11.11
REVISADO POR:	QUIROZ VELASQUEZ, DIEGO EDUARDO	LÁMINA: D-07-A3



M (5 : 1)



L (5 : 1)



ACABADO SUPERFICIAL

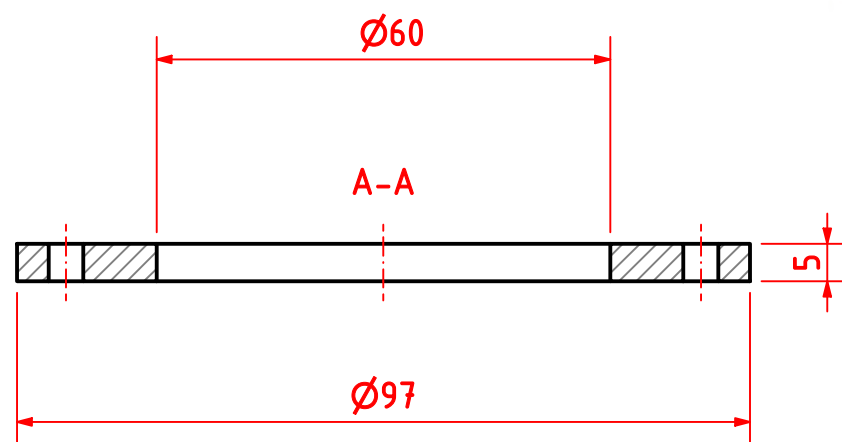
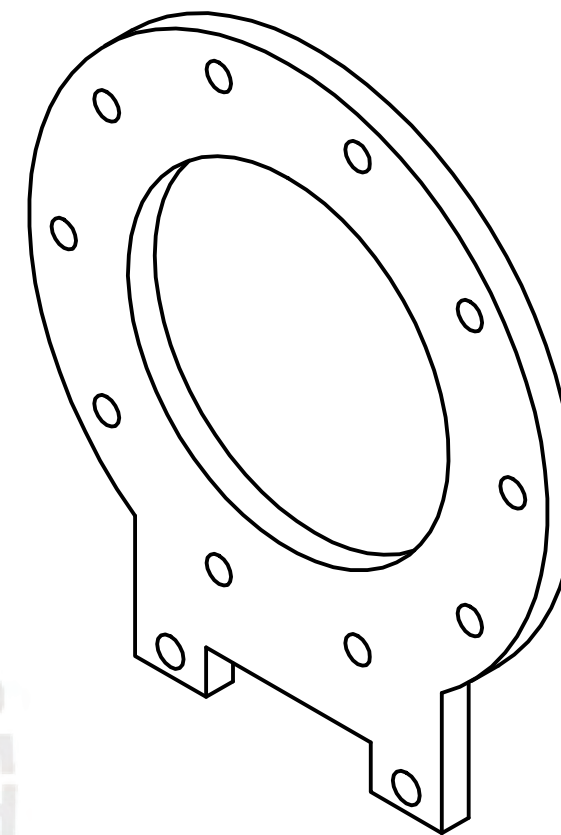
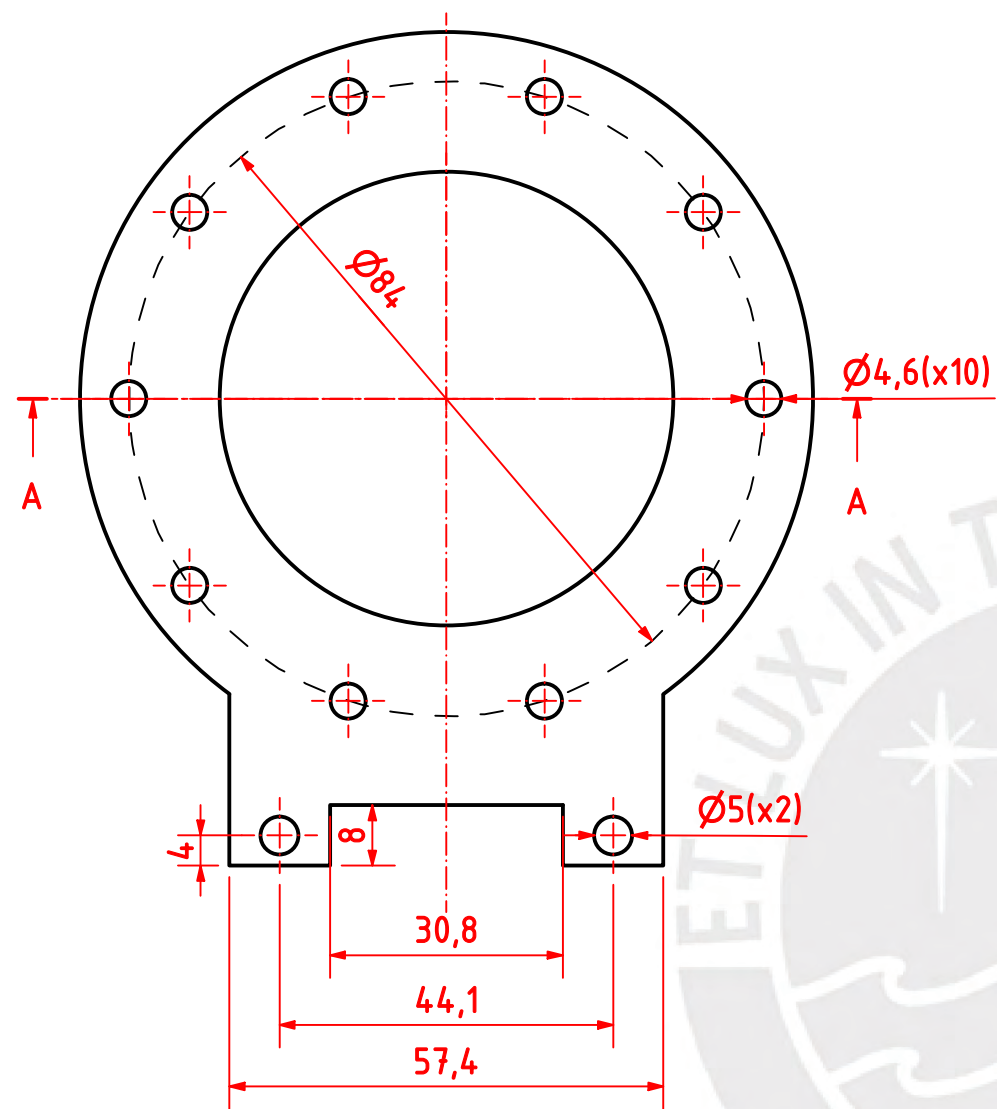
TOLERANCIA GENERAL

MATERIAL

+/- 0.15 mm

Impresión en Nylon

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 010M3	ESCALA
	<b>SOPORTE DE RODILLA</b>	<b>2:1</b>
20192223	SOLANO VEGA, LUIS JANS	FECHA: 2024.11.11
REVISADO POR:	QUIROZ VELASQUEZ, DIEGO EDUARDO	LÁMINA: D-08-A3



ACABADO SUPERFICIAL

TOLERANCIA GENERAL

MATERIAL

+/- 0.15 mm

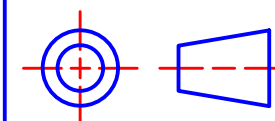
Impresión en Nylon

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

MÉTODO DE PROYECCIÓN

TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 010M3

ESCALA



SOPORTE MOTOR 1 - A

1:1

20192223

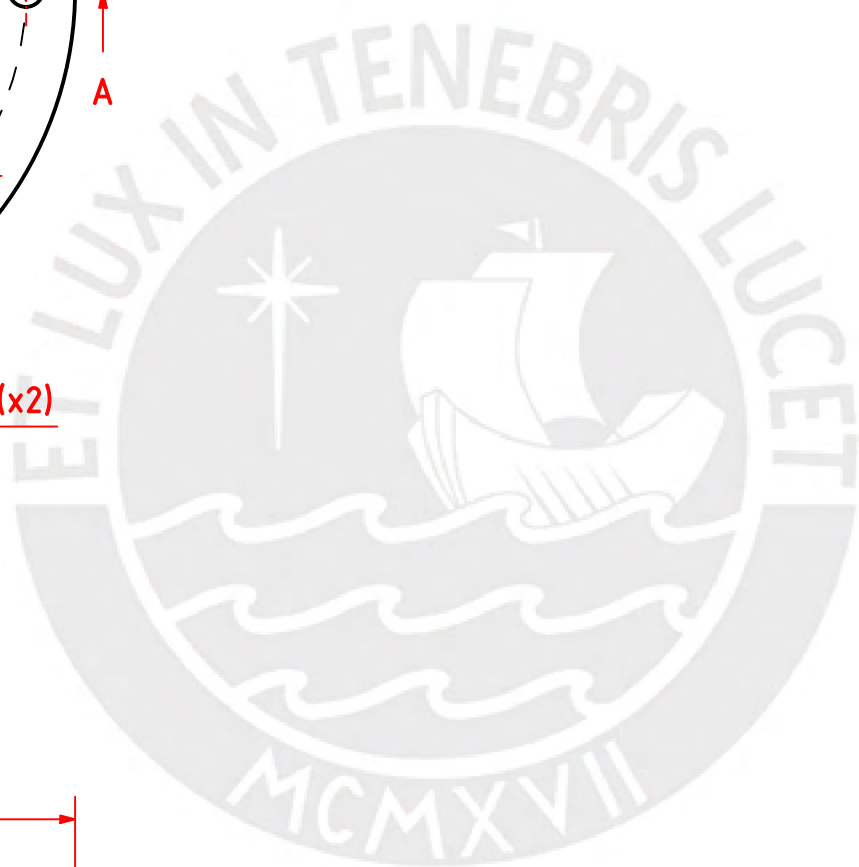
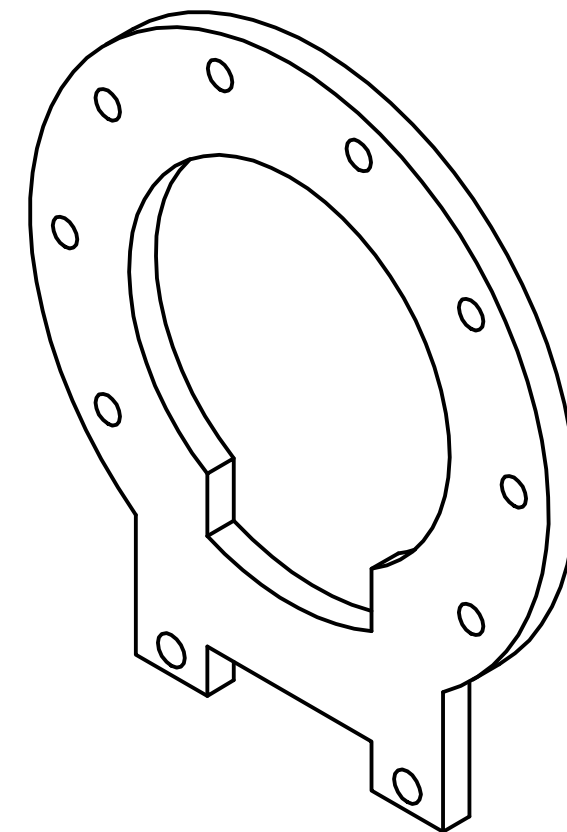
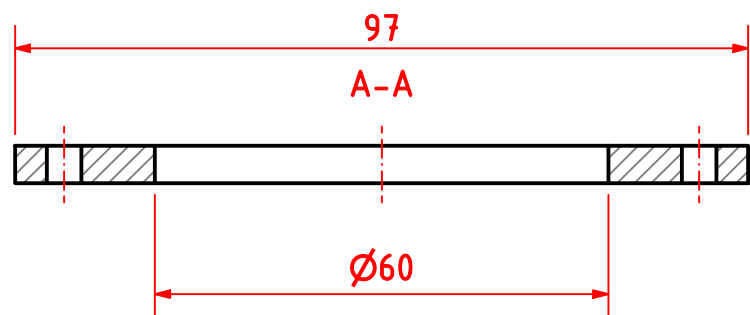
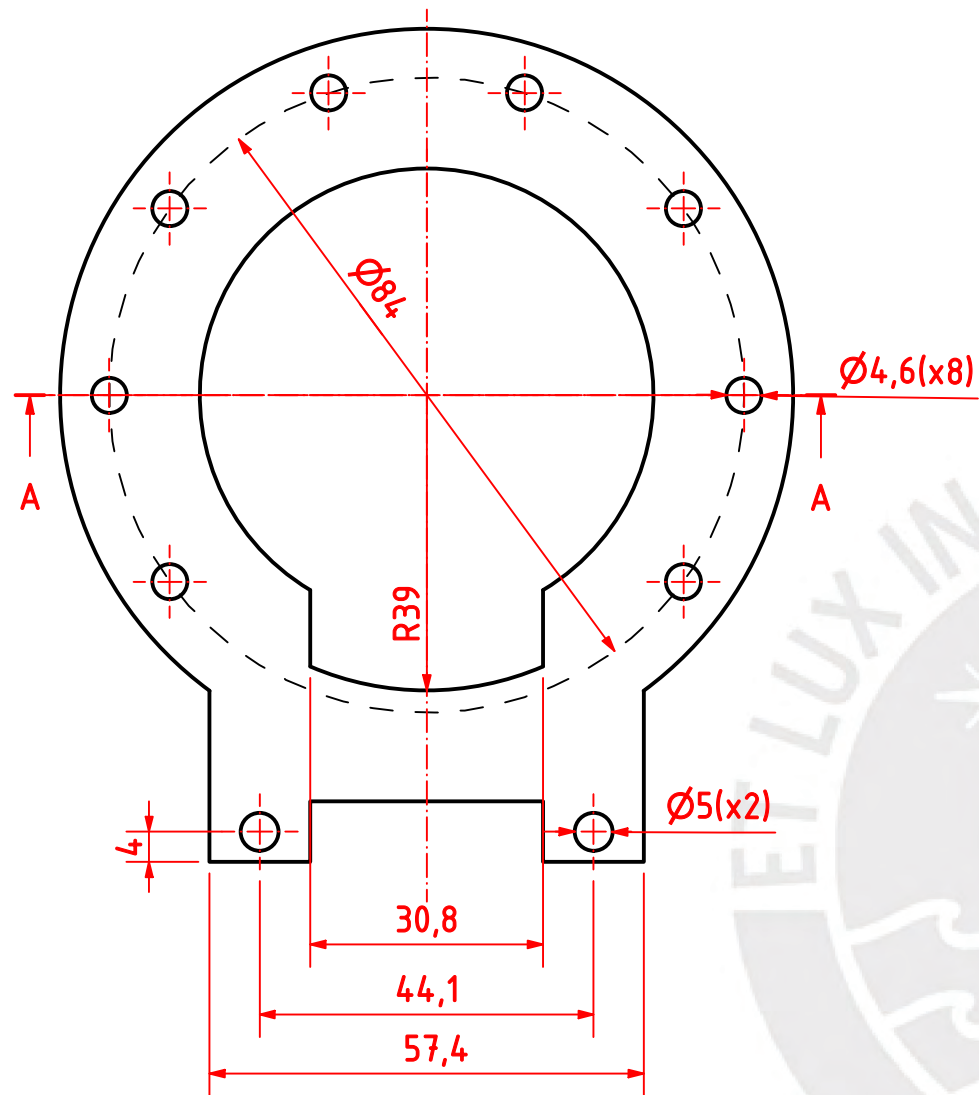
SOLANO VEGA, LUIS JANS

FECHA:  
2024.11.11

REVISADO POR:

QUIROZ VELASQUEZ, DIEGO EDUARDO

LÁMINA:  
D-09-A3



ACABADO SUPERFICIAL

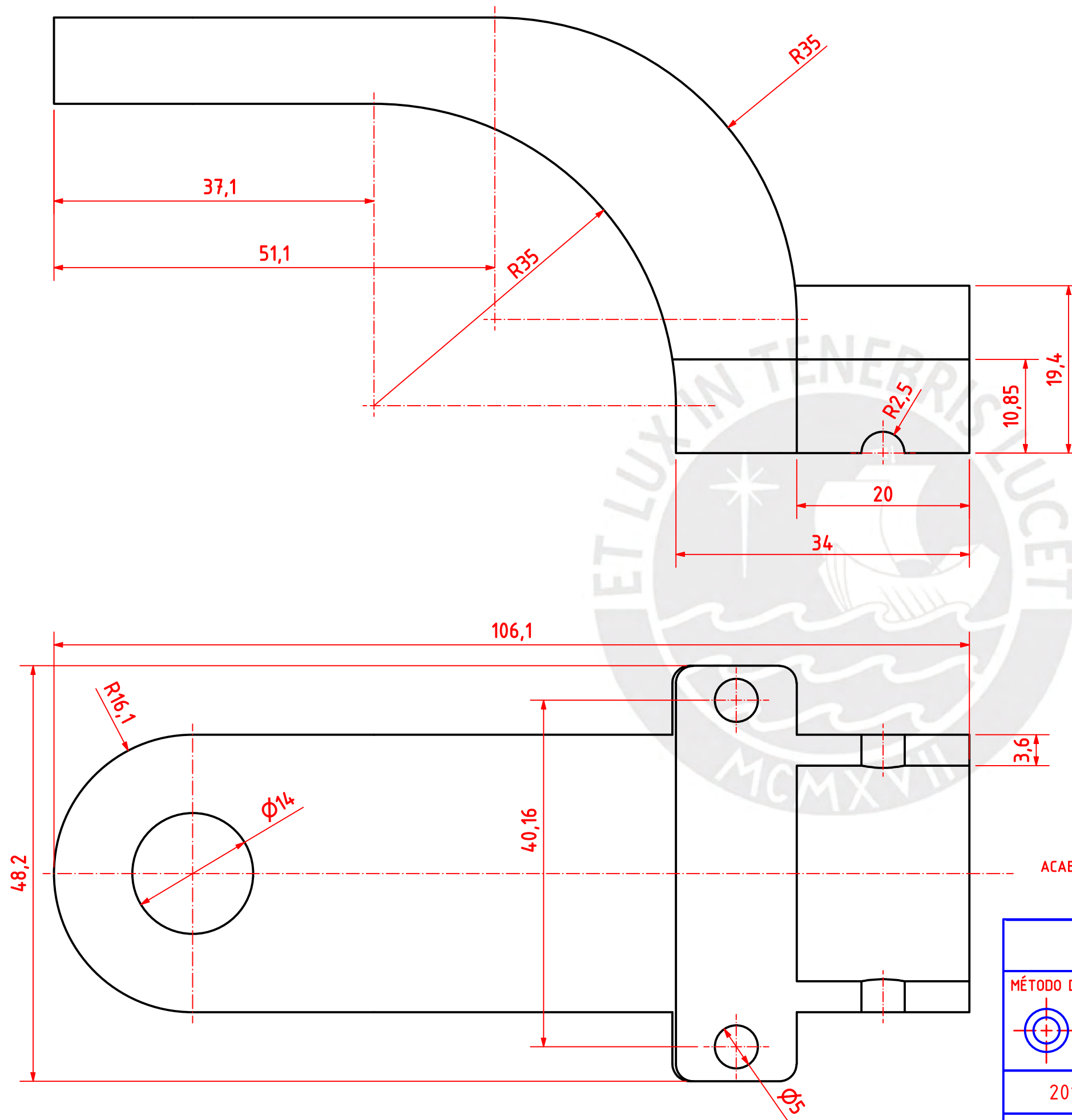
TOLERANCIA GENERAL

MATERIAL

+/- 0.15 mm

Impresión en Nylon

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 010M3	ESCALA
	<b>SOPORTE MOTOR 1 - B</b>	1:1
20192223	SOLANO VEGA, LUIS JANS	FECHA: 2024.11.11
REVISADO POR:	QUIROZ VELASQUEZ, DIEGO EDUARDO	LÁMINA: D-10-A3



ACABADO SUPERFICIAL

TOLERANCIA GENERAL

MATERIAL

+/- 0.15 mm

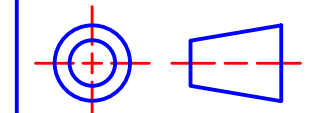
Impresión en Nylon

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

MÉTODO DE PROYECCIÓN

TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 010M3

ESCALA



SOPORTE RUEDA

2:1

20192223

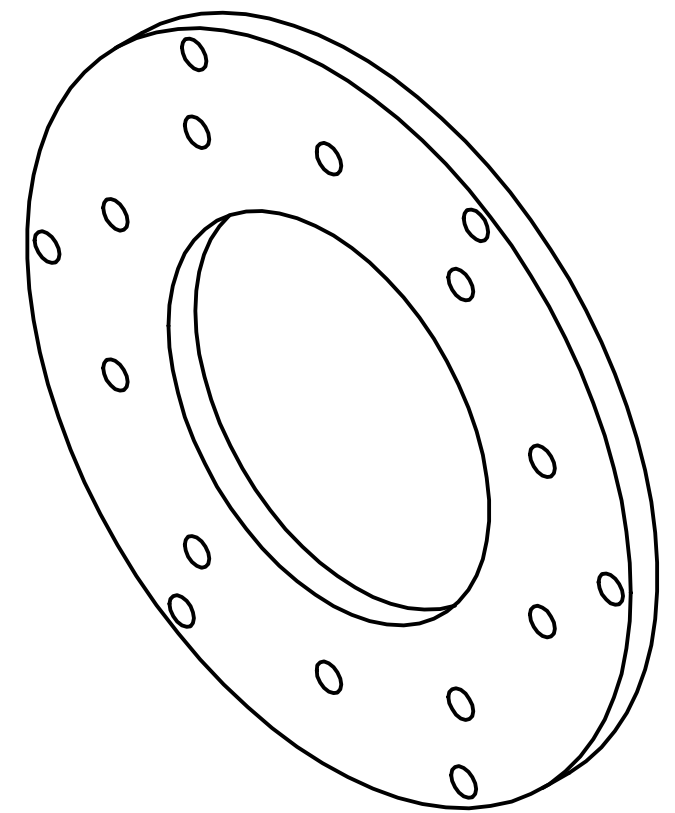
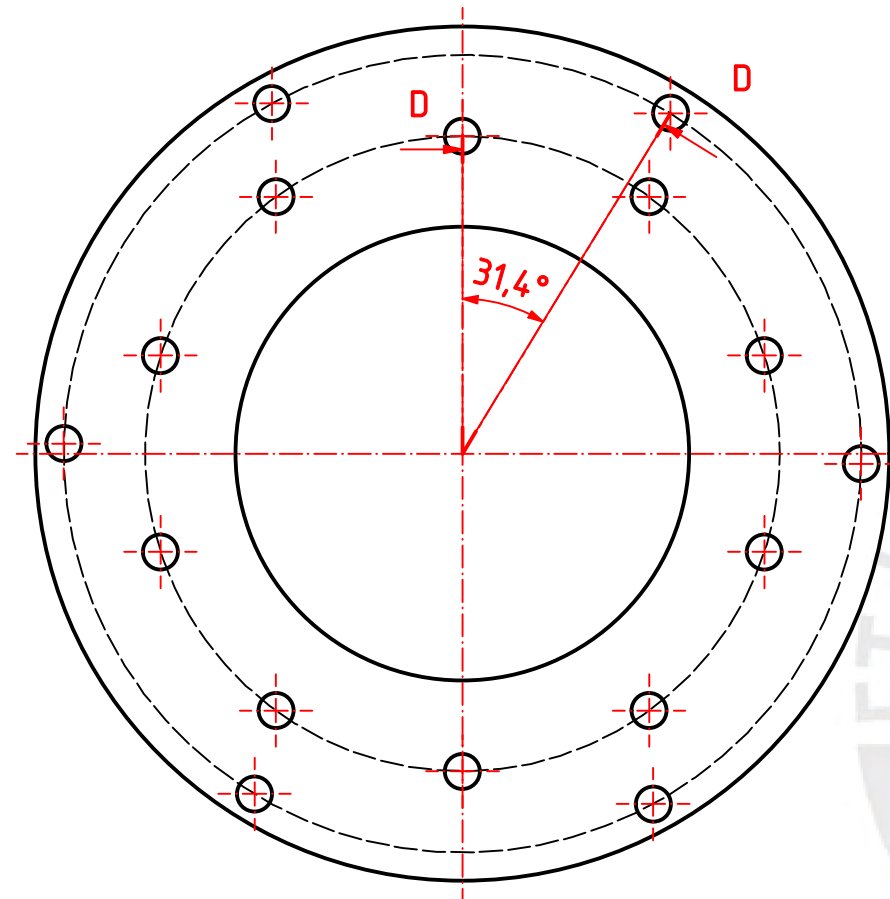
SOLANO VEGA, LUIS JANS

FECHA:  
2024.11.11

REVISADO POR:

QUIROZ VELASQUEZ, DIEGO EDUARDO

LÁMINA:  
D-11-A3



ACABADO SUPERFICIAL

TOLERANCIA GENERAL

MATERIAL

+/- 0.15 mm

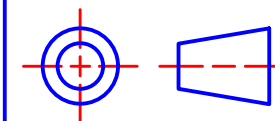
Impresión en Nylon

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

MÉTODO DE PROYECCIÓN

TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 010M3

ESCALA



TAPA MOTOR 2

1:1

20192223

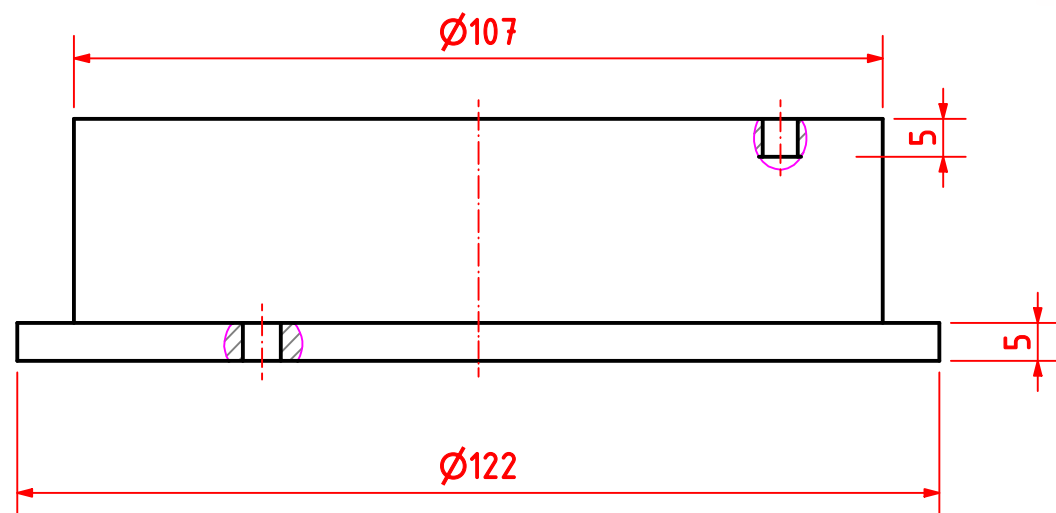
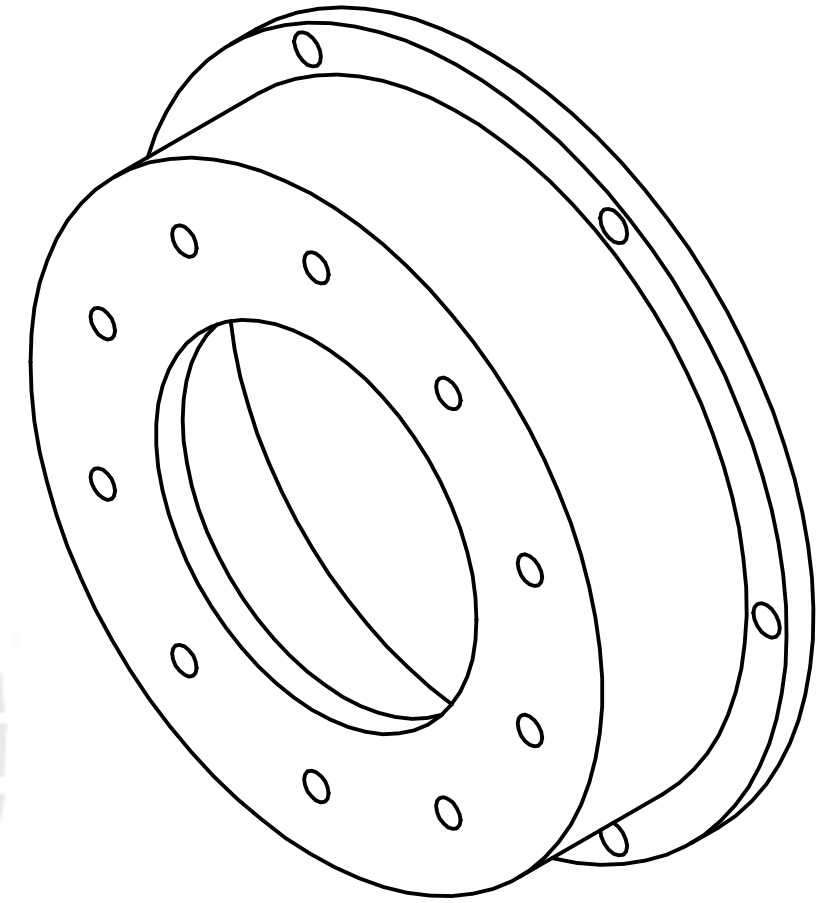
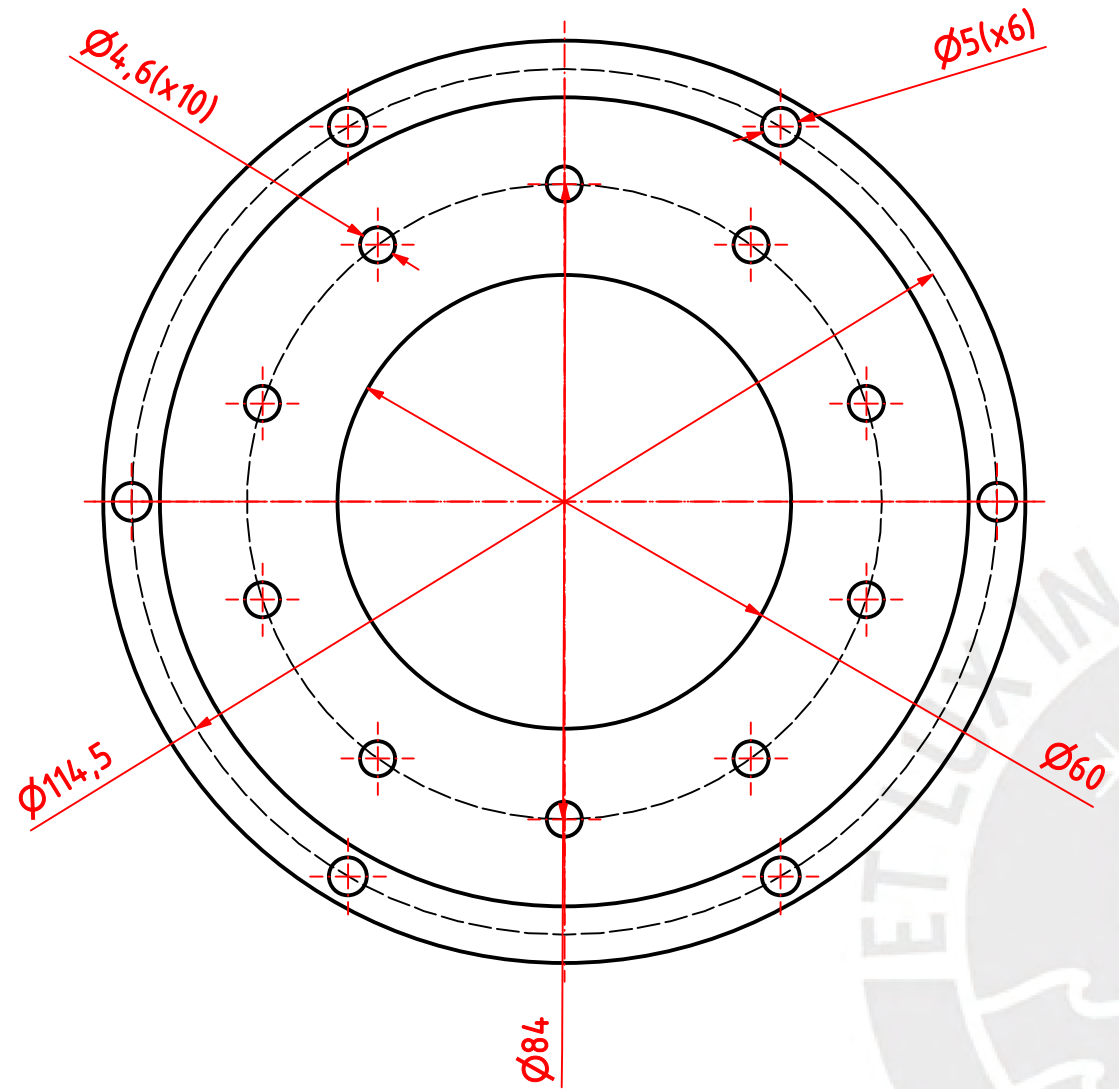
SOLANO VEGA, LUIS JANS

FECHA:  
2024.11.11

REVISADO POR:

QUIROZ VELASQUEZ, DIEGO EDUARDO

LÁMINA:  
D-12-A3



ACABADO SUPERFICIAL

TOLERANCIA GENERAL

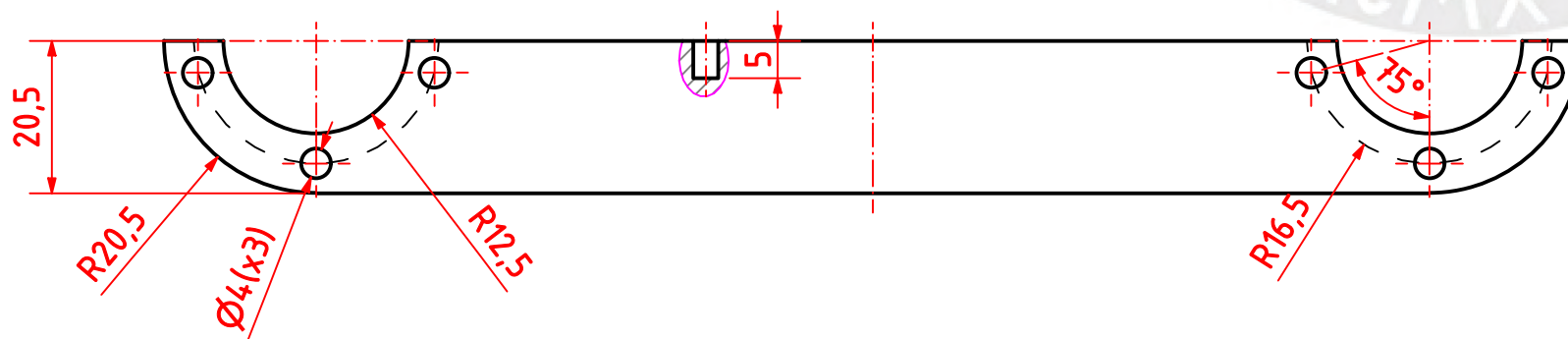
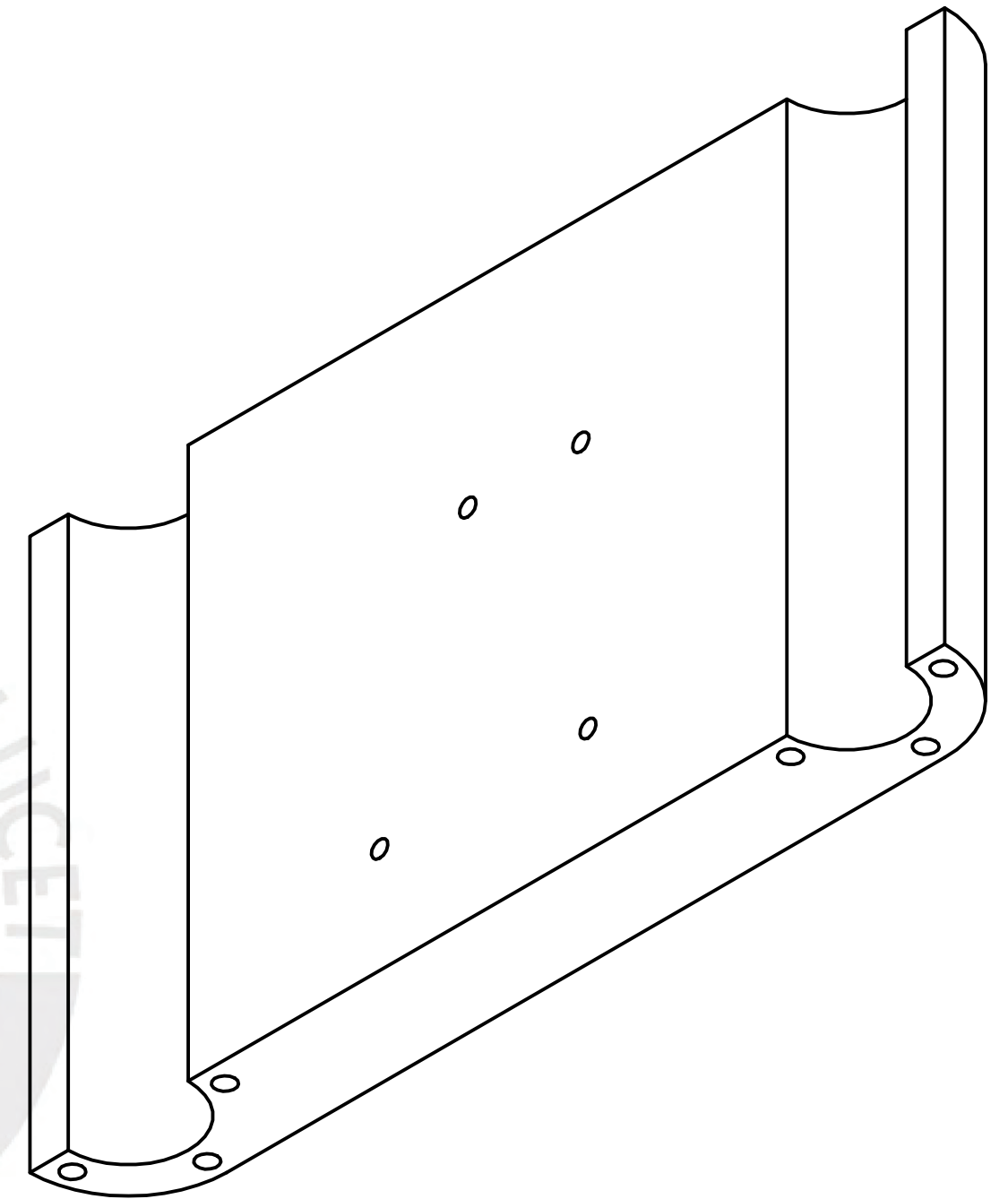
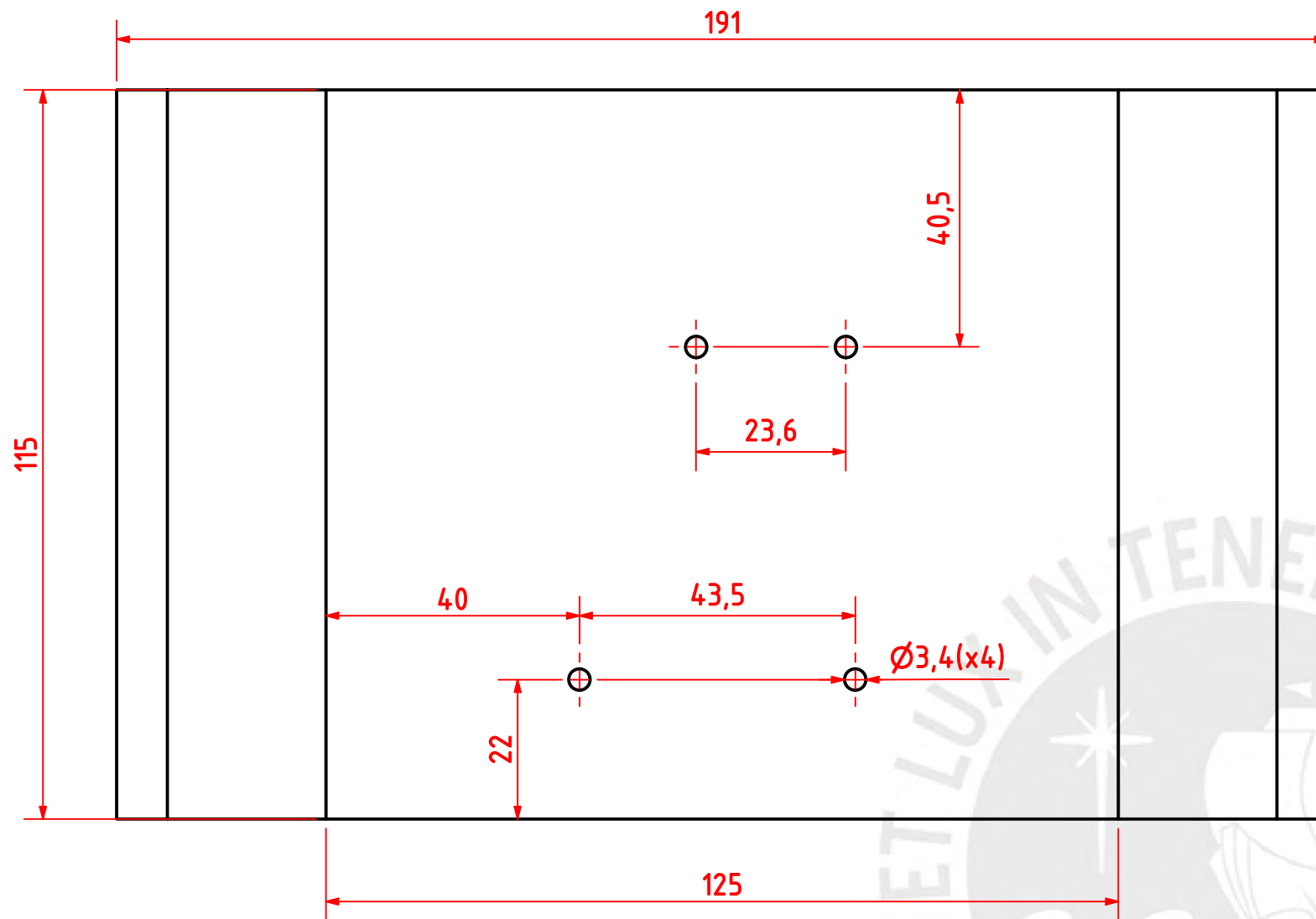
MATERIAL

+/- 0.15 mm

Impresión en PLA

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

MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 010M3	ESCALA
	<b>CARCASA MOTOR 1</b>	1:1
20192223	SOLANO VEGA, LUIS JANS	FECHA: 2024.11.11
REVISADO POR:	QUIROZ VELASQUEZ, DIEGO EDUARDO	LÁMINA: D-14-A3



ACABADO SUPERFICIAL

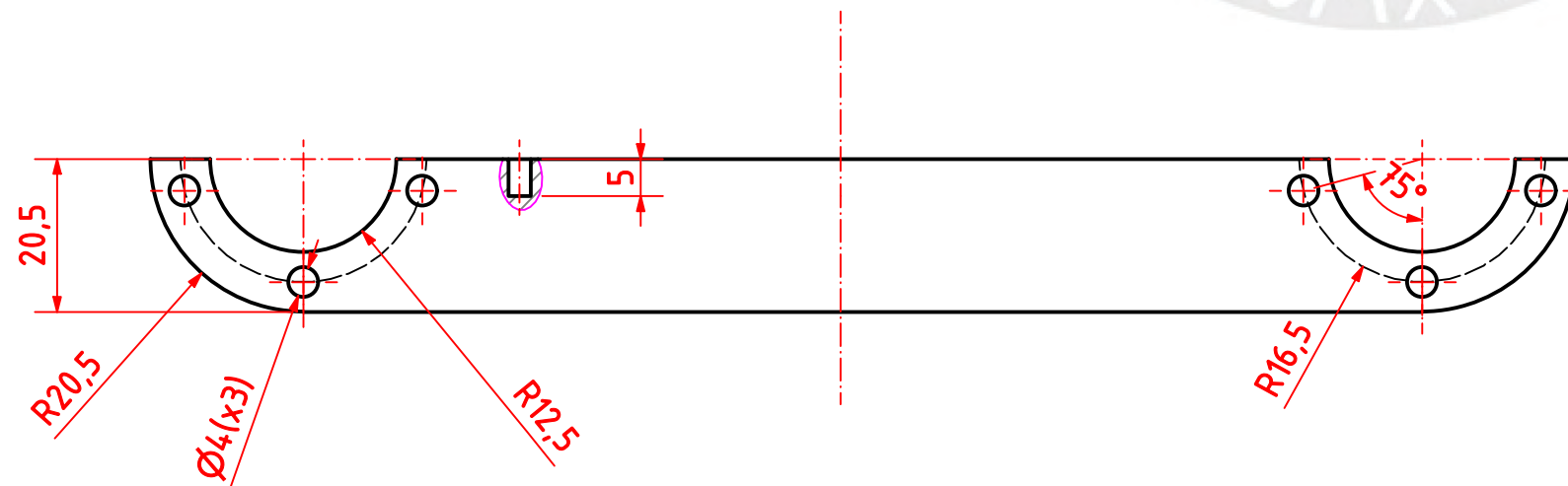
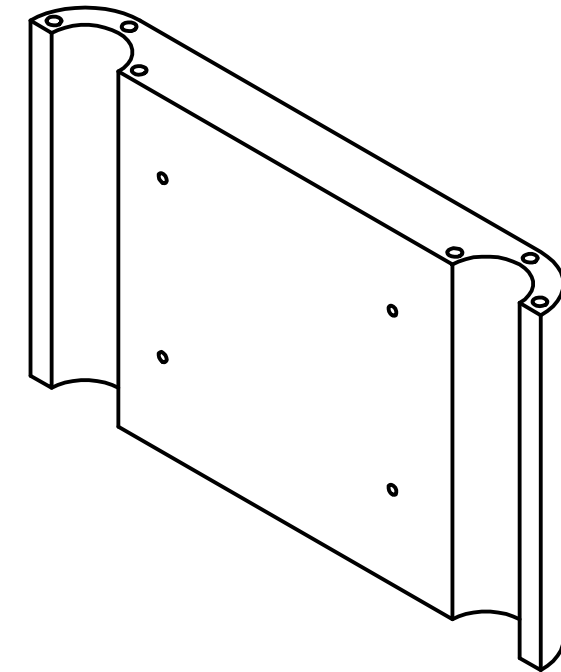
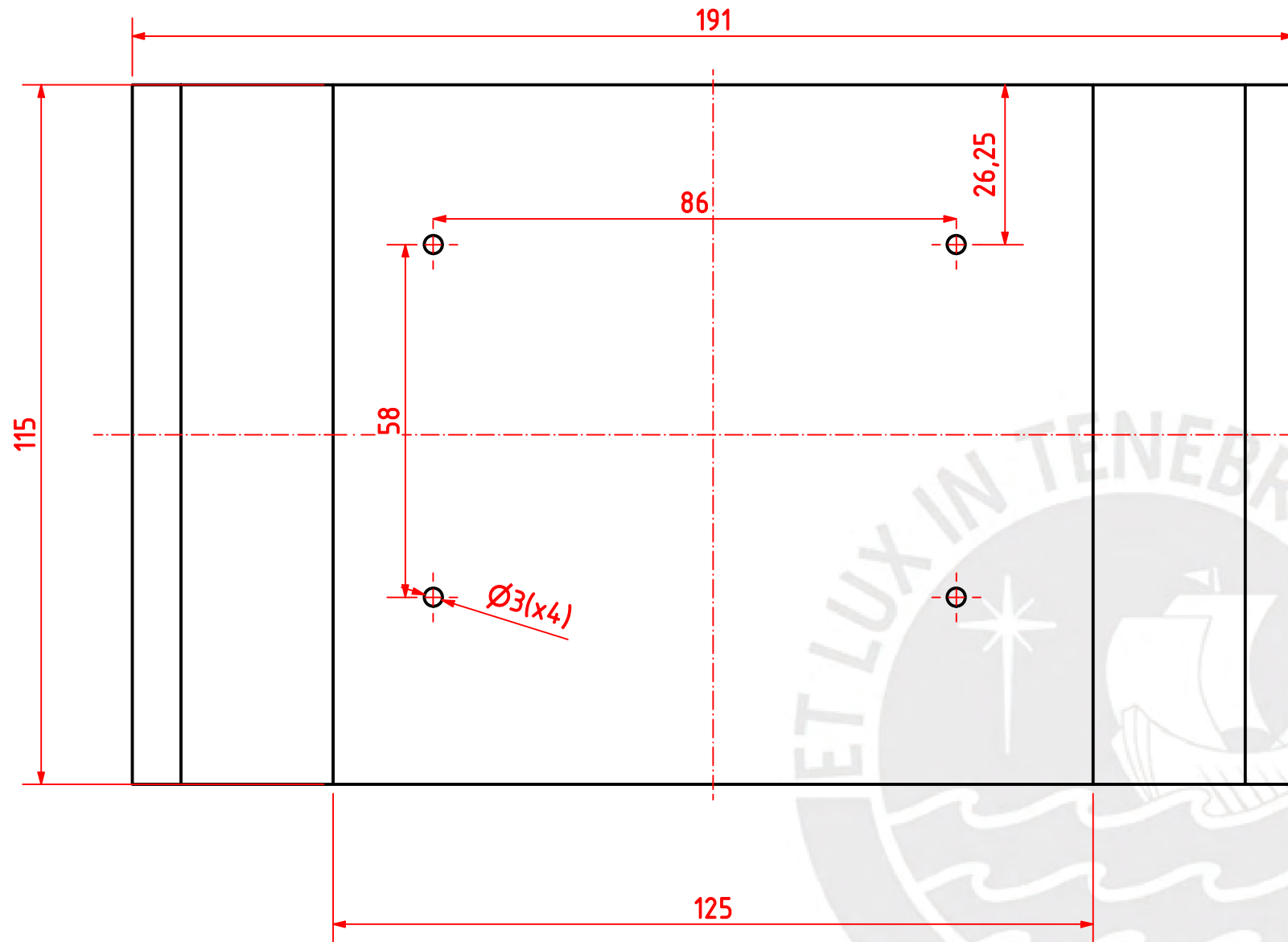
TOLERANCIA GENERAL

MATERIAL

+/- 0.15 mm

Impresión en PLA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 010M3	ESCALA
	<b>CUERPO CABEZA INFERIOR</b>	1:1
20192223	SOLANO VEGA, LUIS JANS	FECHA: 2024.11.11
REVISADO POR:	QUIROZ VELASQUEZ, DIEGO EDUARDO	LÁMINA: D-15-A3



ACABADO SUPERFICIAL

TOLERANCIA GENERAL

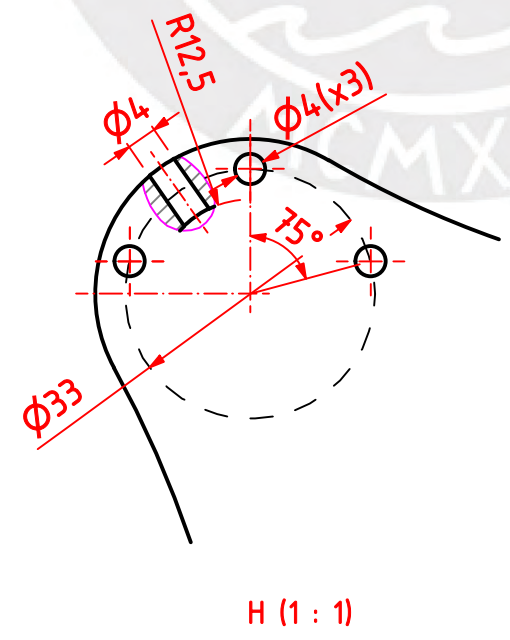
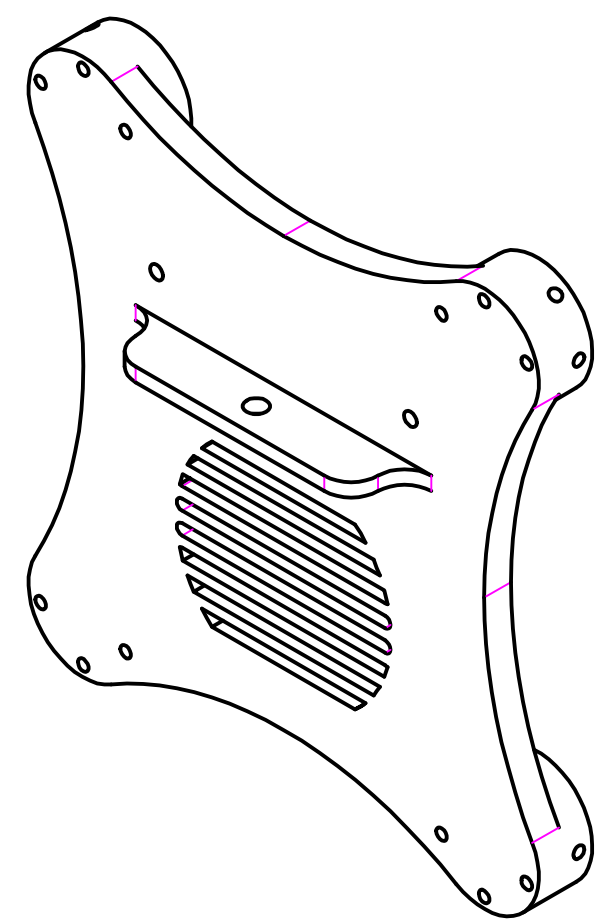
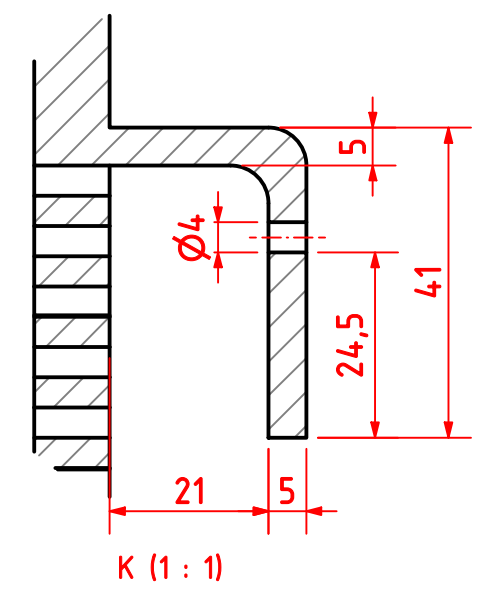
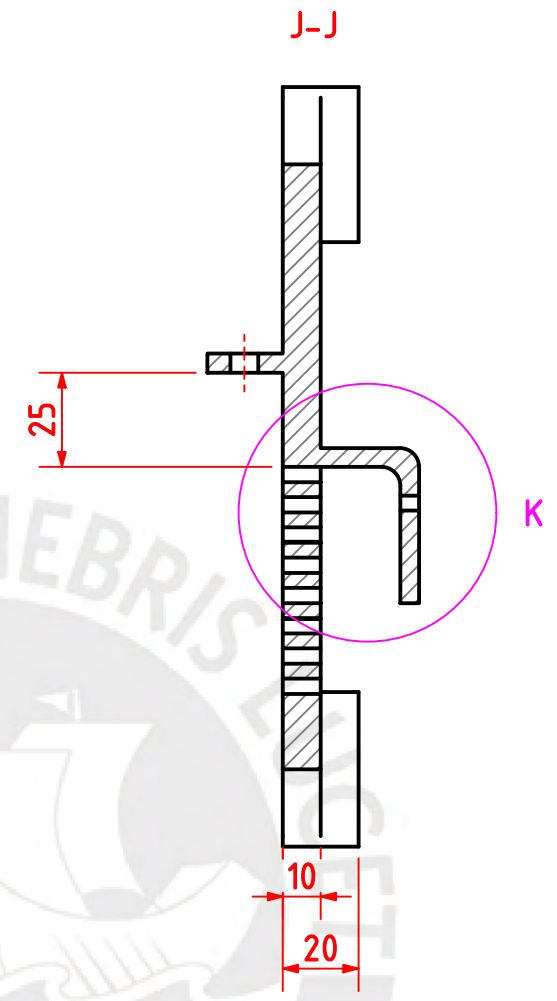
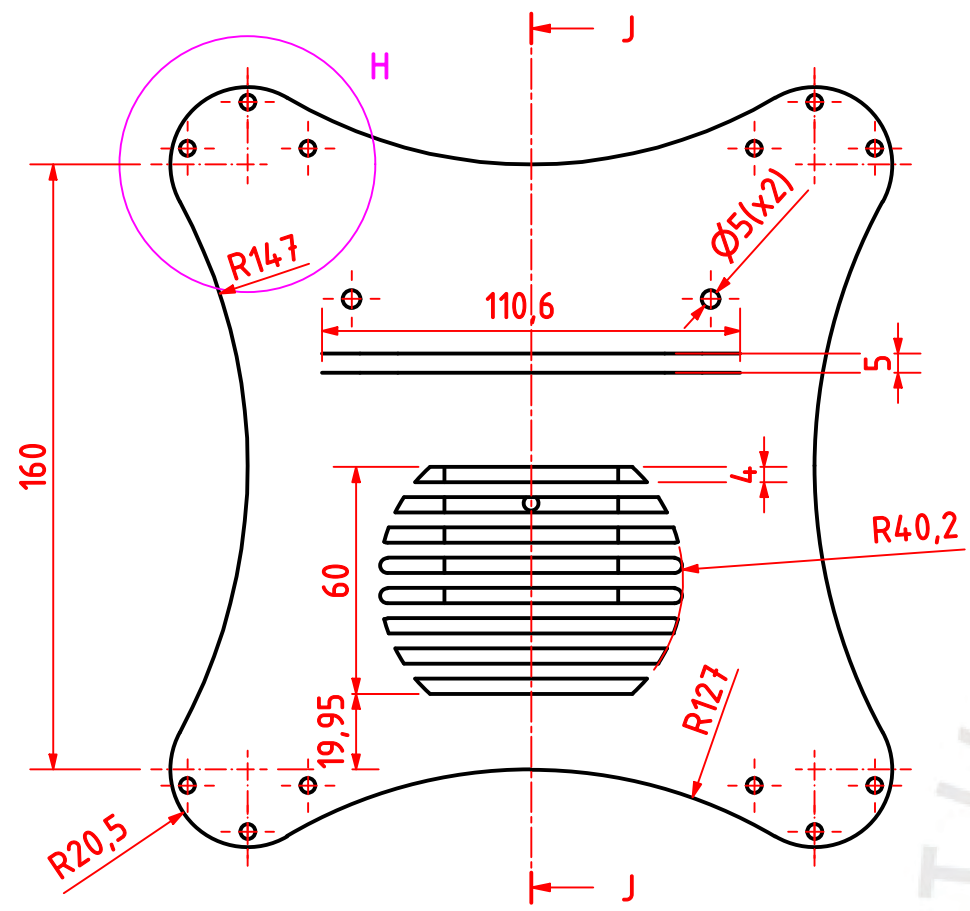
MATERIAL

+/- 0.15 mm

Impresión en PLA

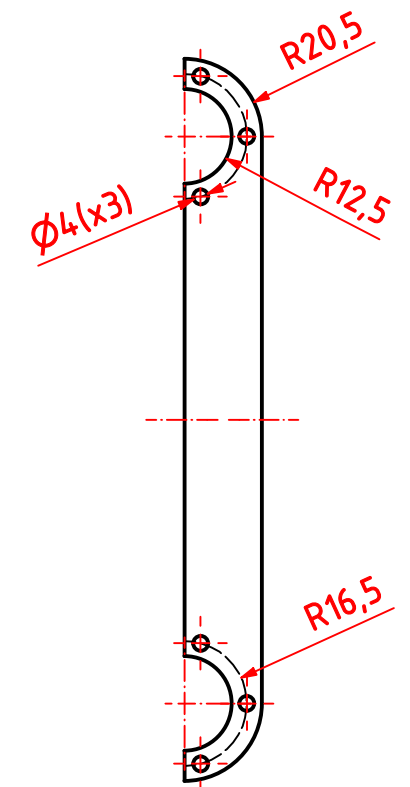
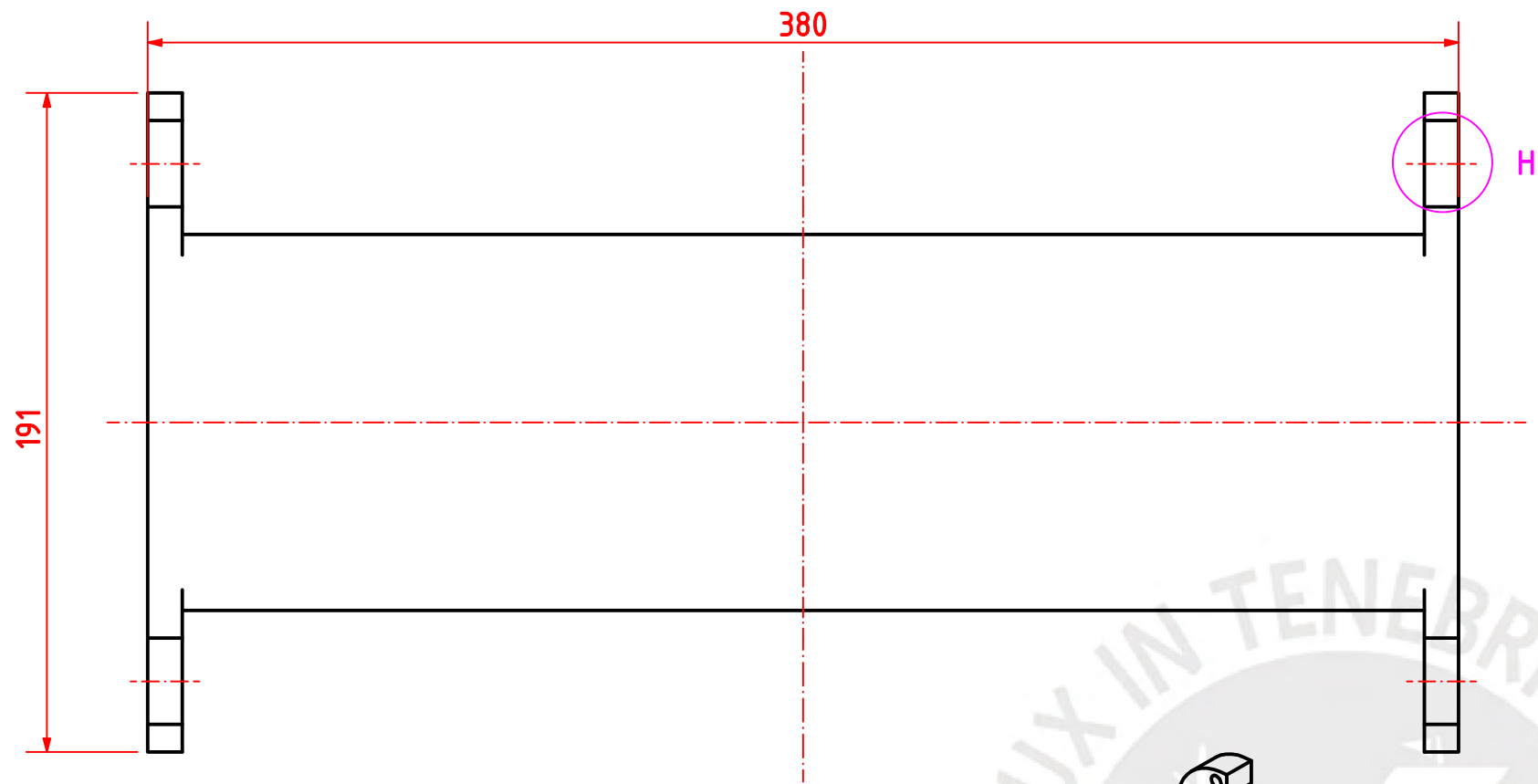
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 010M3	ESCALA
	<b>CUERPO CABEZA SUPERIOR</b>	1:1
20192223	SOLANO VEGA, LUIS JANS	FECHA: 2024.11.11
REVISADO POR:	QUIROZ VELASQUEZ, DIEGO EDUARDO	LÁMINA: D-16-A3



ACABADO SUPERFICIAL TOLERANCIA GENERAL MATERIAL  
 +/- 0.15 mm Impresión en PLA

<b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ</b> FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 010M3	ESCALA
	<b>CUERPO CABEZA</b>	<b>1:2</b>
20192223	SOLANO VEGA, LUIS JANS	FECHA: 2024.11.11
REVISADO POR:	QUIROZ VELASQUEZ, DIEGO EDUARDO	LÁMINA:



H (2 : 1)

ACABADO SUPERFICIAL

TOLERANCIA GENERAL

MATERIAL

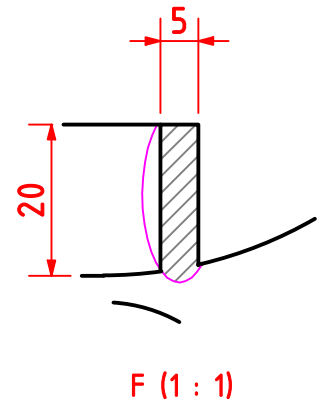
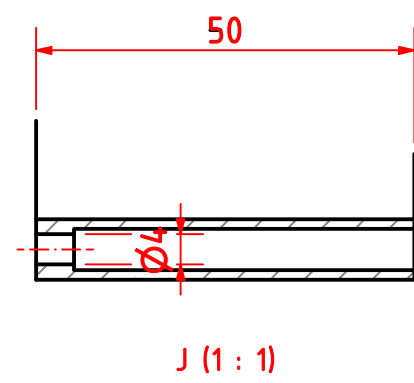
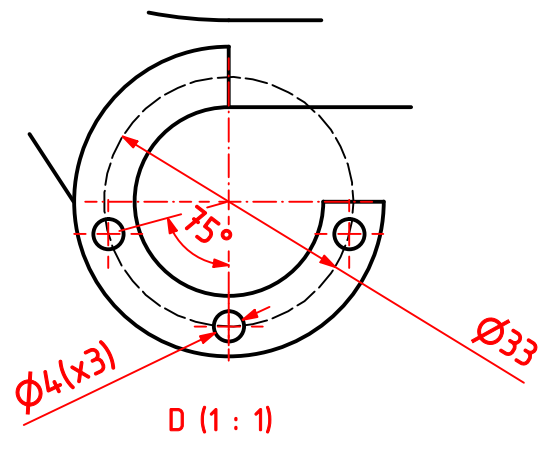
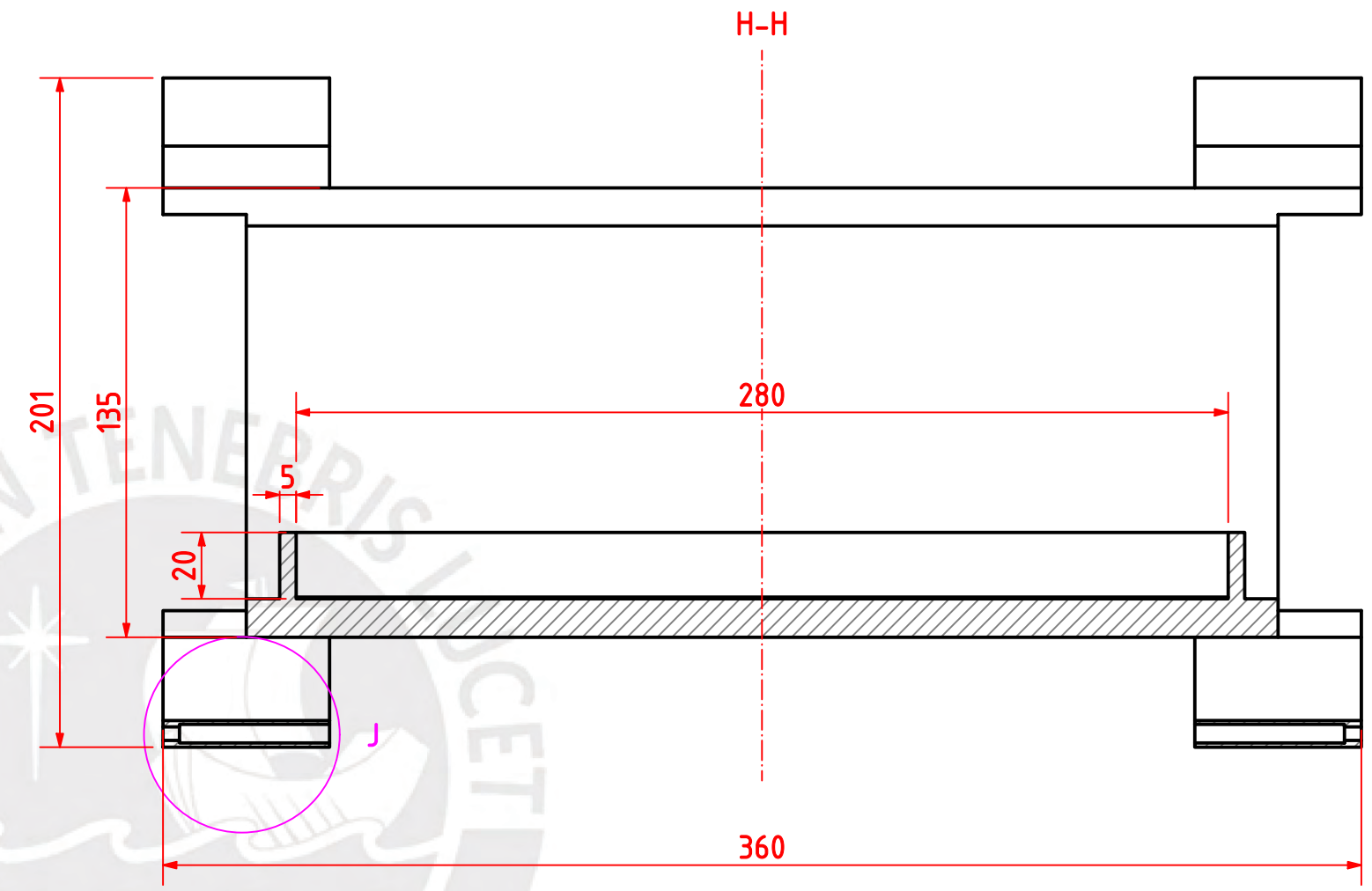
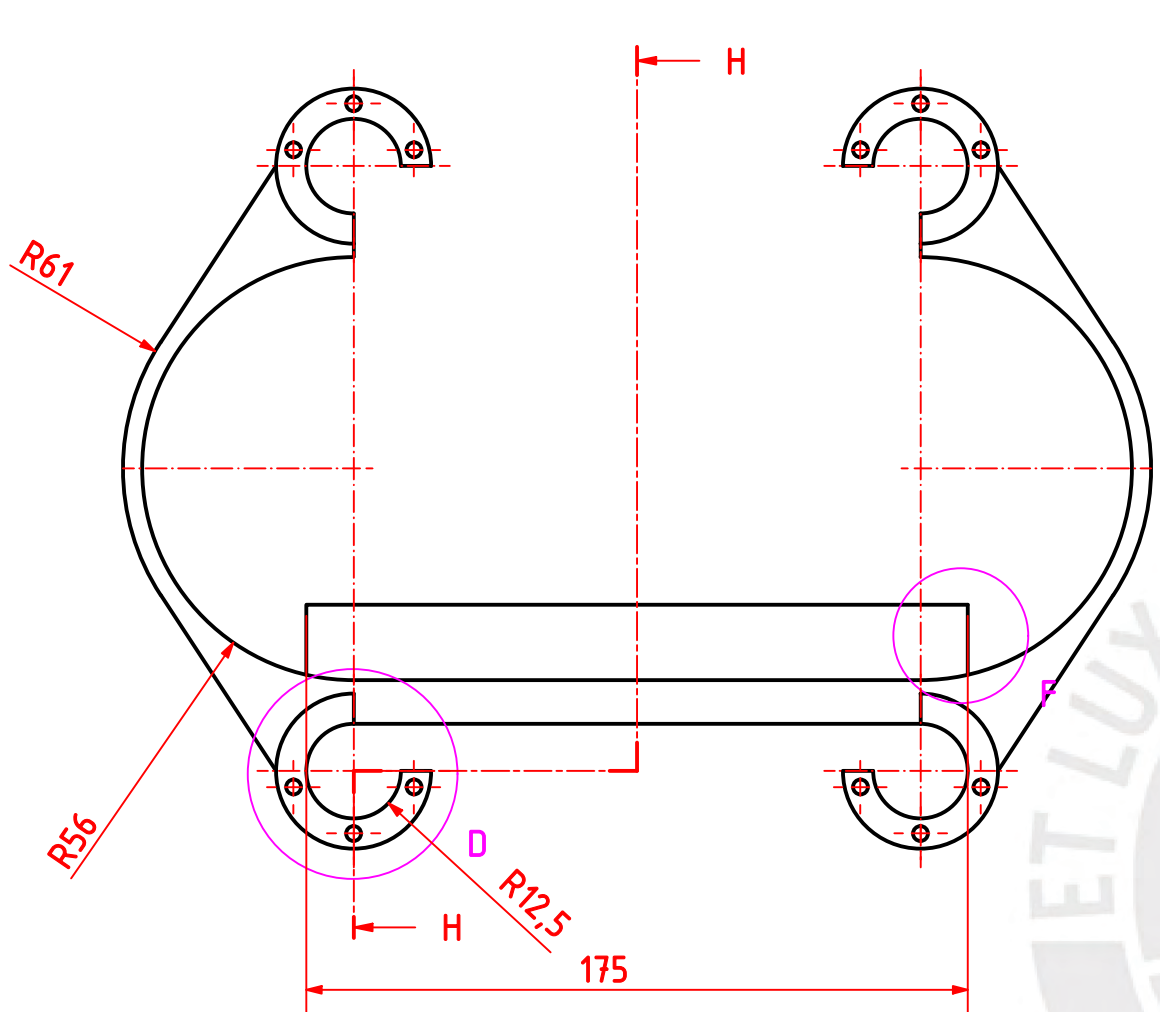
+/- 0.15 mm

Impresión en PLA

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

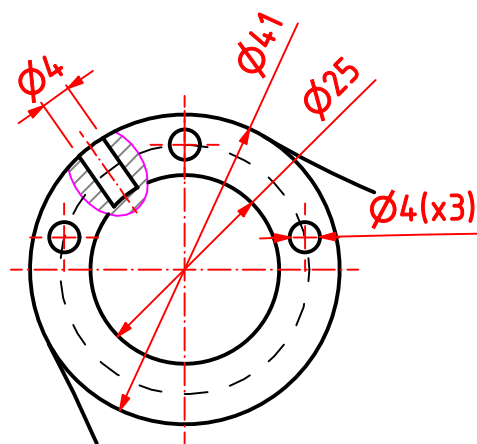
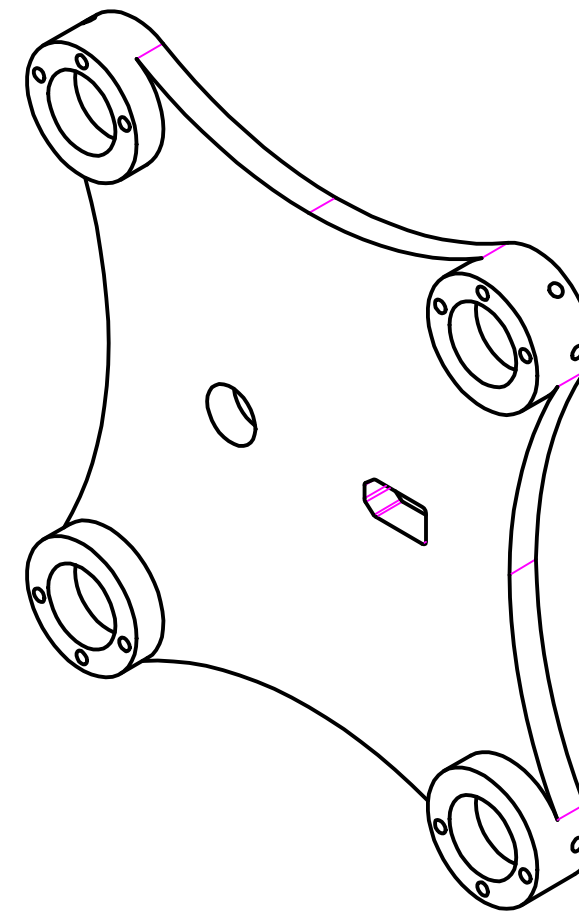
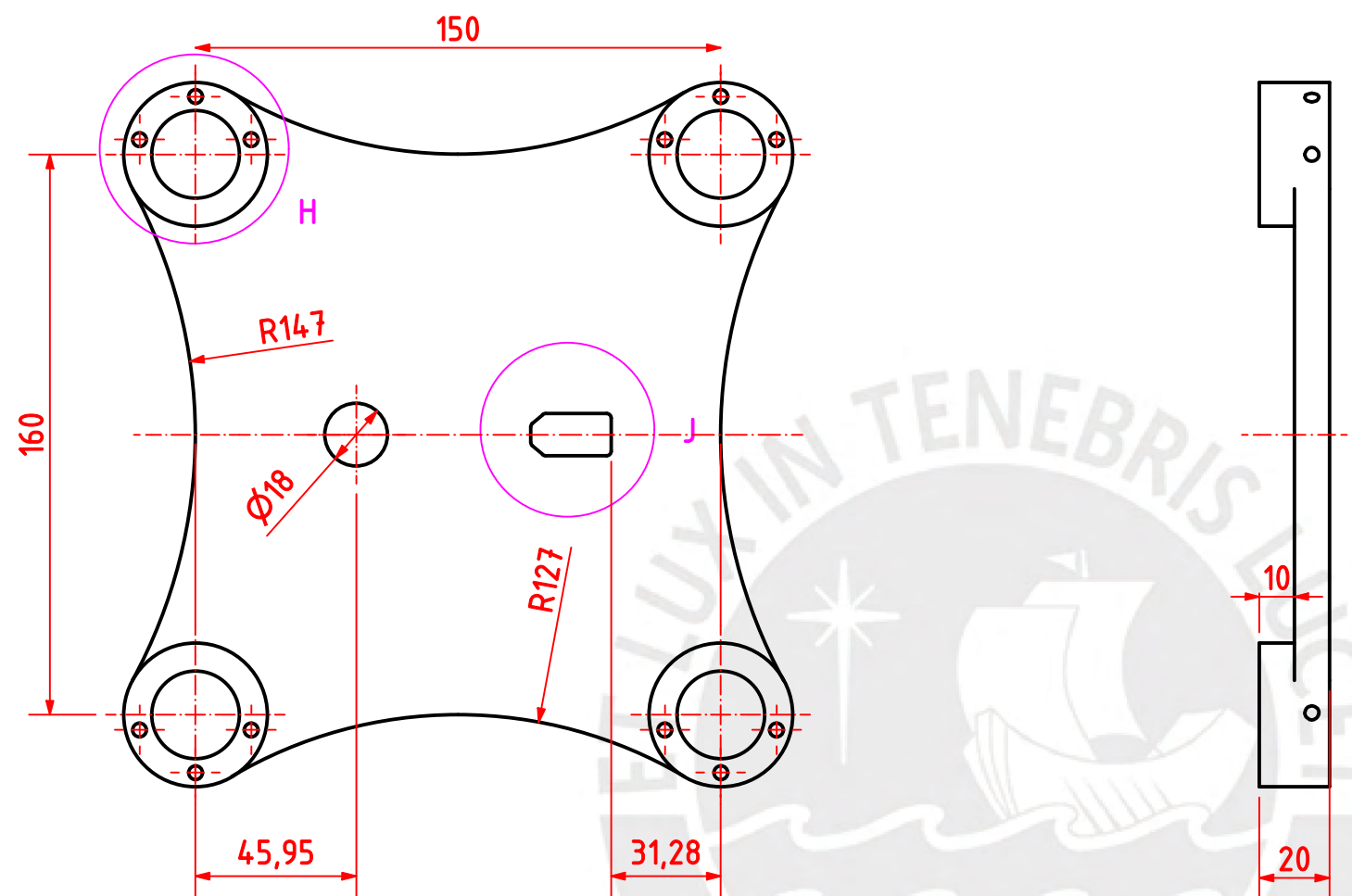
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 010M3	ESCALA
	<b>CUERPO CENTRAL INFERIOR</b>	<b>1:2</b>
20192223	SOLANO VEGA, LUIS JANS	FECHA: 2024.11.11
REVISADO POR:	QUIROZ VELASQUEZ, DIEGO EDUARDO	LÁMINA: D-18-A3



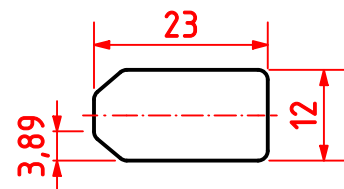


ACABADO SUPERFICIAL TOLERANCIA GENERAL MATERIAL  
 +/- 0.15 mm Impresión en PLA

<b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ</b> FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 010M3	ESCALA <b>1:2</b>
20192223	SOLANO VEGA, LUIS JANS	FECHA: 2024.11.11
REVISADO POR:	QUIROZ VELASQUEZ, DIEGO EDUARDO	LÁMINA: D-20-A3



H (1 : 1)



J (1 : 1)

ACABADO SUPERFICIAL

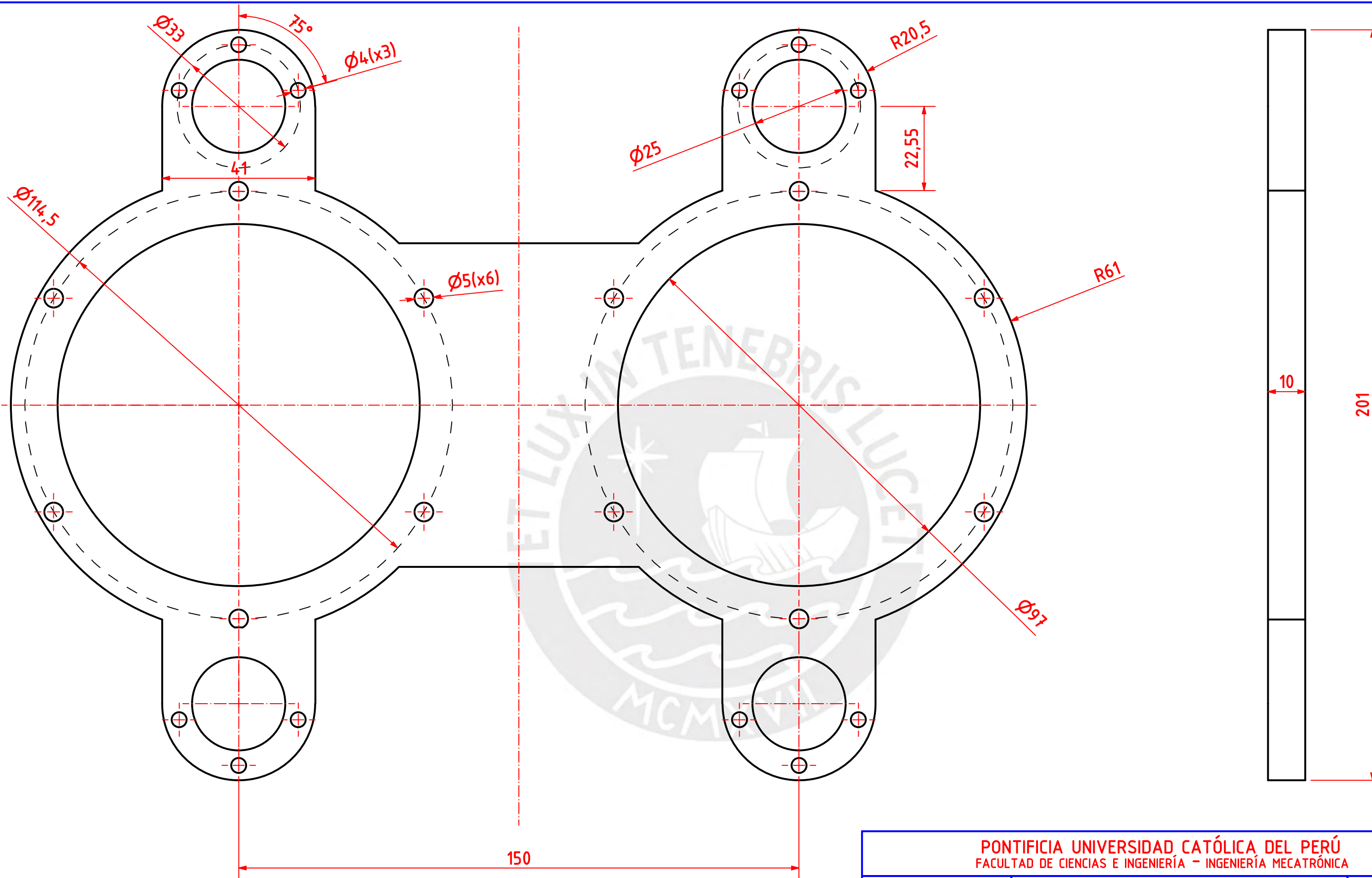
TOLERANCIA GENERAL

MATERIAL

+/- 0.15 mm

Impresión en PLA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 010M3	ESCALA
	<b>CUERPO CABEZA</b>	1:2
20192223	SOLANO VEGA, LUIS JANS	FECHA: 2024.11.11
REVISADO POR:	QUIROZ VELASQUEZ, DIEGO EDUARDO	LÁMINA: D-21-A3



ACABADO SUPERFICIAL

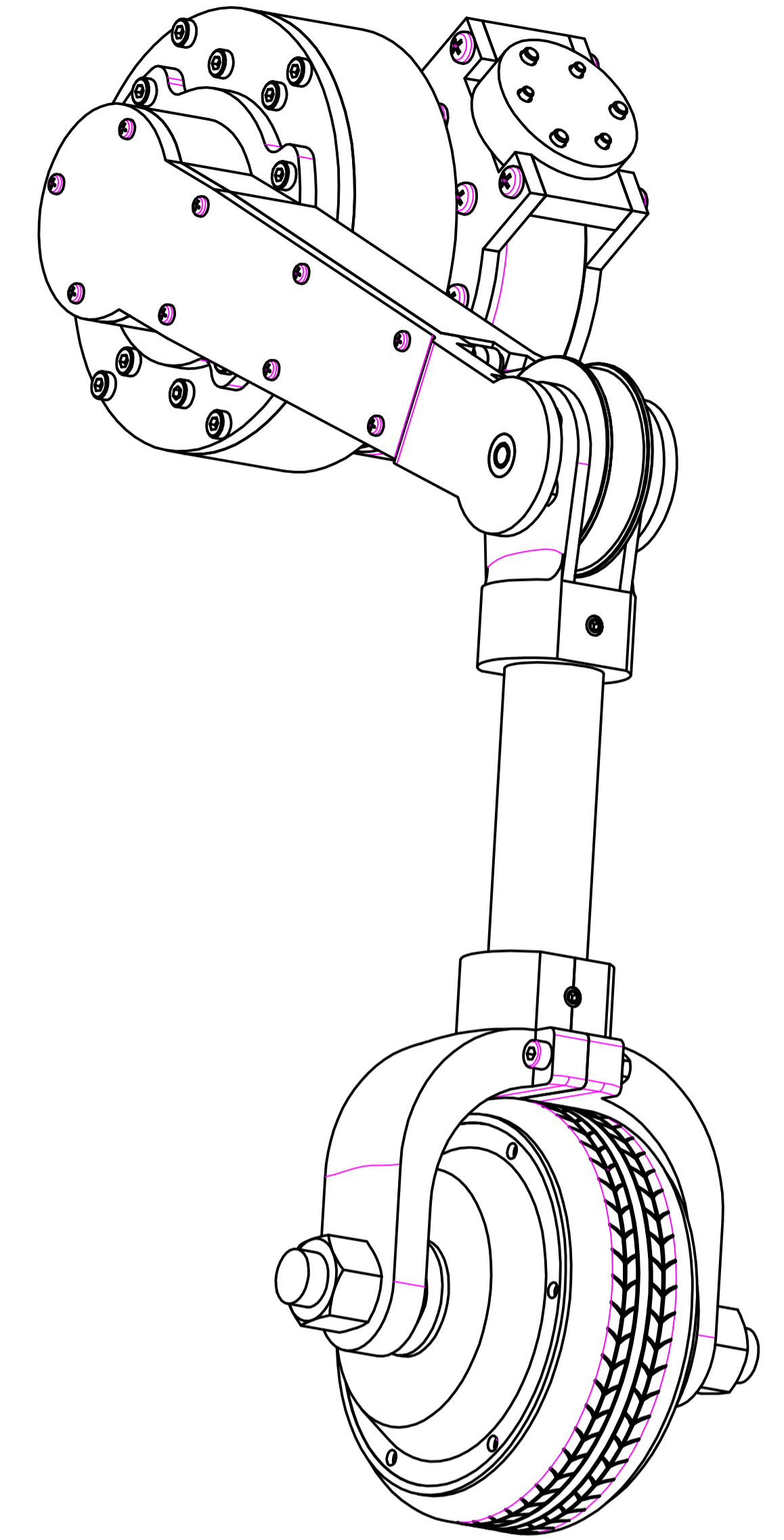
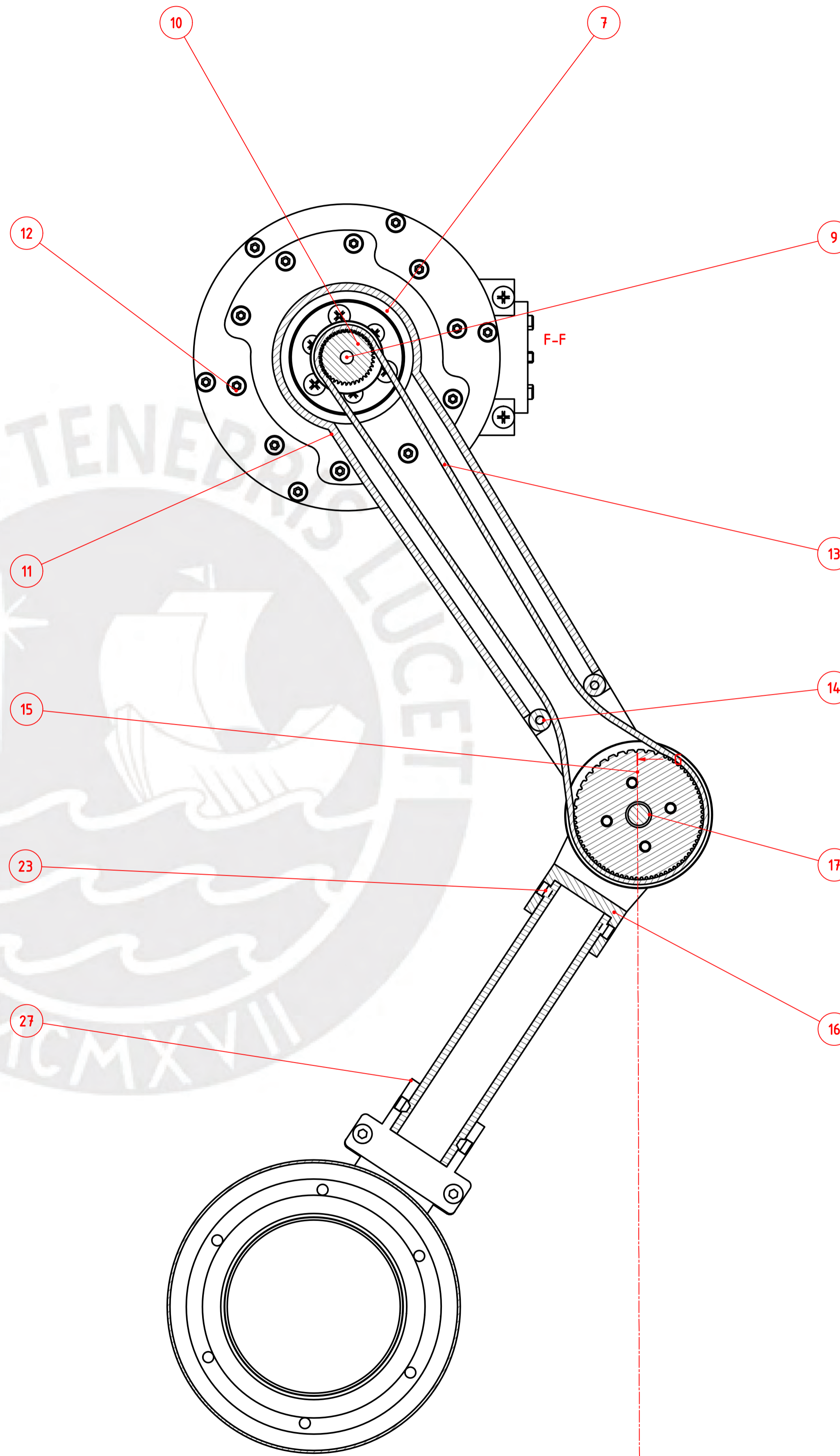
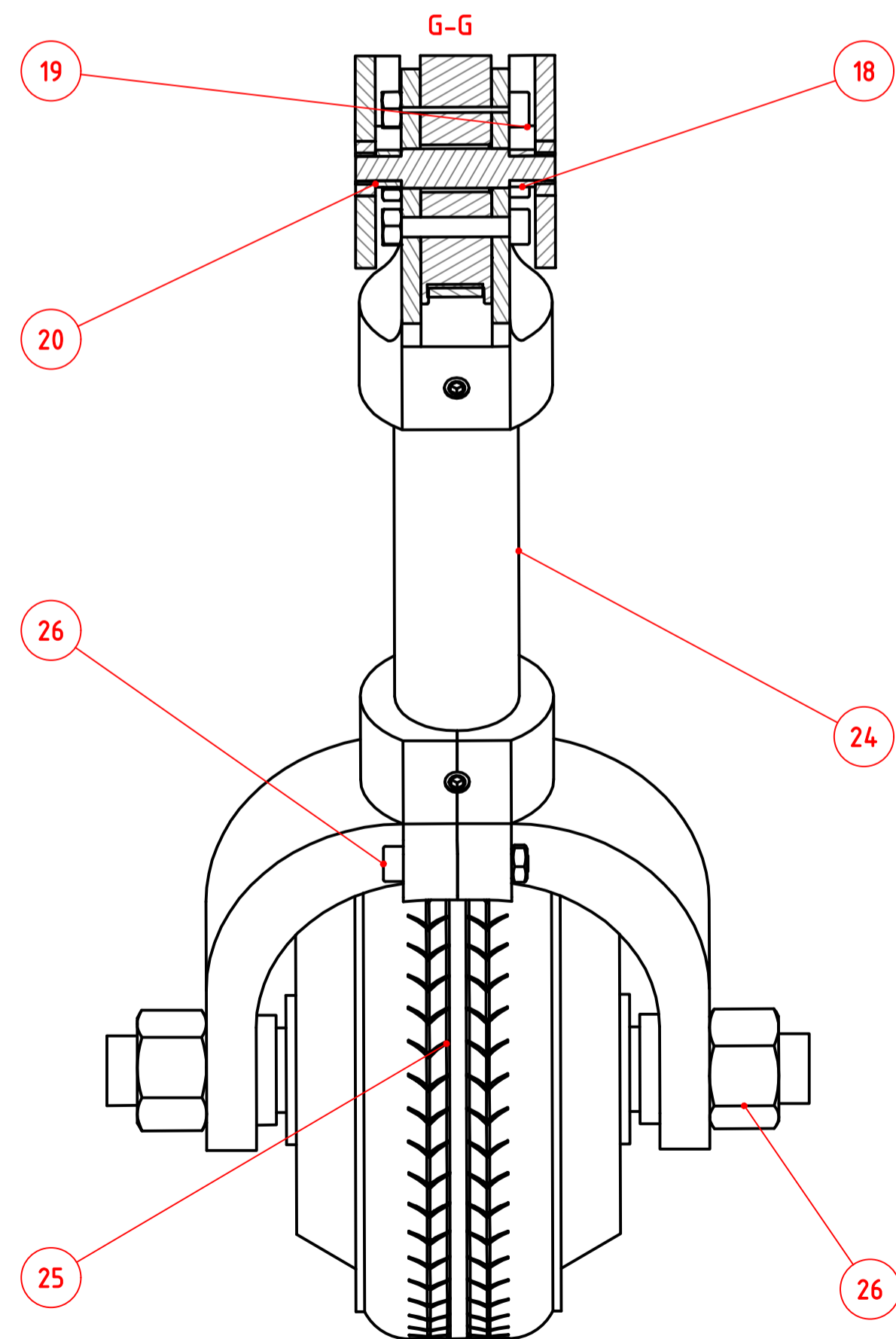
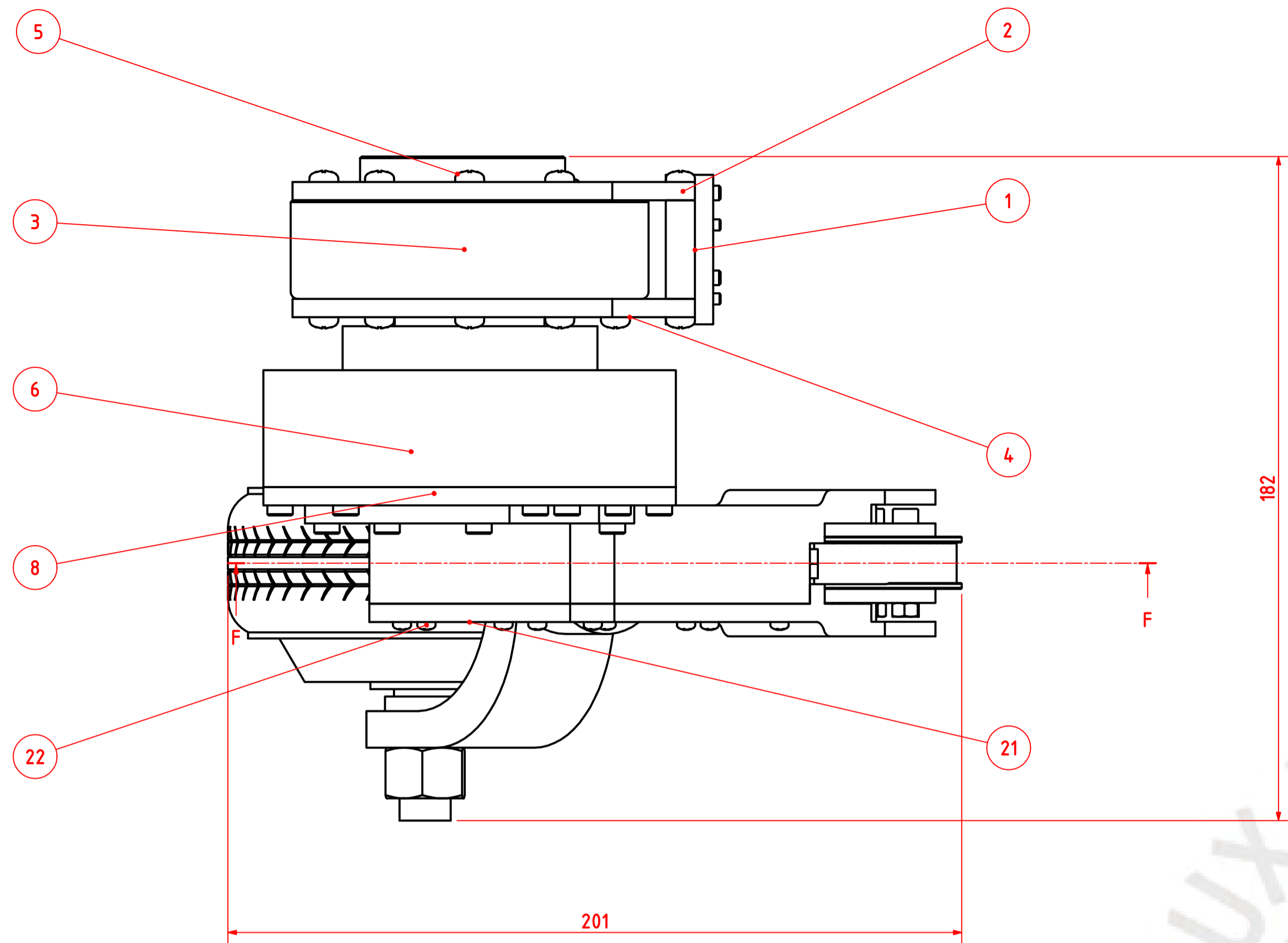
TOLERANCIA GENERAL

MATERIAL

+/- 0.15 mm

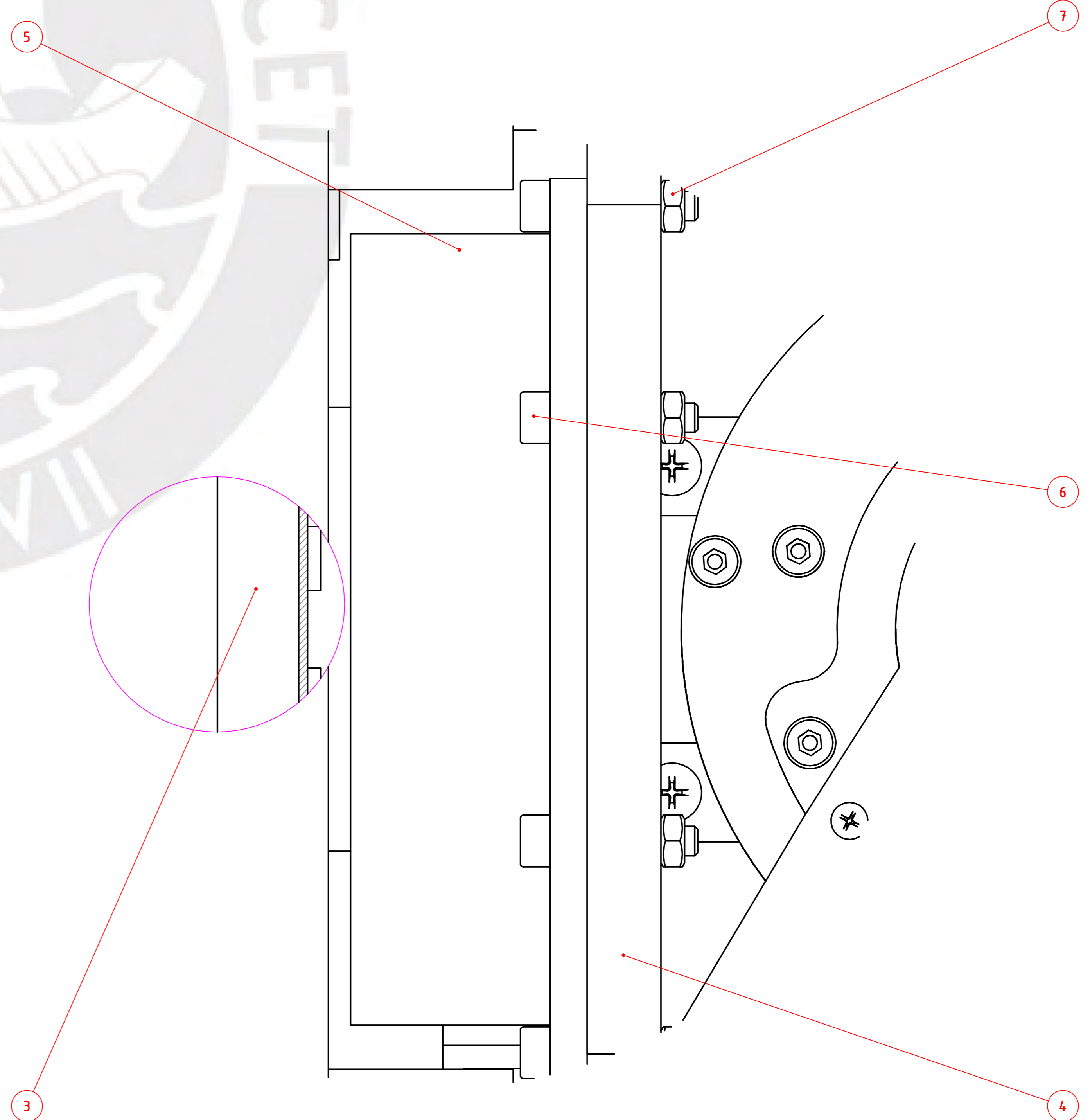
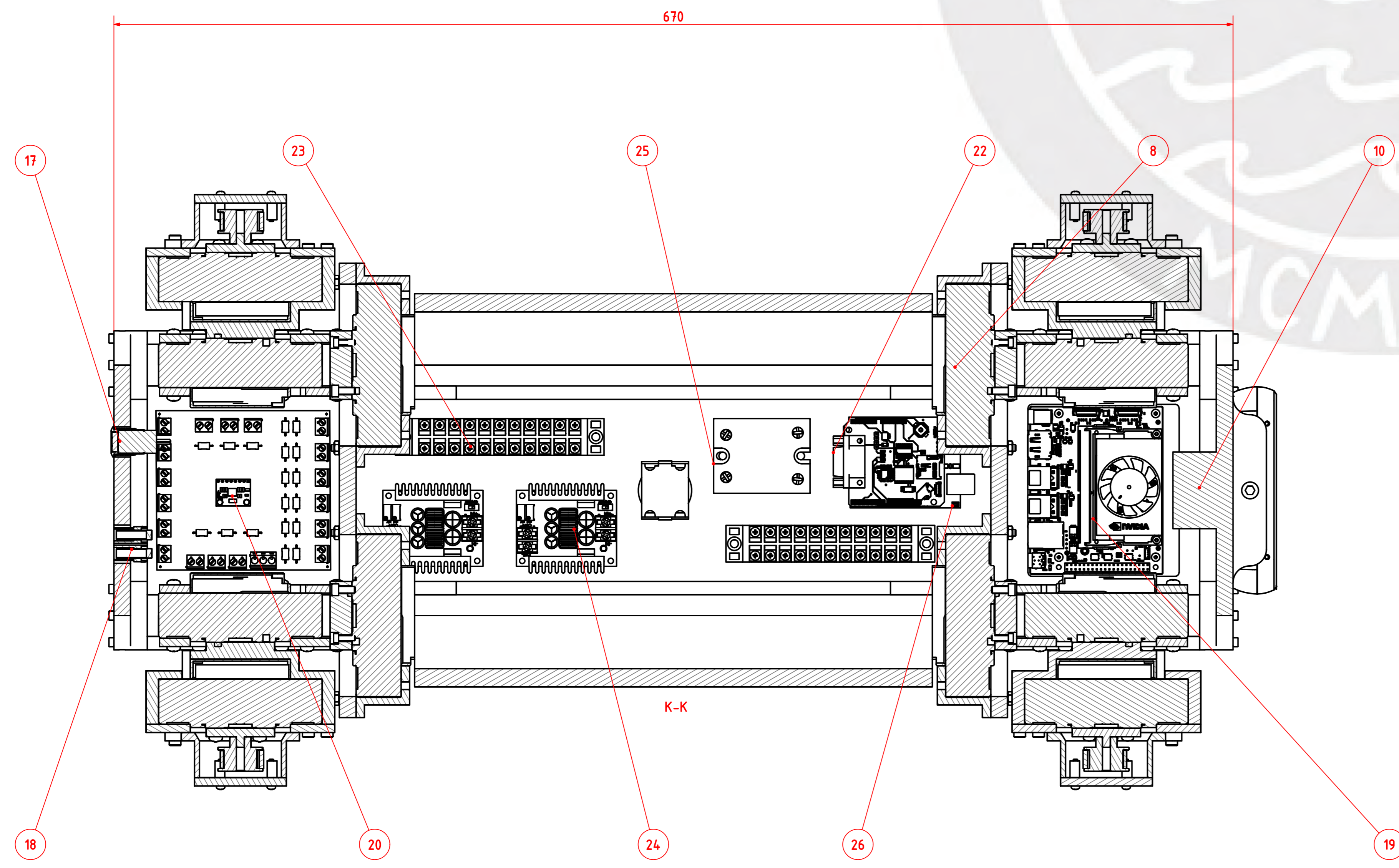
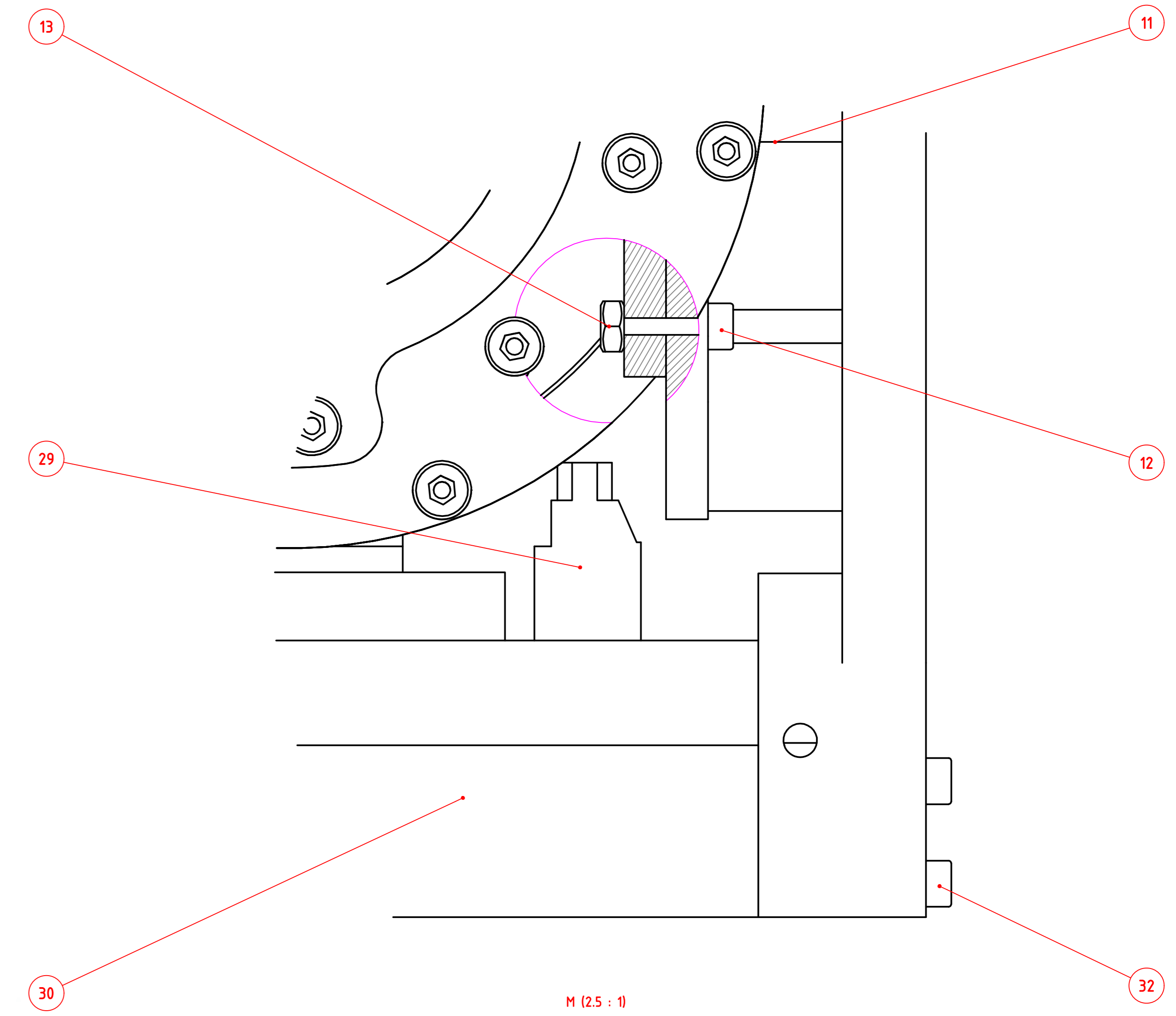
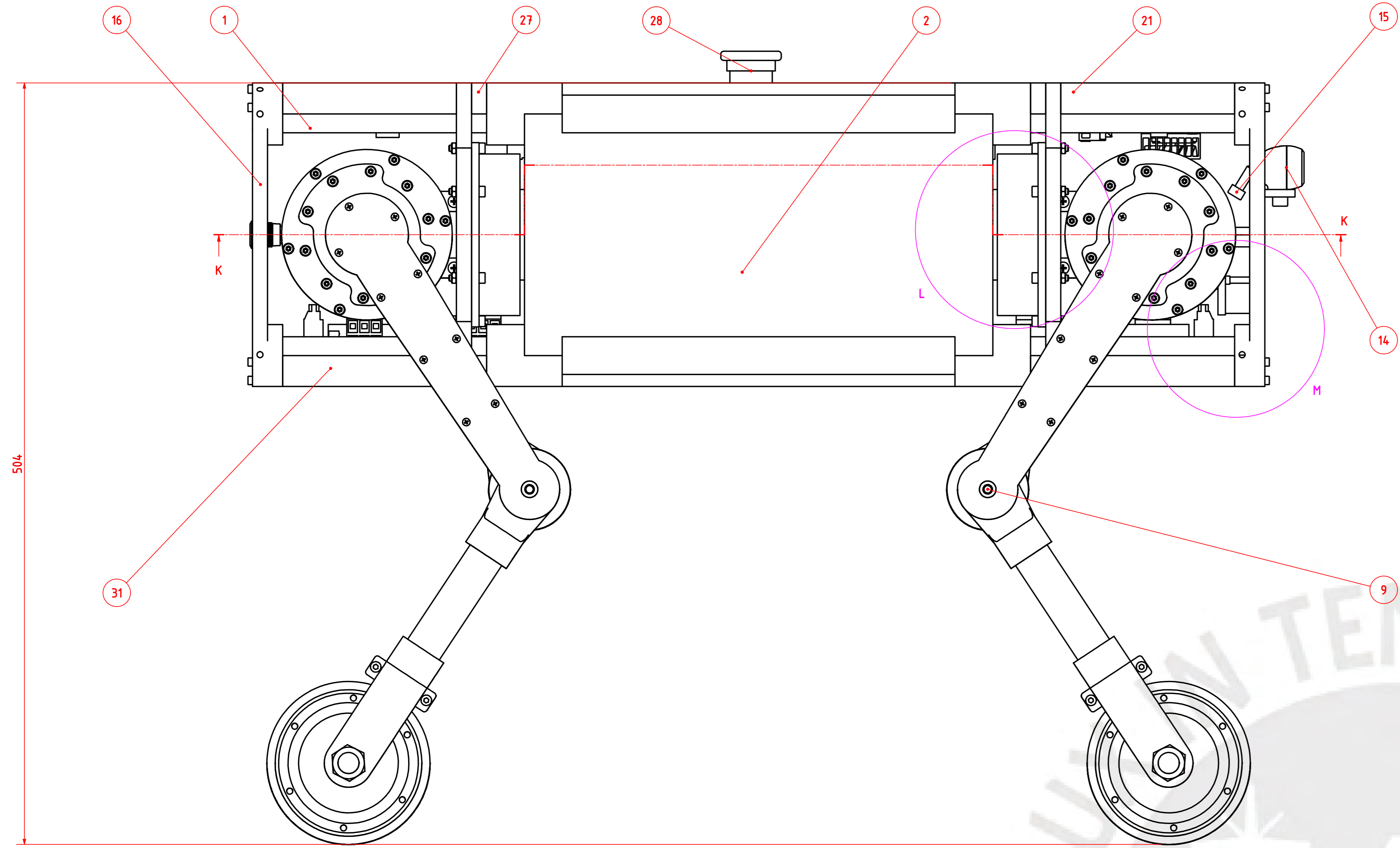
Impresión en PLA

<b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ</b> FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2 - HORARIO 010M3	ESCALA <b>1:1</b>
20192223	SOLANO VEGA, LUIS JANS	FECHA: 2024.11.11
REVISADO POR:	QUIROZ VELASQUEZ, DIEGO EDUARDO	LÁMINA: D-22-A3



28	2	Tuerca M14	ISO 4034
27	2	Soporte de Rueda	D-11-A3
26	2	Perno M4 x 25	ISO 4762
25	1	Rueda - Motor	ZLLG40ASM100
24	1	Barra de carbono	25x23x1000
23	4	Tuerca M5 x 5	ISO 4029
22	3	Perno M3 x 8	ISO 4762
21	1	Carcasa Muslo Externo	D-04-A3
20	2	Rodamiento Rodilla	B022 5x11x4
19	4	Tornillo 4 x 25	AS 1420
18	2	Separador Rodilla	D-07-A3
17	1	Eje Rodilla	D-06-A3
16	1	Soporte de Rodilla	D-08-A3
15	1	GT2 Timing Pulley T40 2	A 6A 3-30H3712
14	4	Rodamiento Correa	NSK 8x3x4
13	1	Correa	A 6R 3-065037
12	6	Tornillo 4 x 16	DIN 6912
11	1	Carcasa Muslo Interno	D-05-A3
10	1	GT2 Timing Pulley T40 1	A 6H 3-13DF03706
9	1	Acople Motor 3	D-03-A3
8	1	Tapa Motor 2	D-12-A3
7	1	RMD-X8-Pro V2	MyActuator
6	2	Acople Motor 2	D-02-A3
5	25	Tornillo 4 x 8 - 4.8 - H	ISO 7045
2	1	Soporte Motor 1 - B	D-10-A3
3	1	RMD-X8-Pro V2	MyActuator
2	2	Soporte Motor 1 - A	D-09-A3
1	1	Acople Motor 1	D-01-A3
IT	CANT	NOMBRE	DESCR.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA			
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TRABAJO DE FIN DE CARRERA 2	010M3	ESCALA
	<b>ENSAMBLE PATA</b>		<b>1.75:2</b>
20192223	SOLANO VEGA, LUIS JANS		FECHA: 2024.11.11
REVISADO POR:	QUIROZ VELASQUEZ, DIEGO EDUARDO		LÁMINA: A1



32	48	Tornillo 3 x 30	ISO 4762
31	1	Cuerpo Central Inferior	D-18-A3
30	2	Cuerpo Cabeza Inferior	D-5-A3
29	2	ODRIVE V3.6	ODRIVE V3.6
28	1	Botón de Emergencia	16mm Mushroom 3 PIN
27	1	Cuerpo Central Superior	D-19-A3
26	1	Arduino Uno	Arduino Uno
25	1	Batle SSR 15A	SSR 6020
24	2	Convertidor Step Down	Teyleten 100W 6A
23	4	Terminal Block	10 A
22	1	Can Bus Shield	Seed Studio CAN-BUS Shield V2.0
21	2	Cuerpo Cabeza Superior	D-16-A3
20	1	PCB de Control	PCBWAT
19	1	SBC	Jetson Orin Nano
18	1	Conector Carga	XT90PB
17	1	Botón Encendido	Hexant A-16-F5
16	1	Cuerpo Trasero	D-21-A3
15	2	Tornillo 6 x 16	ISO 4762
14	1	Cámara	RealSense D455
13	3	Perno M3.5	ISO 4930
12	3	Perno M3 x 12	ISO 4762
11	1	Sensor de Gas	ZCC04B
10	1	Cuerpo Cabeza	D-17-A3
9	4	Pata	E-01-A2
8	4	RWD-X8-Pro V2	MyActuator
7	24	Tuerca M4	ISO 4032
6	24	Perno M4 x 20	ISO 4762
5	4	Carcasa Motor 1	D-16-A3
4	2	Soporte Pata	D-22-A3
3	1	Batería	BitPower Ebike 48V 30AH
2	1	Cuerpo Central	D-20-A3
1	2	Barra de Carbono - Cuerpo	Fibra de Carbono
IT	CANT	NOMBRE	DESCR.

## BIBLIOGRAFÍA

- Adriana Torres-Pardo et al. (2022). *Legged locomotion over irregular terrains: state of the art of human and robot performance*. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/ac92b3>
- Babu, A., Joyeux, S., Schwendner, J., & Grimminger, F. (2010). Effects of Wheel Synchronization for the Hybrid Leg-Wheel Robot Asguard. *i-SAIRAS*.
- Bai, L., Guan, J., Chen, X., Hou, J., & Duan, W. (2018). An optional passive/active transformable wheel-legged mobility concept for search and rescue robots. *Robotics and Autonomous Systems*, *107*, 145-155. <https://doi.org/10.1016/J.ROBOT.2018.06.005>
- Barret James. (2007). *Wireless mine tracking, monitoring and rescue communicating system*. United States Patent Application Publication. <https://patentimages.storage.googleapis.com/c7/97/de/f79a404a913f71/US20080137589A1.pdf>
- Bjelonic, M. (s. f.). *ANYmal on Wheels - Robotic Systems Lab | ETH Zurich*. Recuperado 21 de abril de 2023, de <https://rsl.ethz.ch/robots-media/anymal-wheels.html>
- Bruton, J. (2020). *Mini Robot Dog - The Affordable Quadruped*. [https://www.youtube.com/watch?v=DfBF26DaT-M&list=PLpwJq86vov\\_qzmadB1zj6aVKObH3WbeH](https://www.youtube.com/watch?v=DfBF26DaT-M&list=PLpwJq86vov_qzmadB1zj6aVKObH3WbeH)
- ByungWan Jo, & Rana Asad. (2018). An Internet of Things System for Underground Mine Air Quality Pollutant Prediction Based on Azure Machine Learning. *MDPI*.
- Clavijo, J. (s. f.). *MONITOREO DE GASES EN MINERIA*.
- Crowcon Detection Instruments Limited. (2022). *Gas Monitoring in Mines*.
- Focchi, M., Del, A., Havoutis, I., Featherstone, R., Caldwell, D. G., & Semini, C. (2016). *High-slope Terrain Locomotion for Torque-Controlled Quadruped Robots*. <http://www.springer>.
- Galatzer-Levy, I. R., Ruggles, K. V., & Chen, Z. (2018). Data Science in the Research Domain Criteria Era: Relevance of Machine Learning to the Study of Stress Pathology, Recovery, and Resilience. *Chronic Stress*, *2*. <https://doi.org/10.1177/2470547017747553>
- Gobierno Regional de Arequipa. (s. f.). *Guía de medidas preventivas frente a gases tóxicos en interior de mina y desatado de rocas para la MAPA*. Recuperado 26 de marzo de 2023, de

[https://www.planetgold.org/sites/default/files/Cartilla\\_medidas\\_preventivas\\_gases\\_caida\\_rocas.pdf](https://www.planetgold.org/sites/default/files/Cartilla_medidas_preventivas_gases_caida_rocas.pdf)

Handaoui, M., Dartois, J.-E., Boukhobza, J., Barais, O., & d'Orazio, L. (2020). *ReLeaSER: A Reinforcement Learning Strategy for Optimizing Utilization Of Ephemeral Cloud Resources*. <http://arxiv.org/abs/2009.11208>

Hyun, D. J., Seok, S., Lee, J., & Kim, S. (2014). High speed trot-running: Implementation of a hierarchical controller using proprioceptive impedance control on the MIT Cheetah. *International Journal of Robotics Research*, 33(11), 1417-1445. <https://doi.org/10.1177/0278364914532150>

Issa, A., & Aldair, A. (2022). Learning the Quadruped Robot by Reinforcement Learning (RL). *Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering*.

Ji, Q., Fu, S., Tan, K., Thorapalli Muralidharan, S., Lagrelius, K., Danelia, D., Andrikopoulos, G., Wang, X. V., Wang, L., & Feng, L. (2022). Synthesizing the optimal gait of a quadruped robot with soft actuators using deep reinforcement learning. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 78. <https://doi.org/10.1016/J.RCIM.2022.102382>

Kasprzyczak, L., Trenczek, S., & Cader, M. (2013). Pneumatic robot for monitoring hazardous environments of coal mines. *Solid State Phenomena*, 198, 120-125. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/SSP.198.120>

Kitano, S., Hirose, S., Horigome, A., & Endo, G. (2016). TITAN-XIII: sprawling-type quadruped robot with ability of fast and energy-efficient walking. *ROBOMECH Journal*. <https://sci-hub.ru/https://robomechjournal.springeropen.com/articles/10.1186/s40648-016-0047-1>

Korlapati, N. V. S., Khan, F., Noor, Q., Mirza, S., & Vaddiraju, S. (2022). Review and analysis of pipeline leak detection methods. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2(4). <https://doi.org/10.1016/J.JPSE.2022.100074>

Korovko, A., Slepichev, D., Efitorov, A., Dzhumamuratova, A., Kuznetsov, V., Rabeti, H., Biswas, J., & Pouya, S. (2025). *cuVSLAM: CUDA accelerated visual odometry and mapping*. <https://arxiv.org/pdf/2506.04359>

Machado, J. A. T., & Silva, M. F. (2006). *An Overview of Legged Robots*.

Medina, L., & Calderón, E. (2016). *Inspección técnica de peligros geológicos del pueblo San Juan del Oro*. [http://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//4550\\_informe-tecnico-n0-a6708-inspeccion-tecnica-de-peligros-geologicos-del-pueblo-san-juan-del-oro.pdf](http://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//4550_informe-tecnico-n0-a6708-inspeccion-tecnica-de-peligros-geologicos-del-pueblo-san-juan-del-oro.pdf)

MFE Inspection Solutions. (2019). *INTEGRATED MULTI-GAS DETECTOR FOR UNMANNED AERIAL SYSTEM*. <https://mfe-is.com/wp-content/uploads/2022/09/FLIR-Muve-360-Brochure-Web-2022.pdf>

MINEM. (2022). *Cuadro estadístico de accidentes mortales 2022*. [https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww.minem.gob.pe%2Fminem%2Farchivos%2Ffile%2FMineria%2FESTADISTICA%2FFATALES%2FFax%2520Coyuntural%25202022\\_12.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK](https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww.minem.gob.pe%2Fminem%2Farchivos%2Ffile%2FMineria%2FESTADISTICA%2FFATALES%2FFax%2520Coyuntural%25202022_12.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK)

Ministerio de Trabajo y Promoción de Empleo. (2009). *Norma Básica de Ergonomía y de Procedimiento de Evaluación de Riesgo Disergonómico*. [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/472127/Anexo\\_1-Norma\\_B%3%A1sica\\_de\\_Ergonom%3%ADa....pdf?v=1578090278](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/472127/Anexo_1-Norma_B%3%A1sica_de_Ergonom%3%ADa....pdf?v=1578090278)

Millane, A., Oleynikova, H., Wirbel, E., Steiner, R., Ramasamy, V., Tingdahl, D., & Siegwart, R. (2023). *nvblox: GPU-Accelerated Incremental Signed Distance Field Mapping*.

Nav2 — Nav2 1.0.0 documentation. (2025). <https://docs.nav2.org/>

Niu, W. (2011). Hazardous Gas Detecting Method Applied in Coal Mine Detection Robot. *Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5721182>

Park, H.-W., & Kim, S. (2014). *The MIT Cheetah, an Electrically-Powered Quadrupedal Robot for High-speed Running*. 32(4), 323328.

RAE SYSTEMS SPAIN. (s. f.). *ToxiRAE Pro - RAE Spain*. Recuperado 26 de marzo de 2023, de <https://www.raespain.com/es/productos/catalogo-de-monitores-de-gas-rae-systems-spain/detectores-personals-gas/toxirae-pro.html>

Rudin, N., Hoeller, D., Reist, P., & Hutter, M. (2021). *Learning to Walk in Minutes Using Massively Parallel Deep Reinforcement Learning*.

- Schulman, J., Wolski, F., Dhariwal, P., Radford, A., & Klimov, O. (2017). *Proximal Policy Optimization Algorithms*. <https://arxiv.org/abs/1707.06347v2>
- sentdex. (2022). *Robot Dog learns to walk - Bittle Reinforcement Learning p.3* . <https://www.youtube.com/watch?v=A0tPe7-R8z0&t=839s>
- SMP Robotics. (2022). *Gas and Oil leak inspection robot*.
- Sun, T., Xiang, X., Su, W., Wu, H., & Song, Y. (2017). A transformable wheel-legged mobile robot: Design, analysis and experiment. *Robotics and Autonomous Systems*, 98, 30-41. <https://doi.org/10.1016/J.ROBOT.2017.09.008>
- Sutton, R., & Barto, A. (2015). *Reinforcement Learning: An Introduction* (Segunda). MIT Press. <https://web.stanford.edu/class/psych209/Readings/SuttonBartoIPRLBook2ndEd.pdf>
- Vijayan, V. (2020). *Deep Reinforcement Learning*. <https://medium.com/@vishnuvijayanpv/deep-reinforcement-learning-artificial-intelligence-machine-learning-and-deep-learning-e52cb5974420>
- Wang, P., Song, C., Li, X., & Luo, P. (2020). Gait planning and control of quadruped crawling robot on a slope. *Industrial Robot*, 47(1), 12-22. <https://doi.org/10.1108/IR-05-2019-0115>
- Yu, C., Zhou, L., Qian, H., & Xu, Y. (2018). Posture Correction of Quadruped Robot for Adaptive Slope Walking. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2018*, 1220-1225. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2018.8665093>
- Williams, G., Drews, P., Goldfain, B., Rehg, J. M., & Theodorou, E. A. (2016). Aggressive driving with model predictive path integral control. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2016-June*, 1433–1440. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2016.7487277>
- Zhong, Y., Wang, R., Feng, H., & Chen, Y. (2019). Analysis and research of quadruped robot's legs: A comprehensive review. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. <https://doi.org/10.1177/1729881419844148>