

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**DISEÑO DE UN ROBOT QUE OPERE EN INTERRUPTORES DE  
POTENCIA DE MEDIA TENSIÓN DE 10 KV O 22.9 KV**

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

**AUTOR:**

France Steve Villarreal Sánchez

**ASESOR:**

Julio César Tafur Sotelo

Lima, marzo, 2025


## Informe de Similitud

Yo, Julio César Tafur Sotelo, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada DISEÑO DE UN ROBOT QUE OPERE EN INTERRUPTORES DE POTENCIA DE MEDIA TENSIÓN DE 10 KV o 22.9 KV, de el autor France Villarreal Sánchez, 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 20/03/2025.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de investigación, 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, 25 de marzo del 2025.

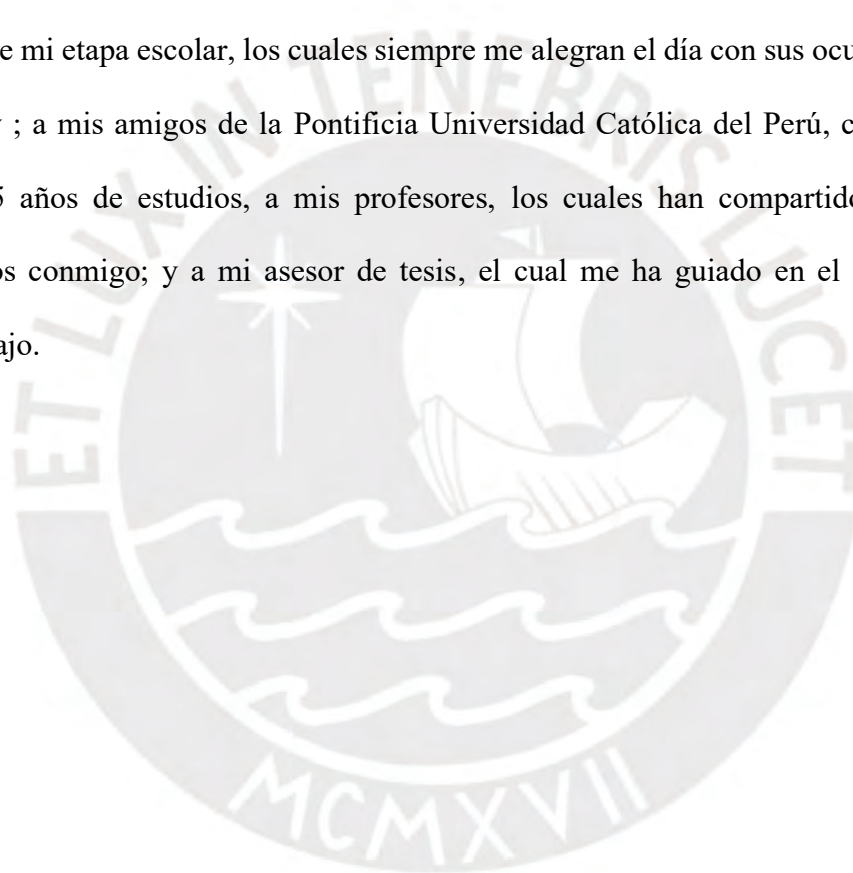
Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>Tafur Sotelo, Julio Cesar</u>	
DNI:06470028 Número del documento de identidad	Firma
ORCID: 0000-0003-3415-1969	

## RESUMEN

Es bien sabido que el contacto con elevados niveles de tensión eléctrica representa un peligro para el ser humano, incluso a pesar de tener los equipos de protección personal (EPPS) necesarios para la realización de una tarea de este tipo. Específicamente, el presente documento centra la problemática en la manipulación de equipos conocidos como interruptores de potencia de media tensión, siendo estos dispositivos que se emplean en las subestaciones eléctricas del Perú para permitir o no el paso de la energía eléctrica en media tensión (1 - 35 kV). Es importante mencionar que la simple presencia de estos equipos representa un riesgo para los operarios que los manipulan; además de estos encontrarse en unas grandes cantidades en un mismo lugar geográfico. Entonces, este trabajo de tesis tiene como objetivo desarrollar un robot que pueda manipular los interruptores de potencia de media tensión, reemplazando el contacto directo realizado por el ser humano; garantizando así la seguridad de este. El diseño final consta de un sistema mecatrónico conformado principalmente por una estructura de v-slots (la cual se desplaza gracias al movimiento de ruedas omnidireccionales controladas por motores DC), una cámara para monitorear el procedimiento en tiempo real y motores paso a paso, los cuales posicionarán un solenoide para que este último accione el botón deseado según lo indique una tarea en específico. Finalmente, cabe mencionar que este sistema será controlado y monitoreado a distancia a través de una tablet.

## AGRADECIMIENTOS

Quisiera dedicar estas líneas para agradecer a todas aquellas personas que me han motivado y apoyado a siempre seguir adelante, a pesar de los problemas que puedan surgir en un momento determinado en la vida. Principalmente agradezco a mis padres y mis familiares en general, quienes me han apoyado en el cumplimiento de todas mis metas desde que tengo uso de razón, siendo mi motivación y ejemplo a seguir en mi desarrollo como persona y como profesional; a mis amigos de mi etapa escolar, los cuales siempre me alegran el día con sus ocurrencias hasta el día de hoy ; a mis amigos de la Pontificia Universidad Católica del Perú, con los que he compartido 5 años de estudios, a mis profesores, los cuales han compartido sus grandes conocimientos conmigo; y a mi asesor de tesis, el cual me ha guiado en el desarrollo del presente trabajo.



## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS .....	9
GLOSARIO DE ABREVIATURAS .....	14
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES AL DISEÑO.....	3
1. 1. Problemática.....	3
1.2. Propuesta de solución.....	8
1.3. Objetivos .....	9
1.3.1 Objetivo general .....	9
1.3.2. Objetivos específicos.....	10
1.4. Alcance.....	10
1.5. Metodología .....	11
CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE.....	13
2.1. Sistema robótico de dos brazos diseñado para operaciones de alto voltaje .....	13
2.2. Robot manipulador para instalación y retiro de esferas de aviso para las aeronaves en líneas de transmisión aéreas .....	14
2.3. Manipulador robótico autónomo para el mantenimiento preventivo e inspección de líneas de transmisión de alto voltaje .....	15
2.4. Sistema manipulador robótico diseñado para el trabajo en subestaciones eléctricas....	16
2.5. Robot autónomo para trabajos en subestación de 110 kV .....	17
CAPÍTULO 3 DISEÑO CONCEPTUAL.....	19
3.1. Lista de requerimientos del sistema .....	19
3.2. Definición de entradas y salidas.....	20
3.3. Estructura de funciones .....	22
3.4. Matriz morfológica.....	29
3.5. Concepto de solución óptimo.....	33
CAPÍTULO 4 DISEÑO MECATRÓNICO.....	37
4.1. Descripción del sistema integral .....	37
4.2. DISEÑO MECÁNICO .....	38
4.2.1. Modelado 3D.....	38
4.2.2. Selección de materiales .....	46

4.2.3. Cálculos mecánicos .....	59
4.3. DISEÑO ELÉCTRICO / ELECTRÓNICO .....	88
4.3.1. Selección de actuadores del subsistema manipulador .....	88
4.3.2. Selección de sensores del subsistema manipulador.....	92
4.3.3. Selección del controlador .....	95
4.3.4. Selección de fuente de energía del subsistema manipulador.....	96
4.3.4. Diagrama del circuito eléctrico/electrónico - Subsistema manipulador.....	103
4.3.5. Selección de componentes electrónicos del subsistema estación de carga .....	114
4.3.6. Circuito esquemático subsistema estación de carga .....	117
4.4. DISEÑO DE LA INTERFAZ .....	118
4.4.1. Selección de tablet industrial.....	118
4.4.2. Selección del control remoto .....	120
4.4.3. Disposición de botones.....	121
4.5. DISEÑO DE SOFTWARE .....	122
4.6. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL .....	128
4.6.1. Variables por monitorear y controlar.....	128
4.6.2. Estrategia de control .....	129
CAPÍTULO 5 PLANOS Y PRESUPUESTO .....	130
5.1. Subsistema manipulador .....	130
5.1.1. Costo de materiales.....	130
5.1.2. Costo de procesos de fabricación empleados .....	134
5.1.3. Costo de componentes electrónicos.....	135
5.2. Subsistema estación de carga .....	136
5.2.1. Costo de materiales.....	136
5.2.2. Costo de componentes electrónicos.....	137
5.3. Subsistema control remoto .....	137
5.4. Costo total del sistema.....	137
5.5. Planos mecánicos del sistema .....	138
CONCLUSIONES .....	140
RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO .....	141
BIBLIOGRAFÍA.....	142
ANEXOS .....	146
ANEXO A: Lista de requerimientos .....	146

ANEXO B: Matriz Morfológica .....	155
ANEXO C: Conceptos de solución.....	163
ANEXO D: Evaluación Técnico - Económica.....	176
ANEXO E: Código Python empleado para pruebas realizadas de detección de color .....	183
ANEXO F: Planos mecánicos y diagramas electrónicos.....	201



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Reporte de accidentes relacionados al contacto con electricidad. Elaboración propia .....	7
Tabla 3.1. Conceptos de solución - Subsistema de manipulación. Elaboración propia.....	29
Tabla 3.2. Conceptos de solución - Subsistema control remoto. Elaboración propia .....	31
Tabla 3.3. Conceptos de solución - Subsistema de estación de carga. Elaboración propia....	32
Tabla 4.1. Selección de la cámara USB. Elaboración propia. ....	48
Tabla 4.2. Propiedades mecánicas del PLA. Farah, Shady, et al, 2016. ....	51
Tabla 4.3. Especificaciones de las uniones presentes en la estructura. Elaboración propia. ...	54
Tabla 4.4. Selección del solenoide. Elaboración propia. ....	55
Tabla 4.5. Tabla comparativa para selección de ruedas mecanum. Elaboración propia. ....	56
Tabla 4.6. Especificaciones principales de la cadena. Obtenido de Promart Homecenter Perú. ....	57
Tabla 4.7. Especificaciones principales de la unión en 90°. Obtenido de Promart Homecenter Perú. ....	58
Tabla 4.8. Especificaciones de la platina. Elaboración propia. ....	59
Tabla 4.9. Masas de los elementos más significativos que conforman la base móvil. Elaboración propia. ....	59
Tabla 4.10. Masas de los elementos que conforman la estructura principal. Elaboración propia. ....	60
Tabla 4.11. Masas de los elementos que conforman la traslación del solenoide. Elaboración propia. ....	61
Tabla 4.12. Masas de los elementos que conforman el soporte de la cámara. Elaboración propia. ....	61
Tabla 4.13. Resumen de masas totales del subsistema manipulador. Elaboración propia. ....	62
Tabla 4.14. Selección de los motores DC de la base móvil. Elaboración propia. ....	80
Tabla 4.15. Selección de los motores paso a paso. Elaboración propia.....	86
Tabla 4.16. Selección del relay para controlar el accionamiento del solenoide. Elaboración propia. ....	88
Tabla 4.17. Selección de driver para motores paso a paso. Elaboración propia.....	89
Tabla 4.18. Selección del driver para motores DC. Elaboración propia.....	90
Tabla 4.19. Comparación de módulos de comunicación USB a TTL. Elaboración propia....	92
Tabla 4.20. Selección del sensor de fin de carrera. Elaboración propia. ....	92

Tabla 4.21. Selección del transmisor - receptor de video. Elaboración propia. ....	93
Tabla 4.22. Selección del controlador para el subsistema manipulador. Elaboración propia. ....	95
Tabla 4.23. Cálculo de potencia necesaria - Subsistema manipulador. Elaboración propia....	96
Tabla 4.24. Selección de fuente de energía del subsistema manipulador. Elaboración propia. ....	97
Tabla 4.25 Selección del regulador 12 - 5 VDC. Elaboración propia. ....	98
Tabla 4.26. Selección del convertidor 12 - 24 VDC. Elaboración propia. ....	99
Tabla 4.27. Selección del sensor de nivel de batería. Elaboración propia. ....	100
Tabla 4.28. Selección del interruptor general - Subsistema manipulador. Elaboración propia. ....	101
Tabla 4.29. Selección del módulo de carga para la batería. Elaboración propia. ....	102
Tabla 4.30. Conexiones Roboclaw y Raspberry Pi 4B. Elaboración propia. ....	104
Tabla 4.31. Conexiones M1 y M2 con Raspberry Pi 4B. Elaboración propia.....	104
Tabla 4.32. Conexiones M1, M2 y Roboclaw 2x15 A - 1. Elaboración propia. ....	104
Tabla 4.33. Conexiones Roboclaw 2 y Raspberry Pi 4B. Elaboración propia. ....	105
Tabla 4.34. Conexiones M3 y M4 con Raspberry Pi 4B. Elaboración propia.....	105
Tabla 4.35. Conexiones M3, M4 y Roboclaw 2x15 A - 2. Elaboración propia. ....	106
Tabla 4.36. Conexiones NEMA 23 - 1 y TB6560 - 1. Elaboración propia. ....	107
Tabla 4.37. Conexiones TB6560 - 1 y Raspberry Pi 4B. Elaboración propia. ....	107
Tabla 4.38. Conexiones NEMA 23 - 2 y TB6560 - 2. Elaboración propia. ....	108
Tabla 4.39. Conexiones TB6560 - 2 y Raspberry Pi 4B. Elaboración propia. ....	108
Tabla 4.40. Conexiones del Limit Switch 1 y la Raspberry Pi 4B. Elaboración propia.....	109
Tabla 4.41. Conexiones del Limit Switch 2 y la Raspberry Pi 4B. Elaboración propia.....	109
Tabla 4.42. Conexiones de la Raspberry Pi 4B y el relay. Elaboración propia. ....	110
Tabla 4.43. Conexiones del solenoide y el relay. Elaboración propia. ....	110
Tabla 4.44. Conexiones de la cámara USB y el transmisor de video. Elaboración propia....	111
Tabla 4.45. Conexiones de la cámara USB y la Raspberry Pi 4B. Elaboración propia.....	111
Tabla 4.46. Conexiones del sensor de nivel de batería y la Raspberry Pi 4B. Elaboración propia. ....	112
Tabla 4.47. Selección del material de la caja electrónica de la estación de carga. Elaboración propia. ....	115
Tabla 4.48. Selección de la fuente switching para la estación de carga. Elaboración propia. ....	116

Tabla 4.49. Selección de la tablet industrial. Elaboración propia.....	118
Tabla 4.50. Selección del control remoto a emplear. Elaboración propia. ....	120
Tabla 4.51. Variables por controlar y monitorear. Elaboración Propia. ....	128
Tabla 4.52. Costo de materiales - Subsistema manipulador. Elaboración propia.....	130
Tabla 4.53. Datos empleados para el cálculo de costo de impresión. Elaboración propia. ...	133
Tabla 4.54. Costos de impresión 3D - Subsistema manipulador. Elaboración propia.....	133
Tabla 4.55. Costo de los procesos de fabricación empleados - Subsistema manipulador. Elaboración propia. ....	134
Tabla 4.56. Costo de los componentes electrónicos - Subsistema manipulador. Elaboración propia. ....	135
Tabla 4.57. Costo de los materiales - Subsistema estación de carga. Elaboración propia.....	136
Tabla 4.58. Costo de los componentes electrónicos - Subsistema estación de carga. Elaboración propia. ....	137
Tabla 4.59. Costo de los componentes del subsistema control remoto. Elaboración propia. ....	137
Tabla 4.60. Costo total del sistema. Elaboración propia.....	138
Tabla 4.61. Lista de planos de despiece y ensamble. Elaboración propia. ....	138
Tabla D.1. Características de las alternativas de comunicación inalámbrica. (Sanjeev Dhawan, 2007) .....	177
Tabla D.2. Análisis técnico. Elaboración propia. ....	181
Tabla D.3. Análisis económico. Elaboración propia. ....	182

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Sistema eléctrico. Área Tecnológica, s/f. ....	4
Figura 1.2. Diagrama unifilar simplificado de una SET. Raúl Del Rosario, s/f. ....	5
Figura 1.3 Interruptor de potencia de MT modelo SFset Schneider Electric. Schneider Electric, s/f.....	6
Figura 1.4 Interruptor de potencia de MT modelo VD4 de ABB. ABB, s/f.....	6
Figura 1.5 Gráfico de barras - contacto con electricidad. Elaboración propia .....	7
Figura 1.6 Procesos principales del sistema robótico. Elaboración propia.....	9
Figura 2.1 Vehículo tipo vagoneta. Safe Rack, s/f .....	14
Figura 2.2 Diagrama de bloques del sistema. Mario F.M. Campos, y otros, 2002.....	15
Figura 2.3 Funcionamiento del sistema de manipulación robótica. Debenest, y otros, 2008..	16
Figura 2.4 Manipulador robótico operando en subestaciones eléctricas. Huang, Zhang, Huang, & Wang, 2016.....	17
Figura 2.5 Partes del DCBot. Tang, Gu, Wang, & Liang, 2019.....	18
Figura 3.1. Black Box. Elaboración propia.....	22
Figura 3.2. Dominio energía. Elaboración propia.....	23
Figura 3.3. Dominio de sensores. Elaboración propia. ....	24
Figura 3.4. Dominio control. Elaboración propia. ....	25
Figura 3.5. Dominio de actuadores. Elaboración propia. ....	26
Figura 3.6. Dominio mecánico. Elaboración propia. ....	26
Figura 3.7. Estructura de funciones. Elaboración propia.....	28
Figura 3.8. Diagrama de operaciones para la instalación. Elaboración propia.....	34
Figura 3.9. Diagrama de operaciones para el uso. Elaboración propia.....	35
Figura 3.10. Diagrama de bloques del subsistema manipulador. Elaboración propia. ....	36
Figura 3.11. Diagrama de bloques del subsistema control remoto. Elaboración propia. ....	36
Figura 3.12. Diagrama de bloques del subsistema estación de carga. Elaboración propia.....	36
Figura 4.1. Modelado 3D del sistema integral. Elaboración propia. ....	38
Figura 4.2. Modelado 3D del subsistema de manipulación. Elaboración propia. ....	39
Figura 4.3. Dimensiones generales del subsistema manipulador – Vista frontal. Elaboración propia. ....	40
Figura 4.4. Dimensiones generales del subsistema manipulador – Vista de perfil. Elaboración propia. ....	40
Figura 4.5. Detalle de la estructura de soporte de la cámara. Elaboración propia.....	41

Figura 4.7. Rodamiento tubular en varilla (lado izquierdo) y tuerca en husillo (lado derecho). Elaboración propia.....	42
Figura 4.8. Interruptor de potencia de MT de la empresa Schneider Electric. (Schneider Electric, s/f).....	43
Figura 4.9. Rango de alcance del solenoide en el eje y (imagen izquierda) y eje x (imagen derecha). Elaboración propia. ....	44
Figura 4.10. Caja de componentes electrónicos - Vista exterior. Elaboración propia.....	44
Figura 4.11. Vista general de la base móvil del subsistema manipulador. Elaboración propia. .....	45
Figura 4.12. Funcionamiento de ruedas mecanum. RoboCT, s/f.....	46
Figura 4.13. Estación de carga del sistema manipulador. Elaboración propia. ....	46
Figura 4.14. Parámetros para analizar el rango de visión de una cámara. (Mvteam, s.f.) .....	49
Figura 4.15. Ángulos verticales presentes en la cámara. Elaboración propia.....	50
Figura 4.16. Configuración del material en software Inventor. Elaboración propia. ....	51
Figura 4.17. Desplazamientos presentes en la simulación. Elaboración propia. ....	52
Figura 4.18. Esfuerzos equivalentes de Von Mises en la simulación. Elaboración propia. ....	52
Figura 4.19. Factor de seguridad en la simulación. Elaboración propia.....	53
Figura 4.20. Elementos de la estructura de la cámara. Elaboración propia. ....	53
Figura 4.21. Ruedas mecanum de aluminio con acople para motor DC. (Ali Express, s/f) ....	57
Figura 4.22. Distancia rueda mecanum y platina. Elaboración propia. ....	58
Figura 4.23. Estimación de parámetros de impresión en 3D. Elaboración propia.....	61
Figura 4.24. DCL del robot para analizar la volcadura respecto a la rueda 2. Elaboración propia. .....	63
Figura 4.25. DCL general de la estructura de la cámara. Elaboración propia. ....	66
Figura 4.26. DCL de estructura simplificada. Elaboración propia. ....	66
Figura 4.27. Sección de flexión crítica. Elaboración propia.....	67
Figura 4.28. Ubicación del centroide en la sección de flexión máxima. Elaboración propia..	68
Figura 4.29. DCL del cuerpo 2. Elaboración propia.....	69
Figura 4.30. Casos de estudio para el análisis de pandeo. Obtenido de Zigurat Institute of Technology. ....	70
Figura 4.31. Sección de análisis de pandeo. Elaboración propia.....	71
Figura 4.32. DCL del pasador A. Elaboración propia. ....	72
Figura 4.33. DCL del pasador C. Elaboración propia.....	73

Figura 4.34. DCL de la base móvil. Elaboración propia. ....	73
Figura 4.35. Vista de sección - Interacción de la base móvil con la estructura principal. Elaboración propia. ....	74
Figura 4.36. Canal en U modelo 3017. Obtenido de catálogo de perfiles de aluminio – Limatambo. ....	74
Figura 4.37. Sección del perfil de análisis. Elaboración propia. ....	75
Figura 4.38. Ubicación del centroide en la sección de análisis. Elaboración propia. ....	75
Figura 4.39. Viga doblemente apoyada. Elaboración propia. ....	76
Figura 4.40. Diagrama de fuerza cortante en N. Elaboración propia. ....	76
Figura 4.41. Diagrama de momento flector en N.mm. Elaboración propia. ....	76
Figura 4.42. Configuración final de cada motor de la base móvil. Elaboración propia. ....	81
Figura 4.43. DCL de cargas radiales del eje de 10 mm de diámetro. ....	82
Figura 4.44. DCL del eje de 10 mm en el software Ftool. Elaboración propia. ....	82
Figura 4.45. Diagrama de fuerza cortante del eje (en N). Elaboración propia. ....	83
Figura 4.46. Diagrama de momento flector en el eje (en N.mm). Elaboración propia. ....	83
Figura 4.47. Cálculo del torque total en motor paso a paso horizontal. Elaboración propia. ..	85
Figura 4.48. Fijación de los motores PaP al manipulador. Elaboración propia. ....	87
Figura 4.49. Conexiones de los motores DC, Roboclaw 2x15 A - 1 y la Raspberry Pi. Elaboración propia. ....	104
Figura 4.50. Conexiones de los motores DC, Roboclaw 2x15 A - 2 y la Raspberry Pi. Elaboración propia. ....	105
Figura 4.51. Conexión motor PaP 1, TB6560 - 1 y Raspberry Pi 4B. Elaboración propia. ..	106
Figura 4.52. Conexión motor PaP 2, TB6560 - 2 y Raspberry Pi 4B. Elaboración propia. ..	107
Figura 4.53. Conexiones de los Limit Switch con Raspberry Pi 4B. Elaboración propia. ....	109
Figura 4.54. Conexión de la Raspberry Pi, relay y solenoide. Elaboración propia. ....	110
Figura 4.55. Conexiones cámara USB. Elaboración propia. ....	111
Figura 4.56. Conexión con el sensor de nivel de batería. Elaboración propia. ....	112
Figura 4.57. Diseño interno de caja de componentes electrónicos del subsistema manipulador. Elaboración propia. ....	113
Figura 4.58. Distribución de componentes electrónicos - Subsistema manipulador. Elaboración propia. ....	113
Figura 4.59. Montaje del sensor de fin de carrera - movimiento horizontal. Elaboración propia. ....	114

Figura 4.60. Montaje del sensor de fin de carrera - movimiento vertical. Elaboración propia.	114
Figura 4.61. Circuito esquemático del subsistema estación de carga. Elaboración propia. ..	117
Figura 4.62. Vista interna de la caja electrónica del subsistema estación de carga. Elaboración propia. ....	117
Figura 4.63. Interfaz para el manejo del robot. Elaboración propia. ....	118
Figura 4.64. Distribución de botones para el manejo del robot. Elaboración propia. ....	122
Figura 4.65. Resultado del código de prueba empleado para la detección de color. Elaboración propia. ....	122
Figura 4.66. Diagrama de flujo principal. Elaboración propia. ....	123
Figura 4.67. Diagrama de flujo del subproceso Activación subsistema manipulador. Elaboración propia. ....	124
Figura 4.68. Subproceso Enviar nivel de batería. Elaboración propia. ....	124
Figura 4.69. Subproceso Recibir color de botón a manipular. Elaboración propia. ....	125
Figura 4.70. Subproceso Mover sistema. Elaboración propia. ....	125
Figura 4.71. Subproceso Movimiento hacia adelante. Elaboración propia. ....	126
Figura 4.72. Subproceso Movimiento hacia atrás. Elaboración propia. ....	126
Figura 4.73. Subproceso Movimiento hacia la derecha. Elaboración propia. ....	127
Figura 4.74. Subproceso Movimiento hacia la izquierda. Elaboración propia. ....	127
Figura 4.75. Estrategia de control para los motores DC. Elaboración propia. ....	129
Figura 4.76. Estrategia de control para posicionar el solenoide. Elaboración propia. ....	129
Figura C.1. Vista general - Concepto de solución 1. Elaboración propia. ....	163
Figura C.2. Subsistema de manipulación del concepto de solución 1. Elaboración propia. .	164
Figura C.3. Vista delantera del subsistema manipulador - Concepto de solución 1. Elaboración propia. ....	165
Figura C.4. Vista general de la caja electrónica - Concepto de solución 1. Elaboración propia. ....	166
Figura C.5. Vista de corte en la caja electrónica - Concepto de solución 1. Elaboración propia. ....	166
Figura C.6. Subsistema control remoto - Concepto de solución 1. Elaboración propia. ....	167
Figura C.7. Vista detallada de interfaz en laptop - Concepto de solución 1. Elaboración propia. ....	167
Figura C.8. Vista general subsistema de estación de carga - Concepto de solución 1. Elaboración propia. ....	168

Figura C.9. Vista detallada de conexión de componentes electrónicos del subsistema estación de carga - Concepto de solución 1. Elaboración propia.....	168
Figura C.10. Vista general concepto de solución 2. Elaboración propia. ....	169
Figura C.11. Vista detallada de elementos del subsistema de manipulación - Concepto de solución 2. Elaboración propia. ....	170
Figura C.12. Vista en corte de la base del manipulador - Concepto de solución 2. Elaboración propia. ....	170
Figura C.13. Vista interna del cuarto de control - Concepto de solución 2. Elaboración propia. ....	171
Figura C.14. Vista general del subsistema de estación de carga - Concepto de solución 2. Elaboración propia. ....	172
Figura C.15. Vista interna de cubierta de la estación de carga - Concepto de solución 2. Elaboración propia. ....	172
Figura C.16. Vista general - concepto de solución 3. Elaboración propia.....	173
Figura C.17. Vista detallada subsistema de manipulación - Concepto de solución 3. Elaboración propia. ....	174
Figura C.18. Vista interior de cubierta metálica - Concepto de solución 3. Elaboración propia. ....	174
Figura C.19. Vista general del subsistema de control remoto - Concepto de solución 3. Elaboración propia. ....	175
Figura C.20. Vista general del subsistema de estación de carga - Concepto de solución 3. Elaboración propia. ....	175
Figura C.21. Vista detallada de la parte electrónica del subsistema estación de carga - Concepto de solución 3. Elaboración propia.....	175
Figura D.1. Resultados evaluación técnica - económica. Elaboración propia.....	182

## GLOSARIO DE ABREVIATURAS

MT:	Media Tensión
VDI:	Verein Deutscher Ingenieure (Asociación de Ingenieros Alemanes)
MTPE:	Ministerio de Trabajo y Promoción del Empleo
3D:	Tridimensional
DC:	Direct Current (Corriente directa)
AC:	Alternating Current (Corriente alterna)
HFOV:	Horizontal Field of View (Campo de visión horizontal)
VFOV:	Vertical Field of View (Campo de visión vertical)
NEMA:	National Electrical Manufacturers Association (Asociación nacional de fabricantes eléctricos)
PaP:	Paso a paso
RPM:	Revoluciones por minuto
UART:	Universal Asynchronous Receiver - Transmitter (Transmisor - receptor asíncrono universal)
PLA:	Polylactic Acid (Ácido poliláctico)
TTL:	Transistor-Transistor Logic (Lógica transistor - transistor)
USB:	Universal Serial Bus (Bus Serial Universal)
HDMI:	High-Definition Multimedia Interface (Interfaz Multimedia de alta definición)
RAM:	Random Access Memory (Memoria de acceso aleatorio)
ROM:	Only Read Memory (Memoria de sólo lectura)
GPIO:	General Purpose Input/Output (Entrada/Salida de propósito general)
PWM:	Pulse Width Modulation (Modulación por ancho de pulso)
PID:	Control Proporcional, Integral y Derivativo

RGB: Red, Green and Blue (Rojo, Verde y Azul)

GDL: Grados de Libertad

IMU: Inertial Measurement Unit (Unidad de medida inercial)

WiMax: Worldwide Interoperability for Microwave Access (Interoperabilidad mundial para acceso por microondas)

WiFi: Wireless Fidelity (Fidelidad inalámbrica)



## INTRODUCCIÓN

Los niveles elevados de electricidad son capaces de causar un daño significativo al ser humano, a tal punto de poder dejarlo al borde la muerte. Específicamente, el desarrollo del presente trabajo se enfoca en los interruptores de potencia de MT, presentes en las subestaciones eléctricas (lugares en los que la energía eléctrica es distribuida a empresas y viviendas). Debido a que estos dispositivos ya mencionados manejan un nivel de tensión entre 10 y 22.9 kV, la simple presencia de estos representa un peligro para los operarios. En el presente trabajo de tesis se realizará el diseño de un robot que pueda operar estos equipos de manera remota, con la finalidad de garantizar la seguridad del operario y reducir los accidentes relacionados a este problema, significando ello la automatización de este proceso de manipulación.

En el primer capítulo se describe la problemática, procesos principales y los objetivos generales y específicos basados en la metodología VDI 2206 para el diseño de sistemas mecatrónicos. Cabe mencionar que el objetivo de esta metodología es poder llegar a un concepto de solución óptimo para posteriormente realizar el diseño mecatrónico.

En el segundo capítulo se ilustrará el estado del arte, en donde se realizó una investigación con respecto a los robots manipuladores en el sector eléctrico, resaltando características como el uso a distancia, alcance y eficacia en la realización de las tareas asignadas.

En el tercer capítulo se define el diseño conceptual del sistema, en donde se empieza estableciendo las funciones necesarias para posteriormente formar una matriz morfológica. Finalmente, se evalúan tres conceptos de solución para realizar el concepto de solución óptimo.

En el cuarto capítulo, se realiza el diseño mecatrónico de cada dominio, en donde se especifican los cálculos necesarios, simulaciones (en caso se requiera), selección de componentes y una descripción del funcionamiento del software empleado.

En el quinto capítulo, se establece el costo por dominio y el costo total. Asimismo, en la última sección se sitúan las conclusiones del trabajo, recomendaciones y trabajo futuro.



## CAPÍTULO 1

### ANTECEDENTES AL DISEÑO

En este primer capítulo se presentará la problemática que abarca el desarrollo de la tesis, así como también los procesos principales involucrados, la propuesta de solución; por último, se presentarán los objetivos generales y específicos.

#### 1. 1. Problemática

En palabras del Ministerio del Ambiente (MINAM), el sistema eléctrico se compone de cuatro principales etapas: generación, transmisión, distribución y utilización. (Figura 1.1). Antes de analizar a detalle cada una de estas etapas por separado, es necesario recalcar que existen diferentes niveles normalizados de tensión (voltaje) según el país en cuestión. Particularmente en el Perú, de acuerdo con el código nacional de electricidad (CNE), estos niveles son los siguientes: baja tensión ( $V \leq 1 \text{ kV}$ ), media tensión ( $1 \text{ kV} < V < 35 \text{ kV}$ ), alta tensión ( $35 \text{ kV} < V \leq 230 \text{ kV}$ ) y muy alta tensión ( $V > 230 \text{ kV}$ ). En primer lugar, la etapa de generación toma lugar en las centrales generadoras, estas pueden ser de tipo hidroeléctrica, a gas, térmica, entre otras; las cuales son seguidas por una estación la cual eleva el nivel de tensión hasta un valor, en la mayoría de los casos, de 220 kV para su posterior transporte (Fuente: Sistema Eléctrico Internacional). En segundo lugar, la etapa de transmisión consiste en trasladar la energía eléctrica generada hasta algún punto de distribución a los consumidores. Además, es importante mencionar que en este proceso la energía eléctrica pasa por las llamadas subestaciones, las cuales reducen el voltaje mediante transformadores, esto se realiza con el fin de que exista un nivel apropiado de tensión en la etapa de distribución. En el caso de la etapa anteriormente mencionada, se busca alcanzar niveles apropiados de voltaje para el consumo de

los ciudadanos, siendo en el caso de Perú 220 V. Por último, la utilización hace referencia al uso de la electricidad de manera individual por parte de los consumidores.

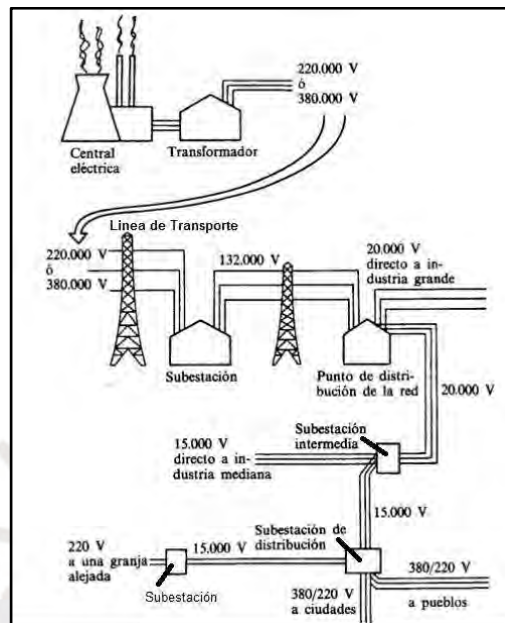


Figura 1.1. Sistema eléctrico. Área Tecnológica, s/f.

En este caso, el área de interés para el presente trabajo son las subestaciones de media tensión, pues es allí en donde se ubican los interruptores de potencia de MT. Este último es un equipo que permite el paso de la energía eléctrica para su posterior transformación a través de un transformador de voltaje, y con ello poder brindar el servicio eléctrico a algún usuario en particular. A su vez, los interruptores de potencia de MT se encuentran acompañados de otros elementos como los transformadores y seccionadores (Figura 1.2). Como dato adicional, es importante mencionar que el interruptor de potencia es el primero en manipularse cuando se desea desconectar un circuito eléctrico de la red, pues este presenta un accionamiento rápido, con lo cual se evita formar arcos eléctricos. Una vez realizado ello, se procede a desconectar de la red al seccionador; esto debe ser así ya que este último no presenta un accionamiento rápido, con lo cual de realizarse esta secuencia de manera invertida se corre el riesgo de que suceda un accidente. En el caso de que se desee energizar el circuito, sucede una situación

invertida: El primero en manipularse en el seccionador para posteriormente cerrar el circuito mediante el accionamiento del interruptor de potencia.

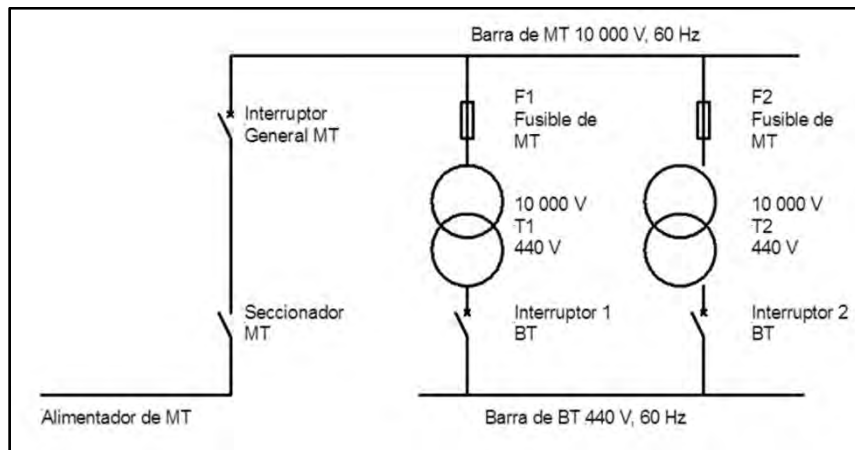


Figura 1.2. Diagrama unifilar simplificado de una SET. Raúl Del Rosario, s/f.

El funcionamiento del interruptor de potencia de MT es de la siguiente manera: Por un lado, para el cierre del circuito de potencia, primero se debe realizar la carga manual respectiva del equipo, esto se logra realizando un movimiento angular y vertical a una palanca de carga hasta que aparezca una señalización en el interruptor que indique el estado de carga completa, es importante mencionar que durante esta acción no hay alto riesgo eléctrico debido a que no se está conmutando algún circuito. Una vez realizada la carga, se procede a presionar el respectivo botón de cierre (botón color verde o negro), con lo cual este proceso finaliza. Por otro lado, en el caso de apertura del circuito de potencia, sólo basta con presionar el respectivo botón asignado a esta acción (botón rojo). Por último, cabe destacar que con el paso de los años se ha ido implementando la opción auxiliar de carga remota a través de un mando de control; modelos como el SFset de Schneider Electric (Figura 1.3) y VD4 de ABB (Figura 1.4) tienen implementada esta función.



Figura 1.3 Interruptor de potencia de MT modelo SFset Schneider Electric. Schneider Electric, s/f



Figura 1.4 Interruptor de potencia de MT modelo VD4 de ABB. ABB, s/f

Como ya se mencionó anteriormente, las etapas más críticas de este proceso se llevan a cabo al presionar los botones de cierre/apertura del interruptor de MT; dado que, si este equipo presenta fallas o se dan situaciones de cortocircuito, el usuario se encontraría expuesto a explosiones debido al alto nivel de tensión que presenta este sistema (normalmente 10 kV y 22.9 kV, según el Código Nacional de la Electricidad). En la Tabla 1.1 y en la Figura 1.5 se puede observar un recopilatorio de la información del MTPE (entidad encargada de reportar toda clase de accidentes en el Perú) acerca de los accidentes relacionados al contacto con la electricidad entre los años 2017 y 2021.

Tabla 1.1 Reporte de accidentes relacionados al contacto con electricidad. Elaboración propia

mes \ año	2021	2020	2019	2018	2017
Enero	1	12	9	4	10
Febrero	2	11	7	4	3
Marzo	4	12	11	7	6
Abril	7	1	11	7	7
Mayo	8	1	12	2	2
Junio	8	3	13	4	7
Julio	11	5	9	1	7
Agosto	6	5	11	2	2
Setiembre	3	13	10	11	4
Octubre	8	7	9	17	8
Noviembre	9	5	4	9	3
Diciembre	7	13	5	1	2
Total	74	88	111	69	61



Figura 1.5 Gráfico de barras - contacto con electricidad. Elaboración propia

De lo anterior, es importante mencionar que, si bien es cierto, el MTPE no indica qué tipo específico de accidente eléctrico ha acontecido, los accidentes relacionados a los interruptores de potencia sí han sucedido en el país. Por ejemplo, un caso relacionado a esto en el Perú aconteció en la empresa Luz del Sur S.A.A. en diciembre de 2021; e incluso a nivel de Latinoamérica se pueden encontrar más ejemplos, siendo uno de ellos reportado por la empresa venezolana Kay Electric. De lo anterior, se puede concluir que, aunque hayan pasado los años,

esta clase de accidentes mortales sigue sucediendo y no se han implementado medidas preventivas eficientes.

## **1.2. Propuesta de solución**

Se propone desarrollar un robot semiautomático que pueda abrir y cerrar los circuitos que gobierna el interruptor de potencia mediante el accionamiento de los botones respectivos. Además, esta actividad mencionada anteriormente deberá ser ejecutada a través de un control remoto y una cámara situada en el robot, esto con el fin de que se pueda realizar una inspección en tiempo real no solamente de los procedimientos en cuestión, sino también del estado del interruptor. Asimismo, es importante mencionar que la realización de estas tareas debe ser supervisada por un personal calificado necesariamente para garantizar la seguridad de estas, pues según lo analizado en la problemática, estas son actividades de alto riesgo.

Finalmente, luego de realizar las tareas, a través del control remoto se le dará la orden al sistema robótico para dirigirse hacia una estación de carga, en donde este esperará hasta la próxima actividad a realizar. De este modo, el robot garantiza la seguridad del operario en todo momento de la manipulación.

### **Procesos principales**

En la Figura 1.6 se observan los procesos principales del sistema robótico en cuestión.



Figura 1.6 Procesos principales del sistema robótico. Elaboración propia

### 1.3. Objetivos

En esta sección se desarrollará el objetivo general y los objetivos específicos del presente trabajo.

#### 1.3.1 Objetivo general

Diseñar un robot cuya función específica sea la de operar los interruptores de potencia de media tensión, esto hace referencia al accionamiento de los botones cierre/apertura del circuito de media tensión. La actividad del robot será controlada por un personal calificado a través de un control remoto desde una distancia aproximada de 5 m. Además, existe una estación de carga de la batería del robot. Para su funcionamiento, el robot deberá ser ensamblado fuera de la subestación eléctrica y luego será trasladado a la sala de interruptores de potencia, en donde se realizarán las manipulaciones de los interruptores de potencias, según solicitud, usando el control remoto. Una vez concluida su labor, el robot será

trasladado a la estación de carga en caso se requiera.

### 1.3.2. Objetivos específicos

- Investigar sobre sistemas de manipulación robótica existentes, con especial interés en el sector eléctrico.
- Realizar el diseño conceptual, teniendo como punto de partida los requerimientos del sistema y sus limitaciones.
- Realizar el diseño mecánico, empleando los mecanismos necesarios para realizar la pulsación del botón de interés, así como también considerando aspectos relacionados al desplazamiento del robot en el ambiente de trabajo.
- Realizar el diseño eléctrico/electrónico integrando los diferentes sensores, actuadores y demás componentes, que en conjunto permitan el correcto funcionamiento del robot.
- Diseñar y realizar la correcta manipulación de los botones de apertura y cierre del interruptor de potencia, los cuales controlan el circuito eléctrico de media tensión, y la navegación requerida por el robot.
- Diseñar una interfaz de usuario, la cual permitirá realizar un seguimiento de la manipulación en tiempo real. En base a lo anterior se verificará la correcta ejecución de la manipulación.
- Estimar el costo total del sistema.

### 1.4. Alcance

En el presente trabajo de tesis, se empezará realizando una investigación en el estado del arte acerca de las tecnologías existentes en el sector eléctrico. Luego, se establecerán funciones y componentes para proponer tres conceptos de solución. Posterior a ello se realizará un análisis

técnico - económico de las alternativas presentadas con la finalidad de elegir el concepto de solución óptimo.

La segunda parte del trabajo consiste en realizar la etapa del diseño mecatrónico, en donde se realizarán los cálculos necesarios (mecánicos, eléctricos/electrónicos) para satisfacer los requerimientos de cada dominio. A su vez, se plantearán diagramas de flujo de software, las interfaces necesarias y la estrategia de control. Finalmente, se realizará un resumen de los costos totales del sistema.

### **1.5. Metodología**

En el presente trabajo se hará uso de la metodología basada en las normas alemanas VDI 2206 y VDI 2221, creadas para el diseño de sistemas mecatrónicos. Según dicha metodología, se debe partir del análisis de una problemática para así definir una lista de requerimientos mínimos para el sistema.

Una vez realizado lo anterior, se determinan las funciones y subfunciones necesarias para satisfacer los requerimientos y con ello plantear una estructura de funciones que combine lo anterior con los dominios del sistema mecatrónico (sensores, interfaz, control, etc). Así, se buscan tecnologías que satisfagan las funciones establecidas para, de este modo, plantear diferentes conceptos de solución. Estas alternativas, se someten a un análisis técnico-económico para obtener el concepto de solución óptimo.

El diseño mecatrónico inicia con el diseño del modelo 3D del sistema, el cual ha sido realizado a través del software Autodesk Inventor, posteriormente se realiza la selección de componentes del dominio mecánico, incluyendo el cálculo de motores paso a paso y motores DC. Posterior a esto, se realiza el diseño del circuito electrónico de los subsistemas presentes; seguido del

diseño de la interfaz en el control remoto y el diagrama de flujo de software. Finalmente, se establece la estrategia de control a utilizar. Es importante resaltar que, según la metodología en cuestión, este es un proceso repetitivo, en donde es posible retornar a etapas anteriores para realizar las modificaciones necesarias para enriquecer el diseño final.

Como un comentario adicional, para un entorno real sería necesario realizar pruebas de campo para validar el funcionamiento del robot, realizando la medición de parámetros cruciales (campo de visión de la cámara, velocidad del manipulador y movimiento del solenoide, principalmente) y establecer un porcentaje de efectividad.



## CAPÍTULO 2

### ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se hará un recopilatorio de las tecnologías existentes en lo que respecta a manipuladores robóticos en el sector eléctrico. En las siguientes líneas, se realizó la selección de diferentes tecnologías teniendo en consideración factores como el nivel de automatización presentado, seguridad ante los operarios y su viabilidad técnica en subestaciones. Como se mencionó anteriormente, esto servirá para posteriormente establecer una lista de requerimientos para el sistema.

#### **2.1. Sistema robótico de dos brazos diseñado para operaciones de alto voltaje**

Este sistema consiste en emplear un vehículo tipo vagoneta (Figura 2.1), el cual presenta un mecanismo de elevación de tal manera que un robot se ubica en el extremo más alto para manipular las líneas eléctricas. Adicionalmente, este robot ya mencionado está diseñado especialmente para operar en líneas de distribución cuyo valor de tensión es de 10 kV, esto lo logra de manera segura empleando una vestimenta dieléctrica capaz de soportar hasta una tensión de 42 kV. Cabe destacar que este último es controlado por un operario a través de un control remoto que emplea un sistema de comunicación maestro – esclavo, en conjunto con unos lentes de realidad virtual a través de una interfaz. Además, para garantizar una mayor protección del operario, este último se encuentra protegido en una cabina, en donde se sitúa una computadora de nivel industrial para procesar las señales. Por último, este sistema se usa principalmente para las siguientes tareas: mantenimiento de líneas, reemplazo de fusibles, reemplazo de pararrayos y revisión del estado de los anillos de puesta a tierra (Safe Rack, s/f).

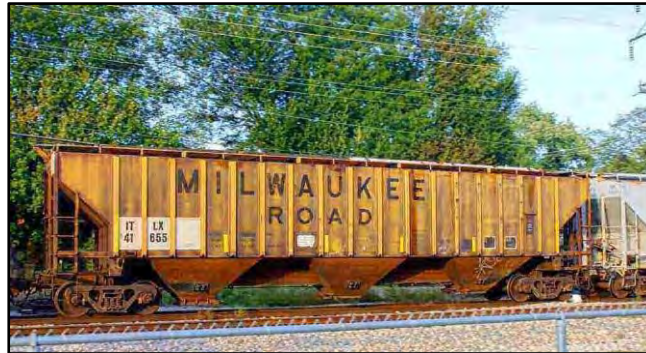


Figura 2.1 Vehículo tipo vagoneta. Safe Rack, s/f

## **2.2. Robot manipulador para instalación y retiro de esferas de aviso para las aeronaves en líneas de transmisión aéreas**

El presente sistema robótico surge debido a la necesidad de contrarrestar el alto riesgo que conlleva realizar la instalación y retiro de las esferas de aviso aéreo de manera manual por un operario. Cabe mencionar que el procedimiento habitual para la ejecución de estas tareas consiste en que un electricista se encuentra sujeto en el aire mediante una cuerda proveniente de un helicóptero situado en la parte superior de la zona de trabajo y rápidamente realice la tarea asignada. Acerca de las características de este sistema, este robot es semiautomático pudiendo funcionar tanto de manera autónoma o a través de un control remoto controlado por un operario situado en el suelo (con un radio máximo de 2 km); a su vez, presenta un gripper, un sistema de traslación a través de ruedas de tracción y un sistema de herramientas adaptadas a este. Este sistema logra que el ajuste de las esferas se logre de manera hermética empleando un sistema de engranajes rectos y helicoidales. Un dato importante a destacar es que presenta una computadora integrada en un PCB que controla todas las funcionalidades del robot, además que presenta una estructura de aluminio para proteger a los componentes de los campos

magnéticos elevados de la zona de trabajo (Mario F.M. Campos, y otros, 2002). El diagrama de bloques del sistema se muestra en la Figura 2.2

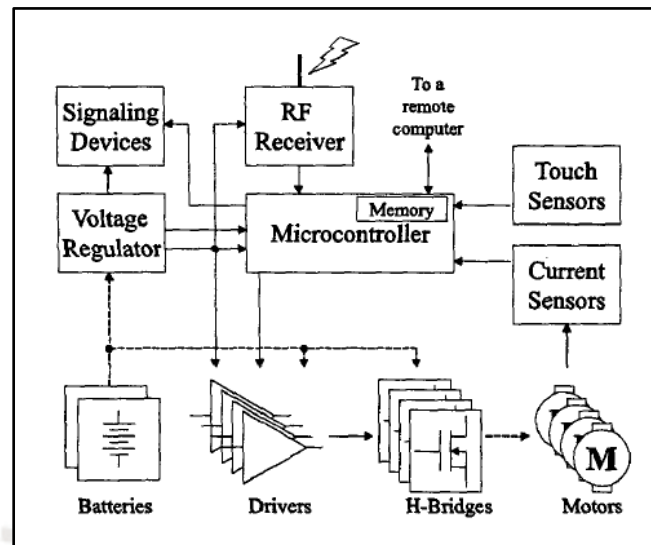


Figura 2.2 Diagrama de bloques del sistema. Mario F.M. Campos, y otros, 2002.

### 2.3. Manipulador robótico autónomo para el mantenimiento preventivo e inspección de líneas de transmisión de alto voltaje

El manipulador robótico de esta sección consiste en un mecanismo empleado principalmente para colocar sensores en las líneas de transmisión de alto voltaje, y en la inspección de líneas de transmisión; esto último incluye la medición del diámetro de los cables y revisar el estado de las uniones atornilladas de estos. Cabe mencionar que estos sensores ya mencionados son los encargados de indicar el estado de los cables de alta tensión, esto es, si existiese alguna zona con una gran concentración de calor, algún defecto en el cable, entre otros. Además, este sistema es controlado a través de un operario mediante cámaras de alta resolución situadas en el robot. Asimismo, los autores señalan que se realizaron diferentes pruebas para comprobar cada una de las versiones del prototipo de este robot. Entre las principales características de este último destacan las siguientes: consumo de corriente promedio de 1.3 A, visión completa de cables de alta tensión gracias al empleo de espejos (Figura 2.3) y un sistema de control autónomo para garantizar el balance del sistema (Debenest, y otros, 2008).

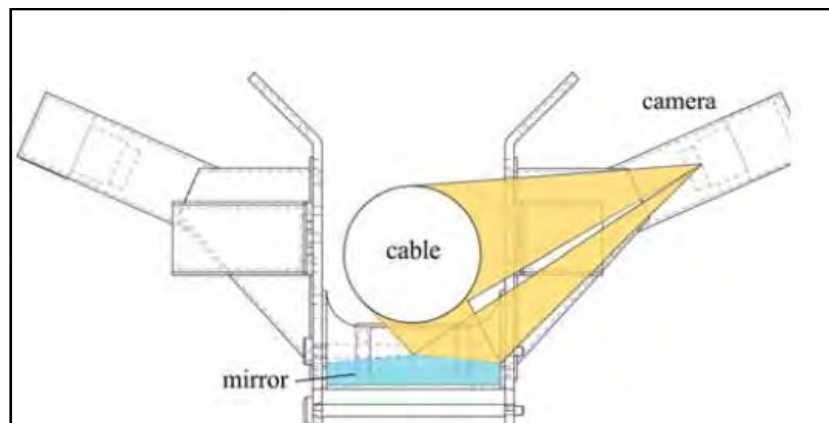


Figura 2.3 Funcionamiento del sistema de manipulación robótica. Debenest, y otros, 2008.

#### 2.4. Sistema manipulador robótico diseñado para el trabajo en subestaciones eléctricas

Este robot es capaz de operar en subestaciones eléctricas que manejan un nivel de tensión de hasta 220 kV. A su vez, este consta de los siguientes elementos: un mecanismo de movimiento, un mecanismo de elevación, un sistema de control maestro, un sistema de manipulación hidráulico (compuesto por un motor diésel y una bomba hidráulica principalmente) de 6 grados de libertad y herramientas de trabajo adaptadas. El sistema manipulador en cuestión funciona de la siguiente manera: Primero, el manipulador hidráulico es llevado hasta la zona de trabajo a través de la plataforma móvil, siendo este proceso controlado de manera inalámbrica por un operario mediante un control remoto; luego una vez ubicado el robot en la zona de trabajo, este procede a emplear una serie de herramientas que se le pueden acoplar para realizar una gran variedad de trabajos, entre las cuales se encuentran herramientas de limpieza, herramientas para retirar hielo de las líneas, entre otros (Huang, Zhang, Huang, & Wang, 2016) . En la Figura 2.4 se muestra el robot realizando sus labores en una subestación eléctrica.



Figura 2.4 Manipulador robótico operando en subestaciones eléctricas. Huang, Zhang, Huang, & Wang, 2016.

### 2.5. Robot autónomo para trabajos en subestación de 110 kV

En subestaciones tradicionales, se encuentran unidades llamadas torres de media tensión (DCB, por sus siglas en inglés); en donde se conecta una barra de acero entre dos de estas unidades mediante pernos. El robot semiautomático (llamado DCBot) tiene la tarea principal de ensamblar y/o desensamblar estas uniones empernadas de manera automática en ocasiones en las que el sistema requiere mantenimiento. Es importante mencionar que estas actividades se realizan mientras esta zona se encuentra energizada. Acerca de la composición del DCBot, este se encuentra compuesto por tres partes principales: una plataforma de operación con un sistema de manipulación (este último compuesto por dos robots KUKA con 6 grados de libertad cada uno), un sistema de elevación, y un sistema automático de carga, que puede llevar a la plataforma hacia el punto de interés. Además, el sistema presenta un control remoto, el cual únicamente se emplea en tres situaciones, las cuales son las siguientes: supervisar el sistema mientras se realizan las tareas, detener el sistema ante situaciones anormales y guiar al robot en su camino entre el almacén donde se guarda este sistema y la zona de recojo en la plataforma. A su vez, el robot presenta un peso total de 3.5 toneladas y una altura de trabajo en un rango entre 2.8 m y 5.7 m (Tang, Gu, Wang, & Liang, 2019). En la Figura 2.5 se ilustra el sistema robótico en cuestión.

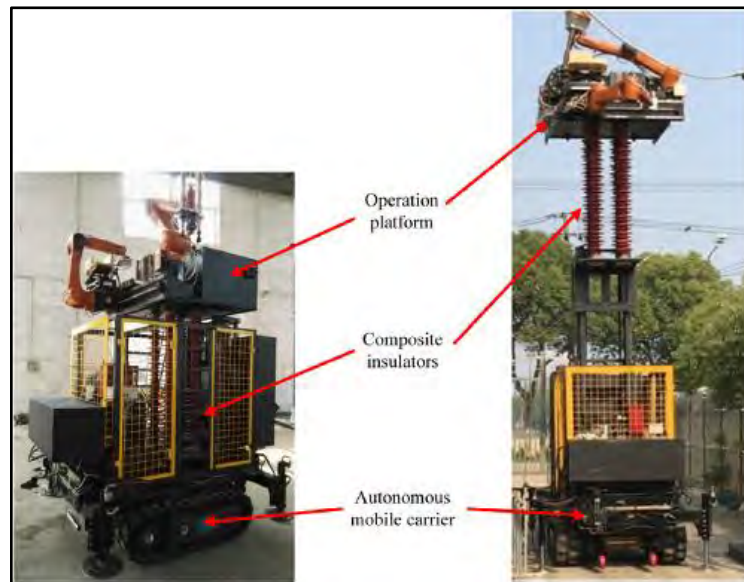


Figura 2.5 Partes del DCBot. Tang, Gu, Wang, & Liang, 2019.

Luego de presentar las alternativas anteriormente mostradas, se han identificado tecnologías clave, las cuales son aplicables al diseño del presente trabajo. Entre estas, destaca el uso de una cámara para el monitoreo en tiempo real, la integración del control remoto para la operación y la implementación de actuadores precisos (como por ejemplo motores DC) para la manipulación de equipos de un nivel de tensión significativo. Algunas oportunidades de mejora de estas alternativas, sería la optimización de la movilidad en espacios reducidos y la simplificación del mecanismo de manipulación. Asimismo, al ser una tarea crucial para el contexto de una subestación eléctrica, es clave considerar un control manual para el presente trabajo, pues no es posible garantizar una confiabilidad del 100% en la operación y aún así, ello representa un riesgo potencial de falla.

## CAPÍTULO 3

### DISEÑO CONCEPTUAL

En el presente capítulo se realiza el diseño conceptual del sistema mecatrónico. Un primer paso es definir las entradas y las salidas en forma de señales, materia y energía para así poder establecer las funciones del sistema, agrupándolas en una estructura de funciones. Finalmente, se realizarán tres alternativas con las diferentes tecnologías encontradas para así realizar un análisis técnico económico y elegir la mejor alternativa.

#### **3.1. Lista de requerimientos del sistema**

En esta sección se definirán los requerimientos del sistema, clasificándolos como exigencia o deseo según sea el caso. En el Anexo A se describe lo anterior mencionado en su totalidad, mientras que en las siguientes líneas se analizarán los más importantes.

#### **Función principal**

Realizar el cambio de estado del circuito controlado por el interruptor de potencia de MT (estado cerrado o abierto) a través del accionamiento de los botones presentes en dicho interruptor. Esta operación se llevará a cabo mediante un control remoto empleado por el operario. Cabe mencionar que, para medir el desempeño del sistema, se tienen parámetros operacionales como por ejemplo encoders magnéticos para medir la velocidad de giro en las ruedas y la cámara.

### **Geometría**

Dimensiones limitadas por el espacio disponible en la sala de interruptores de potencia de MT en la subestación eléctrica. (3 m de ancho y 4 m de alto como máximo, estimado a partir de imágenes en catálogo de Schneider Electric)

### **Cinemática**

Velocidad promedio de operación del dispositivo de manipulación: 500 mm/s. (Estimado a partir de información recolectada en ABB)

### **Fuerzas**

Fuerza estimada para presionar el botón de cierre/apertura del circuito del interruptor de potencia de MT: 10 N. (Valor aproximado estimado a partir de una fuerza promedio usada para presionar un botón)

### **Señales**

Las señales de entrada son principalmente las instrucciones enviadas al robot a través del control remoto, así como los botones de encendido/apagado y parada de emergencia. Las señales de salida corresponden al estado del interruptor de potencia de MT posterior a la manipulación (circuito abierto/cerrado), visualización del procedimiento a través de una cámara situada en el robot, estado de conexión inalámbrica y el nivel de energía eléctrica restante disponible.

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

Una vez mencionados los requerimientos principales del sistema, es necesario definir las entradas y salidas del sistema mecatrónico. Ahora, estas se presentarán a través de un diagrama

de *Black Box* o Caja Negra, el cual ilustra los tipos de datos que ingresan/salen del sistema. Estos tipos de datos pueden ser los siguientes: energía (indicados con líneas continuas), señal (indicados con líneas punteadas) y materia (indicados con líneas gruesas).

## **ENTRADAS**

- Parámetros de operación: Señal que contiene la información sobre la operación a realizar, esto es, las instrucciones que serán brindadas por el operario a través del control remoto.
- Encendido/Apagado: Señal que se encarga de apagar y encender algún elemento en particular, como por ejemplo algún sistema de alimentación de energía eléctrica.
- Energía eléctrica: Alimentación del sistema.
- Interruptor de MT no manipulado: Entrada tipo materia que hace referencia al interruptor de media tensión en estado de no manipulado.

## **SALIDAS**

- Estado del interruptor manipulado: Señal que brinda la información al operario sobre el estado del interruptor a manipular.
- Visualización del procedimiento: Señal que se encarga de mostrar la manipulación del interruptor de potencia en tiempo real.
- Estado de conexión inalámbrica: Señal que muestra el estado de conexión inalámbrica entre el control remoto y el sistema manipulador.
- Nivel de energía disponible: Señal que envía información sobre el nivel en el sistema manipulador.
- Calor, ruido: Formas de energía producidas por los actuadores del sistema.

- Energía mecánica de movimiento: Energía mecánica producida por los actuadores del sistema.
- Interruptor de MT manipulado: Salida tipo materia que hace referencia a que el interruptor de potencia ya está manipulado según lo requerido

La Figura 3.1 ilustra el Black Box, que contiene las entradas y salidas anteriormente mencionadas.

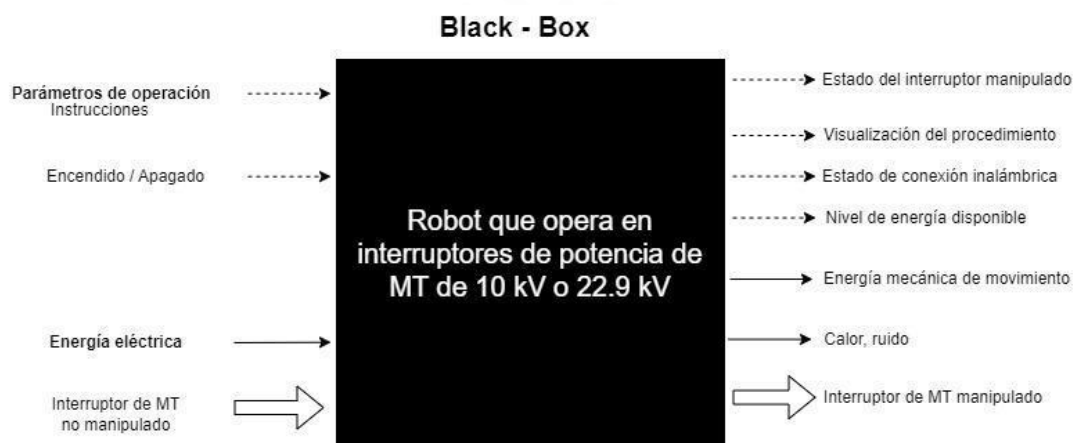


Figura 3.1. Black Box. Elaboración propia.

### 3.3. Estructura de funciones

En esta sección se detalla las funciones presentes del sistema, clasificando estas por dominios y subsistemas. Cabe mencionar que los dominios en cuestión son los siguientes: energía, interfaz, sensores, actuadores, mecánico, comunicaciones y control. Además, se encuentran presentes los siguientes subsistemas: subsistema de manipulación, subsistema control remoto y subsistema de estación de carga. A continuación, se analizará el contenido de cada uno de los dominios empleados en el desarrollo del sistema mecatrónico.

#### Dominio energía

La Figura 3.2 muestra las funciones correspondientes al dominio energía. A continuación, se describen cada una de estas:

- **Activar/desactivar alimentación:** Establece el estado de cierre o apertura del circuito de alimentación eléctrica.
- **Almacenar energía:** Permite almacenar la energía eléctrica dentro del subsistema indicado.
- **Acondicionar energía:** Adapta el voltaje de alimentación a algún voltaje deseado.
- **Energizar sensores:** Energiza los sensores del subsistema manipulador.
- **Energizar controladores:** Proporciona energía eléctrica a los controladores del sistema manipulador.
- **Energizar actuadores:** Brinda energía eléctrica a los actuadores del sistema manipulador.
- **Energizar estación de carga:** Alimentación de la estación de carga.

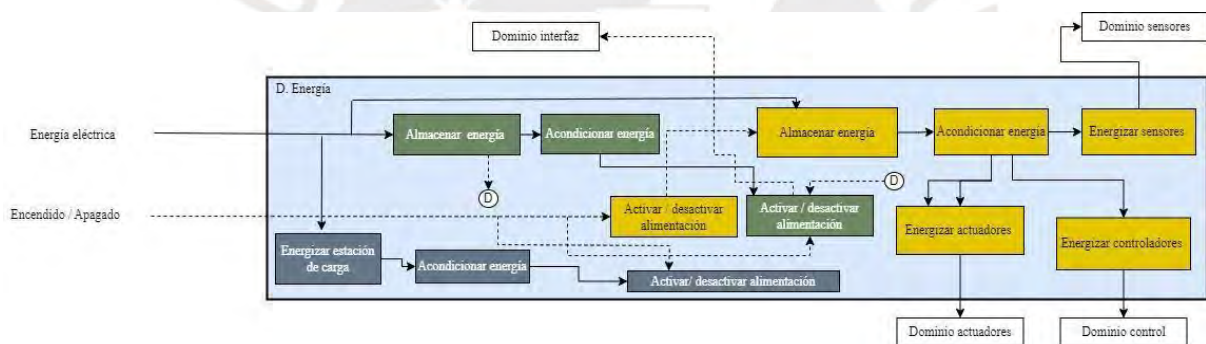


Figura 3.2. Dominio energía. Elaboración propia.

### Dominio sensores

Las funciones presentes en este dominio se muestran en la Figura 3.3, las cuales se mencionan a continuación:

- **Medir velocidad de desplazamiento lineal del sistema:** Mide la velocidad de desplazamiento lineal del subsistema manipulador en todo momento de la manipulación.

- **Medir nivel de batería:** Permite realizar una medición del nivel de batería presente en el sistema manipulador para posteriormente enviar esta información a la interfaz.
- **Visualizar procedimiento:** Visualizar el procedimiento en todo momento de la ejecución de distintas tareas según se requiera.
- **Medir longitud de onda:** Brinda información sobre la longitud de onda (color), lo cual tiene como objetivo poder identificar los botones de apertura y cierre del interruptor de potencia.

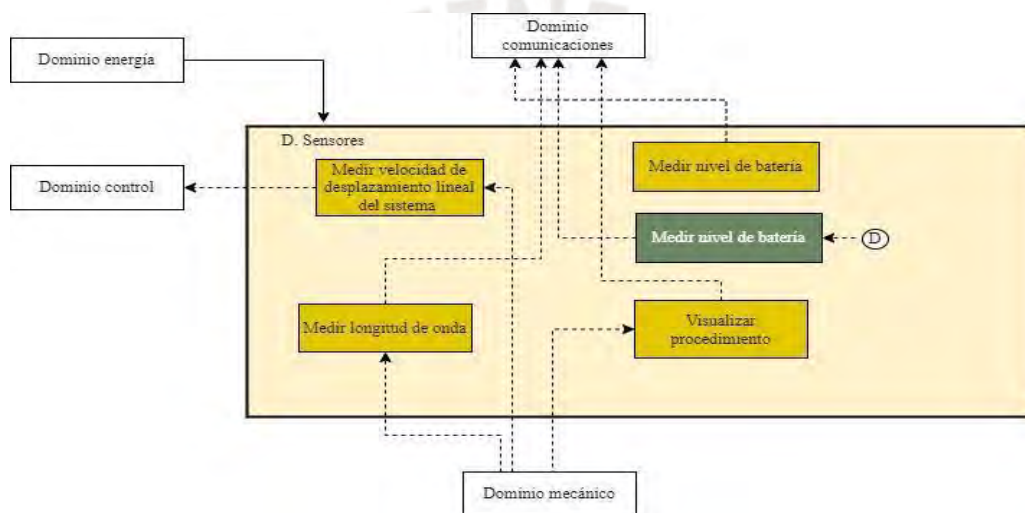


Figura 3.3. Dominio de sensores. Elaboración propia.

### Dominio control

Las funciones para este dominio se observan en la Figura 3.4, las cuales serán comentadas a continuación:

- **Procesar datos:** Recolecta la información solicitada a través de la interfaz y las envía a la unidad de control principal del sistema para realizar alguna acción en particular.
- **Controlar velocidad de desplazamiento lineal:** Se encarga de garantizar la velocidad de desplazamiento lineal de 1 m/s, la cual fue indicada en la lista de requerimientos.

- **Controlar el posicionamiento del actuador:** Permite establecer un control de la posición del actuador que estará en contacto con los botones de apertura/cierre del circuito. Cabe mencionar que en este caso existe un control de lazo cerrado.

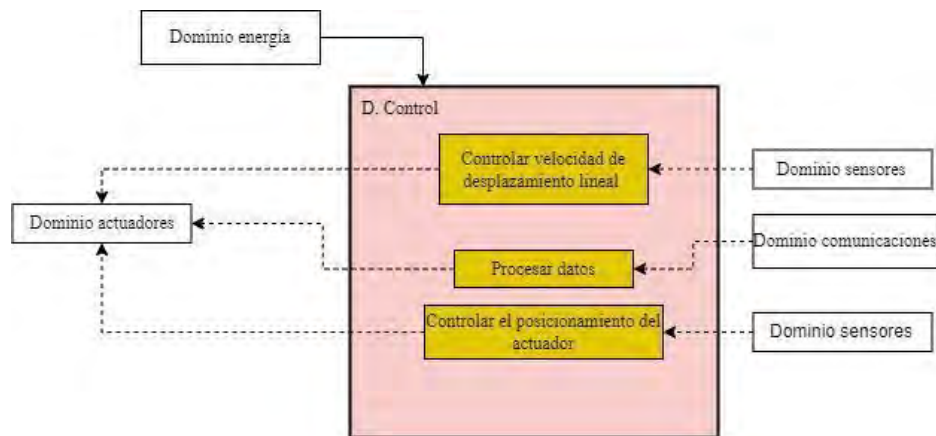


Figura 3.4. Dominio control. Elaboración propia.

### Dominio actuadores

A continuación, se procederá a explicar a detalle cada una de las funciones que gobiernan el presente dominio, las cuales se ilustran en la Figura 3.5.

- **Accionar manipulación:** Permite cambiar el estado de los botones presentes en el interruptor de potencia (cerrado/abierto).
- **Accionar movimiento de traslación del sistema:** Permite el movimiento del sistema alrededor del ambiente de trabajo disponible.
- **Accionar desplazamiento del actuador:** Realiza el movimiento del actuador con el objetivo de aproximarse al botón que se desea manipular.

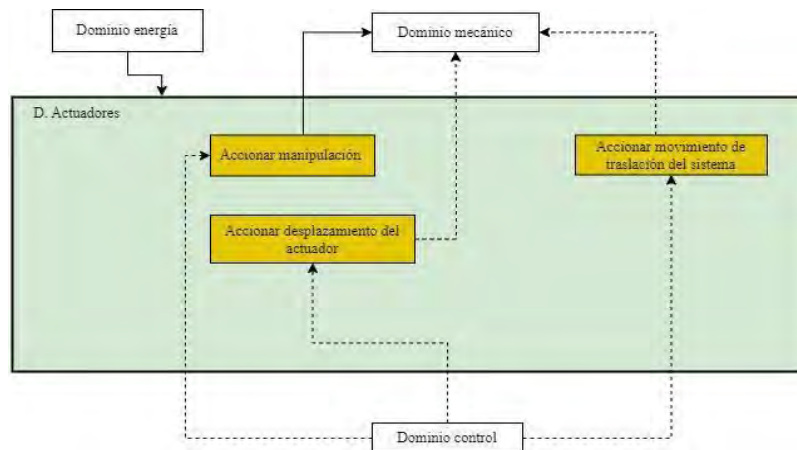


Figura 3.5. Dominio de actuadores. Elaboración propia.

### Dominio mecánico

Las funciones para este dominio se observan en la Figura 3.6, las cuales serán comentadas a continuación:

- **Manipular interruptor de potencia:** Acción de manipular los botones presentes en el interruptor de potencia.
- **Trasladar el sistema manipulador:** Se encarga de movilizar al sistema manipulador por la zona de trabajo disponible.
- **Trasladar actuador:** Se encarga de hacer posible el movimiento del actuador para aproximarse al interruptor de potencia.

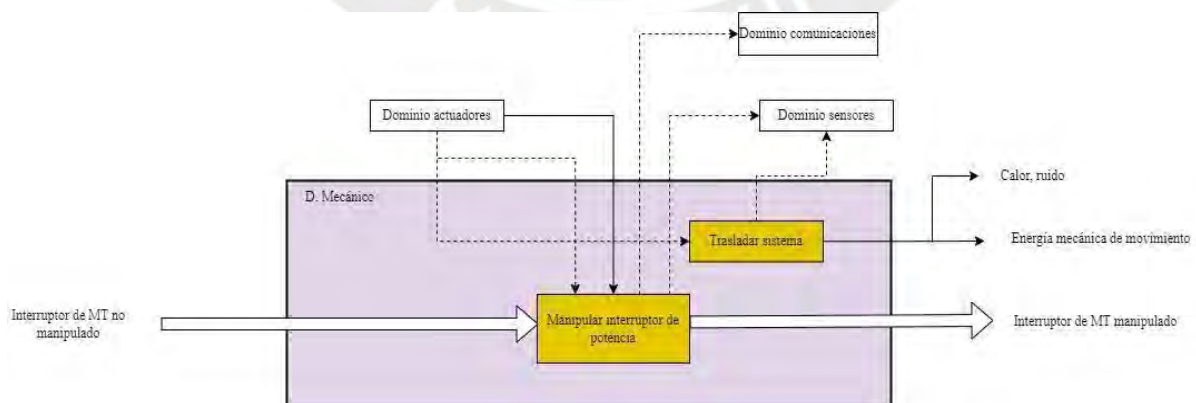


Figura 3.6. Dominio mecánico. Elaboración propia.

Como último detalle en la presente sección, en la Figura 3.7 se ilustra la estructura de funciones de manera completa.



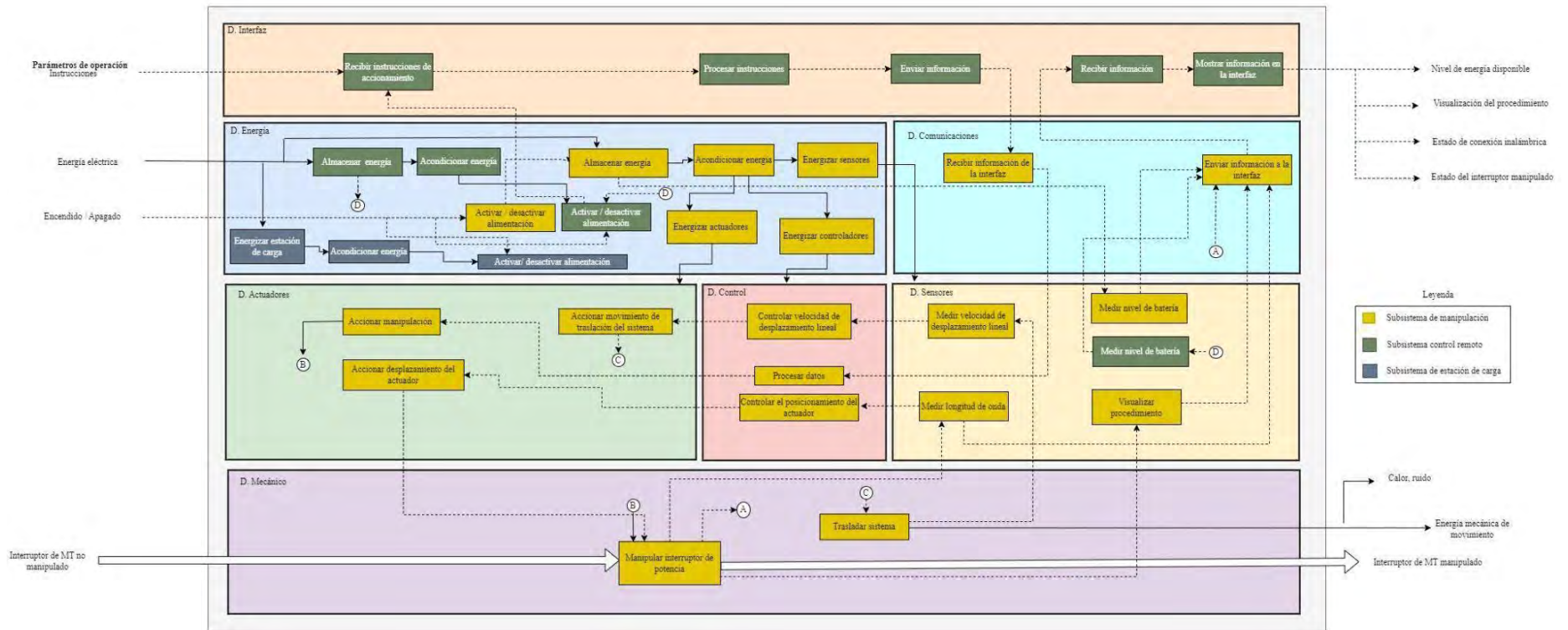


Figura 3.7. Estructura de funciones. Elaboración propia.

### 3.4. Matriz morfológica

Siguiendo la estructura anteriormente descrita, se presentan diferentes alternativas a nivel tecnológico para cada función. En el Anexo B se encuentra el desarrollo de la matriz morfológica, donde se ha realizado una división por subsistemas, desarrollándose los dominios para cada uno de estos casos. A continuación, se muestran los resultados obtenidos correspondientes a 3 conceptos de solución indicados en las tablas 3.1, 3.2 y 3.3.

Tabla 3.1. Conceptos de solución - Subsistema de manipulación. Elaboración propia.

Subsistema de manipulación				
Función		Solución 1	Solución 2	Solución 3
Dominio Mecánico	Manipular interruptor de potencia	Estructura metálica móvil + piezas impresas + solenoide	Manipulador robótico de 3 GDL adaptable + base móvil metálica + actuador lineal eléctrico	Manipulador robótico de 5 GDL adaptable + base móvil metálica + extensión
	Trasladar sistema	Ruedas omnidireccionales	Ruedas circulares	Llantas tipo oruga
Dominio Sensores	Medir nivel de batería	Sensor de nivel de batería	Circuito integrado	Circuito electrónico
	Medir velocidad de desplazamiento lineal	Encoders magnéticos	Sensor IMU	Encoders ópticos
	Medir longitud de onda	Algoritmo interno + cámara	Sensor RGB	Algoritmo interno + cámara
	Visualizar procedimiento	Cámara USB	Cámara infrarroja	Cámara industrial

Dominio Actuadores	Accionar manipulación	Motor DC	Motor paso a paso	Servomotor
	Accionar movimiento de traslación del sistema	Motor DC	Motor paso a paso	Servomotor
	Accionar desplazamiento del actuador	Motor paso a paso	Motor DC	Servomotor
Dominio Energía	Activar / desactivar alimentación	Switch de encendido / apagado	Pulsador de encendido / apagado	Palanca de encendido / apagado
	Acondicionar energía	Integrados step - up / step - down y reguladores integrados	Regulador con diodos Zener	Circuito electrónico
	Almacenar energía	Baterías Li - ion	Baterías de plomo y ácido	Baterías de Ni - Cd
	Energizar sensores	Microprocesador	Fuente de alimentación DC	Fuente de alimentación DC
	Energizar actuadores	Fuente de alimentación DC	Alimentación de la red (220 VAC trifásico, 60 Hz) + acondicionamiento interno	Alimentación de la red (220 VAC trifásico, 60 Hz)
	Energizar controladores	Fuente de alimentación DC	Alimentación de la red (220 VAC trifásico, 60 Hz) + acondicionamiento interno	Alimentación de la red (220 VAC trifásico, 60 Hz)

Dominio Comunicaciones		Recibir información de la interfaz	Comunicación Bluetooth	Comunicación Wi-Fi	Comunicación WiMax
		Enviar información de la interfaz	Comunicación Bluetooth	Comunicación Wi-Fi	Comunicación WiMax
Dominio Control	Hardware	Controlar velocidad de desplazamiento lineal	Microprocesador	Controlador industrial	Controlador industrial
		Procesar datos	Microprocesador	Microcontrolador	Procesador propio de dispositivo manipulador
		Controlar el posicionamiento del actuador	Microprocesador	Controlador industrial	Controlador industrial
	Software	Controlar posición del sistema manipulador	Algoritmo de control PID	Algoritmo de control adaptativo	Algoritmo de control ON/OFF
		Procesar datos	Software de código abierto	Software industrial	Software de código abierto
		Controlar el posicionamiento del actuador	Algoritmo de control PID	Algoritmo de control adaptativo	Algoritmo de control ON/OFF

Tabla 3.2. Conceptos de solución - Subsistema control remoto. Elaboración propia

Subsistema control remoto			
Función	Solución 1	Solución 2	Solución 3

Dominio Energía	Almacenar energía	Batería interna	Baterías de Li - ion	Batería interna
	Activar / desactivar alimentación	Switch de encendido / apagado interno	Pulsador de encendido / apagado	Palanca de encendido / apagado
	Acondicionar energía	Acondicionamiento interno	Acondicionamiento interno	Acondicionamiento interno
	Medir nivel de batería	Circuito electrónico en mando de consola	Circuito electrónico en laptop	Circuito electrónico en control remoto industrial
Dominio Interfaz	Recibir instrucciones de accionamiento	Pantalla táctil de tablet industrial	Teclado de laptop	Pantalla de control remoto industrial
	Procesar instrucciones	Procesador interno de tablet industrial	Procesador interno de laptop	Procesador interno de control remoto industrial
	Enviar información	Comunicación Bluetooth + mando de consola	Comunicación Wi - Fi + Laptop	Comunicación WiMax + control remoto industrial
	Recibir información	Comunicación Bluetooth	Comunicación Wi - Fi	Comunicación WiMax
	Mostrar información en la interfaz	Pantalla táctil de tablet industrial	Pantalla de laptop	Pantalla táctil de tablet industrial

Tabla 3.3. Conceptos de solución - Subsistema de estación de carga. Elaboración propia

Subsistema de estación de carga				
Función		Solución 1	Solución 2	Solución 3
Dominio Energía	Activar / desactivar	Switch de encendido	Pulsador de encendido	Palanca de encendido /apagado

	alimentación	/apagado	/apagado	
	Acondicionar energía	Fuente Switching	Transformador de voltaje + etapa rectificadora	Circuito electrónico
	Energizar estación de carga	Alimentación de la red (220 VAC trifásico, 60 Hz)	Alimentación de la red (220 VAC trifásico, 60 Hz)	Batería de plomo y ácido

### 3.5. Concepto de solución óptimo

Después de haber realizado una descripción y posterior evaluación de los tres conceptos de solución planteados (Anexos C y D), se concluye que el concepto de solución 1 es la más apropiada. Con relación a los cambios que se pueden realizar para mejorar la manipulación del interruptor de potencia de media tensión, se propone agregar una cadena para descargar a tierra cualquier carga estática presente en el robot, esto teniendo en cuenta dos factores: en primer lugar, el robot está compuesto por una estructura metálica, lo cual conlleva a que exista una zona electrizada; en segundo lugar, la radiación electromagnética del ambiente de trabajo podría también generar este efecto en el robot. La idea de esta cadena es que se encuentre sujeta en la base de este y pueda ser arrastrada constantemente para neutralizar cualquier carga estática presente, esto con la finalidad de agregar incluso una mayor seguridad para el operario al momento de la manipulación.

Las Figuras 3.8 y 3.9 muestran la interacción del sistema con los operarios. Con la finalidad de tener un mayor entendimiento, este se ha dividido en instalación y uso.

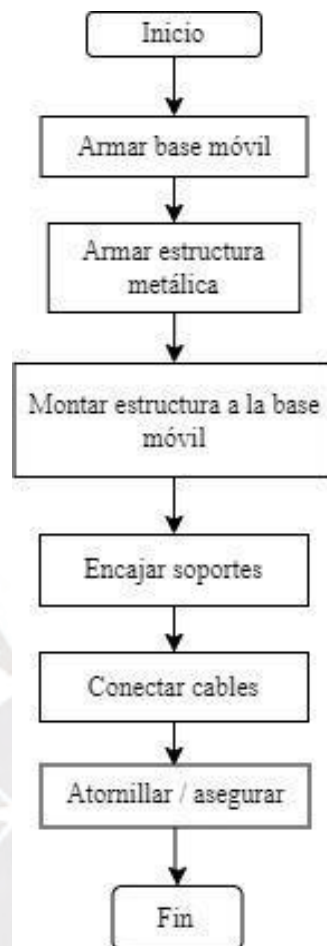


Figura 3.8. Diagrama de operaciones para la instalación. Elaboración propia.

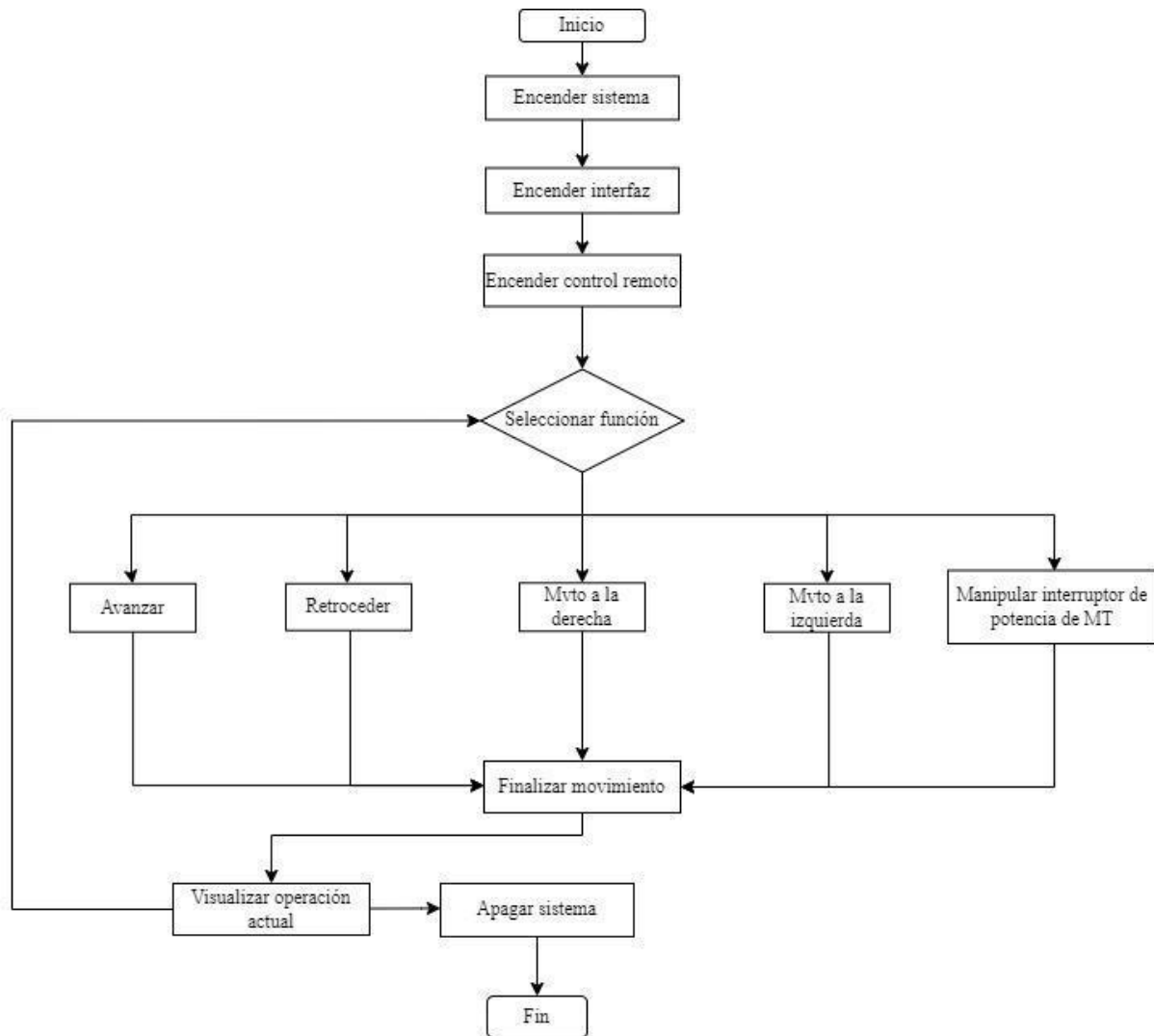


Figura 3.9. Diagrama de operaciones para el uso. Elaboración propia.

Adicionalmente, las Figuras 3.10 a la 3.12 muestran diagramas de bloques en donde se puede apreciar la interacción y conexión entre los componentes. Cabe mencionar que, al igual que en el caso de la matriz morfológica, las líneas continuas representan energía; mientras que las líneas discontinuas, señal.

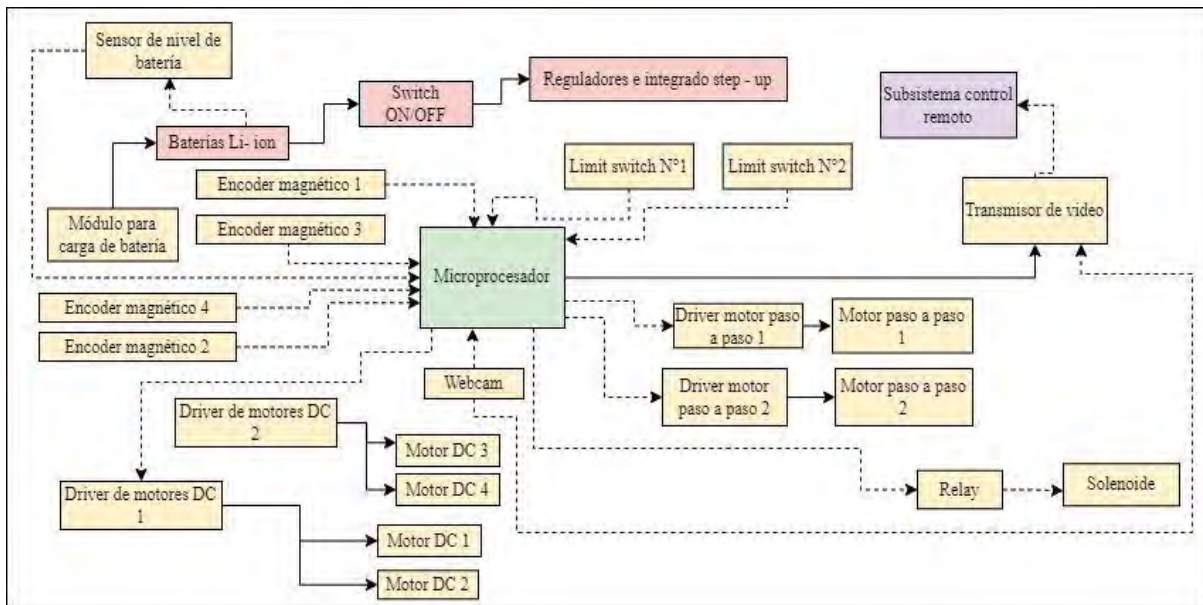


Figura 3.10. Diagrama de bloques del subsistema manipulador. Elaboración propia.

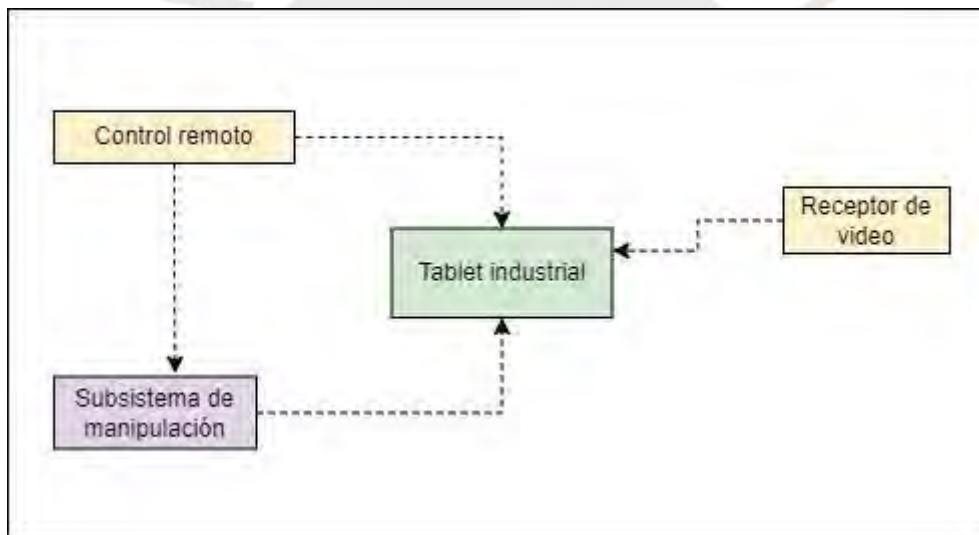


Figura 3.11. Diagrama de bloques del subsistema control remoto. Elaboración propia.

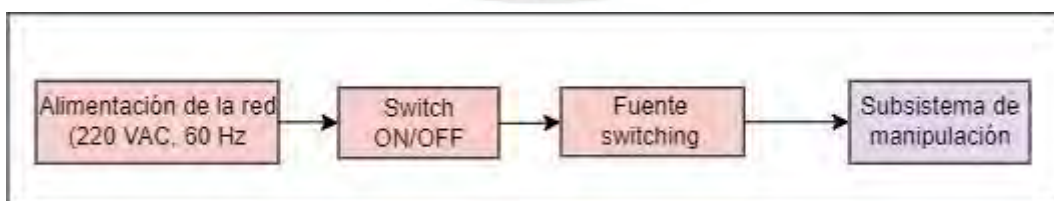


Figura 3.12. Diagrama de bloques del subsistema estación de carga. Elaboración propia.

## CAPÍTULO 4

### DISEÑO MECATRÓNICO

En el presente capítulo se realizará el desarrollo detallado del diseño mecatrónico, siguiendo los lineamientos establecidos en los capítulos anteriores. Primero, se llevará a cabo una descripción del sistema integral y cada uno de los subsistemas que lo conforman. Luego, se especificará el diseño en cada uno de los dominios: mecánico, eléctrico/electrónico, interfaz, control. Por último, se sitúan los planos de todos los elementos/ensambles del sistema.

#### 4.1. Descripción del sistema integral

Recapitulando lo analizado en la sección anterior, el sistema mecatrónico en cuestión presenta 3 subsistemas: subsistema de manipulación, subsistema de control remoto y subsistema de estación de carga. La interacción entre los 3 subsistemas se da de la siguiente manera: el operario traslada el sistema manipulador hacia el interruptor de potencia a manipular, ya sea a través del control remoto (mando de consola) o a través del soporte para traslado manual (parte de la estructura), donde esta última busca facilitar el traslado del sistema en caso se desee que este proceso no ocupe demasiado tiempo. Una vez que el manipulador se encuentra en la posición deseada, se debe indicar el color del botón a manipular a través de la interfaz presente en la tablet industrial para posteriormente accionar el botón en el control remoto correspondiente para empezar la manipulación. Dada esta orden, la cámara del subsistema manipulador captará las coordenadas (X, Y) de la ubicación del color del botón ingresado y gracias a los motores paso a paso se ubicará el solenoide alineado y al frente del botón, para posteriormente presionarlo de manera automática. Esto último es posible gracias a un algoritmo interno que, en conjunto con la cámara, detectará las coordenadas con cierta precisión. Por último, cabe mencionar que se puede manipular algún otro interruptor de potencia siguiendo

un proceso análogo al explicado anteriormente. Una vez terminadas las manipulaciones requeridas, se debe llevar el sistema a su estación de carga, en donde esperará la próxima instrucción a realizar.

## 4.2. DISEÑO MECÁNICO

En esta sección se detalla todo lo relacionado al dominio mecánico del desarrollo del proyecto. Se verán las siguientes secciones: Modelado 3D, selección de materiales y cálculos mecánicos.

### 4.2.1. Modelado 3D

A continuación, se analizarán los modelados 3D correspondientes al sistema mecatrónico.

#### Modelado 3D del sistema completo

En la Figura 4.1 se observa el modelado 3D del sistema mecatrónico basado en el concepto de solución 1.

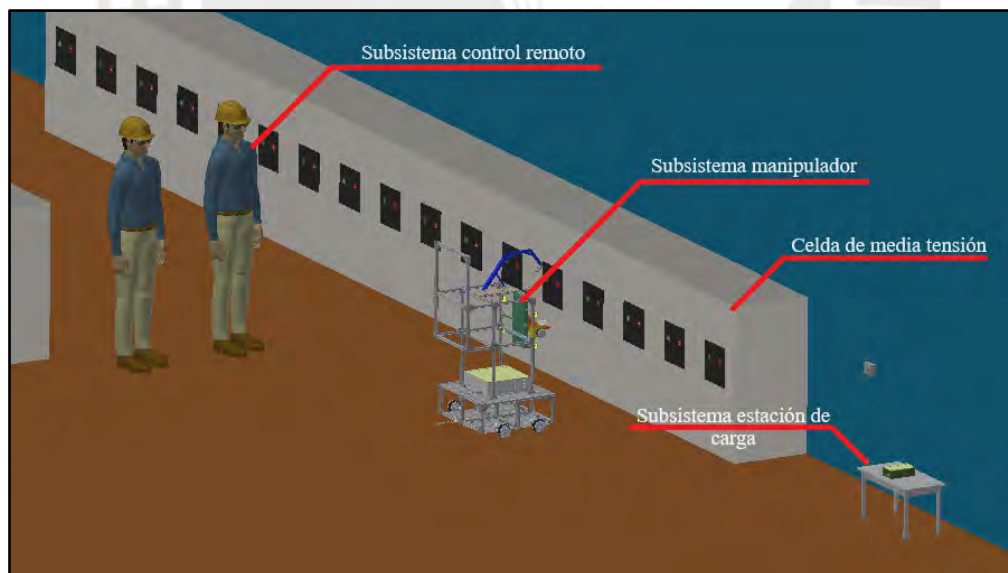


Figura 4.1. Modelado 3D del sistema integral. Elaboración propia.

### Modelado 3D del subsistema manipulador

La Figura 4.2 muestra la composición del subsistema manipulador, en donde se señalan sus elementos principales tales como la cámara, la estructura, la base móvil, etc. En las siguientes líneas se dará una mayor explicación sobre estas.

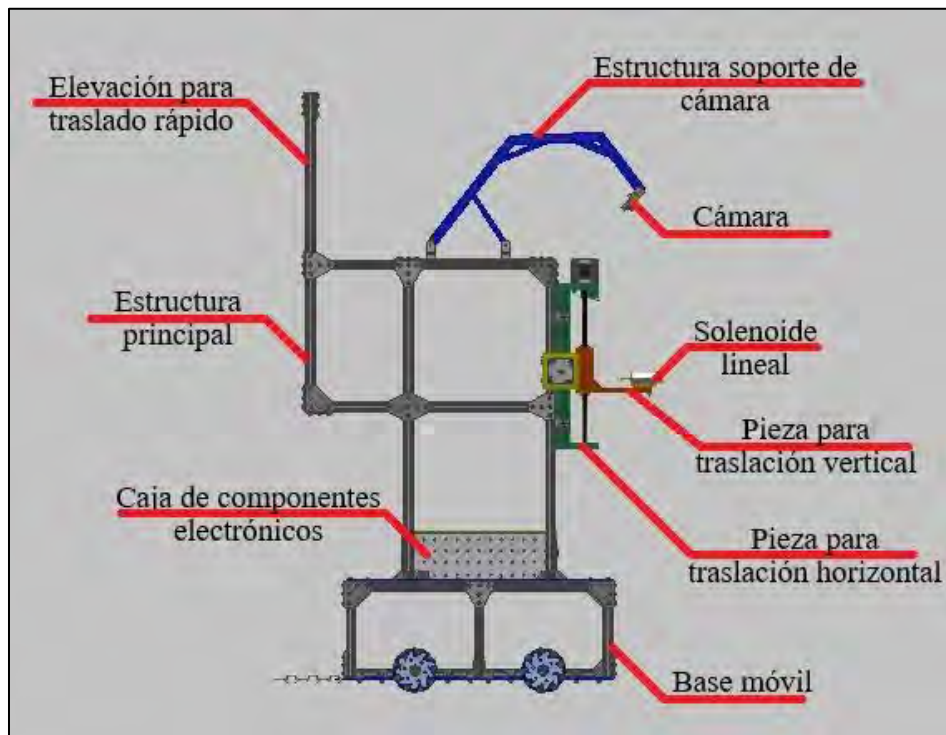


Figura 4.2. Modelado 3D del subsistema de manipulación. Elaboración propia.

### Dimensiones generales del subsistema manipulador

En las Figuras 4.3 y 4.4, se observan las dimensiones principales (en milímetros) del subsistema manipulador.

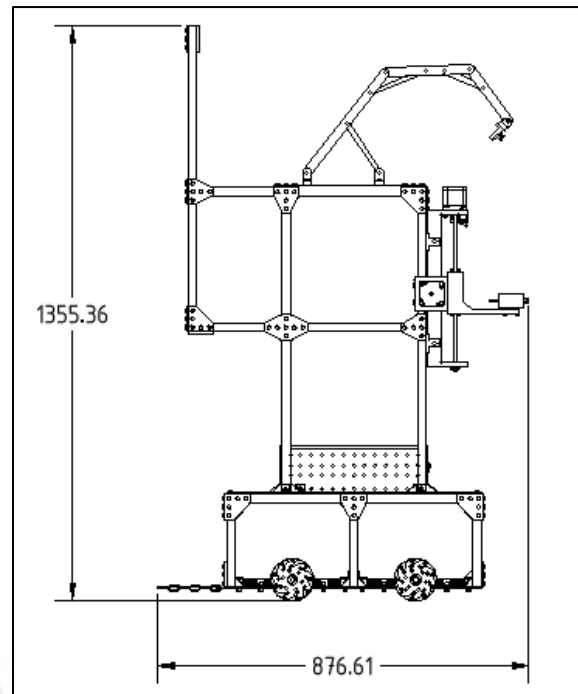


Figura 4.3. Dimensiones generales del subsistema manipulador – Vista frontal. Elaboración propia.

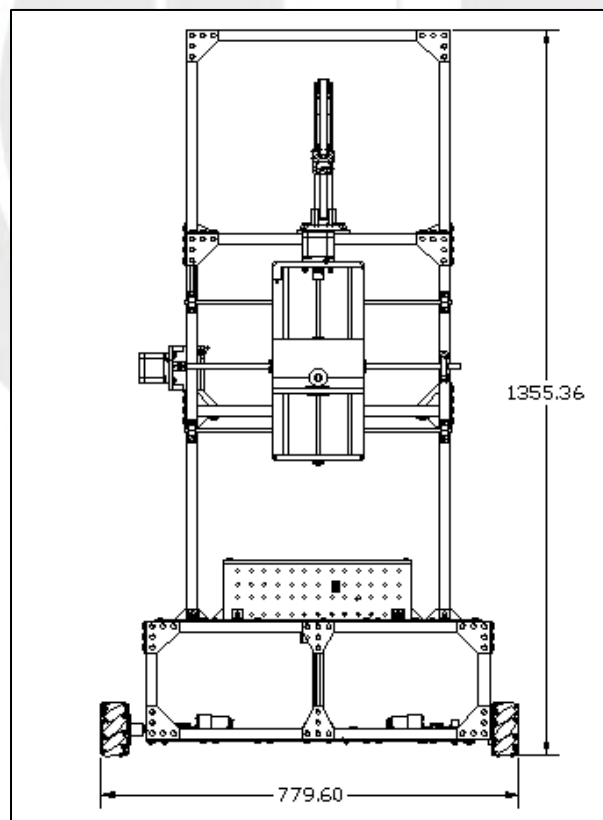


Figura 4.4. Dimensiones generales del subsistema manipulador – Vista de perfil. Elaboración propia.

## Cámara

Con respecto a la cámara, en la Figura 4.5 se observa una estructura conformada por elementos impresos en 3D unidos a través de pasadores, la cual a su vez se encuentra apoyada sobre una base atornillada a la estructura. Es importante mencionar que esta presenta un ángulo de inclinación de  $40^\circ$  respecto a la horizontal.

En la estructura se observa que existe una elevación para traslado rápido, esta tiene como objetivo poder trasladar el robot a voluntad, en caso se desee trasladarlo entre puntos lejanos.

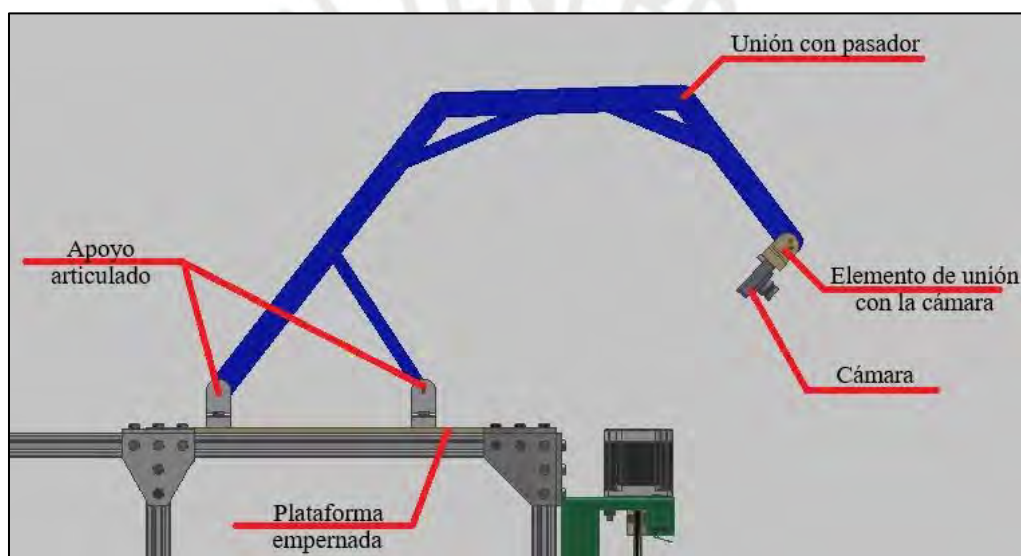


Figura 4.5. Detalle de la estructura de soporte de la cámara. Elaboración propia.

## Movimiento del solenoide

La Figura 4.6 detalla los principales componentes que hacen posible el movimiento del solenoide, siendo estos los motores paso a paso que ubican a este último en las posiciones X e Y solicitadas según la lectura de la cámara. Cabe mencionar que las piezas de color verde y naranja, así como el soporte de motor paso a paso horizontal serán impresos en 3D.



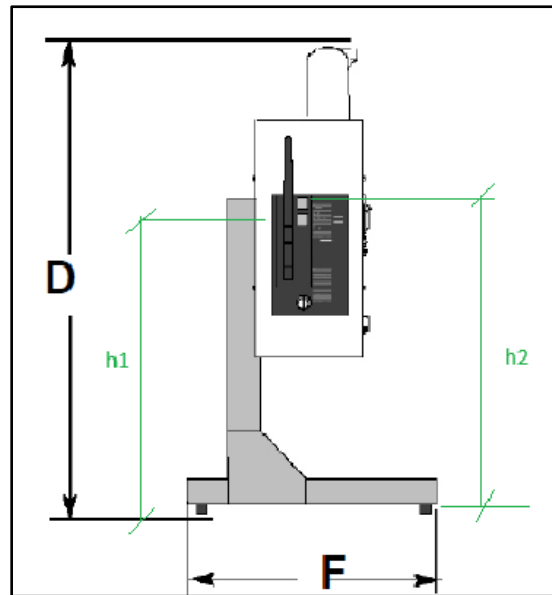


Figura 4.8. Interruptor de potencia de MT de la empresa Schneider Electric. (Schneider Electric, s/f)

La figura anterior fue obtenida de la guía de uso de la empresa ya mencionada, en donde se indica que la altura vertical  $D$  tiene un valor de 1175 mm. Es así que, trabajando con una escala, es posible obtener las alturas de los botones respecto al piso ( $h_1$  y  $h_2$ ). Realizando este procedimiento se obtienen las alturas  $h_1 = 762.13 \text{ mm}$  y  $h_2 = 726.54 \text{ mm}$ , las cuales sirven de referencia para el desplazamiento vertical del solenoide.

Es así, que se ha considerado que el solenoide se encuentre a una altura de 725 mm respecto del piso y tenga un movimiento vertical de  $\pm 125 \text{ mm}$ , representado por el rango [600, 850] mm.

Con respecto al desplazamiento horizontal, se considera un rango de 22 cm con un margen de seguridad adecuado para evitar limitaciones en el alcance total del manipulador. Lo anterior se ilustra en la Figura 4.9.

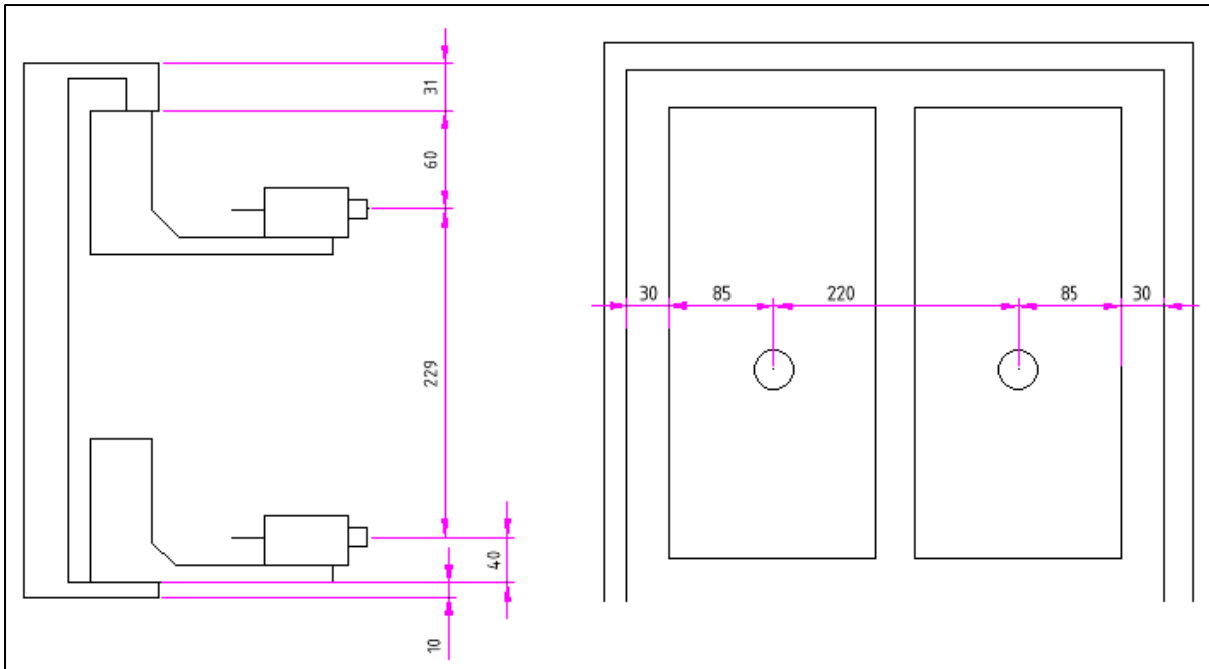


Figura 4.9. Rango de alcance del solenoide en el eje y (imagen izquierda) y eje x (imagen derecha). Elaboración propia.

### Caja de componentes electrónicos

En la Figura 4.10, se observa una vista externa de la caja de componentes electrónicos presente en el manipulador con el objetivo de ilustrar su ensamblaje. Posteriormente en el diseño electrónico se analizará su composición interna.

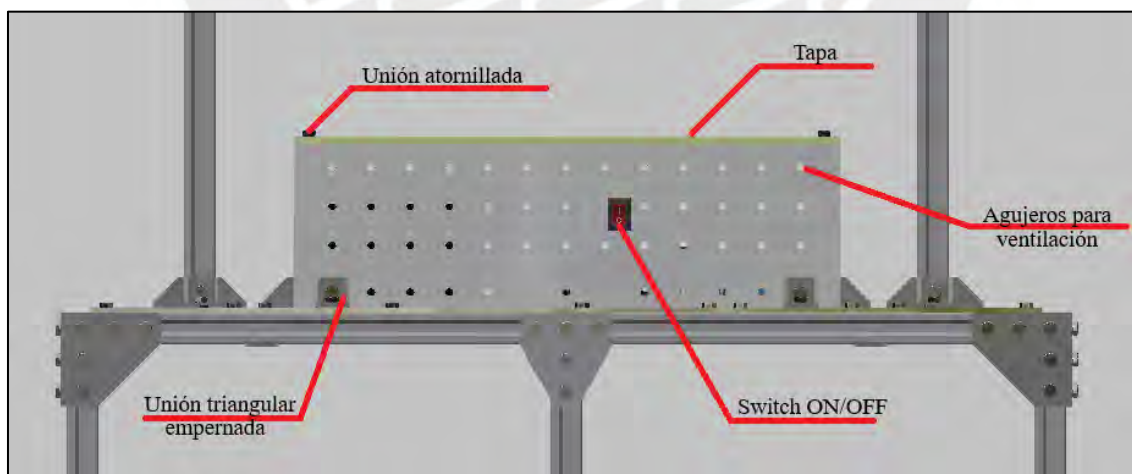


Figura 4.10. Caja de componentes electrónicos - Vista exterior. Elaboración propia.

## Base móvil

La Figura 4.11 muestra una vista general de la base móvil del subsistema manipulador. En los siguientes párrafos se verá a detalle sus componentes.

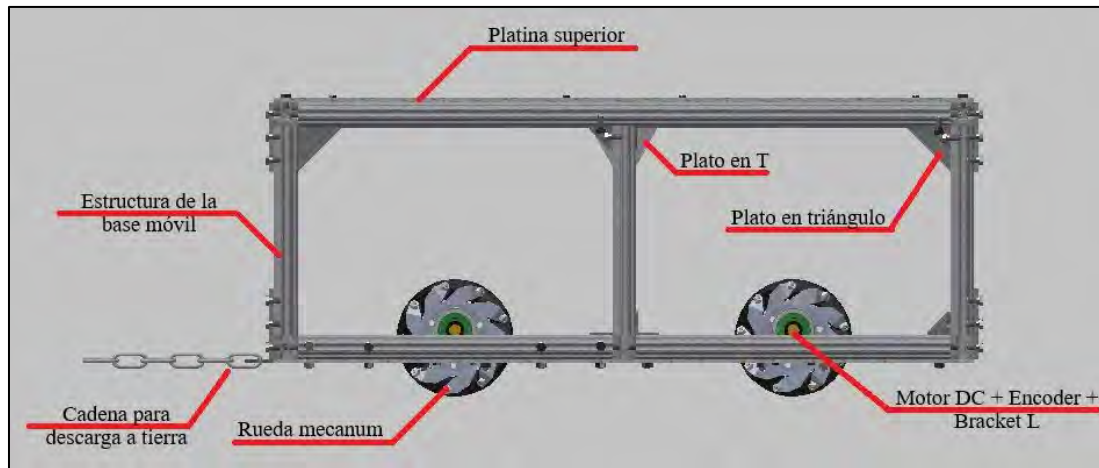


Figura 4.11. Vista general de la base móvil del subsistema manipulador. Elaboración propia.

Analizando la figura anterior, la base móvil se encuentra conformada por una estructura de v-slots para darle rigidez a este conjunto, esto es necesario puesto que este soportará el peso de los elementos restantes del robot. Cabe destacar que presenta platinas de aluminio tanto para la parte inferior como para la parte superior. Además, se empleará ruedas tipo mecanum (omnidireccionales) con el objetivo de poder facilitar el posicionamiento del robot de tal forma que siempre se logre ubicar este delante del interruptor de potencia de media tensión, es decir, con una correcta alineación. El funcionamiento de este tipo de ruedas se ilustra en la Figura 4.12.

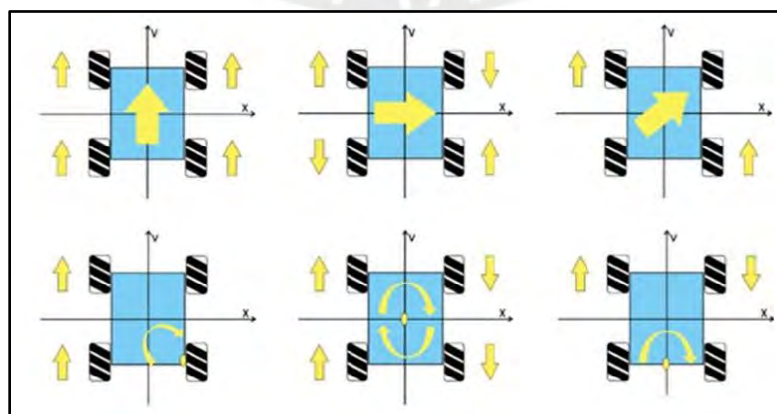


Figura 4.12. Funcionamiento de ruedas mecanum. RoboCT, s/f.

### Modelado 3D del subsistema estación de carga

La Figura 4.13 muestra el modelado 3D de la estación de carga, el cual básicamente consta de una carcasa impresa en 3D con conectores para recargar la batería del robot manipulador siempre que se requiera.

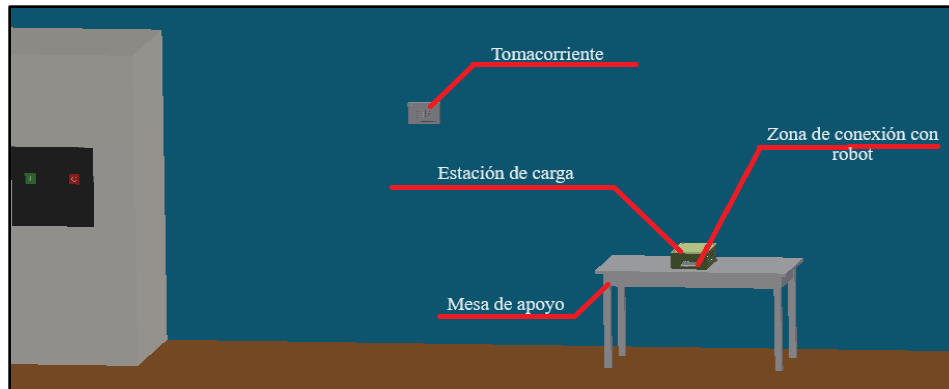


Figura 4.13. Estación de carga del sistema manipulador. Elaboración propia.

Es importante mencionar que el subsistema control remoto no posee un dominio mecánico y es por esta razón que no se le ha mencionado en anteriores apartados. Este último mencionado será analizado posteriormente.

A continuación, se desarrollará el dominio mecánico para el caso del subsistema manipulador.

#### 4.2.2. Selección de materiales

En la presente sección, se realizará la selección de materiales según los requerimientos de cada elemento presente en el subsistema manipulador.

#### Material para la estructura y la base móvil del subsistema de manipulación

Se requiere de una estructura total ligera, esto con la finalidad de facilitar el ensamblaje, así como de poder trasladar el robot sin mucha dificultad. Dado que la estructura no estará sometida a una cantidad significativa de carga (esto se validará posteriormente con cálculos de

peso), y, además, se busca que esta sea lo más ligera posible para garantizar una facilidad de ensamblaje y de traslado; se opta por emplear aluminio 6063 - T5. Particularmente, se opta por emplear perfiles v-slots cuya sección es de 20 x 20 mm, esto debido a que presentan una sección con un momento de inercia mayor que otro tipo de perfiles de dimensiones similares (como el perfil en L, por ejemplo), esto último implica una mayor rigidez para la estructura, es por ello que es muy usado en este tipo de aplicaciones. (Fuente: Cimech3D)

### **Material para las piezas de traslación del solenoide y los elementos del soporte de la cámara**

En esta parte de la selección de materiales, se busca elegir el material más apropiado para las piezas impresas en 3D que se trasladarán de manera horizontal y vertical a lo largo de la estructura (las cuales fueron vistas en la Figura 4.6), así como de los elementos que conforman el soporte de la cámara USB (Figura 4.5), esto es: elementos de unión, apoyos y base de soporte de la cámara. Se opta por emplear piezas impresas en PLA a través de manufactura aditiva. Cabe mencionar que, para posteriores cálculos se emplearán las propiedades mecánicas del PLA impreso considerando un relleno de 100% en las impresiones, según Farah et al (2016).




### **Selección del material de las platinas de la base móvil**

Para el caso de las platinas de la base móvil, se usará aluminio como material base por motivos similares a los indicados en la selección del material de la estructura del manipulador.

### **Selección de la cámara USB**

Para la selección de la cámara USB (Tabla 4.1) es importante tener en cuenta dos aspectos principales: se busca que esta tenga dos salidas de video (una para la detección de coordenadas en la unidad de control, y otra para poder transmitir el video a través de un transmisor - receptor), además de unas dimensiones apropiadas para ser acopladas en el sistema. Asimismo, se busca que los fps (frames per second) se encuentren entre 30 y 60 para garantizar que la calidad del video transmitido sea adecuada. (Fuente: IONOS Digital Guide)

Tabla 4.1. Selección de la cámara USB. Elaboración propia.

Características	Alternativa		
	Arducam Cámara USB [1] 	ELP Cámara USB HDMI 4K [2] 	MOKOSE Cámara HDMI/USB HD Streaming Webcam [3] 
Salidas disponibles	HDMI (1 salida)	HDMI y USB tipo C (2 salidas)	HDMI y USB tipo C (2 salidas)
Resolución	1080P @ 30 fps	4K @ 30fps	4K @ 30fps
Campo de visión horizontal (HFOV)	-	120°	85°
Peso	-	150 - 200 g	146 g
Dimensiones	80 x 50 x 50 mm	37.85 x 37.85 x 47 mm	95 x 59 x 27.2 mm
¿Compatible con diferentes sistemas operativos?	Sí	Sí	Sí
Precio (Considerando un tipo de cambio de 1 US\$ = S/. 4.00)	US\$ 35 = S/. 140.00	US\$ 107 = S/. 428.00	US\$ 142.50 = S/. 570.00

[1] <https://www.amazon.com/-/es/Arducam-nocturna-computadora-conmutaci%C3%B3n-autom%C3%A1tica/>

[2] <https://www.amazon.com/-/es/computadora-simult%C3%A1neamente-Lightburn-seguridad-port%C3%A1til>

[3] <https://www.amazon.com/-/es/C100-6-12MM/dp/B07YZPJ2CM?th=1>

De las tres alternativas presentadas, la elegida es la cámara marca MOKOSE. Esto se debe a que presenta una resolución adecuada (4K @ 30 fps), y un filtro de ruido presente en el envío de información, siendo un modelo más robusto que la segunda alternativa. Adicionalmente, esta cámara presenta un agujero roscado para facilitar el montaje al subsistema manipulador, lo cual favorece al diseño mecánico.

Una vez elegida la cámara a emplear, es necesario garantizar el rango de visión adecuado tanto para el monitoreo del procedimiento como para el procesamiento de la imagen para identificar el color deseado. La Figura 4.14 muestra los parámetros importantes a tener en cuenta en este tipo de aplicaciones.

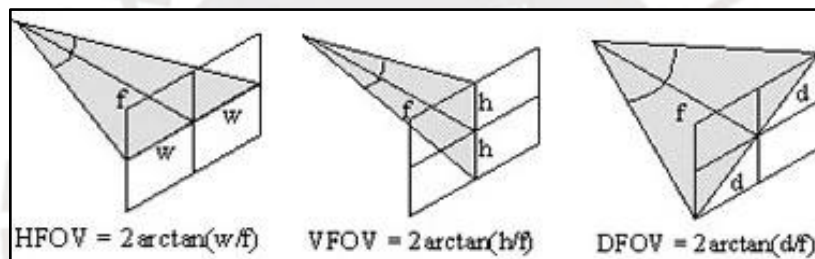


Figura 4.14. Parámetros para analizar el rango de visión de una cámara. (Mvteam, s.f.)

### Cálculo del campo de visión vertical (VFOV)

Particularmente para el desarrollo del sistema en cuestión, se debe calcular el valor del VFOV con la finalidad de estimar el rango de visión vertical de la cámara. En primer lugar, se debe tener en cuenta la relación de aspecto de la cámara USB, la cual es de 16:9. Luego, se puede calcular el VFOV a través de la siguiente fórmula:

$$VFOV = 2 \arctan\left(\frac{9}{16} \tan\left(\frac{HFOV}{2}\right)\right)$$

Reemplazando con  $HFOV = 85^\circ$ , se obtiene un  $VFOV = 55.26^\circ$ . El resultado de lo anterior se muestra en la Figura 4.15.

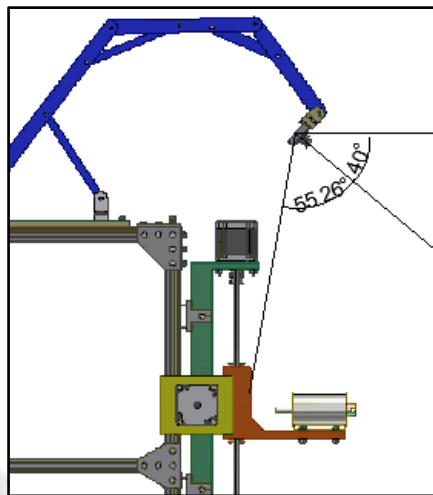


Figura 4.15. Ángulos verticales presentes en la cámara. Elaboración propia.

Entonces, se puede garantizar que se tiene una correcta visualización tanto del solenoide en el momento de la manipulación.

### **Selección del material del soporte de la cámara USB**

Los elementos que conforman el soporte de la cámara USB serán realizados a través de manufactura aditiva (impresión 3D) en plástico PLA. Esto es así debido principalmente a que este soporte no está sometido a un peso considerable, pues la cámara USB elegida tiene una masa de 146 g.

Es de esperarse que, dado el bajo peso de la cámara acoplada a la estructura, no se origine falla alguna. Para validar ello, se ha realizado una simulación por elementos finitos en el software Inventor. Esto se realizó considerando las siguientes características para PLA impreso con un porcentaje de relleno del 100% (Farah, Shady, et al, 2016), las cuales se muestran en la Tabla 4.2. Además, estas características del PLA se emplearán para posteriores cálculos.

Tabla 4.2. Propiedades mecánicas del PLA. Farah, Shady, et al, 2016.

Características	PLA - impresión 3D	
Generales	Densidad	1 g/cm <sup>3</sup>
	Esfuerzo último de tracción	59 MPa
	Esfuerzo de fluencia	70 MPa
Esfuerzo	Módulo de Young	1.28 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.36
	Módulo de corte	0.64 GPa

La Figura 4.16. muestra la configuración realizada en el software Inventor.

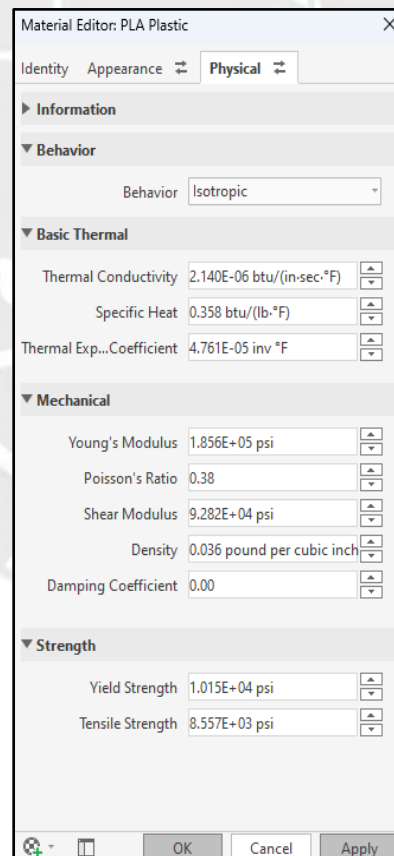


Figura 4.16. Configuración del material en software Inventor. Elaboración propia.

Vale la pena mencionar que el material presenta un comportamiento isotrópico en la simulación, siendo un caso diferente al real debido a que este se encuentra constituido

por capas de plástico. No obstante, el tener como resultado un factor de seguridad alto es una buena aproximación del comportamiento final del material. Los resultados de dicha simulación se observan en las Figuras 4.17, 4.18 y 4.19, en donde se ha considerado como elementos de unión pasadores de acero inoxidable (ISO 2338) de 3 mm de diámetro para todos los casos.

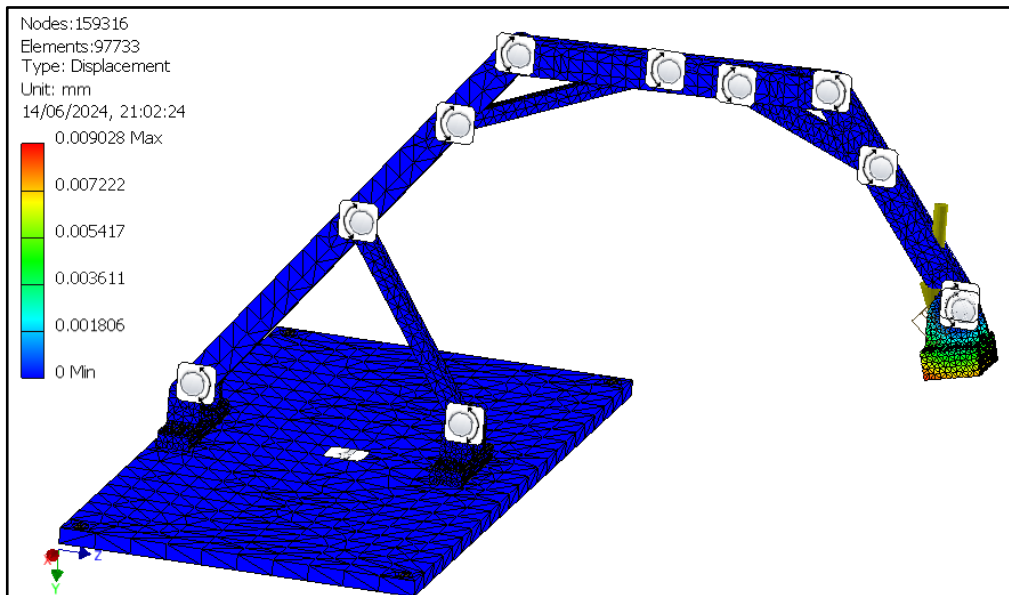


Figura 4.17. Desplazamientos presentes en la simulación. Elaboración propia.

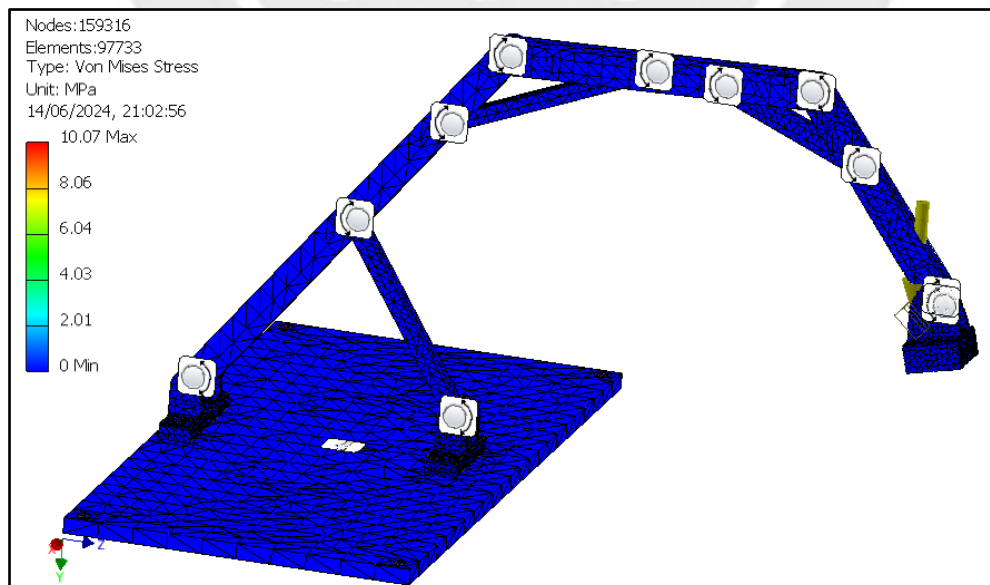


Figura 4.18. Esfuerzos equivalentes de Von Mises en la simulación. Elaboración propia.

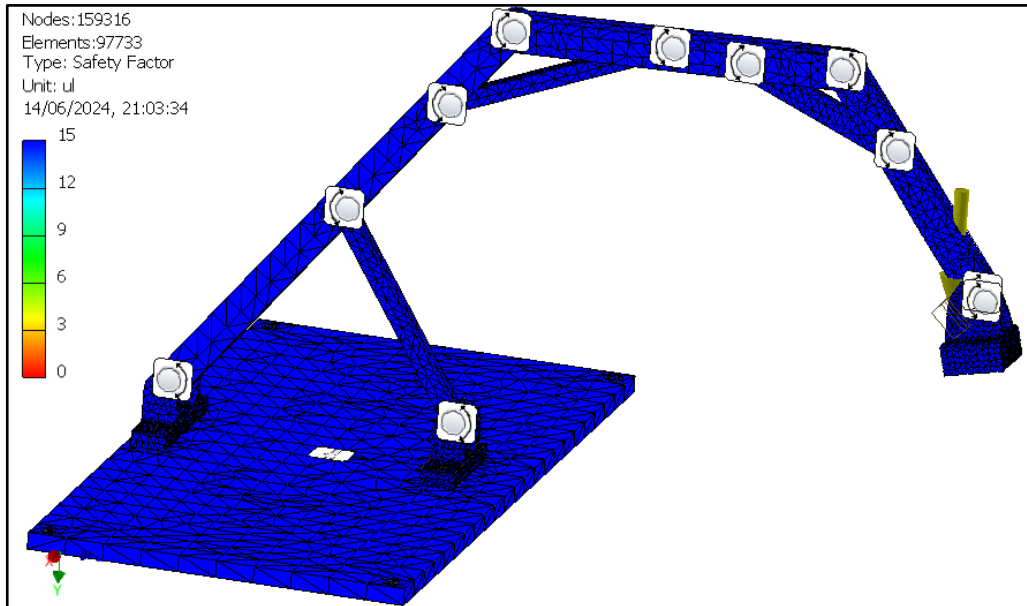


Figura 4.19. Factor de seguridad en la simulación. Elaboración propia.

Luego de observar las últimas figuras mostradas, se valida el comportamiento esperado de la estructura. A continuación, se le asignará un nombre a cada elemento que conforma la estructura (Figura 4.20) con la finalidad de especificar las dimensiones del pasador para cada caso.

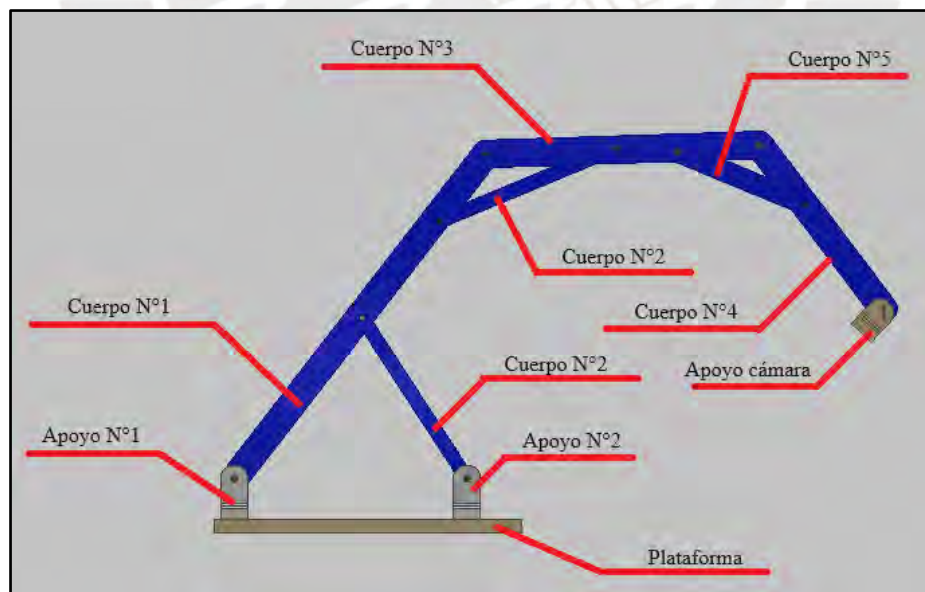


Figura 4.20. Elementos de la estructura de la cámara. Elaboración propia.

La Tabla 4.3 muestra las especificaciones de cada unión mostrada en la Figura 4.18. Para los costos en cada caso se empleó como referencia el catálogo de pasadores ISO 2338 de la empresa Norelem.

Tabla 4.3. Especificaciones de las uniones presentes en la estructura. Elaboración propia.

Unión	Longitud del pasador (mm)	Designación	Costo (Considerando 1 € = S/. 4.10)
Cuerpo N°1 - Apoyo N°1	45	Pasador cilíndrico 3 x 45	0.43 € = S/. 1.76
Cuerpo N°2 - Apoyo N°2	30	Pasador cilíndrico 3 x 30	0.24 € = S/. 0.98
Cuerpo N°1 - Cuerpo N°2 (2 unidades)	30	Pasador cilíndrico 3 x 30 (2)	0.48 € = S/. 1.97
Cuerpo N°1 - Cuerpo N°3	30	Pasador cilíndrico 3 x 30	0.24 € = S/. 0.98
Cuerpo N°2 - Cuerpo N°3	20	Pasador cilíndrico 3 x 20	0.20 € = S/. 0.82
Cuerpo N°3 - Cuerpo N°5	20	Pasador cilíndrico 3 x 20	0.20 € = S/. 0.82
Cuerpo N°3 - Cuerpo N°4	20	Pasador cilíndrico 3 x 20	0.20 € = S/. 0.82
Cuerpo N°4 - Cuerpo N°5	12	Pasador cilíndrico 3 x 12	0.13 € = S/. 0.54
Cuerpo N°4 - Apoyo cámara	20	Pasador cilíndrico 3 x 20	0.20 € = S/. 0.82
		Total	S/. 9.51

### Selección del material para la caja de componentes electrónicos en el manipulador




De manera similar al caso del soporte de la cámara, se elige emplear PLA para la caja de componentes electrónicos del manipulador. Una ventaja en este caso es que dicho material presenta aislamiento eléctrico.

### Selección de solenoide

La elección del solenoide (Tabla 4.4) es uno de los elementos más importantes del subsistema manipulador, puesto que es el que accionará los botones del interruptor de potencia. Como requerimientos principales, se debe tomar en cuenta su peso, sus dimensiones, la potencia

máxima demandada y la fuerza máxima que puede ejercer. Según la lista de requerimientos del Anexo A, la fuerza mínima referencial para accionar los botones sería de 10 N, donde se puede observar que tanto la segunda como la tercera alternativa (leyendo de izquierda a derecha) cumplen con esto último; sin embargo, la tercera de estas presenta un peso mayor en comparación a la segunda opción, así como el triple de costo y una mayor demanda de potencia. Luego, la mejor elección para este caso sería la alternativa 2: Landa Tubular Solenoid TU 4875.

Tabla 4.4. Selección del solenoide. Elaboración propia.

Característica	Alternativa		
	Magnetic Solenoid TAU-0530 [1] 	TU3257 20 mm Long Stroke [2] 	Landa Tubular Solenoid TU65110L [3] 
Voltaje de alimentación	12 V	12 - 24 VDC	24 VDC
Potencia	18 W	125 W	32 - 320 W
Dimensiones	56.8 x 15 x 13 mm	L: 57 mm D: 32 mm	168 x 70 x 45 mm
Carrera	9.8 mm	20 mm	50 mm
Fuerza	$0 \leq F \leq 7 \text{ N}$	$0 \leq F \leq 12 \text{ N}$	$0 \leq F \leq 120 \text{ N}$
Peso	0.100 kg	0.27 kg	2.45 kg
Precio (Considerando 1US\$ = S/.4.00)	S/. 4.63	25 US\$ = S/. 100.00	95 US\$ = S/. 380.00

[1] <https://www.aliexpress.com/item/32731717962>

[2] <https://www.alibaba.com/product-detail/TU3257-20mm-Long-Stroke-12v-24v>

[3] <https://zslanda.en.alibaba.com/product/62383545627>

### Selección de ruedas tipo mecanum del manipulador

Para la selección de ruedas, se toma en cuenta que este tipo de ruedas varía sus propiedades en función a los siguientes aspectos: diámetro de la rueda, capacidad de carga, tipo de aplicación y material de construcción. Para este caso, se debe buscar unas ruedas con una capacidad de carga media (20 kg aproximadamente) y de un diámetro entre 100 - 150 mm, además de una buena resistencia y durabilidad. La comparación se muestra en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Tabla comparativa para selección de ruedas mecanum. Elaboración propia.

Características	Alternativa		
	Ruedas de aluminio [1] 	Ruedas de acero [2] 	Ruedas de nylon [3] 
Material base	Aluminio	Acero	Nylon
Diámetro	100 mm	60 mm	2" (50 mm)
Capacidad de carga promedio	20 - 45 kg	35 - 50 kg	-
Precio (Considerando 1US\$ = S/.4.00)	\$ 38.49 = S/. 153.96	S/. 116.45	\$45.00 = S/. 180

[1] <https://es.aliexpress.com/item/4001233189119>

[2] <https://www.amazon.de/Vbestlife-Mecanum-Wheels-Durable-Capacity>

[3] <https://www.vexrobotics.com/mecanum-wheels.html>

De todas las características mostradas, se opta por las ruedas mecanum de aluminio como la mejor alternativa debido a que presenta propiedades intermedias entre el acero y el nylon, así como favorecer a disminuir el peso del sistema completo. Adicionalmente, estas ruedas incluyen un acople para el motor DC que se elegirá posteriormente. (Figura 4.21)



Figura 4.21. Ruedas mecanum de aluminio con acople para motor DC. (Ali Express, s/f)

### Cadena para descarga a tierra

La cadena debe tener una longitud de tal manera que garantice el contacto con el suelo, sin tener demasiada longitud. Esto debido a que una gran longitud podría perjudicar el movimiento del robot, así como también podría ocasionar el resbalamiento del operario. Ahora bien, dado que no existe requerimiento de carga alguna es posible elegir alguna cadena en base a 2 criterios: el costo y su diámetro del eslabón. Es así que se elige una cadena con las características mostradas en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Especificaciones principales de la cadena. Obtenido de Promart Homecenter Perú.

Especificaciones principales	
Diámetro del eslabón	3 mm (1/8")
Precio de lista (por metro)	S/. 6.50
Precio de lista gancho de seguridad de cadena	S/. 6.50
Proveedor	Promart Perú
Material	Acero galvanizado
Marca	SM
Fuente	<a href="https://www.promart.pe/cadena-de-acero-galvanizado-3mm--1-8-----venta-por-metro/p">https://www.promart.pe/cadena-de-acero-galvanizado-3mm--1-8-----venta-por-metro/p</a>

Además, esta cadena será fijada en la parte inferior de la estructura de v-slots a través de un ángulo de 90° (Figura 4.22), cuyas características se observan en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7. Especificaciones principales de la unión en 90°. Obtenido de Promart Homecenter Perú.

Especificaciones principales	
Peso del producto	0.04 kg
Dimensiones	1 “ x 1”
Precio de lista (por metro)	S/. 1.50
Proveedor	Promart Perú
Material	Acero
Marca	Global Trader
Fuente	<a href="https://www.promart.pe/angulo-liviano-1--x2-unids-/p">https://www.promart.pe/angulo-liviano-1--x2-unids-/p</a>

Es necesario recalcar que se necesitaría una longitud menor a 1 m (longitud de compra), esto debido a que la distancia entre la parte inferior de la rueda y la base del robot es de aproximadamente 5.5 cm, con lo cual un valor apropiado para la longitud de la cadena sería de 8 cm. Dicho corte deberá ser realizado con alguna herramienta especial, como por ejemplo una cizalla.



Figura 4.22. Distancia rueda mecanum y platina. Elaboración propia.

Las especificaciones de las platinas se observan en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Especificaciones de la platina. Elaboración propia.

Especificaciones principales	
Dimensiones	4"x 1/8"x 5.95 m
Material	Aluminio
Precio de lista	S/. 180.00
Proveedor	Grupo Tasayco
Fuente	<a href="https://tasayco.com.pe/producto/platina-de-aluminio-4-x-1-8-x-5-95m/">https://tasayco.com.pe/producto/platina-de-aluminio-4-x-1-8-x-5-95m/</a>

Una vez indicadas las características de la platina en cuestión, es de notar que dentro del presupuesto se consideran 2 platinas tanto para cubrir tanto parte inferior como para la superior (realizando los cortes, cada 600 mm de longitud), tal y como se observó en la Figura 4.22.

#### 4.2.3. Cálculos mecánicos

##### Análisis de volcadura

Para este análisis, se ha empleado las herramientas brindadas por el software Autodesk Inventor, en donde se obtuvo las medidas de las distancias relativas entre los elementos y las masas de los elementos más significativos. Los resultados de este análisis se observan en las Tablas 4.9 a la 4.13.

Tabla 4.9. Masas de los elementos más significativos que conforman la base móvil. Elaboración propia.

Elementos de la base móvil			
Elemento	Masa unitaria	Cantidad	Masa total
Rueda mecanum	1 kg	4	4 kg
V-slot 20 x 20 x 200 mm	0.092kg	6	0.552 kg
V-slot 20 x 20x 600	0.275 kg	7	1.925 kg

mm			
V-slot 20 x 20 x 180 mm	0.082 kg	3	0.246 kg
V-slot 20 x 20 x 290 mm	0.133 kg	2	0.266 kg
V-slot 20 x 20x 270 mm	0.124 kg	2	0.248 kg
V-slot 20 x 20x 560 mm	0.257 kg	1	0.257 kg
Platinas de aluminio 4"x 1/8" x 600 mm	0.523 kg	12	6.276 kg
<b>Subtotal masa de la base móvil</b>			<b>13.770 kg</b>

Tabla 4.10. Masas de los elementos que conforman la estructura principal. Elaboración propia.

Elementos de la estructura principal			
Elemento	Masa unitaria	Cantidad	Masa total
V-slot 20 x 20 x 720 mm	0.330 kg	6	1.98 kg
V-slot 20 x 20 x 300 mm	0.137 kg	5	0.685 kg
V-slot 20 x 20 x 450 mm	0.206 kg	7	1.442 kg
V-slot 20 x 20 x 150 mm	0.069 kg	4	0.276 kg
<b>Subtotal masa de la estructura principal</b>			<b>4.383 kg</b>

Adicionalmente, para estimar las masas de los elementos impresos en 3D se empleó el software Ultimaker Cura (Figura 4.23), aproximando la masa de cada elemento a la cantidad de filamento empleado. Cabe mencionar que se considerará que todas las piezas presentan un relleno (infill) de 20%.

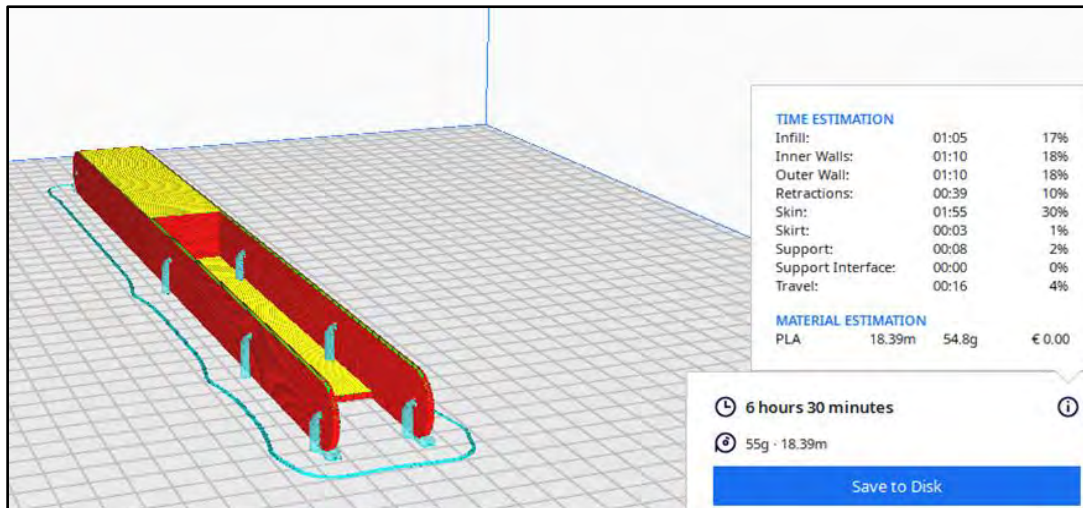


Figura 4.23. Estimación de parámetros de impresión en 3D. Elaboración propia.

Tabla 4.11. Masas de los elementos que conforman la traslación del solenoide. Elaboración propia.

Elementos para la traslación del solenoide			
Elemento	Masa unitaria	Cantidad	Masa total
Pieza para traslación horizontal (impresión 3D)	0.708 kg	1	0.708 kg
Pieza para traslación vertical (impresión 3D)	0.304 kg	1	0.304 kg
Husillo horizontal	0.207 kg	1	0.207 kg
Husillo vertical	0.142 kg	1	0.142 kg
Varilla horizontal	0.197 kg	2	0.394 kg
Varilla vertical	0.144 kg	2	0.288 kg
Solenoide	0.270 kg	1	0.270 kg
<b>Subtotal masa de los elementos para la traslación del solenoide</b>			<b>2.313 kg</b>

Tabla 4.12. Masas de los elementos que conforman el soporte de la cámara. Elaboración propia.

Elementos del conjunto soporte de cámara (considerando relleno de 20%)			
Elemento	Masa unitaria (kg)	Cantidad	Masa total
Cuerpo N°1 (impresión 3D)	0.055	1	0.055
Cuerpo N°2 (impresión 3D)	0.010	2	0.020

Cuerpo N°3 (impresión 3D)	0.029	1	0.029
Cuerpo N°4 (impresión 3D)	0.018	1	0.018
Cuerpo N°5 (impresión 3D)	0.006	1	0.006
Apoyo N°1 (impresión 3D)	0.013	1	0.013
Apoyo N°2 (impresión 3D)	0.011	1	0.011
Plataforma (impresión 3D)	0.099	1	0.099
Apoyo cámara (impresión 3D)	0.007	1	0.007
<b>Subtotal masa del soporte cámara</b>			<b>0.258 kg</b>

Tabla 4.13. Resumen de masas totales del subsistema manipulador. Elaboración propia.

Resumen de masas halladas	
Subconjunto	Peso
Subtotal masa de la base móvil	13.770 kg
Subtotal masa de la estructura principal	4.383 kg
Subtotal masa de los elementos para la traslación del solenoide	2.313 kg
Subtotal masa del soporte cámara	0.258 kg
<b>Masa total del subsistema manipulador</b>	<b>20.724 kg</b>

De lo anterior, se puede observar que el peso total del robot es de aproximadamente 21 kg, esto sin considerar, de momento, los componentes electrónicos del sistema.

A continuación, se procederá a dibujar un DCL con los respectivos pesos de cada elemento significativo para analizar la volcadura respecto a la rueda 2 (ubicada en el lado derecho de la Figura 4.24). Es importante resaltar que se ha ilustrado únicamente los pesos relevantes del sistema con el objetivo de simplificar el análisis.

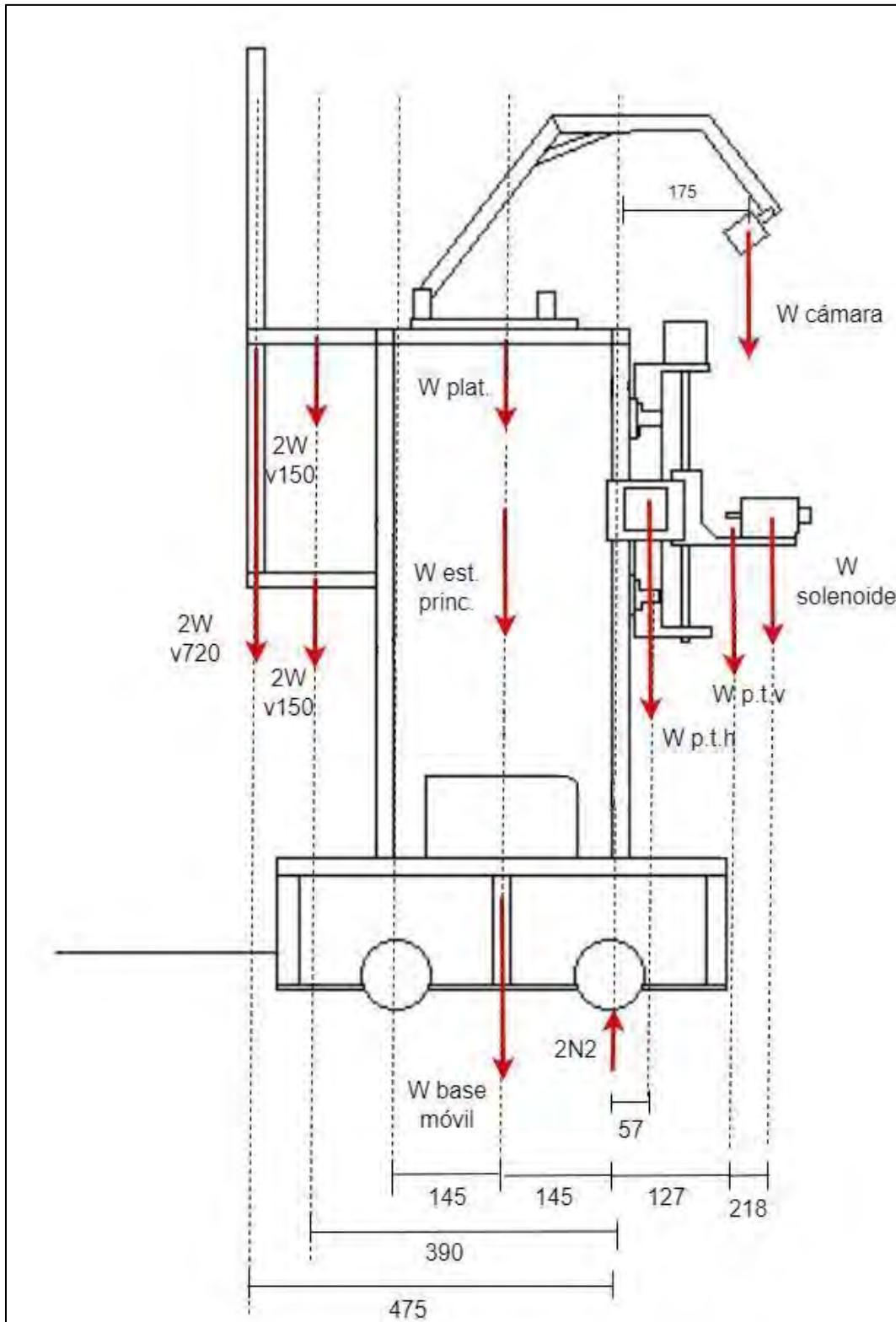


Figura 4.24. DCL del robot para analizar la volcadura respecto a la rueda 2. Elaboración propia.

Donde:

- $W_{v720}$ : Peso de v-slot 20 x 20 x 720 mm
- $W_{v150}$ : Peso de v-slot 20 x 20 x 150 mm
- $W_{plat}$ : Peso de la plataforma del soporte cámara
- $W_{est.princ.}$ : Peso de la estructura principal
- $W_{base\ móvil}$ : Peso de la base móvil
- $W_{p.t.h.}$ : Peso de la pieza para la traslación horizontal
- $W_{p.t.v.}$ : Peso de la pieza para la traslación vertical
- $W_{solenoid}$ : Peso del solenoide
- $W_{cámara}$ : Peso de la cámara (incógnita)
- $N_1$  y  $N_2$ : Fuerzas normales

En este caso, se emplean los valores de las masas halladas previamente, y con ello se calcula el peso de cada elemento, resultando en lo siguiente:

- $W_{v720}$ : 3.24 N
- $W_{v150}$ : 0.68 N
- $W_{plat}$ : 0.97 N
- $W_{est.princ.}$ : 43 N
- $W_{base\ móvil}$ : 135.08 N
- $W_{p.t.h.}$ : 6.95 N
- $W_{p.t.v.}$ : 2.98 N
- $W_{solenoid}$ : 2.65 N
- $W_{cámara\ (máx)}$ : ?

Para el análisis, es de notar que si la sumatoria de momentos en sentido horario respecto al punto de contacto de la rueda 2 con el suelo, es mayor que la sumatoria de momentos en el sentido opuesto, el sistema se volcará. Inicialmente, se tiene como incógnita el peso de la cámara que haría volcar el sistema para posteriormente validarlo con el peso real y analizar la estabilidad.

Entonces, tomando sumatoria de momentos respecto al punto de contacto de la rueda 2 con el piso:

$$\sum M.\text{en sentido horario} > \sum M.\text{sentido antihorario}$$

$$W_{p.t.h} \times 57 + W_{p.t.v} \times 127 + W_{solen.} \times 345 + W_{cám.} \times 175 > W_{b.móvil} \times 145$$

$$+ W_{est.princ.} \times 145 + W_{plat.} \times 145 + 2W_{v150} \times 390 + 2W_{v150} \times 390$$

$$+ 2W_{v720} \times 475$$

De la desigualdad anterior, se obtiene lo siguiente:

$$1688.86 + 175W_{cámara} > 30101.45$$

$$W_{cámara} > 162.36 \text{ N}$$

$$M_{cámara} > 16.55 \text{ kg}$$

Luego, se concluye que el sistema no vuelca en sentido horario debido a que la cámara debería pesar más de 16.55 kg para lograr ello.

Análogamente, podría realizarse el cálculo de volcadura para la rueda 1; sin embargo, es de notar que, dado que la base móvil y la estructura principal tienen los mayores pesos del sistema, se obtendría un resultado similar al calculado recientemente.

En conclusión, el sistema no tenderá a volcar en ningún sentido.

### Cálculo de estructura del soporte de la cámara

A continuación, se analizará la estructura que conforma el soporte de la cámara. La Figura 4.25 muestra el DCL general para este caso. Es de notar que se han considerado únicamente las cargas significativas para este análisis, por ello el peso de la cámara y del cuerpo 1 de la estructura son los únicos indicados.

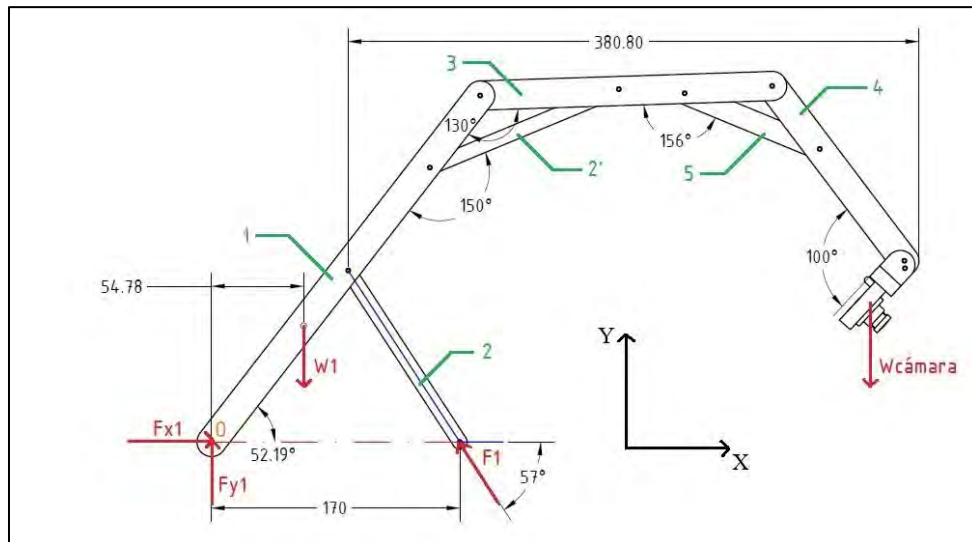


Figura 4.25. DCL general de la estructura de la cámara. Elaboración propia.

Ahora, es de notar que los elementos 2', 3, 4 y 5 tienden a tener un comportamiento rígido. Es así que el sistema anterior queda simplificado según lo ilustrado en la Figura 4.26.

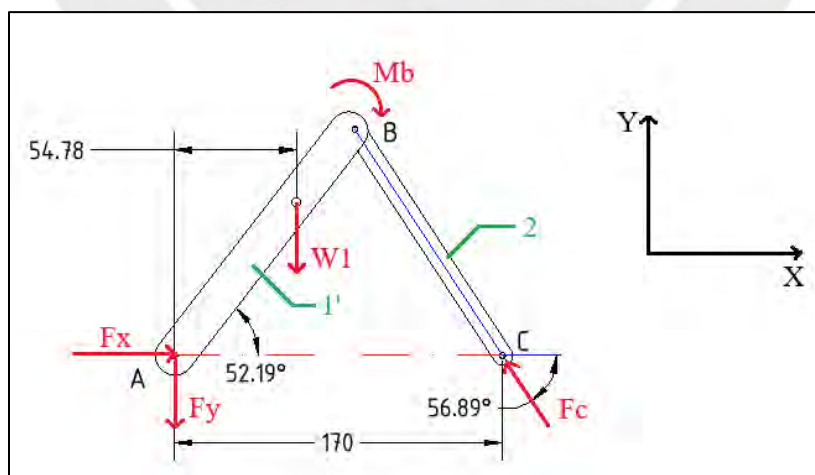


Figura 4.26. DCL de estructura simplificada. Elaboración propia.

El punto B indicado en la figura anterior representa el punto de flexión máximo de toda la parte superior de la armadura. Luego, se tiene como dato de entrada que  $W_1 = 0.97 N$  y  $M_b = 380.80 \times W_{cámara} = 544.54 N \cdot mm$ . A continuación, se plantean las siguientes ecuaciones para el análisis estático:

$$\sum M_A = 0$$

$$(0.97) \cdot (54.78) + 544.54 = Fc \operatorname{sen}(56.89^\circ) \cdot (170)$$

$$Fc = 4.19 N$$

$$\sum F_x = 0$$

$$Fx = Fc \operatorname{cos}(56.89^\circ)$$

$$Fx = 2.29 N$$

$$\sum F_y = 0$$

$$Fy = Fc \operatorname{sen}(56.89^\circ)$$

$$Fy = 3.52 N$$

Ahora, se analiza la sección en el punto B, según la Figura 4.27:

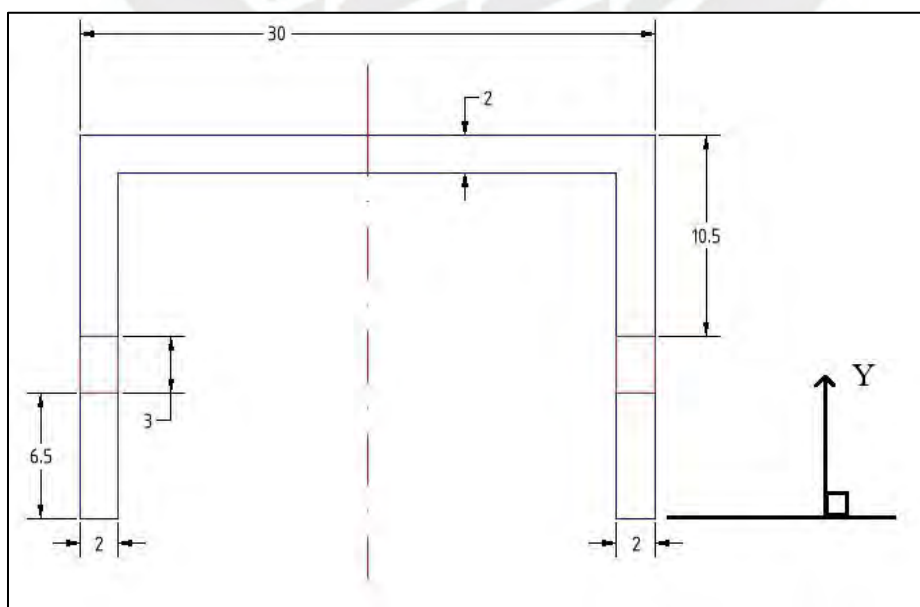


Figura 4.27. Sección de flexión crítica. Elaboración propia.

Para continuar con el análisis de resistencia, es necesario hallar la ubicación del centroide de la sección, luego se tiene lo siguiente:

$$\bar{y}_{CG} = \frac{(2)(6.5)(3.25)(2) + (10.5)(2)(14.75)(2) + (26)(2)(19)}{2(6.5)(2) + (10.5)(2)(2) + (26)(2)}$$

$$\bar{y}_{CG} = 14.1 \text{ mm}$$

Una vez hallado el centroide, se ubica dicho punto en la sección (Figura 4.28) y se procede a calcular el momento de inercia de áreas respecto a dicho punto. Para ello se emplea el teorema de Steiner tal que se obtiene lo siguiente:

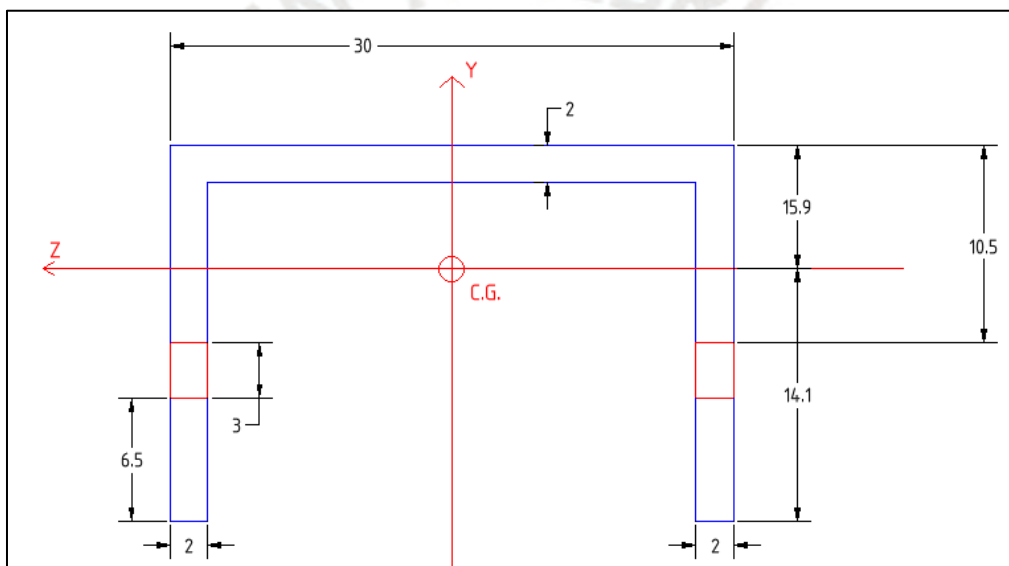


Figura 4.28. Ubicación del centroide en la sección de flexión máxima. Elaboración propia.

$$I_z = \left[ \frac{(2)(6.5)^3}{12} + (2)(6.5)(14)^2 \right] \times 2 + \left[ \frac{(2)(10.5)^3}{12} + (2)(10.5)(14)^2 \right] \times 2 + \left[ \frac{(26)(2)^3}{12} + (26)(2)(14.9)^2 \right]$$

$$I_z = 26004.4 \text{ mm}^4$$

Además, se calcula el esfuerzo máximo:

$$\sigma = \frac{My}{I_z} = \frac{(544.544)(15.9)}{26004.4} = 0.33 \text{ MPa}$$

Luego, de la Tabla 4.2, se sabe que para el PLA  $\sigma_f = 70 \text{ MPa}$  y considerando un F.S. de 5, se tiene que  $\sigma_{admisible} = 14 \text{ MPa} > 0.33 \text{ MPa}$ , por lo que se valida el diseño para el punto de flexión máximo de la estructura.

Adicionalmente, según lo observado en la Figura 4.26, el elemento etiquetado por el número 2 presenta fuerzas de compresión (Figura 4.29), por lo que será necesario analizar este cuerpo para el caso de pandeo.

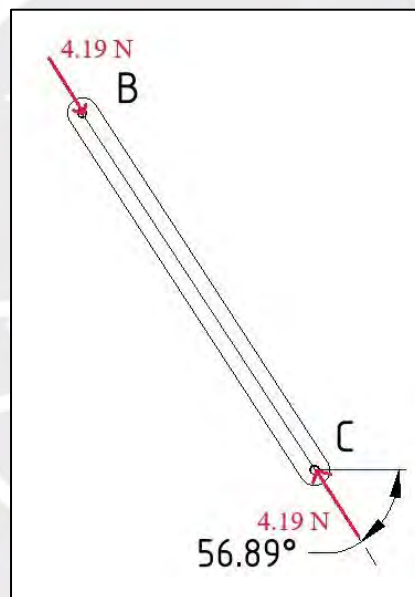


Figura 4.29. DCL del cuerpo 2. Elaboración propia.

Para el presente análisis, se utilizará la siguiente fórmula para hallar fuerza de pandeo empleando cierto factor de seguridad tal que:

$$F_k = \frac{\pi^2 EI}{L_p^2 (FS)}$$

Donde:

- E: Módulo de Young
- I: Momento de inercia de área
- FS: Factor de seguridad ( $3 < FS_{recom.} < 5$ )
- $L_p$ : Longitud de pandeo

Para el cálculo, el valor del módulo de Young (E) se obtiene de la Tabla 4.2. Asimismo, el valor de la longitud de pandeo se analiza según el caso en cuestión (Figura 4.30). Es de notar que en el presente problema la longitud de pandeo corresponde a  $L_p = L = 140 \text{ mm}$ , debido a los tipos de apoyo presentes. Luego, para el cálculo del momento de inercia se analiza la sección de menor área (Figura 4.31):

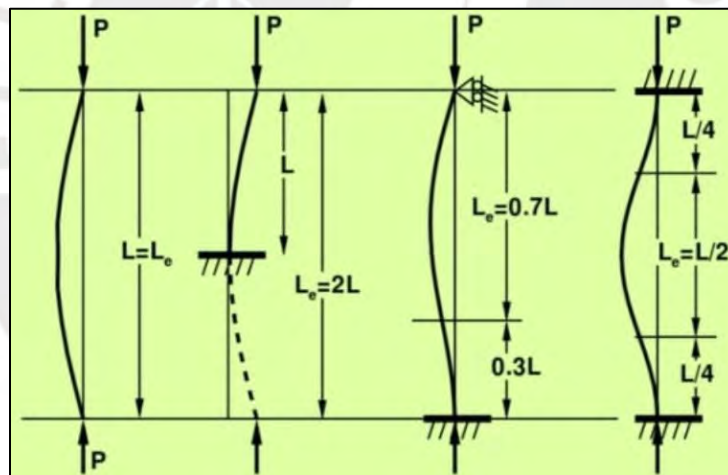


Figura 4.30. Casos de estudio para el análisis de pandeo. Obtenido de Zigurat Institute of Technology.

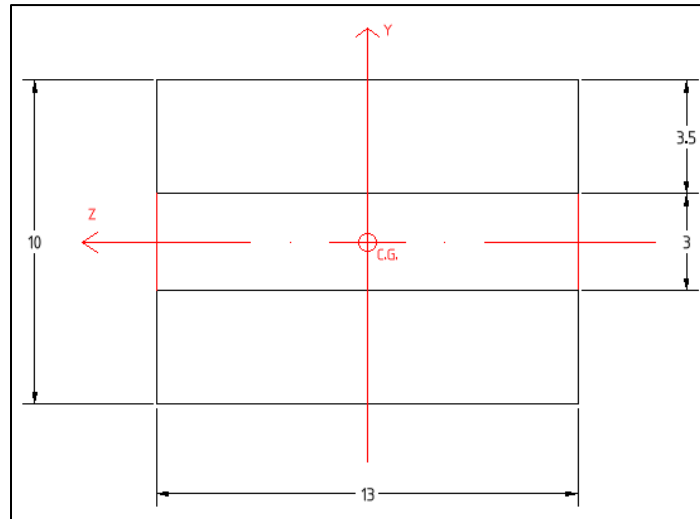


Figura 4.31. Sección de análisis de pandeo. Elaboración propia.

Análogamente al caso anterior, se calcula el momento de inercia respecto al centroide a través del teorema de Steiner, de modo que:

$$I_z = \left[ \frac{(13)(3.5)^3}{12} + (13)(3.5)(3.25)^2 \right] \times 2$$

$$I_z = 1054.08 \text{ mm}^4$$

Ahora, se calcula la fuerza de pandeo con la fórmula anteriormente mencionada:

$$F_k = \frac{\pi^2 (1.28 \times 10^3) (1054.08)}{(140)^2 (4)}$$

$$F_k = 169.85 \text{ N}$$

De la Figura 4.29, se sabe que la fuerza de compresión en el elemento de análisis es  $F = 4.19 \text{ N}$ , entonces se comprueba que  $F < F_k$ , por lo que se garantiza que no habrá pandeo en el elemento en cuestión.

Finalmente, se analizarán los pasadores presentes en la estructura (Figura 4.26):

1. Para el punto A:

$$F_A = \sqrt{F_x + F_y} = 4.20 \text{ N}$$

El DCL del pasador A se observa en la Figura 4.32.

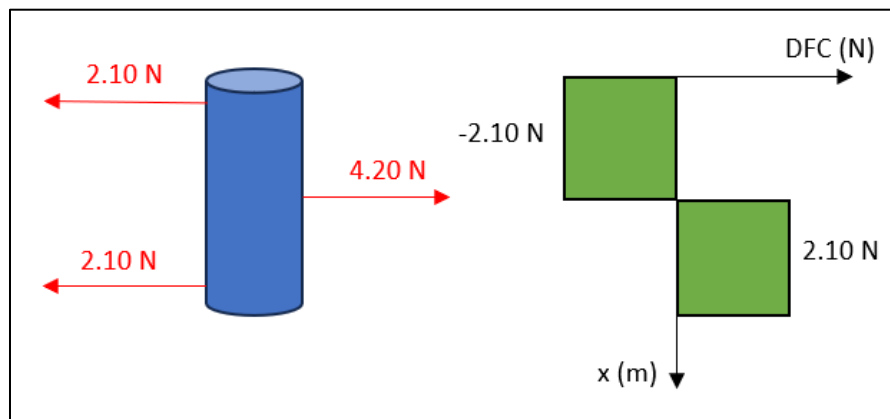


Figura 4.32. DCL del pasador A. Elaboración propia.

Además, para el acero inoxidable se cumple que  $\sigma_f = 205 \text{ MPa}$  (Fuente: MaterialMundial) y para el cálculo del esfuerzo cortante  $\tau$  permisible, es posible trabajar con la siguiente aproximación (Fuente: Shigley's Mechanical Engineering Design):

$$\tau_{perm} = 0.4\sigma_f$$

Es así que se obtiene que  $\tau_{perm} = 82 \text{ MPa}$ . Entonces, trabajando con un diámetro de pasador de 3 mm para el punto A (Tabla 4.3) se obtiene:

$$\tau = \frac{2.10}{\frac{\pi(3)^2}{4}} = 0.29 \text{ MPa} < 82 \text{ MPa}$$

Es así que se justifica la resistencia mecánica del pasador en A.

2. Para el punto C:

Análogamente, para el punto C se tiene el siguiente DCL mostrado en la Figura 4.33:

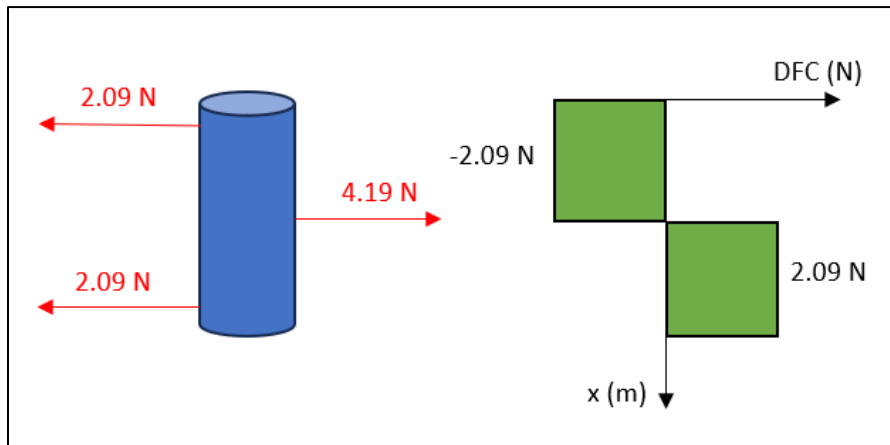


Figura 4.33. DCL del pasador C. Elaboración propia.

Dado que el valor de la fuerza cortante para este caso es bastante cercano al del pasador en A, se puede concluir que el esfuerzo cortante obtenido para el pasador en C será menor al esfuerzo admisible.

Con todo lo anterior mencionado, se finaliza el análisis del diseño mecánico de la estructura que soporta la cámara.

### Cálculo de la base móvil

En primer lugar, se realiza el DCL de la base móvil (Figura 4.34).  $W'$  hace referencia al peso de los elementos que se sitúan encima de la base móvil, mientras que  $W_{bm}$  hace referencia al peso de la base móvil.

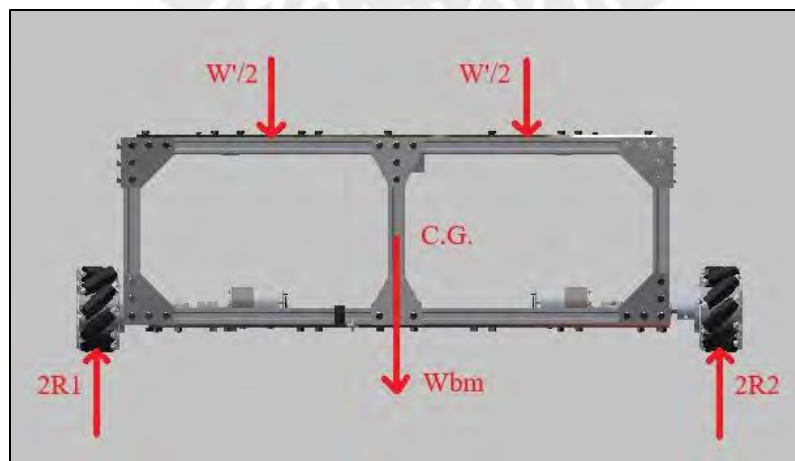


Figura 4.34. DCL de la base móvil. Elaboración propia.

Para justificar el diseño mecánico de la base móvil, se analiza la interacción que este tiene con la estructura principal del robot a través de una vista de sección (Figura 4.35):

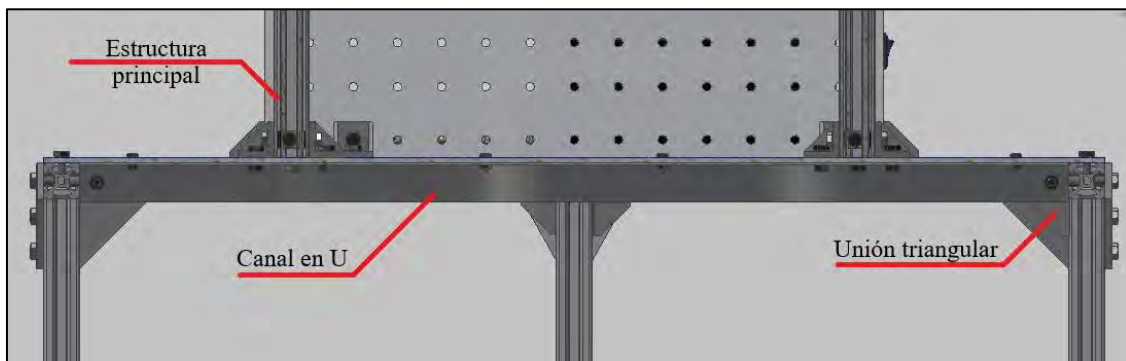


Figura 4.35. Vista de sección - Interacción de la base móvil con la estructura principal. Elaboración propia.

De la figura anterior, se observa que existe un canal en U ubicado en todo el ancho de la base móvil, el cual soporta las cargas verticales que corresponden al peso repartido de la estructura principal del robot.

El canal en U mencionado corresponde al modelo comercial 3017 de la empresa Limatambo, cuyas dimensiones se ilustran en la Figura 4.36.

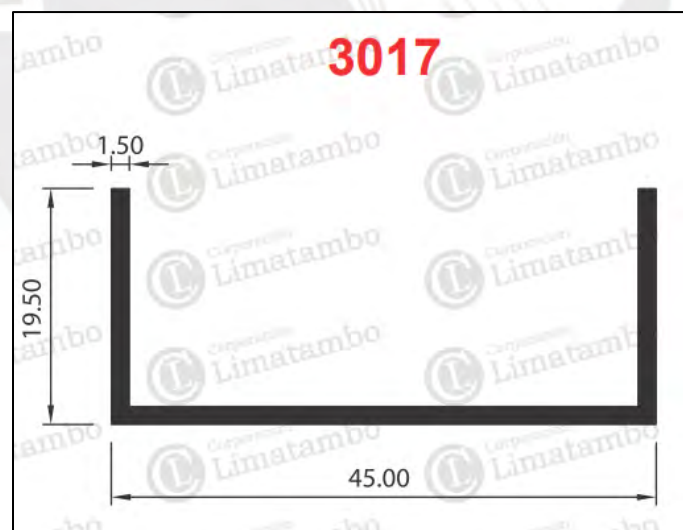


Figura 4.36. Canal en U modelo 3017. Obtenido de catálogo de perfiles de aluminio – Limatambo.

Una vez indicado el modelo del perfil, se procede a calcular el centroide de la sección (Figura 4.37 y 4.38) para realizar los cálculos de resistencia necesarios.

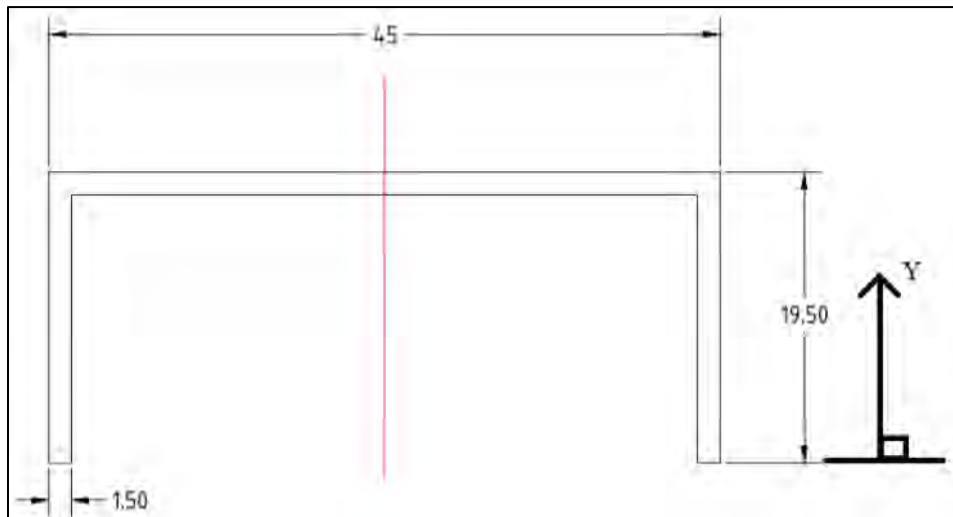


Figura 4.37. Sección del perfil de análisis. Elaboración propia.

$$\bar{y}_{CG} = \frac{(1.50)(19.50)(9.75)(2) + (42)(1.50)(18.75)}{(1.50)(19.50)(2) + (42)(1.50)}$$

$$\bar{y}_{CG} = 14.42 \text{ mm}$$

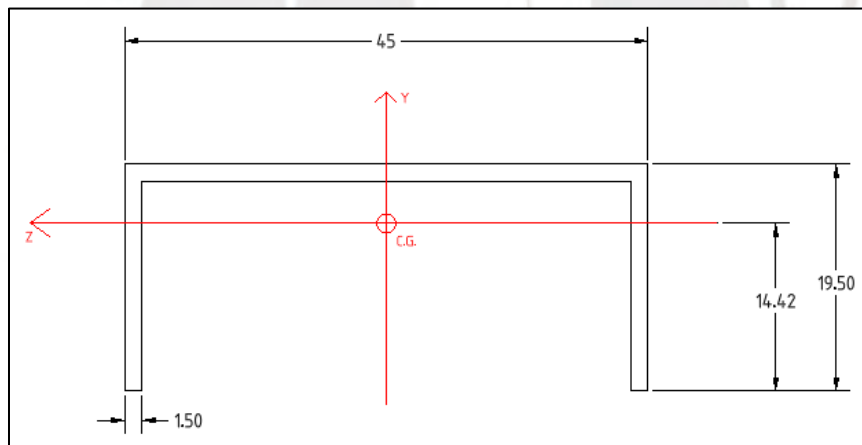


Figura 4.38. Ubicación del centroide en la sección de análisis. Elaboración propia.

Empleando el software Ftool, lo anterior ilustrado se puede modelar como una viga con doble apoyo (Figura 4.39):

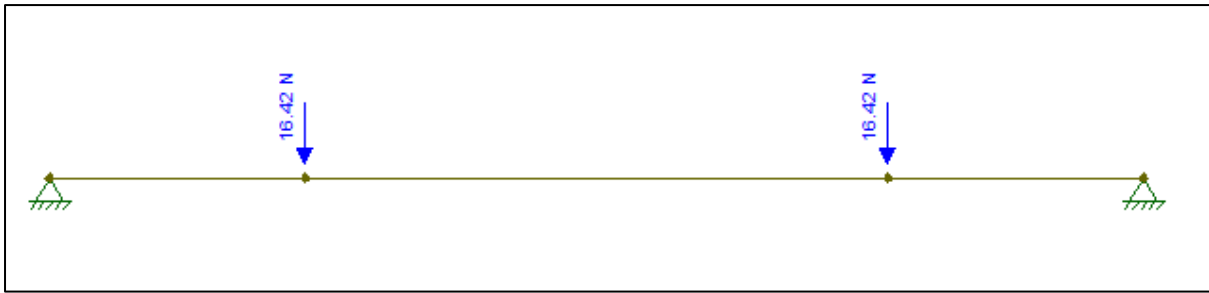


Figura 4.39. Viga doblemente apoyada. Elaboración propia.

A través del diagrama anterior es posible obtener los diagramas de fuerzas internas (Figuras 4.40 y 4.41) para en base a ello calcular el esfuerzo máximo:

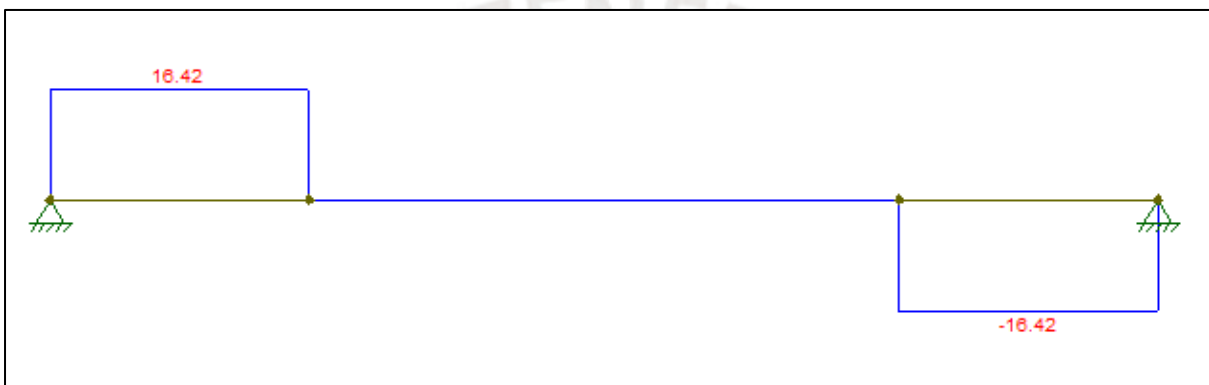


Figura 4.40. Diagrama de fuerza cortante en N. Elaboración propia.

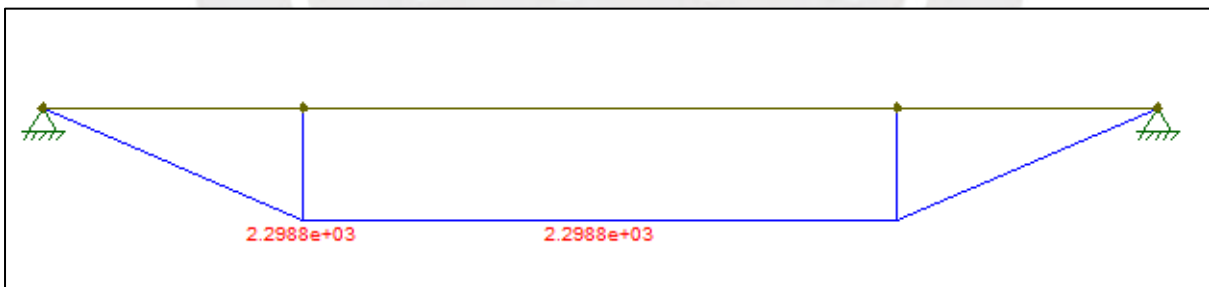


Figura 4.41. Diagrama de momento flector en N.mm. Elaboración propia.

Es de notar que el momento flector máximo corresponde a 2298.8 N.mm. Una vez obtenido ese valor, se calcula el esfuerzo máximo:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{My}{I} = \frac{(2298.8)(14.42)}{30722.69} = 1.05 \text{ MPa}$$

Dado que, según la ficha técnica de Limatambo, el material del elemento viga es de aluminio AA6063, para los cálculos se considera  $\sigma_f = 145 \text{ MPa}$  (Fuente: ASTM B221). Luego, se considera un factor de seguridad de 5, en donde se obtiene lo siguiente:

$$\sigma_{perm} = \frac{\sigma_f}{FS} = \frac{145}{5} = 29 \text{ MPa} > 1.05 \text{ MPa}$$

A partir de lo anterior, se termina por justificar el diseño de la base móvil.

### **Cálculo de motores DC para desplazamiento lineal**

En primer lugar, se establecen las condiciones de diseño del robot, estas son la velocidad lineal final y la masa total del robot.

Entonces, se tienen las siguientes condiciones:

1. Velocidad lineal objetivo: 1 m/s
2. Masa estimada del robot: 20.72 kg

Considerando un FS = 1.50:

Masa del robot: 31.08 kg

Datos:

- Peso del robot: 304.89 N
- Diámetro de las ruedas: 100 mm

Cálculo del torque

Considerando, inicialmente, que el robot llega a su velocidad máxima en 3 s:

$$a = 0.33 \text{ m/s}^2$$

Ahora, se empleará la siguiente fórmula, la cual se deduce a partir de la segunda ley de Newton:

$$T = \frac{m * a * R}{\# \text{ de motores}}$$

Donde:

- T: Torque por motor (N.m)
- m: Masa del robot (kg)
- R: radio de la rueda (m)

Entonces, al reemplazar se obtiene que:

$$\text{Torque por motor (T)} = 0.26 \text{ N.m}$$

Cálculo de las RPM

En primer lugar, se divide la velocidad máxima entre el radio de una rueda:

$$\text{Vel angular (en rad/s)} = V_{\text{máx}}/R = 20 \text{ rad/s}$$

Finalmente, se hace una conversión de unidades y se calcula las RPM a través de la siguiente fórmula:

$$\text{RPM} = \text{Vel angular (en rad/s)} \times 30/\pi = 191 \text{ RPM}$$

Luego, las RPM necesarias para garantizar una velocidad lineal de 1 m/s son 191 RPM.

Ahora, a cada uno de estos valores encontrados se le considera un FS de 1.25, esto implica que:




- Torque necesario por cada motor: 0.32 N.m
- RPM necesarios por cada motor: 238.75 RPM
- Potencia necesaria por motor: 8 W

Entonces, los motores DC a seleccionar deben tener como mínimo los valores anteriormente mostrados de torque, RPM y potencia.

#### **Selección de los motores DC de la base móvil**

Los motores DC para la base móvil se elegirán teniendo en cuenta las condiciones de cálculo previamente realizadas. La Tabla 4.14 presenta las alternativas que se tienen para este caso.

Tabla 4.14. Selección de los motores DC de la base móvil. Elaboración propia.

Característica	Alternativa		
	Metal Gearmotor 37Dx70L Pololu [1] 	Geartisan Motor de engranajes [2] 	Motorreductor DC Nider [3] 
Voltaje de alimentación	12 VDC	12 VDC	24 VDC
Corriente máxima	5.5 A	-	3 A
Dimensiones	D: 37 mm L: 89.6 mm	76.7 x 32 x 25 mm	187 x 44 x 44 mm
Torque máximo	5 N.m	9.55 N.m	12 N.m
RPM	10 000 RPM	200 RPM	200 RPM
Potencia máxima	12 W	200 W	72 W
Peso	-	141.7 g	-
¿Incluye encoder?	Sí (encoder magnético)	No	-
Precio (Considerando 1 US\$ = S/.4.00)	US\$ 51.95 = S/. 207.80	US\$ 15.00 = S/. 60.00	S/. 52.40

[1] <https://www.pololu.com/product/4753>[2] <https://www.amazon.com/Greartisan-engranajesnm>[3] <https://cl.rsdelivers.com/product/nidec/405667>

De lo anterior, se opta por elegir al primer motor presentado, esto debido a que cumple con las especificaciones mencionadas anteriormente en los cálculos. Además, algo importante a destacar de este motor es que es posible personalizarlo e indicarle al fabricante que se desea adquirir en conjunto con encoders magnéticos (pues incluyen sensores de efecto Hall), una relación de transmisión de 19:1 (rpm máx: 530 rpm, torque máx: 0.83 Nm) e inclusive incluye un encoder magnético y un soporte universal de fijación.en L

Ahora bien, para la fijación de este motor a la base móvil, es necesario incluir rodamientos para poder compensar el efecto de la carga radial producida por el contacto de la rueda con el suelo. Esto es así debido a que podría ocasionarse un daño interno en el motor. Así, la disposición final de los componentes queda según la Figura 4.42.

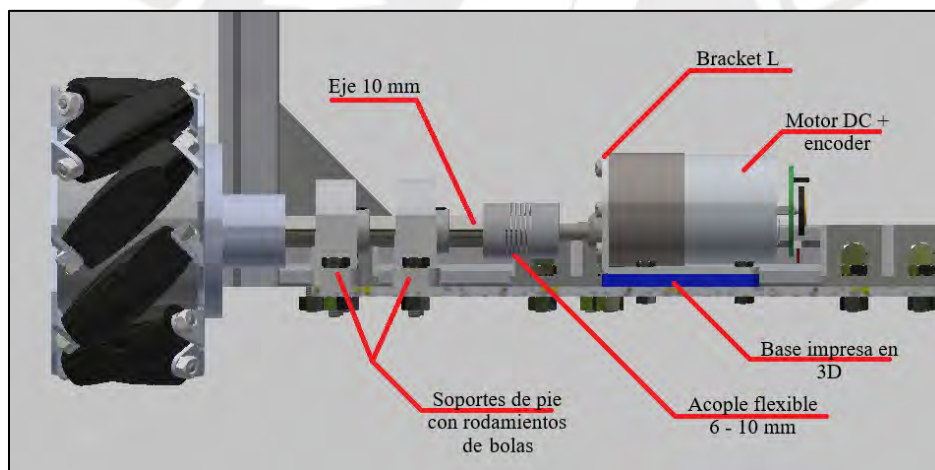


Figura 4.42. Configuración final de cada motor de la base móvil. Elaboración propia.

A continuación, se procederá a calcular las cargas radiales presentes en cada uno de los soportes de pie e indicar el modelo elegido. Para ello, se analiza las cargas radiales presentes en el eje de 10 mm (Figura 4.43).

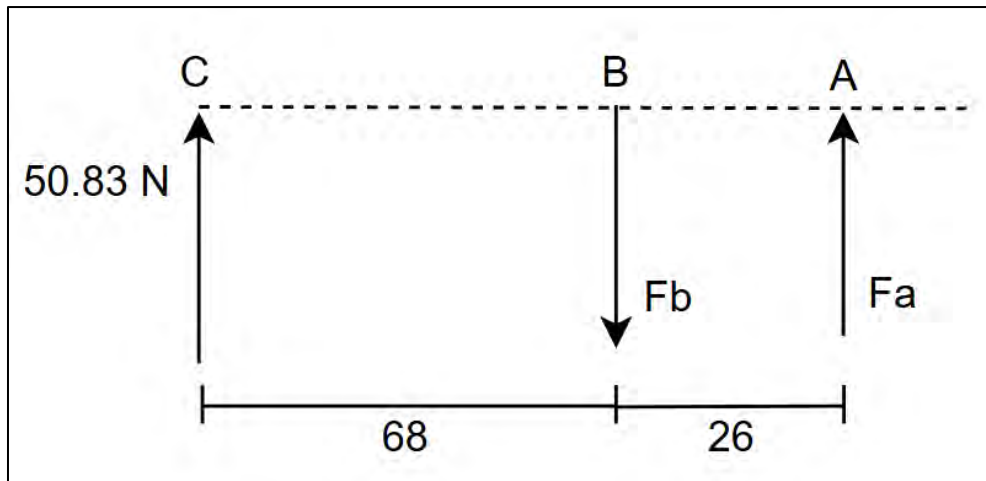


Figura 4.43. DCL de cargas radiales del eje de 10 mm de diámetro.

Se resuelven las siguientes ecuaciones:

$$\sum M_A = 0$$

$$26F_B = (50.83) \cdot (94)$$

$$F_B = 183.77 \text{ N}$$

$$\sum F_V = 0$$

$$F_A - F_B + 50.83 = 0$$

$$F_A = 132.94 \text{ N}$$

Luego, se realiza el análisis por resistencia del eje de 10 mm a través del software Ftool (Figura 4.44 a la 4.46)

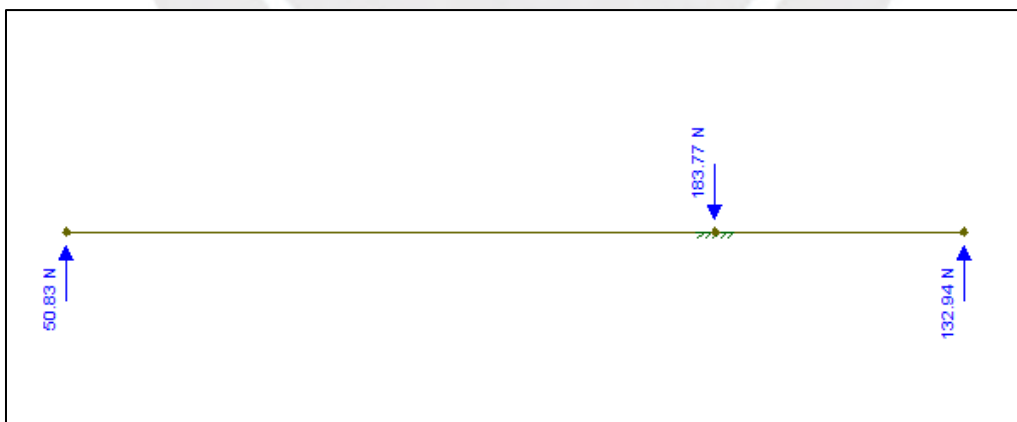


Figura 4.44. DCL del eje de 10 mm en el software Ftool. Elaboración propia.

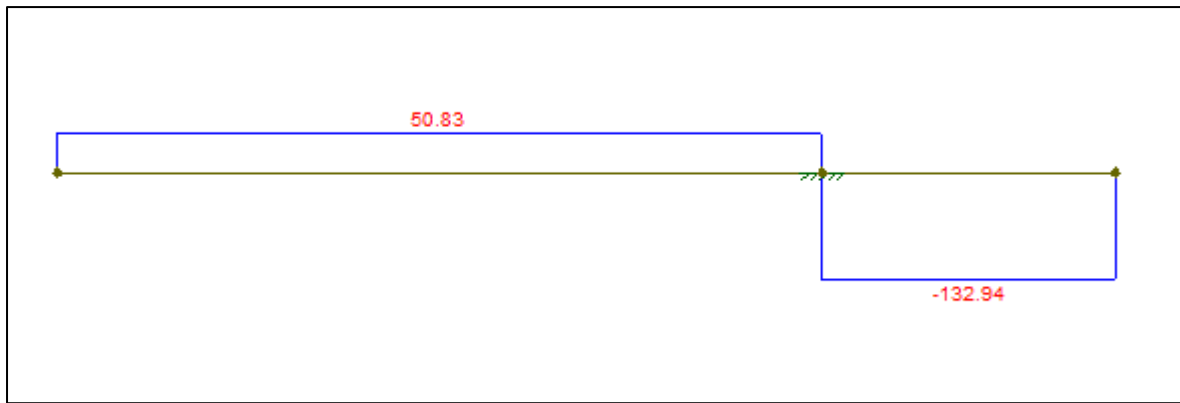


Figura 4.45. Diagrama de fuerza cortante del eje (en N). Elaboración propia.

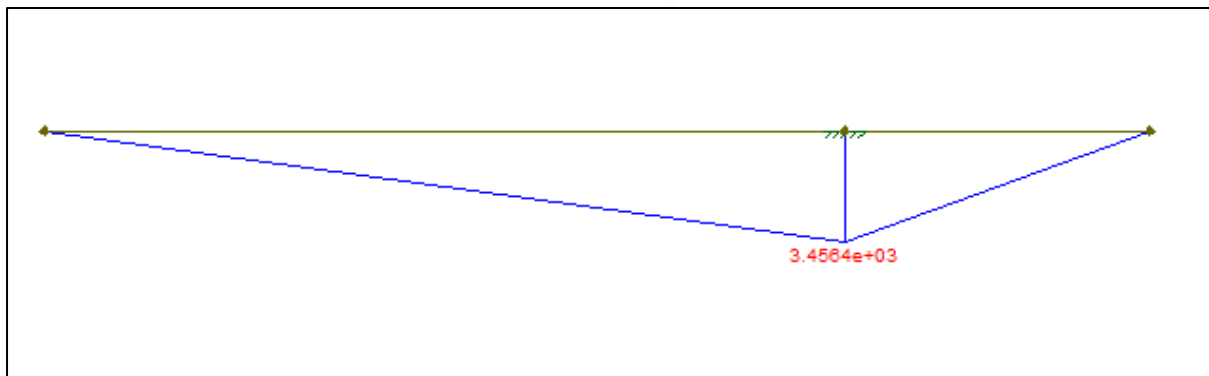


Figura 4.46. Diagrama de momento flector en el eje (en N.mm). Elaboración propia.

Despreciando el efecto de la fuerza cortante, es de notar que el punto mayor esfuerzo es el punto B. Luego:

$$\sigma = \frac{My}{I} = \frac{32M}{\pi d^3} = \frac{(32)(3456.4)}{\pi(10)^3}$$

$$\sigma = 35.21 \text{ MPa}$$

Además, de la ficha técnica del acero inoxidable para el eje (Fuente: Dold Mechatronik) se sabe que  $\sigma_f = 840 \text{ MPa}$  y considerando un F.S. de 5:

$$\sigma = 35.21 \text{ MPa} < \frac{840 \text{ MPa}}{5}$$

$$\sigma = 35.21 \text{ MPa} < 168 \text{ MPa}$$

Por lo tanto, se verifica la resistencia mecánica del eje de 10 mm de diámetro.

En el caso de los rodamientos empleados, estos son modelo KP000 de la empresa MADLER, cuyas características principales se observan en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15. Características de los rodamientos empleados. Fuente: MADLER

Características de los rodamientos empleados	
Diámetro del agujero (mm)	10
Modelo	KP00
Carga estática máxima (kN)	2
Carga dinámica máxima (kN)	4.7

Luego, la carga máxima presente en el sistema anterior es de 132.94 N. Es así que empleando, por ejemplo, un factor de seguridad de 5; se tiene que  $132.94 N < \frac{2000 N}{5}$ . Luego, queda justificada la selección de los rodamientos.

### **Cálculo para elección de los motores paso a paso**

En el presente apartado, se realizará el cálculo del torque total que presentan los motores paso a paso en su estado de reposo, el objetivo de este cálculo es hallar el torque máximo (stall torque) y en base a eso elegir el modelo de motor más adecuado. Específicamente, se analizará a detalle el caso del motor paso a paso en el eje horizontal (eje X), esto debido a que es el que presenta una mayor carga acoplada respecto al eje del husillo.

Es importante mencionar que para realizar este cálculo, se ha tomado como referencia datos obtenidos a través del software Autodesk Inventor para las distancias a los respectivos centros de gravedad.

Una vez definidos los centros de gravedad y las distancias, se procede a realizar el diagrama respectivo, el cual es mostrado en la Figura 4.47.

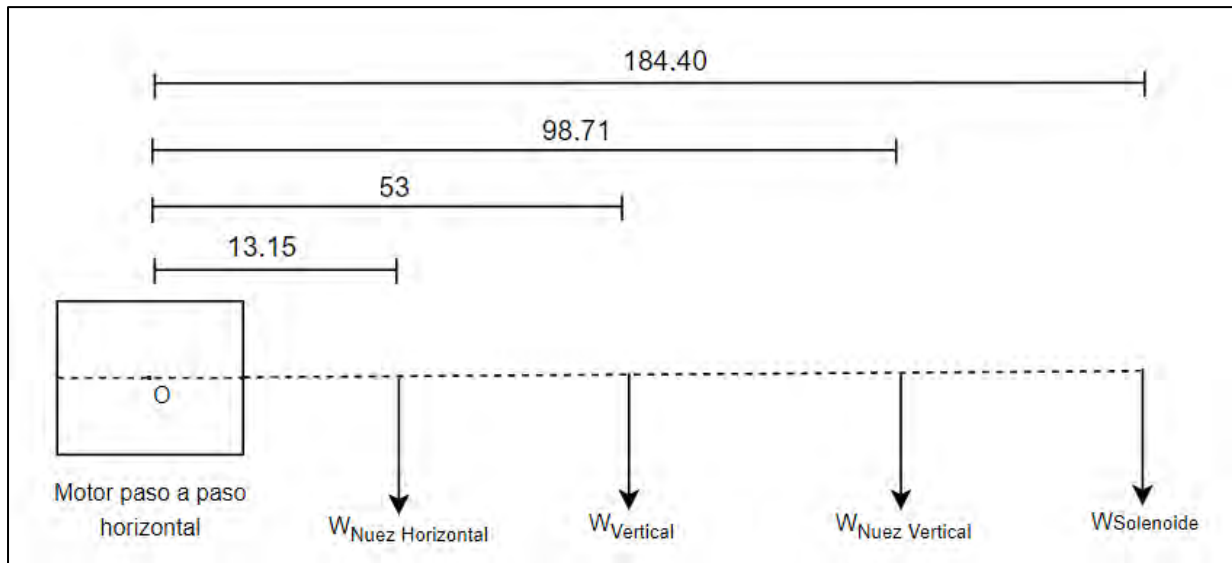


Figura 4.47. Cálculo del torque total en motor paso a paso horizontal. Elaboración propia.

De las Figuras anteriormente mostradas, se rescatan los valores de los pesos correspondientes para cada uno de los elementos respectivos.

- $W_{\text{Nuez Horizontal}} = 6.94 \text{ N}$
- $W_{\text{Husillo Vertical}} = 1.39 \text{ N}$
- $W_{\text{Varilla Vertical}} = 1.41 \text{ N}$
- $W_{\text{Vertical}} = W_{\text{Husillo Vertical}} + 2W_{\text{Varilla Vertical}} = 4.21 \text{ N}$
- $W_{\text{Nuez Vertical}} = 2.98 \text{ N}$
- $W_{\text{Solenoides}} = 2.65 \text{ N}$

$$\Sigma M_o = 1097.21 \text{ N.mm} = 1.09 \text{ N.m}$$



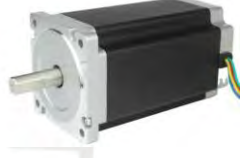
Luego, se deberá garantizar que el torque máximo del motor paso a paso a elegir sea superior a 1.09 N.m, considerando que aún falta adicionar el peso del motor paso a paso vertical.

A continuación, se realizará la selección de los motores paso a paso.

### Selección de los motores paso a paso

Como se pudo observar en el cálculo anterior, los motores paso a paso deben tener un torque de retención mayor o igual a 1.09 N.m. Entonces, bajo esta condición se procede a elegir un modelo, teniendo como referencia lo mostrado en la Tabla 4.16.

Tabla 4.16. Selección de los motores paso a paso. Elaboración propia.

Característica	Alternativas		
	iMetrix Motor NEMA 17 [1] 	JoyNano Motor NEMA 23 [2] 	StepperOnline Motor NEMA 34 [3] 
Voltaje de alimentación	5 VDC	24 - 48 VDC	36 - 48 VDC
Corriente nominal máxima/fase	1.7 A	2.8 A	6 A
Dimensiones	47 x 42 x 42 mm	76 x 57 x 57 mm	86 x 86 x 80 mm
Torque de retención (máximo)	0.49 N.m	1.9 N.m	4.8 N.m
Resolución	1.8° (200 pasos por revolución)	1.8° (200 pasos por revolución)	1.8° (200 pasos por revolución)
Masa	0.350 kg	1.1 kg	5.4 kg
Precio (Considerando 1 US\$ = S/.4.00, 1€ = S/. 4.10)	S/. 75.00	US\$ 30 = S/. 120.00	€ 29 = S/. 118.90

[1] <https://naylorpmechatronics.com/motores-pap-steppers/287-motor-pap-stepper-nema17>

[2] <https://tiendamia.com/pe/e-product?>

[3] <https://www.omc-stepperonline.com/es/serie-e-nema-34-motor-paso-a-paso-bipola>

Dado que el motor NEMA 23 presenta un torque de retención de  $1.9 \text{ N.m} > 1.09 \text{ N.m}$ , esto sugiere que este modelo es un candidato tentativo de cumplir con los cálculos anteriormente realizados. Esto se valida realizando nuevamente el cálculo del torque de retención, considerando que:

$$W_{\text{Vertical}} = W_{\text{Nema Vertical}} + W_{\text{Husillo Vertical}} + 2W_{\text{Varilla Vertical}}$$

Considerando que la masa del motor NEMA 23 es de 1.1 kg, se obtiene que:

$$\Sigma M_o = 1669.13 \text{ N.mm} = 1.67 \text{ N.m}$$

Luego, es de notar que en este caso se da un  $FS = 1.9/1.67 = 1.14$  para la selección de este motor. Además, se observa que el motor NEMA 34 también cumpliría lo anterior mencionado (pues su torque de retención es  $4.8 \text{ N.m}$ ); sin embargo, esta pesa casi 5 veces más que el NEMA 23, por lo que se concluye que la mejor alternativa para este caso sería el último mencionado. Complementando la explicación anterior, la fijación del motor PaP horizontal a la estructura se realiza mediante una pieza intermedia, la cual se fabrica a través de manufactura aditiva (impresión 3D) usando al PLA como material. En el caso del motor PaP vertical, este será empernado encima del elemento que permite la traslación horizontal del solenoide (Figura 4.48).

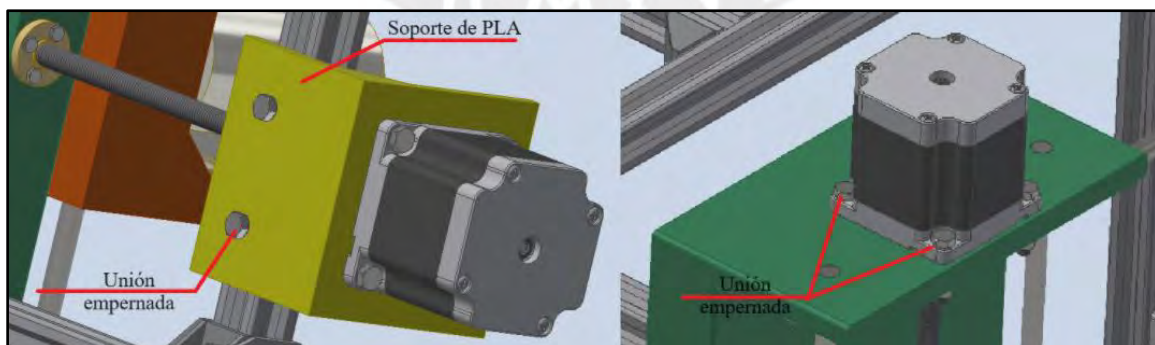


Figura 4.48. Fijación de los motores PaP al manipulador. Elaboración propia.

### 4.3. DISEÑO ELÉCTRICO / ELECTRÓNICO

En este capítulo se realizará el desarrollo correspondiente al diseño eléctrico/electrónico del sistema mecatrónico, dividiéndolo por los subsistemas mencionados anteriormente.

#### 4.3.1. Selección de actuadores del subsistema manipulador

En esta sección se realizará la elección de los actuadores del subsistema manipulador, así como de los elementos que apoyan en el funcionamiento de estos. Se debe tener en cuenta que previamente ya se hizo este procedimiento para el solenoide y los motores DC de la base móvil en el capítulo anterior.

#### Selección de relay para controlar el solenoide

El relay será el elemento encargado de controlar el accionamiento del solenoide según se detecte la cercanía de este al interruptor de potencia. Además, típicamente este tipo de solenoides lineales presenta una corriente de 1 - 2.5 A a 12 V. La Tabla 4.17 muestra la elección de este componente.

Tabla 4.17. Selección del relay para controlar el accionamiento del solenoide. Elaboración propia.

Características	Alternativa		
	Relé MY4P HH54P MY4NJ [1] 	Módulo Relé [2] 	Relé de ajuste eléctrico [3] 
Voltaje de alimentación	12 VDC	12 VDC	12 VDC

Corriente máxima	5 A	10 A	40 A
Dimensiones	75.5 x 65 x 29.6 mm	51 x 25.5 mm	28 x 28 x 25 mm
Precio (Considerando 1US\$ = S/.4.00)	S/. 7.92	S/. 29.00	US\$ 12.00 = S/. 48.00

[1] <https://es.aliexpress.com/item/4001237825238.html?>

[2] <https://articulo.mercadolibre.com.pe/MPE-656532344-modulo-rele-1-canal-12vdc-high-low>




[3] <https://www.amazon.com/el%C3%A9ctrico-inclinaci%C3%91>

Analizando los requerimientos anteriores, es de notar que la segunda alternativa cumple con las condiciones mínimas requeridas, por lo que se opta por esta opción. Cabe mencionar que, según la Tabla 4.4, la potencia máxima del solenoide es de 125 W. Ahora, es de notar que, dado que la tarea es una pulsación, podemos considerar, como una estimación inicial, un uso del 75% de la potencia, con lo cual esto corresponde a 93.75 W. Si esto lo dividimos entre 12 V, obtenemos una corriente de 7.81 A, lo cual es menor a los 10 A como máximo del relé.

### Selección de driver para motores paso a paso

Una vez definido el motor paso a paso a emplear, es necesario definir el tipo de controlador (driver) más adecuado para el consumo de corriente que este tendrá. Las alternativas para este caso se encuentran en la Tabla 4.18

Tabla 4.18. Selección de driver para motores paso a paso. Elaboración propia.

	Alternativa		
Características	Driver A4988 + CNC Shield V3 [1] 	Driver TB6560 [2] 	Driver TB6600 [3] 

Voltaje de operación	12 - 36 VDC	10 - 35 VDC	9 - 40 VDC
Corriente máxima	2 A	3 A (pico máximo de 3.5 A)	4 A
Dimensiones	68.8 x 53.5 x 11.7 mm	75 x 50 x 35 mm	96 x 56 x 33 mm
¿Permite configuración de pasos?	Sí	Sí	Sí
Peso	31 g	78 g	700 g
Precio	S/. 20.00	S/. 40.00	S/. 45.00

[1] <https://naylorlampmechatronics.com/ardusystem-shields/68-shield-cnc-v3-grbl.html>

[2] <https://mtlab.pe/producto/pp00/>

[3] <https://mtlab.pe/producto/tb6600-driver-motor-paso-a-paso/>




Según las especificaciones del motor NEMA 23, este presenta una corriente máxima de salida de 2.8 A, siendo esta menor a la corriente máxima que puede soportar el driver TB6560; asimismo este es un driver de peso ligero, y no es un modelo robusto en comparación al driver TB6600. Luego, se concluye que la mejor opción es el driver TB6600.

### Selección del driver para motores DC

Una vez definidos los motores DC a emplear, se deben buscar el driver más adecuado para este fin (Tabla 4.19), esto es, que sean capaces de brindar la cantidad de corriente necesaria y de controlarlo de una manera adecuada.

Tabla 4.19. Selección del driver para motores DC. Elaboración propia.

Características	Alternativa		
	Driver L298N [1]	Driver L9110 [2]	Controlador de motores RoboClaw 2 x 15 A [3]

			
Voltaje de alimentación	5 - 12 VDC	2.5 - 12 VDC	6 - 34 VDC
Cantidad de canales	2	2	2
Corriente máxima por canal	2 A (pico máximo de 3 A)	800 mA	15 A
Dimensiones	43 x 23.9 x 43 mm	30 x 23 mm	74 x 52 x 17 mm
Peso	30 g	-	61 g
Precio (Considerando 1 US\$ = S/.4.00)	S/. 5.20 = \$ 1.30	S/.7.00	US\$ 99.95 = S/. 399.80

[1] <https://es.aliexpress.com/item/1005006860765418.html>

[2] <https://mtlab.pe/producto/en44/>



[3] [https://www.basicmicro.com/RoboClaw-2x15A-Motor-Controller\\_p\\_10.html](https://www.basicmicro.com/RoboClaw-2x15A-Motor-Controller_p_10.html)

Analizando el motor DC elegido, es de notar que presenta una corriente máxima de 5.5 A aproximadamente. Entonces, evaluando las alternativas presentadas en la tabla anterior, es de notar que el controlador Roboclaw de 2 canales es un elemento robusto, capaz de brindar la corriente solicitada por el motor con un gran margen de seguridad.

### Selección de módulo USB a TTL (UART)

Dado que la Raspberry Pi solo presenta 2 pines para la comunicación UART, para realizar la conexión del segundo Roboclaw se empleará un adaptador USB a TTL (UART). En la Tabla 4.20 se muestran las opciones encontradas en el mercado.

Tabla 4.20. Comparación de módulos de comunicación USB a TTL. Elaboración propia.

Características	Alternativa	
	CP2102 [1] 	FTDI - FT232RL [2] 
Nivel lógico	TTL 3.3V - 5V	TTL 3.3V - 5V
Conector USB	Tipo A	Mini USB
Versión USB	2.0	2.0
Precio	S/. 15.00	S/. 15.00

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

[2] <https://mtlab.pe/producto/em74/>

Se selecciona la primera alternativa mostrada debido a su facilidad de conexión con el Roboclaw, pues presenta terminal USB.

#### 4.3.2. Selección de sensores del subsistema manipulador



En esta sección se realizará la selección de los sensores presentes en el subsistema manipulador.

##### Selección de sensores de fin de carrera (Limit Switch)

Los sensores de fin de carrera serán los encargados de realizar una calibración inicial de la posición del solenoide, para a partir de ahí poder moverlo a alguna posición deseada. La Tabla 4.21 muestra las alternativas para este caso.

Tabla 4.21. Selección del sensor de fin de carrera. Elaboración propia.

Características	Alternativa
-----------------	-------------

	Limit Switch 125 V 1A [1] 	Limit Switch Joinfworld [2] 
Corriente máxima	1 A	5 A
Grado de protección	-	IP67
Dimensiones	13 x 5.8 x 6.3 mm	20 x 6.29 x 25 mm
Precio (Considerando 1US\$ = S/.4.00)	S/. 5.00	US\$ 9.49 = S/. 37.96

[1] <https://articulo.mercadolibre.com.pe/MPE-446586342-sensor-final-de-carrera>



[2] <https://www.amazon.com/Joinfworld-interruptor-impermeable>


En este caso, dado que no existe un requerimiento especial para este caso, se elige la opción más económica.

### Selección del transmisor - receptor de video

Una vez elegida la cámara USB, se debe elegir un conjunto de dispositivos que permitan la transmisión y recepción de la señal de vídeo, desde el microprocesador del manipulador hasta el control remoto. Preferentemente, estos deben ser de un tamaño compacto y de un alcance de 5 m como mínimo. La Tabla 4.22 presenta las diferentes tecnologías que se podrían emplear para este caso.

Tabla 4.22. Selección del transmisor - receptor de video. Elaboración propia.

Características	Alternativa		
	50 m Wireless HDMI Extender [1]	DXchip Kit HDMI inalámbrico [2] 	TT388-MINI-EPCOM TITANIUM [3] 

			
Tipos de conectividad	Sólo HDMI	HDMI / USB tipo C	Sólo HDMI
Voltaje	5 VDC	5 VDC	5 VDC
Corriente	1 A	1 A	-
Resolución	1080 P @ 60 fps	1080 P @ 30 fps	1080 P @ 30 fps
Frecuencia de comunicación	5 GHz	-	5 GHz
Alcance máximo	50 m	30 m	15 m
Dimensiones	-	230 x 193 x 39 mm	88.90 x 38.99 x 15.17mm
Peso	-	-	30 g
Precio (Considerando un tipo de cambio de 1 US\$ = S/. 4.00)	S/. 215.48	US\$ 130.00 = S/. 520.00	S/. 529.84

[1] <https://es.aliexpress.com/item/1005006031147755.html>

[2] <https://www.amazon.com/Transmisor-inal%C3%A1brico-compatible-transmisi%C>




[3] <https://www.relematic.mx/producto/tt388-mini-epcom-titanium-28383.htm>

Se puede observar que los modelos presentados son bastante similares; no obstante, la primera alternativa contiene un módulo de antena para facilitar la comunicación, esto ocasiona que su alcance sea significativamente mayor que los demás casos (50 m), superando por 10 veces la distancia mínima requerida para el diseño. A su vez, presenta un menor precio que las demás alternativas.

### 4.3.3. Selección del controlador

El controlador del sistema debe ser tal que permita soportar un algoritmo computacional de reconocimiento de color, al mismo tiempo de poder mandar las señales necesarias para controlar los sensores y actuadores del sistema. La Tabla 4.23 presenta las alternativas sugeridas para este caso.

Tabla 4.23. Selección del controlador para el subsistema manipulador. Elaboración propia.

Características	Alternativa		
	Raspberry Pi 4B [1] 	Jetson Nano [2] 	Jetson Xavier [3] 
FPS	4K@25 fps   4x 1080@25 fps	4K@30fps   4x 1080@30fps	4K@60fps   4x 1080@60fps
Potencia máx	15.3 W	10 W	30 W
RAM	4 GB	4 GB	8 GB
Frecuencia (MHz)	1.5 GHz	1.43 GHz	1.3 GHz
Tamaño	88 x 58 x 18,5 mm	100 x 80 x 29 mm	103 x 90 x 34 mm
Peso	45 g	249 g	1.67 kg
Precio (Considerando un tipo de cambio de 1 US\$ = S/. 4.00)	US\$ 110.00 = S/. 440.00	US\$ 228.00 = S/. 912.00	US\$ 700.00 = S/. 2800

[1] <https://www.amazon.com/-/es/DIGISHUO-Raspberry-Ventilador-Tarjeta-Micro-SD>

[2] <https://www.amazon.com/-/es/integrado-Robotics-Machine-Learning-disipador/dp>

[3] <https://www.amazon.com/-/es/Yahboom-desarrollador-adaptador-corriente-tarjeta>

Dado que no se ha planteado un mínimo valor de fps, inicialmente podría considerarse un mínimo de 25 fps para garantizar la fluidez de la transmisión de video. Siendo ese el caso,

se elige la placa Raspberry Pi 4B debido a que es capaz de procesar la señal de video entrante de manera satisfactoria, así como ser la alternativa más económica.

Para garantizar la sincronización de los actuadores, se implementa una estrategia basada en interrupciones y temporización (se analizará en el dominio interfaz), asegurando que cada actuador reciba las señales de control en el momento adecuado. Además, se emplea un sistema de retroalimentación con sensores de posición para ajustar la respuesta de los motores en tiempo real y evitar desajustes en la ejecución de las tareas.

#### 4.3.4. Selección de fuente de energía del subsistema manipulador

Se establece inicialmente que el sistema tenga una autonomía de 2 horas. El cálculo relacionado a esto se observa en la Tabla 4.24.

##### Cálculo de potencia

La Tabla 4.24 muestra el cálculo realizado, teniendo en cuenta los valores de voltajes y corrientes señalados previamente. Despreciando las pérdidas de potencia, es de notar que la potencia se conserva y es posible calcular la corriente batería necesaria (A) por cada componente.

Tabla 4.24. Cálculo de potencia necesaria - Subsistema manipulador. Elaboración propia.

Componente	Cantidad	Potencia de salida		Potencia de entrada		Capacidad requerida	
		Voltaje de componente (V)	Corriente de componente (A)	Voltaje de batería (V)	Corriente de batería necesaria (A)	Tiempo de funcionamiento (h)	Energía requerida en batería (Ah)
Solenoide	1	12	2.5	12	2.5	2	5

Motor DC	4	12	5.5	12	5.5	2	44
Motor paso a paso	2	24	2.8	12	5.6	2	22.4
Raspberry Pi 4B	1	5	3	12	1.3	2	2.6
Transmisor de video	1	5	1	12	0.4	2	0.8
Cámara USB	1	12	1	12	1	2	2
Roboclaw 2 x15 A	2	12	0.05	12	0.05	2	0.2
Driver TB6560	2	24	0.02	12	0.04	2	0.08
<b>Total (Ah)</b>							<b>77.08</b>

Voltaje de la batería: 12 V (se usará un regulador step - up para alimentar los motores paso a paso de 24 V)

- Corriente: 77.08 Ah


Utilizando un FS = 1.25:



- Corriente con FS: 96.35 Ah

### Fuente de energía

Una vez realizado el cálculo correspondiente en la parte anterior, se procede a elegir la batería a emplear. Esta selección se aprecia en la Tabla 4.25.

Tabla 4.25. Selección de fuente de energía del subsistema manipulador. Elaboración propia.

Características	Alternativas		
	Batería AVTARK [1]		Batería Powerun [3]

			
Voltaje de trabajo	12 VDC	12 VDC	12 VDC
Capacidad de corriente	120 Ah	50 Ah	50 Ah
Permite recarga	Sí	Sí	Sí
Peso	0.90 kg	5.2 kg	6 kg
Dimensiones	150 x 98 x 64 mm	255 x 165 x 215 mm	225 x 130 x 210 mm
Precio (Considerando un tipo de cambio de 1 US\$ = S/.4.00)	S/. 34.16	US\$ 55.00 = S/. 220.00	109 US\$ = S/. 436.00

[1] <https://es.aliexpress.com/item/1005007038801294.html?spm=a2g0o.productlist.main.9.10745bc>

[2] <https://www.alibaba.com/product-detail/High-Capacity-12V-Lithium-ion-Battery>

[3] <https://www.alibaba.com/product-detail/12V-7Ah-10Ah-12Ah-20Ah-40Ah>

De lo anterior, se concluye que la mejor alternativa es la batería marca AVTARK, puesto que cumple con los requerimientos mínimos establecidos en los cálculos, así como tener un peso y dimensiones adecuadas para el sistema mecatrónico.

A continuación, se realizará la selección de los reguladores del circuito electrónico.

### Selección del regulador/convertidor 12 - 5 VDC

Este regulador será el encargado de poder alimentar al Raspberry Pi (3 A), así como al transmisor de vídeo (1 A). La elección de este componente se aprecia en la Tabla 4.26.

Tabla 4.26 Selección del regulador 12 - 5 VDC. Elaboración propia.

	Alternativas
--	--------------

Característica	LM7805 [1] 	Regulador Dorhea [2] 	Electro Store Step - down LM2596 [3] 
Voltaje de entrada	7 - 35 VDC	6.3 - 22 VDC	9 - 36 VDC
Voltaje de salida	5 VDC	5 VDC	5 - 5.2 VDC
Corriente máxima de salida	1 A	3 A	5 A
Dimensiones	-	159 x 79 x 9.91 mm	-
Peso	-	18 g	-
Precio (considerando un tipo de cambio de 1 \$ = S/. 4.00)	S/. 2.50	US\$ 9.00 = S/. 36.00	S/. 35.00

[1] <https://www.teslaelectronic.com.pe/producto/17805-regulador-de-voltaje-positivo/>

[2] [https://www.amazon.com/-/es/Convertidor-alimentaci%](https://www.amazon.com/-/es/Convertidor-alimentaci%/)

[3] <https://articulo.mercadolibre.com.pe/MPE-653061512-convertidor-de-voltaje-dc-dc-de-24v>

Dado que el regulador debe de garantizar poder suministrar al menos una corriente de 4 A, la mejor alternativa sería la tercera, pues presenta la capacidad de suministrar hasta 5 A, tratándose así de un FS = 1.25.




### Selección del convertidor step - up 12 - 24 VDC

Como ya se comentó anteriormente, este convertidor hará posible alimentar a los motores paso a paso NEMA 23 desde la batería.

Para ello, se necesitan 24 VDC como mínimo según lo visto en la Tabla 4.15, además de una corriente máxima de 2.8 A c/u. La selección se puede apreciar en la Tabla 4.27.

Tabla 4.27. Selección del convertidor 12 - 24 VDC. Elaboración propia.

Características	Alternativas		
	Convertidor elevador THLY [1]	Convertidor step up ORIGIN [2]	Convertidor TBS1224C240Z [3]

			
Voltaje de entrada	12 VDC	10 - 32 VDC	12 VDC
Voltaje de salida	24 VDC	12 - 35 VDC	24 VDC
Corriente máxima de salida	5 A	6 A	10 A
Dimensiones	113 x 86 x 35 mm	65 x 56.5 x 23 mm	74 x 74 x 32 mm
Peso	263 g	-	260 g
Precio (considerando un tipo de cambio de 1 \$ = S/. 4.00)	US\$ 32.00 = S/. 128.00	US\$ 0.50 = S/. 2.00	S/. 47.59

[1] <https://www.amazon.com/-/es/Convertidor-convertidor-impermeable-terminales-veh>

[2] <https://spanish.alibaba.com/p-detail/150W-1600332494027.html?>




[3] <https://es.aliexpress.com/item/1005006871353656.html?spm=a2g0o.productlist.main.7.2e71258fMAv>

La tercera alternativa es la opción elegida pues cumple con lo mínimo necesario para satisfacer los requerimientos anteriormente mencionados ( $10 \text{ A} > 2.8 \text{ A} \times 2$ ).

### Selección del sensor de nivel de batería

La finalidad del sensor de nivel de batería es informar al operario, a través del control remoto, el estado en tiempo real de la batería. En la Tabla 4.28 se realiza este proceso de selección.

Tabla 4.28. Selección del sensor de nivel de batería. Elaboración propia.

	Alternativas		
Características	HiLetgo 5 [1] 	DC-055V Digital Display Sensor [2] 	INA219 Sensor [3] 

Voltaje de alimentación	5 VDC	12 VDC	3 - 5 VDC
Rango voltaje de entrada	0 - 25 VDC	0 - 55 VDC	0 - 26 VDC
Resolución de voltaje	10 bits	12 bits	12 bits
Dimensiones	127 x 88.9 x 0.5 mm	-	100 x 70 x 16 mm
Peso	23 g	-	-
¿Requiere ADC externo?	Sí	Sí	No, trabaja con comunicación I2C
Precio (Considerando un tipo de cambio de 1 US\$ = S/. 4.00)	US\$ 5.89 = S/23.56	US\$ 11.72 = S/. 46.88	US\$ 2.80 = S/. 11.20

[1] <https://www.amazon.com/-/es/HiLetgo-m%C3%B3dulo-detecci%C3%B3n-voltaje-Arduino>

[2] <https://www.amazon.com/-/es/detecci%C3%B3n-conmutador-Componente-electr%C3%B3nico>

[3] <https://www.amazon.com/-/es/Bi-Direccional-Alimentaci%C3%B3n-Breakout-Compatible-Raspberry>

Se elige a la tercera opción como la alternativa ganadora, principalmente debido a que no se necesita hacer uso de algún componente adicional (en este caso, un ADC).

### Selección del switch ON/OFF general

En la Tabla 4.29 se observa la selección del switch general, el cual será el encargado de energizar/desenergizar el manipulador según la operación que se desee realizar.

Tabla 4.29. Selección del interruptor general - Subsistema manipulador. Elaboración propia.

Características	Alternativas	
	Interruptor DairTrek [1]	Interruptor QTEATAK [2]
		
Voltaje máximo de trabajo	12 V	250 V

Corriente máxima	6 A	10 A
Dimensiones	23.1 x 23.1 x 25.4 mm	150 x 9.91 x 100.08 mm
Peso	5 g	-
Precio (Considerando un tipo de cambio de 1 US\$ = S/. 4.00)	US\$ 7.00 = S/.28.00	US\$ 7.00 = S/.28.00

[1] <https://www.amazon.com/Interruptores-basculantes-encendido-interruptor-automotriz>

[2] <https://www.amazon.com/-/es/Interruptor-basculante-encendido-unidades-posiciones/dp/B07Y>

Se elige como mejor opción el interruptor QTEATAK, debido a que presenta una alta capacidad de corriente y voltaje.

### Elección de módulo para carga de batería

Para que sea posible la recarga de la batería del manipulador en la estación de carga, es importante elegir un módulo de carga para el sistema. La Tabla 4.30 muestra este proceso de elección.

Tabla 4.30. Selección del módulo de carga para la batería. Elaboración propia.

Características	Alternativas		
	Módulo de carga XH-M603 12-24V [1] 	Módulo de Baterías de Li-ion BMS [2] 	Módulo de carga YX-1708 [3] 
Voltaje de alimentación	12 - 24 VDC	11.1 - 12.4 VDC	12 - 48 VDC
Tipo de entrada	Bornes atornillables	-	Bornes atornillables
Corriente máxima de trabajo	20 A	8 A	30 A
Temperatura de trabajo	-	40 - 50 °C	-

Dimensiones	82 x 58 mm	50 x 21 x 1 mm	70 x 51 x 23 mm
Peso	36 g	-	60 g
Precio (Considerando un tipo de cambio de 1 US\$ = S/. 4.00)	US\$ 7.31 = S/. 29.24	S/. 11.50	US\$ 12.98 = S/. 51.92

[1] <https://www.ebay.com/itm/324297916996?hash=item4b81a98244:g:XwEAAOSw-RJfWt>

[2] <https://bracsan.pe/producto/modulo-para-carga-de-baterias-de-li-ion-bms-3s-10a-11-1v-12v-12>

[3] <https://www.amazon.com/-/es/control-cargador-bater%C3%ADa-autom%C3%A1tico-protecci%C3%B3n-temperatura-18650-3s-10a-11-1v-12v-12>

Se elige al módulo de carga YX-1708 como la mejor alternativa, dado que presenta una gran capacidad de suministrar corriente a la batería. Además, algo en especial que presenta este dispositivo es que corta la energía eléctrica de manera automática al sobrepasar un umbral máximo para la carga de la batería, el cual es regulable por el usuario.

#### 4.3.4. Diagrama del circuito eléctrico/electrónico - Subsistema manipulador

A continuación, se detalla las conexiones principales en cada uno de los subcircuitos presentes en el subsistema manipulador.

##### Conexiones motores DC

Las Figuras 4.49 y 4.50 muestran las conexiones de los motores DC con el driver Roboclaw 2x15 A y la Raspberry Pi 4B. Además, la configuración UART a emplear será la siguiente: 115200 bps, 8 bits de datos, sin paridad, bit de parada (1). En las Tablas 4.31 a la 4.36 señalan de manera específica las conexiones entre los pines de los componentes anteriormente señalados.

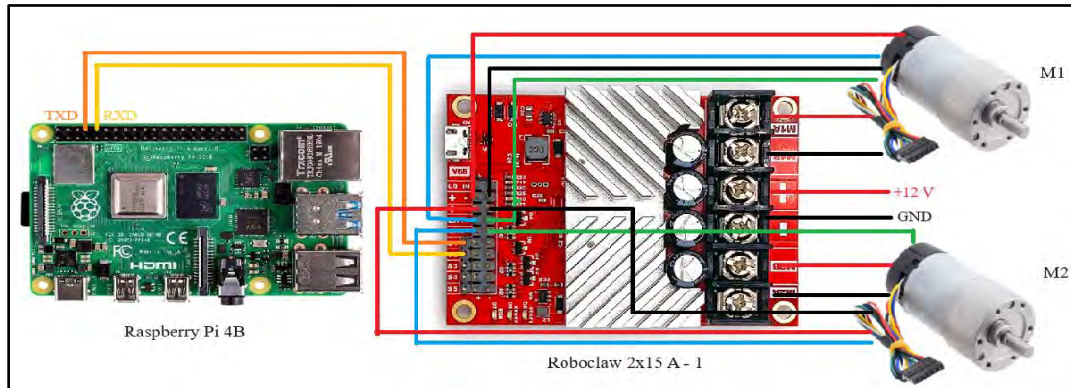


Figura 4.49. Conexiones de los motores DC, Roboclaw 2x15 A - 1 y la Raspberry Pi. Elaboración propia.

Tabla 4.31. Conexiones Roboclaw y Raspberry Pi 4B. Elaboración propia.

Conexiones Roboclaw 2x15 A- 1 y Raspberry Pi 4B	
Roboclaw 2x15 A- 1	Raspberry Pi 4B
S1 (Rx)	GPIO 14 (Tx)
S2 (Tx)	GPIO 15 (Rx)
GND	GND

Tabla 4.32. Conexiones M1 y M2 con Raspberry Pi 4B. Elaboración propia.

Conexiones M1, M2 y Roboclaw 2x15 A- 1	
M1/M2	Roboclaw 2x15 A- 1
A1 (M1)	EN1 - A
A2 (M1)	EN1 - B
A1 (M2)	EN2 - A
A2 (M2)	EN2 - B
VCC (encoder M1)	+5 V
VCC (encoder M2)	+5 V
GND (encoder M1)	GND
GND (encoder M1)	GND

Tabla 4.33. Conexiones M1, M2 y Roboclaw 2x15 A - 1. Elaboración propia.

Conexiones M1/M2 y Roboclaw 2x15 A - 1
--

M1/M2	Roboclaw 2x15 A - 1
Cable 1 (M1)	OUT 1
Cable 2 (M1)	OUT 2
Cable 1 (M2)	OUT 3
Cable 2 (M2)	OUT 4

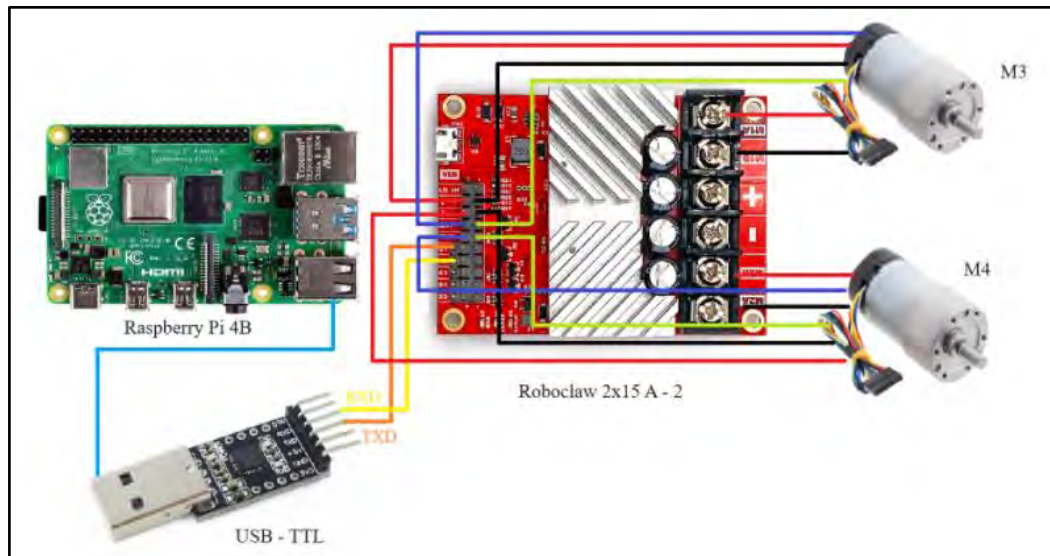


Figura 4.50. Conexiones de los motores DC, Roboclaw 2x15 A - 2 y la Raspberry Pi. Elaboración propia.

Tabla 4.34. Conexiones Roboclaw 2 y Raspberry Pi 4B. Elaboración propia.

Conexiones Roboclaw 2x15 A- 2 y Raspberry Pi 4B	
Roboclaw 2x15 A- 2	Raspberry Pi 4B
S1 (Rx)	Tx (USB - TTL)
S2 (Tx)	Rx (USB - TTL)
GND	GND

Tabla 4.35. Conexiones M3 y M4 con Raspberry Pi 4B. Elaboración propia.

Conexiones M3, M4 y Roboclaw 2x15 A- 2	
M3/M4	Roboclaw 2x15 A- 2
A1 (M3)	EN1 - A
A2 (M3)	EN1 - B
A1 (M4)	EN2 - A

A2 (M4)	EN2 - B
VCC (encoder M3)	+5 V
VCC (encoder M4)	+5 V
GND (encoder M3)	GND
GND (encoder M4)	GND

Tabla 4.36. Conexiones M3, M4 y Roboclaw 2x15 A - 2. Elaboración propia.

Conexiones M3/M4 y Roboclaw 2x15 A - 2	
M3/M4	Roboclaw 2x15 A - 2
Cable 1 (M3)	OUT 1
Cable 2 (M3)	OUT 2
Cable 1 (M4)	OUT 3
Cable 2 (M4)	OUT 4

### Conexiones de los motores paso a paso

La conexión de los motores NEMA 23 con el driver TB6560 y la Raspberry Pi 4B se observa en las Figuras 4.51 y 4.52. Asimismo, las Tablas 4.37 a la 4.50 detallan las conexiones a realizar.

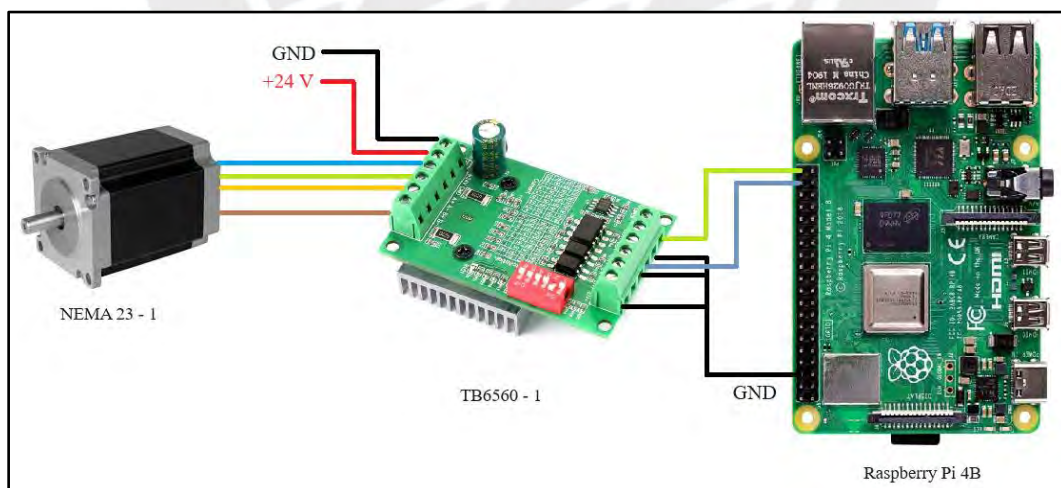


Figura 4.51. Conexión motor PaP 1, TB6560 - 1 y Raspberry Pi 4B. Elaboración propia.

Tabla 4.37. Conexiones NEMA 23 - 1 y TB6560 - 1. Elaboración propia.

Conexiones Motor NEMA 23 - 1 y TB6560 - 1	
NEMA 23 - 1	TB6560 - 1
A+	A+
A-	A-
B+	B+
B-	B-

Tabla 4.38. Conexiones TB6560 - 1 y Raspberry Pi 4B. Elaboración propia.

Conexiones TB6560 - 1 y Raspberry Pi 4B	
TB6560 - 1	Raspberry Pi 4B
CLK-	GND
DIR-	GND
EN-	GND
DIR+	GPIO 20
CLK+	GPIO 21

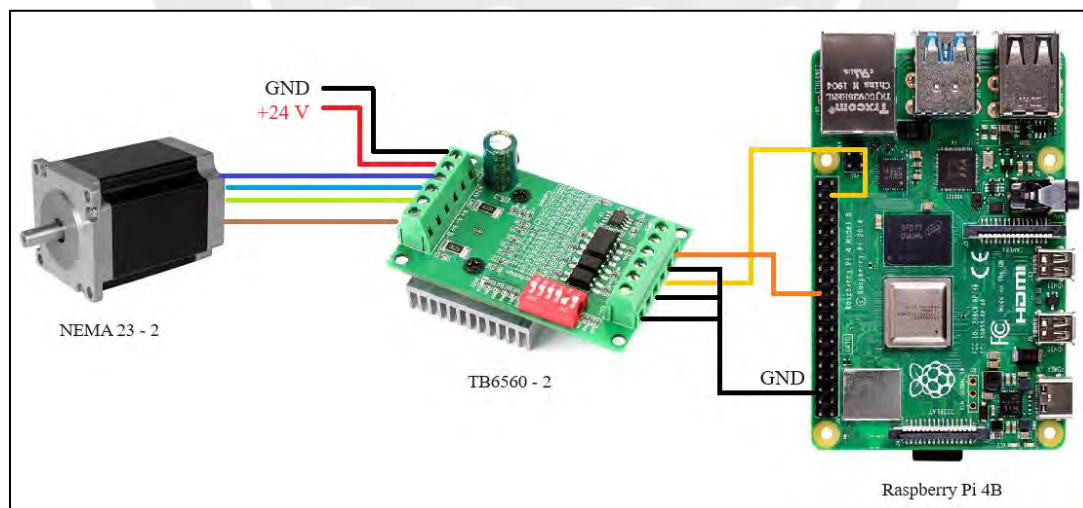


Figura 4.52. Conexión motor PaP 2, TB6560 - 2 y Raspberry Pi 4B. Elaboración propia.

Tabla 4.39. Conexiones NEMA 23 - 2 y TB6560 - 2. Elaboración propia.

Conexiones Motor NEMA 23 - 2 y TB6560 - 2	
NEMA 23 - 2	TB6560 - 2
A+	A+
A-	A-
B+	B+
B-	B-

Tabla 4.40. Conexiones TB6560 - 2 y Raspberry Pi 4B. Elaboración propia.

Conexiones TB6560 - 2 y Raspberry Pi 4B	
TB6560 - 2	Raspberry Pi 4B
CLK-	GND
DIR-	GND
EN-	GND
DIR+	GPIO 26
CLK+	GPIO 25

### Conexiones Limit Switch

La Figura 4.53 muestra la conexión de los limit switch con la Raspberry Pi 4B. Cabe mencionar que mediante programación se debe activar las resistencias de pull - up internas del microprocesador para poder garantizar un nivel lógico definido en el pin GPIO asignado. En la Tabla 4.41 y 4.42 se sitúa lo anterior de manera detallada

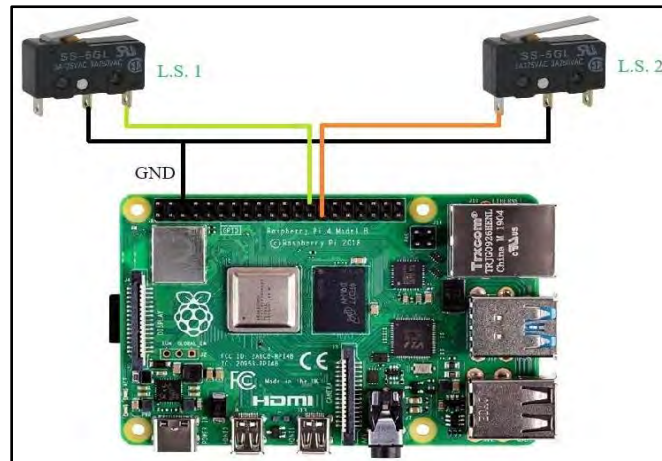


Figura 4.53. Conexiones de los Limit Switch con Raspberry Pi 4B. Elaboración propia.

Tabla 4.41. Conexiones del Limit Switch 1 y la Raspberry Pi 4B. Elaboración propia.

Conexiones L.S. 1 y Raspberry Pi 4B	
Limit Switch 1	Raspberry Pi 4B
COM 1	GND
NA 1	GPIO 7

Tabla 4.42. Conexiones del Limit Switch 2 y la Raspberry Pi 4B. Elaboración propia.

Conexiones L.S. 2 y Raspberry Pi 4B	
Limit Switch 2	Raspberry Pi 4B
COM 2	GND
NA 2	GPIO 0

### Conexiones relay

La Figura 4.54 y la Tabla 4.43 y 4.44 ilustran las conexiones entre el relay, el solenoide y la Raspberry Pi 4B.

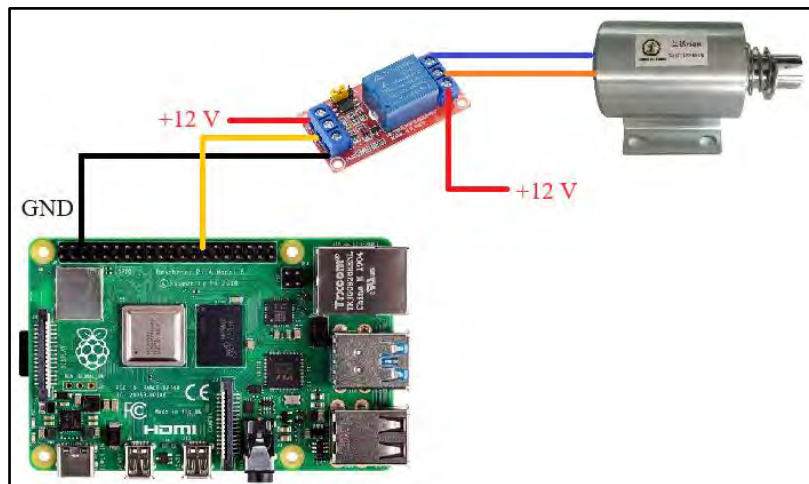


Figura 4.54. Conexión de la Raspberry Pi, relé y solenoide. Elaboración propia.

Tabla 4.43. Conexiones de la Raspberry Pi 4B y el relé. Elaboración propia.

Conexiones Relé y Raspberry Pi 4B	
Relé 12 V	Raspberry Pi 4B
GND	GND
IN	GPIO 1

Tabla 4.44. Conexiones del solenoide y el relé. Elaboración propia.

Conexiones Relé y Solenoide	
Relé 12 V	Solenoide
NO	V+
GND	V-

### Conexiones de la cámara USB

La Figura 4.55, la Tabla 4.45 y 4.46 muestran las conexiones entre la cámara USB, el transmisor de video y la Raspberry Pi 4B.

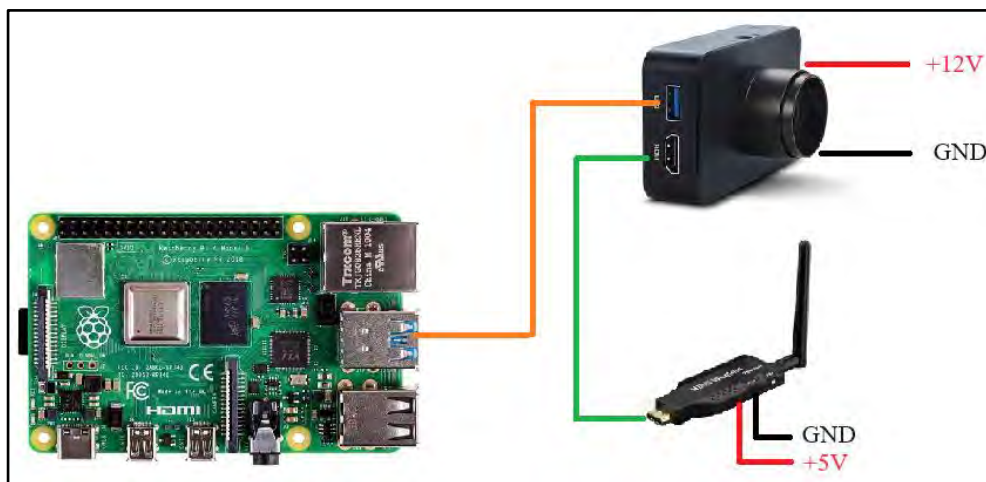


Figura 4.55. Conexiones cámara USB. Elaboración propia.

Tabla 4.45. Conexiones de la cámara USB y el transmisor de video. Elaboración propia.

Conexiones cámara USB y el transmisor de video	
Cámara USB	Transmisor de video
HDMI	HDMI

Tabla 4.46. Conexiones de la cámara USB y la Raspberry Pi 4B. Elaboración propia.

Conexiones cámara USB y la Raspberry Pi 4B	
Cámara USB	Raspberry Pi 4B
USB	USB

### Conexiones sensor de nivel de batería

La conexión con el sensor de batería se muestra en la Figura 4.56 y la Tabla 4.47. Es importante mencionar que la batería será conectada entre los pines V+ y V- del sensor INA219.

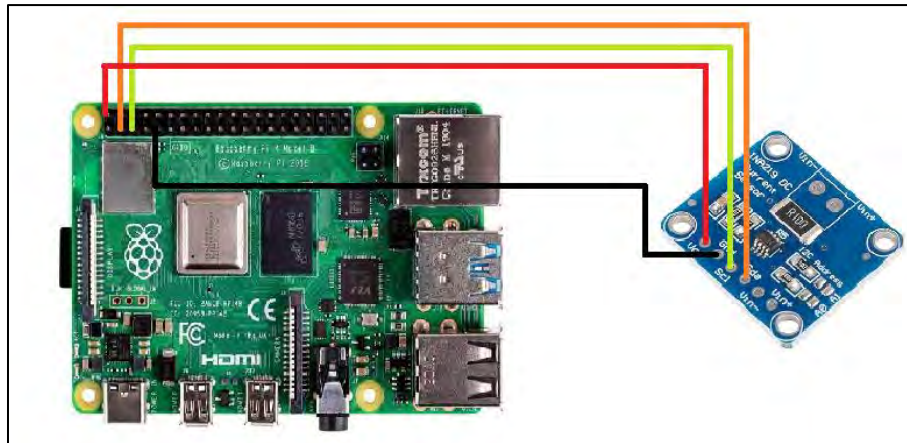


Figura 4.56. Conexión con el sensor de nivel de batería. Elaboración propia.

Tabla 4.47. Conexiones del sensor de nivel de batería y la Raspberry Pi 4B. Elaboración propia.

Conexiones sensor de nivel de batería y la Raspberry Pi 4B	
INA 219	Raspberry Pi 4B
SDA	GPIO 2
SCL	GPIO 3
VCC	+3.3 V
GND	GND

En la Figura 4.57 se observa el diseño interno de la caja de componentes electrónicos. A su vez, en la Figura 4.58 se encuentra representada la distribución de los componentes electrónicos del presente subsistema, en donde la fijación de todos los elementos es a través de uniones emperradas M3. Es importante mencionar que dichos pernos atraviesan la base caja y la platina superior de la base móvil, llegando hasta el lado inferior de estas, siendo allí donde se ajusta con una tuerca.

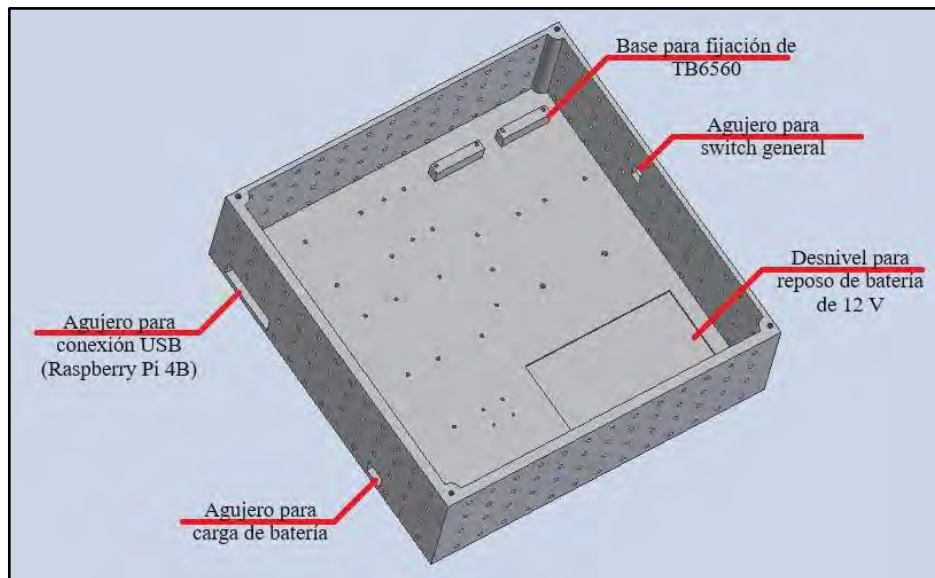


Figura 4.57. Diseño interno de caja de componentes electrónicos del subsistema manipulador. Elaboración propia.

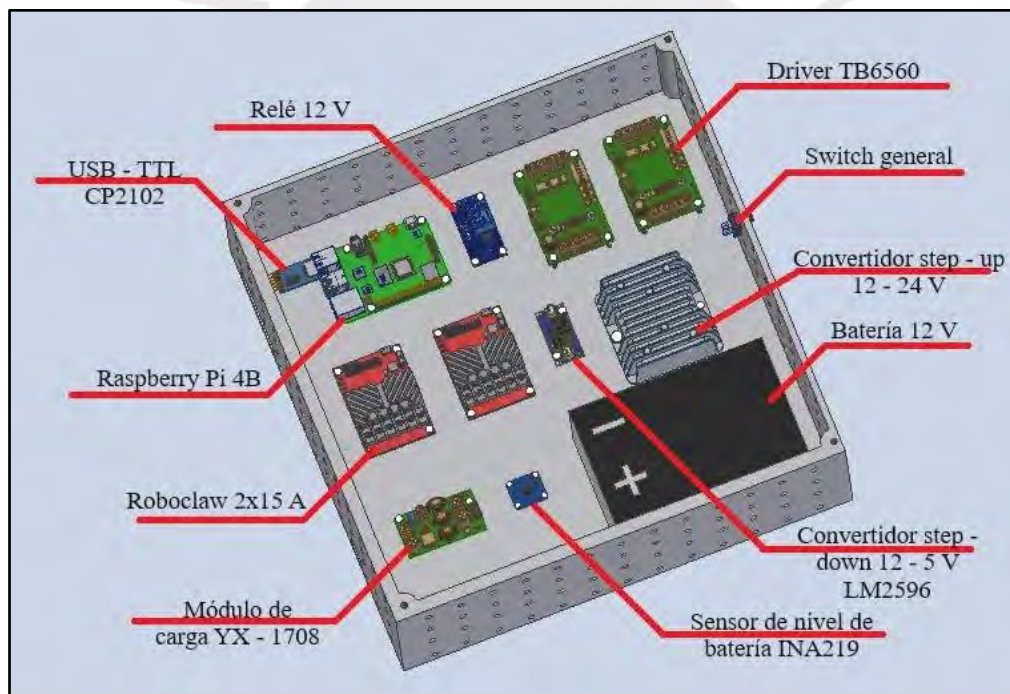


Figura 4.58. Distribución de componentes electrónicos - Subsistema manipulador. Elaboración propia.

Concluyendo con esta parte, en las Figuras 4.59 y 4.60 se observa el montaje de los sensores de fin de carrera (limit switch) para el movimiento horizontal y vertical respectivamente.

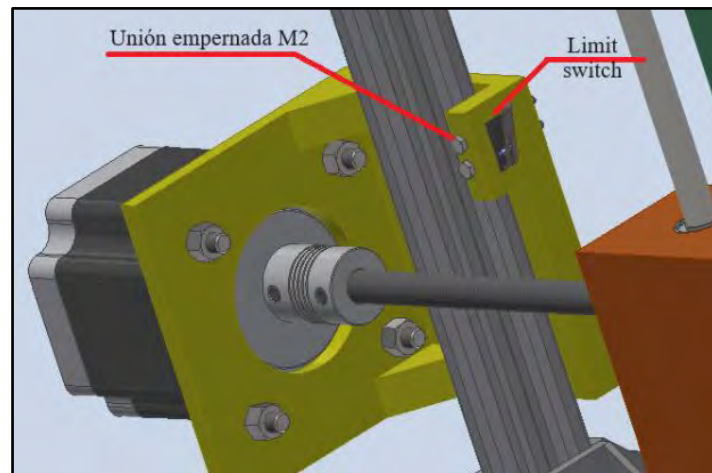


Figura 4.59. Montaje del sensor de fin de carrera - movimiento horizontal. Elaboración propia.

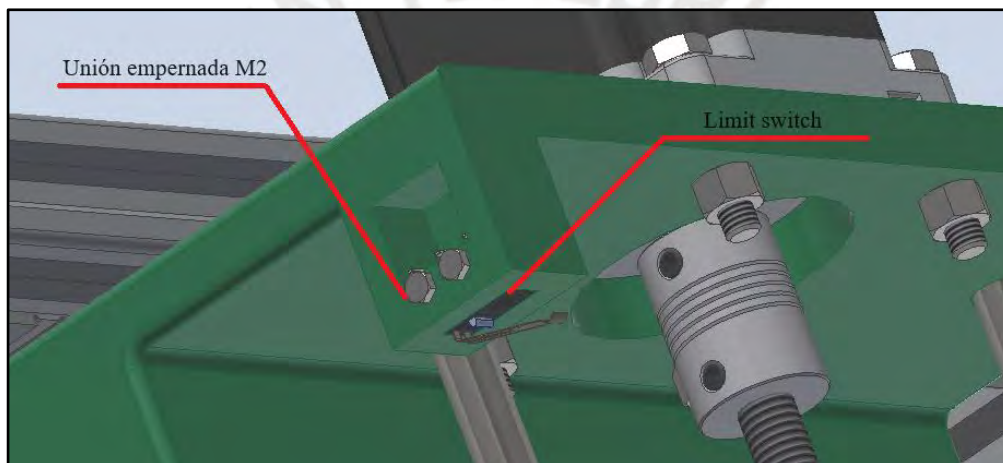


Figura 4.60. Montaje del sensor de fin de carrera - movimiento vertical. Elaboración propia.




#### 4.3.5. Selección de componentes electrónicos del subsistema estación de carga

En esta sección se realizará la selección de los componentes necesarios para definir el subsistema estación de carga.

##### Selección del material de la caja electrónica de la estación de carga

La selección del material a emplear para la construcción de la caja electrónica de la estación de carga se muestra en la Tabla 4.48.

Tabla 4.48. Selección del material de la caja electrónica de la estación de carga. Elaboración propia.

Características	Alternativas		
	Impresión 3D en PLA [1] 	Aluminio 6061 [2] 	MDF [3] 
Precio por kg aprox.(S/.)	65	15	62.90 (Dimensiones:2.8mm x 1.85 x 2.44 m)
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.24	2.7	0.6
Capacidad de aislamiento eléctrico	Si tiene	No tiene	Sí tiene
Resistencia a la corrosión	Sí tiene	No tiene	Sí tiene
Facilidad de manufacturar	Muy alta	Media	Alta

[1] <https://www.pt-mexico.com/>

[2] <https://www.alu-stock.es/es/informacion-tecnica/el-aluminio/>

[3] <https://www.maderas20.com/>




Para este caso, se opta por emplear impresión 3D en PLA para la construcción de esta caja por motivos similares por los que se prefirió este material para la caja de componentes electrónicos del subsistema manipulador. Es importante mencionar que, si bien es cierto, existen varias alternativas para impresión 3D, la caja electrónica en cuestión no estará sometida a cargas y es por ello que en este caso un material de plástico con propiedades intermedias (como el PLA) sería una alternativa aceptable.

### Selección de la fuente Switching

La Tabla 4.49 muestra el proceso de selección de la fuente switching más apropiada para este caso, donde como condiciones se tiene que la salida debe ser de 12 V. Asimismo, la corriente que se presente en la salida debe de garantizar un tiempo de carga apropiado. Es importante

mencionar que este tipo de fuentes ya incluye una protección contra interferencia electromagnética (EMI) en la entrada, por lo que no será necesario tener en cuenta ello.

Tabla 4.49. Selección de la fuente switching para la estación de carga. Elaboración propia.

Características	Alternativas		
	Fuente Switching 12 V - 2 A [1]	Fuente Switching 12 V - 5 A [1]	Fuente Switching 12 V - 10 A [1]
			
Voltaje de entrada	85 - 265 VAC	85 - 265 VAC	85 - 265 VAC
Frecuencia de trabajo	50 - 60 Hz	50 - 60 Hz	50 - 60 Hz
Voltaje de salida	12 VDC	12 VDC	12 VDC
Corriente máxima en la salida	2 A	5 A	10 A
Potencia	25 W	60 W	120 W
Dimensiones	85 x 58 x 32 mm	85 x 58 x 33 mm	60 x 98 x 42 mm
Precio	S/. 14.75	S/. 31.95	S/. 47.94

[1] <https://es.aliexpress.com/item/33051556213.html?>

De las tres fuentes switching presentadas, se elige como la mejor alternativa a la que presenta una corriente máxima de 10 A, esto debido que brindaría un tiempo de carga de la batería del robot (asumiendo batería completamente descargada y corriente máxima) de  $24 Ah/10 = 2.4$  horas. Evidentemente, se podría optar por una fuente de mayor amperaje; sin embargo, esto eleva el precio y, además, dado que la manipulación de los interruptores no son tareas que se ejecuten de manera recurrente, 2.4 horas es un tiempo adecuado.

Además, este tipo de fuentes incluye diferentes tipos de protecciones. A continuación, se presentan las más importantes y cómo esto se involucra con la seguridad operativa del sistema:

- Limitación de corriente: Evita ocasionar daño a los componentes internos de la fuente.
- Protección contra sobrecorriente: Corta la alimentación ante un aumento repentino de la corriente, lo cual minimiza la posibilidad de algún incendio.
- Protección por reinicio automático: Ante un exceso de corriente, se apaga la fuente por un tiempo y luego trata de encenderse nuevamente. Si este problema persiste, repite el proceso en lugar de dejar circular una corriente que podría ser peligrosa.

#### 4.3.6. Circuito esquemático subsistema estación de carga

La Figura 4.61 muestra el circuito esquemático del dominio electrónico del subsistema estación de carga.

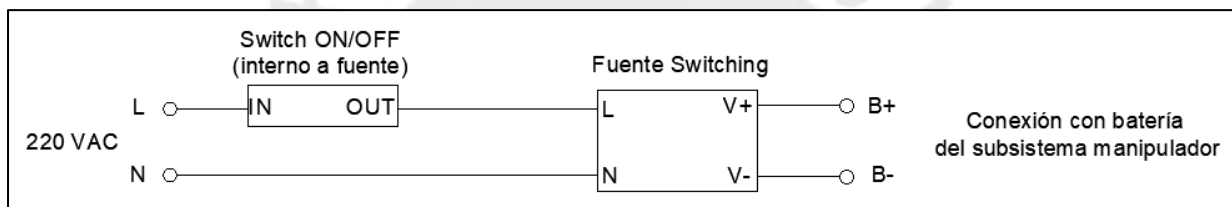


Figura 4.61. Circuito esquemático del subsistema estación de carga. Elaboración propia.

Finalmente, la vista interna de la caja presente en el subsistema estación de carga se sitúa en la Figura 4.62.

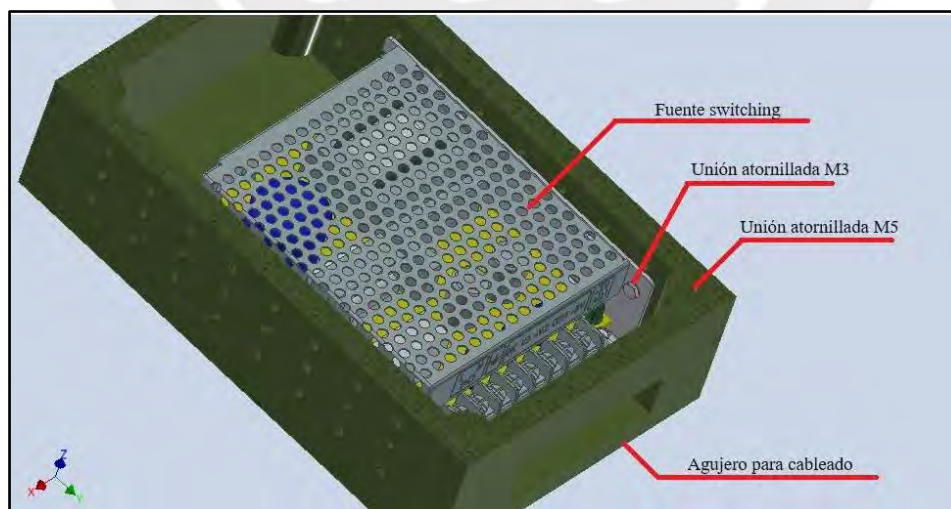


Figura 4.62. Vista interna de la caja electrónica del subsistema estación de carga. Elaboración propia.

#### 4.4. DISEÑO DE LA INTERFAZ

Para el caso del subsistema control remoto se optará por emplear una tablet industrial como interfaz, en donde se podrá enviar y recibir señales. La idea es que se pueda observar la señal de video en tiempo real, así como las acciones que se están realizando a través de unos indicadores virtuales (Figura 4.63). A su vez, se podrá elegir el color del botón a manipular a través de un selector situado en la parte superior izquierda.






Figura 4.63. Interfaz para el manejo del robot. Elaboración propia.

##### 4.4.1. Selección de tablet industrial

Para la selección de la tablet a emplear, se tiene como condiciones de partida que posea las siguientes características mínimas para asegurar una efectividad: 8 GB de memoria RAM, Windows 10 y puerto HDMI (de preferencia) para su conexión con el receptor de video. La selección se observa en la Tabla 4.50.

Tabla 4.50. Selección de la tablet industrial. Elaboración propia.

	Alternativas
--	--------------

Características	Tablet industrial Dell Latitude 7212 Rugged Extreme 12 [1] 	Rugged tablet RT - I17J [2] 	Tableta industrial Android PoEc [3] 
Marca	Dell	RUGLINE	NEONTEK
Peso	1.28 kg	-	1.8 kg
Sistema operativo	Windows 10 Pro	Windows 11	Android 12
Memoria	8 GB de RAM	8 GB de RAM y 128 GB de memoria ROM	4 GB de RAM y 32 GB de memoria Flash
Características de la batería	Batería principal de iones de litio de 2 celdas (34 W/h) + Batería secundaria de iones de litio de 2 celdas (34 W/h)	5000 mAh, con tiempo de duración de 7h	-
Tamaño de la pantalla	11.6 in	10.1 in	14 in
Procesador	Intel® Core™ i5-6300U 2.4GHz	Intel Celeron Processor N5100	i7 12va generación
¿Presenta puerto HDMI?	No	Sí	Sí
Precio	S/. 6199.00	S/. 2112.62	S/1379.96
Estándar de protección	MIL-STD-810G	CE, FCC, IP65, MIL-STD-810H	-

Tipos de conectividad que ofrece	WiFi, Bluetooth	WiFi, Bluetooth, 4G, GPS	WiFi, Ethernet, Bluetooth
----------------------------------	-----------------	--------------------------	---------------------------

[1] <https://www.magitech.pe/tablet-industrial-dell-latitude-7212-rugged-extreme-12-intel-core-i5>

[2] <https://es.aliexpress.com/item/1005006384956667.html>

[3] <https://es.aliexpress.com/item/1005004953481905.html#nav-specification>

Se elige emplear la segunda alternativa debido a que cumple con los requerimientos anteriormente mencionados, así como tener un peso adecuado para el usuario, y una gran autonomía de la batería. Además, este tipo de tablet son ampliamente utilizados en aplicaciones que requieren una mayor robustez y durabilidad, a comparación de tablets comunes como pueden ser las Android u modelos similares.

#### 4.4.2. Selección del control remoto

En la Tabla 4.51 se observan las diferentes alternativas que se pueden emplear para controlar el robot a distancia.

Tabla 4.51. Selección del control remoto a emplear. Elaboración propia.

Características	Alternativas		
	DualShock 4 [1] 	Dual Sense [2] 	DualShock 2 [3] 
Durabilidad	Media	Alta	Baja
Nivel tecnológico	Medio	Alto	Bajo
Peso	210 g	322 g	174 g
Dimensiones	162 x 52 x 98 mm	141 x 39 x 191 mm	150 x 102 x 51 mm
Precio	S/. 279.00	S/. 329.90	S/. 55.00

[1] <https://www.oechsle.pe/mando-ps4-dualshock-4-negro-1000100183/p>

[2] <https://phantom.pe/mando-dualsense-ps5.html>

[3] <https://articulo.mercadolibre.com.pe/MPE-624588097-mando-original-para-play-station-2>

Se prefiere emplear un mando tipo DualShock 4 debido principalmente a que, al ser un dispositivo relativamente moderno, presenta un precio y una durabilidad intermedia respecto a las otras dos alternativas presentadas.

#### **4.4.3. Disposición de botones**

La Figura 4.64 muestra la distribución de los botones que se emplearán para controlar el robot, en donde se emplean los botones del lado izquierdo para realizar los diferentes movimientos relacionados al desplazamiento lineal del sistema. Si bien es cierto, las ruedas mecanum permiten realizar movimientos en diagonal, por simplicidad de uso, se limitará a los 4 movimientos mostrados en la figura anteriormente mencionada. Asimismo, al lado derecho del control remoto se sitúa el botón relacionado a la manipulación del interruptor, el cual es presionado una vez el robot se encuentre en reposo en la posición deseada, frente al interruptor. Acto seguido, el sistema automáticamente moverá los actuadores necesarios (motores NEMA 23 y solenoide) para presionar el botón solicitado a través de la tablet. Como comentario adicional, es de notar que existen mandos de control mucho más robustos, como los de un manipulador Kuka. Sin embargo, un DualShock 4 representa una alternativa bastante práctica y muy empleada en general, diseñado para la comodidad de uso.



Figura 4.64. Distribución de botones para el manejo del robot. Elaboración propia.

#### 4.5. DISEÑO DE SOFTWARE

Con respecto al software a emplear, se usará el lenguaje Python con librerías de libre acceso, tales como OpenCV para realizar tanto la detección del color como la corrección angular de la imagen capturada por la cámara. De este modo, es posible hallar las coordenadas en el espacio para proceder a realizar la manipulación del botón indicado a través de la tablet industrial.

Por ejemplo, en el caso de la detección del color, se realizó un código de prueba (Anexo E), en donde se obtiene como resultado lo mostrado en la Figura 4.65.

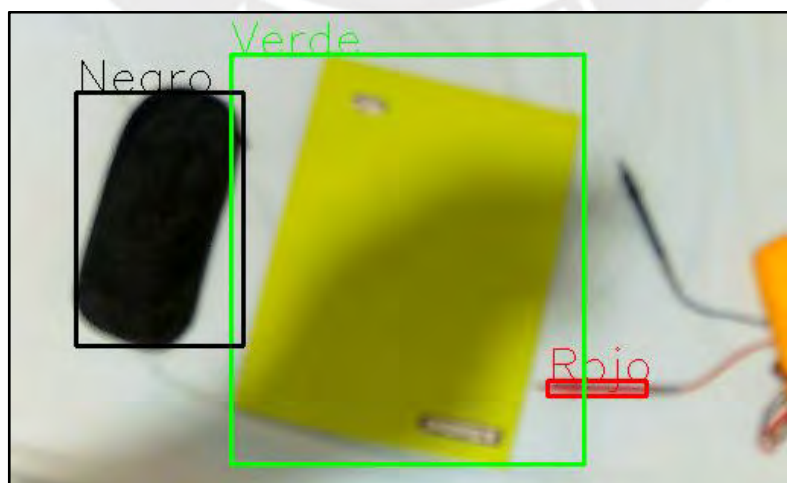


Figura 4.65. Resultado del código de prueba empleado para la detección de color. Elaboración propia.

### Diagrama de flujo del software

Las Figuras 4.66 a la 4.74 muestran de manera resumida el funcionamiento de la interfaz, junto a los comandos que serán enviados al robot. Es importante mencionar que la realización de las tareas se realizará empleando FreeRTOS.

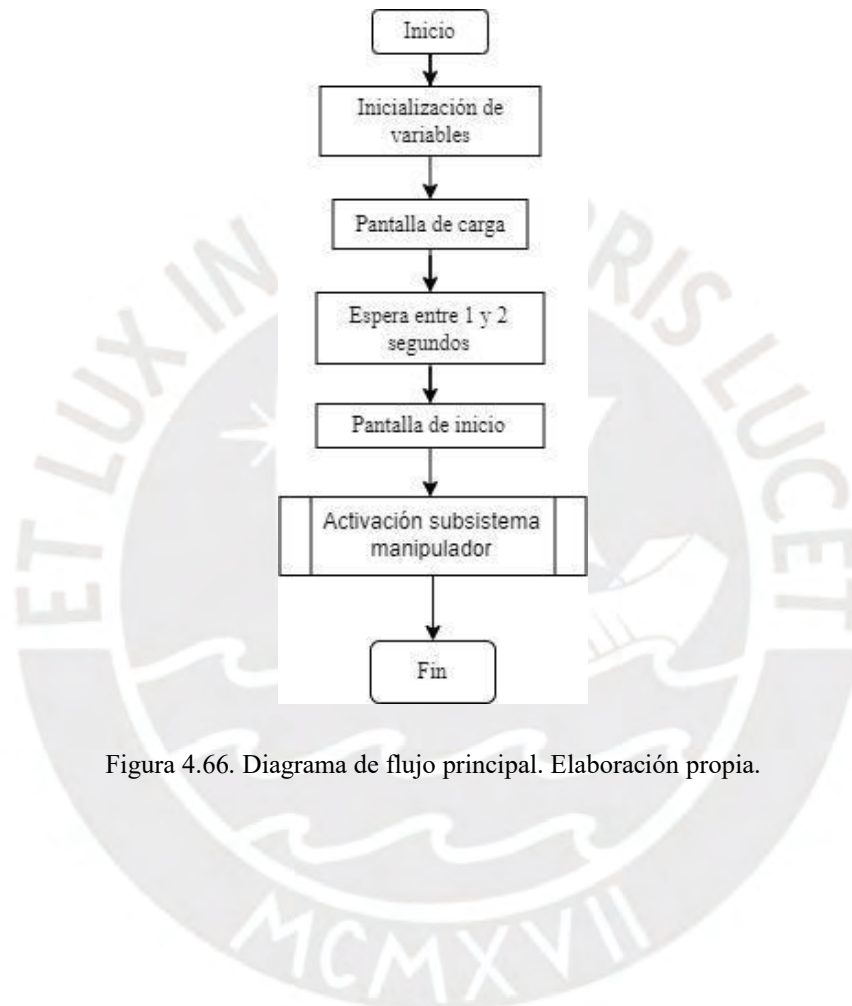


Figura 4.66. Diagrama de flujo principal. Elaboración propia.

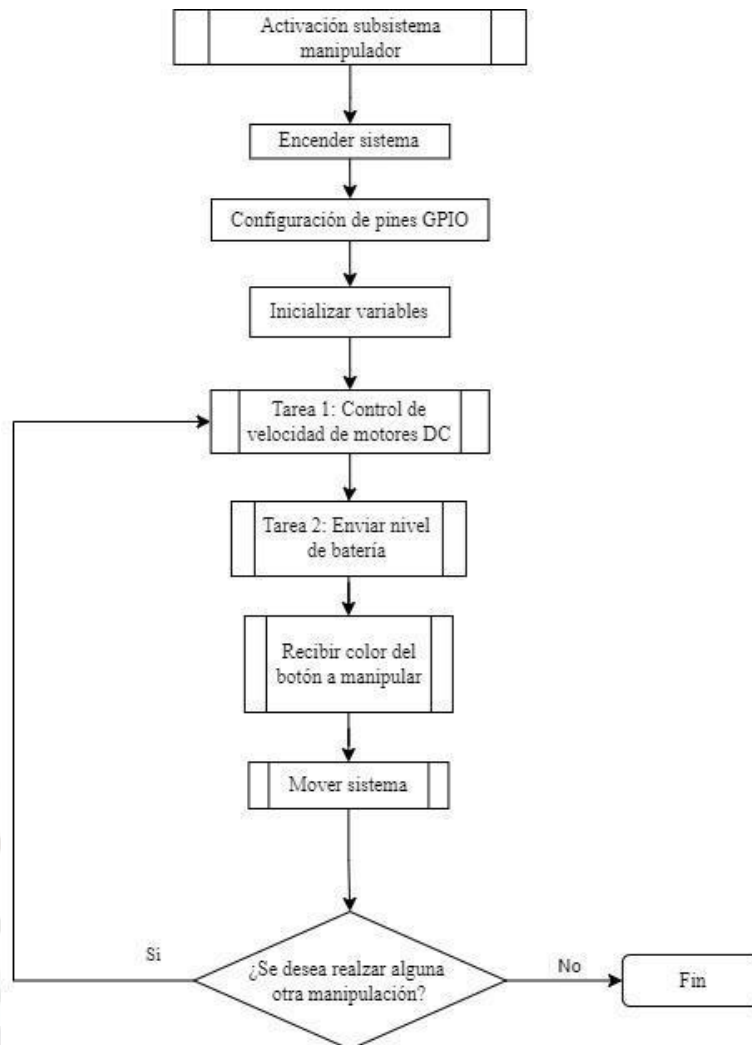


Figura 4.67. Diagrama de flujo del subproceso Activación subsistema manipulador. Elaboración propia.

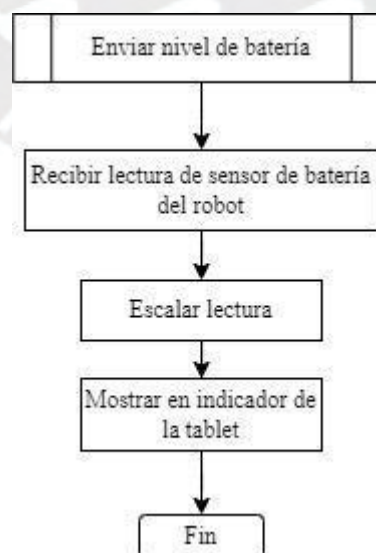


Figura 4.68. Subproceso Enviar nivel de batería. Elaboración propia.

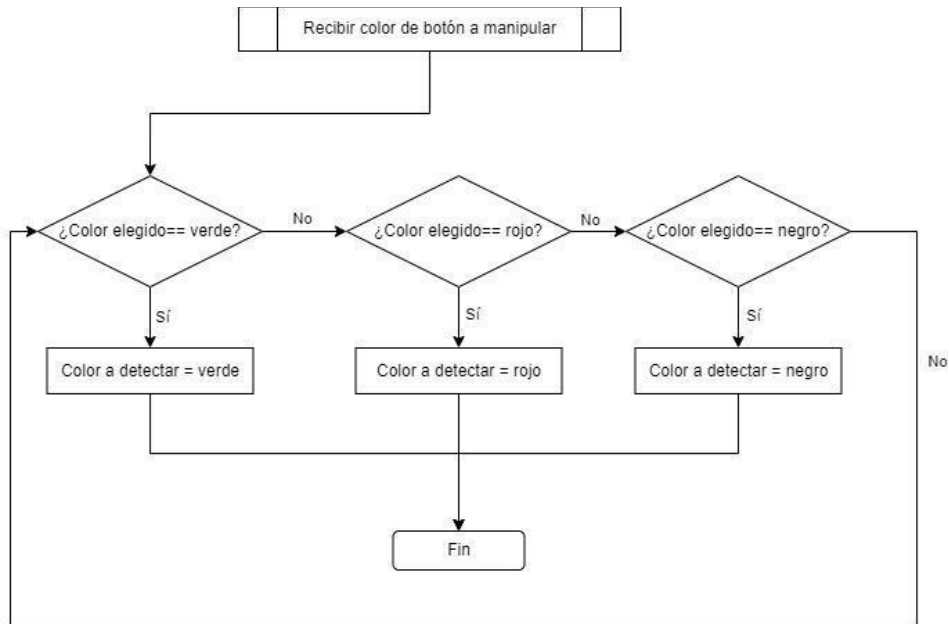


Figura 4.69. Subproceso Recibir color de botón a manipular. Elaboración propia.

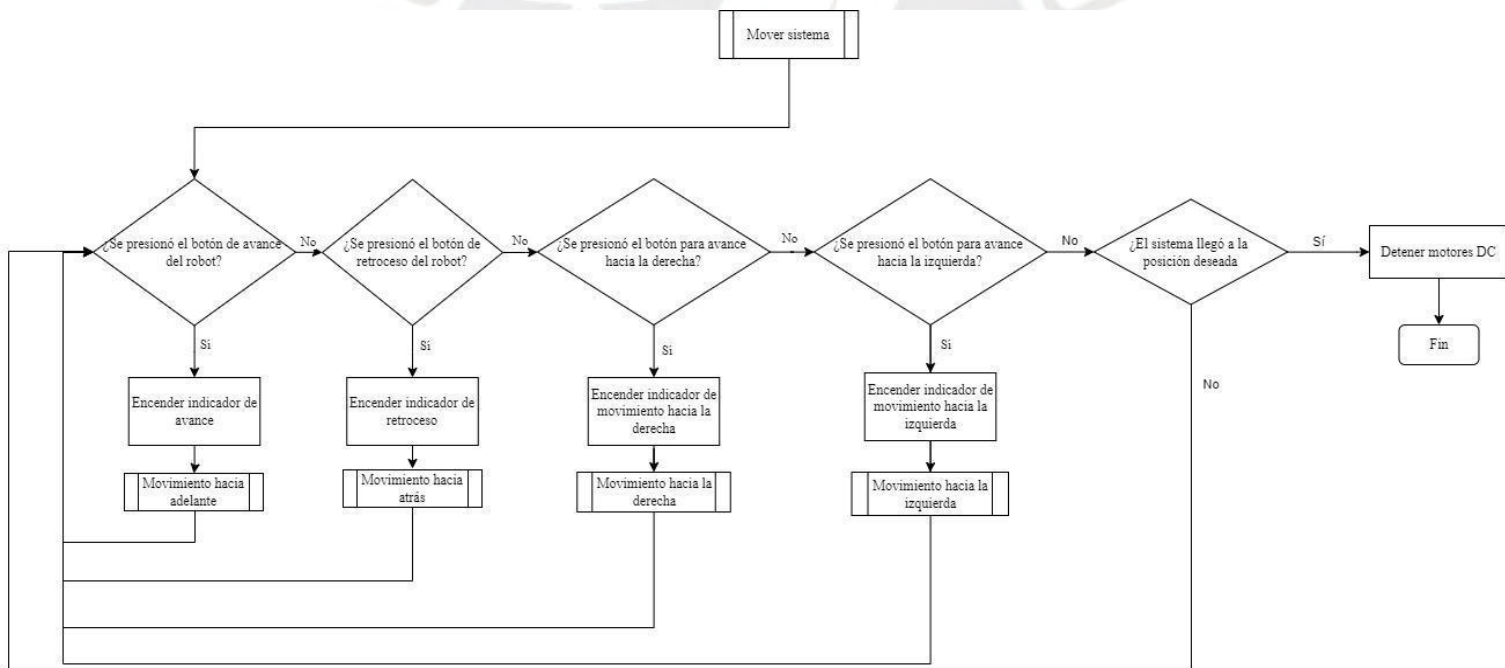


Figura 4.70. Subproceso Mover sistema. Elaboración propia.

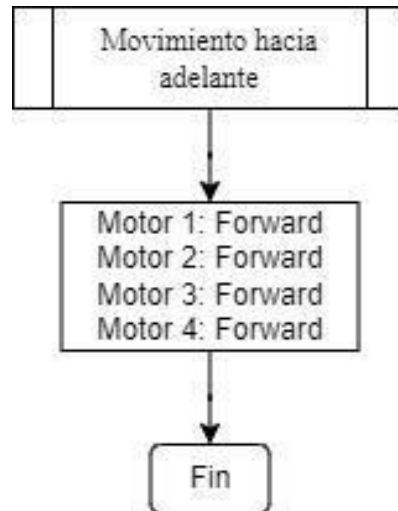


Figura 4.71. Subproceso Movimiento hacia adelante. Elaboración propia.

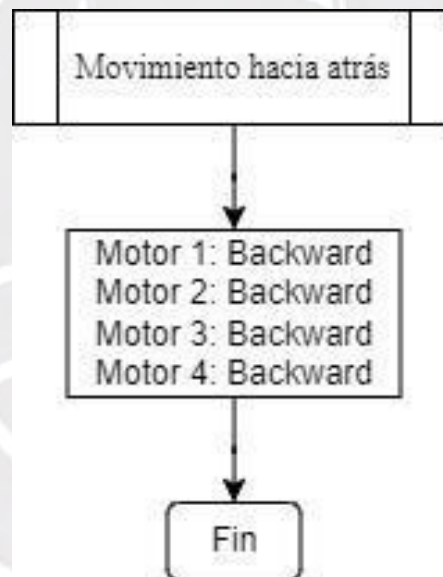


Figura 4.72. Subproceso Movimiento hacia atrás. Elaboración propia.

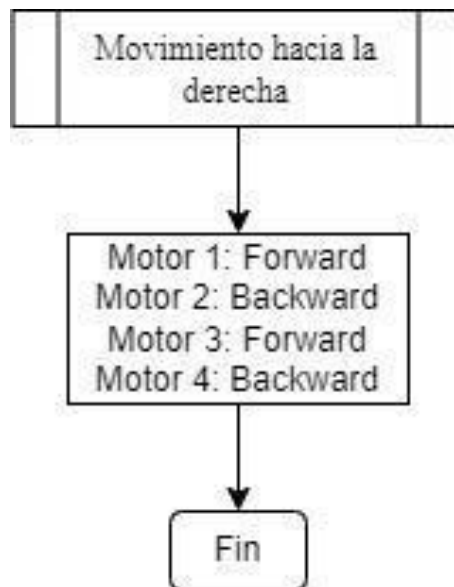


Figura 4.73. Subproceso Movimiento hacia la derecha. Elaboración propia.

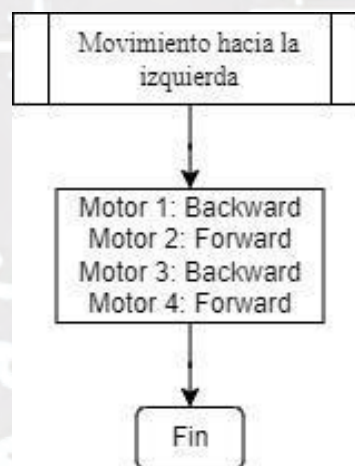


Figura 4.74. Subproceso Movimiento hacia la izquierda. Elaboración propia.

## 4.6. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

En las siguientes líneas se analizará el sistema de control a desarrollar en el presente trabajo.

### 4.6.1. Variables por monitorear y controlar

En esta subsección, se identifican las variables que se van a monitorear y controlar, las cuales se resumen en la Tabla 4.52. En primer lugar, tanto la velocidad del manipulador, como la posición del solenoide (actuador) son variables que se deberán controlar. En segundo lugar, el estado de la manipulación se deberá monitorear en todo momento a través de la interfaz en la laptop. A su vez, el nivel de batería del manipulador se deberá monitorear en todo momento para ser recargada en caso sea necesario.

Tabla 4.52. Variables por controlar y monitorear. Elaboración Propia.

Variable	Tipo de Variable	Valores de la variable	Monitorear/Controlar
Nivel de batería del manipulador	Analógica	0-100%	Monitorear (a través de la interfaz en la Tablet)
Velocidad lineal del manipulador	Analógica	0-100% (0 a 1 m/s)	Controlar (Se medirá la velocidad de rotación a través de encoders magnéticos y un control de lazo cerrado)
Posición del solenoide	Analógico	X:0-3860 px Y:0-2160 px	Controlar (control de lazo abierto)
Estado de la manipulación	-	-	Monitorear (a través de la cámara)

#### 4.6.2. Estrategia de control

Primero, se plantea realizar un control de lazo cerrado para lograr una velocidad del manipulador de 1 m/s, la manera en la cual se va a realizar ello es a través de ondas PWM emitidas por los pines de los controladores Roboclaw 2x15 A hacia los motores. Dicha velocidad será corroborada por la lectura de los encoders en cada motor.

Es importante mencionar que, como se detalló anteriormente en la sección de cálculos mecánicos, los motores deben tener una velocidad de giro de 191 RPM, por lo cual se debe considerar un duty cycle de 36% (pues la velocidad máxima de los motores elegidos es de 530 RPM) para las ondas PWM ya mencionadas (Figura 4.75).

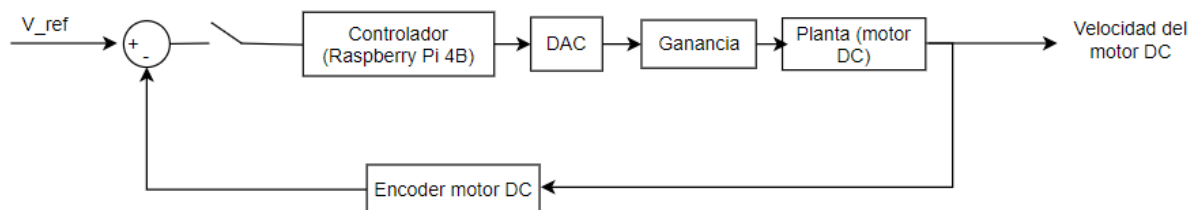


Figura 4.75. Estrategia de control para los motores DC. Elaboración propia.

Además, para controlar la posición del solenoide (actuador) se plantea también un control de lazo abierto (Figura 4.76), pues garantizar el alineamiento perfecto de este último con el botón a manipular podría ser una tarea que requiera alto poder computacional, saturando a la Raspberry Pi. La idea en este caso es que, una vez obtenidas las coordenadas X e Y del botón de interés, se mande ondas PWM para mover los dos motores paso a paso presentes en el manipulador.

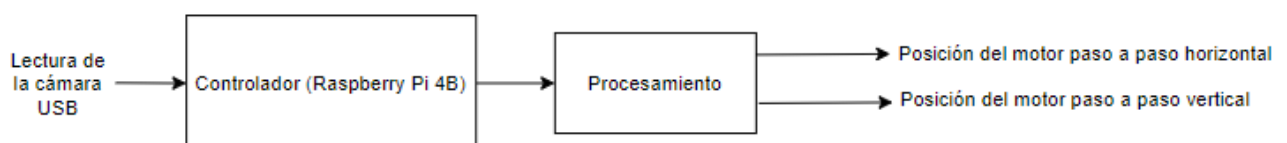


Figura 4.76. Estrategia de control para posicionar el solenoide. Elaboración propia.

## CAPÍTULO 5

### PLANOS Y PRESUPUESTO

En el presente capítulo se resumen los precios de cada uno de los elementos que conforman el diseño mecatrónico en cuestión con la finalidad de verificar el cumplimiento del requerimiento establecido (menor a US\$ 20 000). Para un mejor entendimiento, se dividirá el cálculo del presupuesto por subsistema, al mismo tiempo que se presenta una lista de los planos mecánicos de los elementos que lo conforman.

#### 5.1. Subsistema manipulador

A continuación, se analizarán los costos del subsistema manipulador.

##### 5.1.1. Costo de materiales

La Tabla 4.53 resume los costos de los materiales a emplear para realizar el ensamble del robot.

Tabla 4.53. Costo de materiales - Subsistema manipulador. Elaboración propia.

Item	Componente	Descripción	Cantidad	Costo unitario (S/.)	Subtotal (S/.)
1	V - slot 20 x 20 x 3200 mm (longitud comercial)	Sólo v-slot	6	100.00	600.00
2	Rueda mecanum de aluminio de Ø 100 mm (incluye acople para motor DC)	Rueda y acople	4	115.56	462.24
3	Cadena 3 mm	Sólo cadena	1	6.50	6.50
4	Gancho de seguridad de cadena	Sólo gancho de seguridad	1	6.50	6.50
5	Ángulo de 90°	Sólo ángulo	1	1.50	1.50
6	Platina de 4"x 1/8"x 5.95 m	Sólo platina	2	180.00	360.00

7	Placa de unión en T para v-slot 20 x 20	Sólo placa de unión en T	16	5.37	85.92
8	Plato de unión en cruz para v-slot 20 x 20	Sólo plato de unión en cruz	2	12.13	24.26
9	Plato de unión en triángulo para v-slot 20 x 20	Sólo plato de unión en triángulo	28	3.00	84.00
10	Varilla lisa Ø 8 mm x 1 m	Se vende por metro	3	27.48	82.44
11	Husillo Ø8 mm x 50 cm	Se vende por longitudes comerciales, incluye 1 tuerca por unidad	2	26.00	52.00
12	Tuerca husillo Ø8 mm	Sólo tuerca	3	6.50	19.50
13	Acople flexible 8 x 8 mm	Acople + prisioneros	2	6.50	13.00
14	Bracket vertical SK8	Bracket + tornillos de sujeción	4	5.50	22.00
15	KP-08 Chumacera vertical (Ø8 mm)	Chumacera + prisionero	1	8.50	8.50
16	KP-000 Rodamiento	Chumacera + rodamiento	8	33	264.00
17	Eje 10 mm / 3 m	Sólo eje	1	12.00	12.00
18	LM8UU Rodamiento lineal	Sólo rodamiento	4	5.00	20.00
19	Ángulo de esquina de 90° para v - slot 20 x 20	Sólo ángulo	148	3.00	444.00
20	Tornillo de cabeza hexagonal M5 x 10	Sólo tornillo	366	7.00 (25 unidades)	105.00
21	Tornillo de cabeza hexagonal M3 x 12	Sólo tornillo	28	20.00 (10 unidades)	40.00
22	Tornillo de cabeza	Sólo tornillo	69	30.00 (30)	90.00

	hexagonal M5 x 12			unidades)	
23	Tornillo de cabeza hexagonal M3 x 10	Sólo tornillo	8	20.00 (9 unidades)	20.00
24	Tornillo de cabeza hexagonal M3 x 16	Sólo tornillo	13	30.00 (40 unidades)	30.00
25	Tornillo de cabeza hexagonal M2 x 20	Sólo tornillo	2	10.00 (5 unidades)	10.00
26	Tornillo de cabeza hexagonal M2 x 25	Sólo tornillo	2	10.00 (5 unidades)	10.00
27	Tornillo de cabeza hexagonal M5 x 25	Sólo tornillo	4	12.00 (5 unidades)	12.00
28	Tornillo de cabeza hexagonal M5 x 20	Sólo tornillo	12	30.00 (40 unidades)	30.00
29	Tornillo de cabeza hexagonal M2.5 x 8	Sólo tornillo	20	20.00 (40 unidades)	20.00
30	Tornillo de cabeza hexagonal M2 x 16	Sólo tornillo	4	10.00 (5 unidades)	10.00
31	Tornillo de cabeza hexagonal M5 x 16	Sólo tornillo	6	15.00 (10 unidades)	15.00
32	Tornillo de cabeza hexagonal M3 x 30	Sólo tornillo	8	15.00 (10 unidades)	15.00
33	Tuerca hexagonal M3	Sólo tuerca	49	2.90 (4 unidades)	142.10
34	Tuerca hexagonal M5	Sólo tuerca	84	3.90 (3 unidades)	327.60
35	Tuerca hexagonal M2	Sólo tuerca	4	5.00 (4 unidades)	5.00
36	Tuerca cabeza martillo deslizante (Ø5 mm) para v - slot 20 x 20	Sólo tuerca	361	1.00	361.00
37	Pasadores (estructura soporte de cámara)	Sólo pasadores (Tabla 4.5)	10	-	9.51

<b>Total en soles (S/. )</b>	<b>3 820.57</b>
<b>Total en dólares (Considerando un tipo de cambio de 1 US\$ = S/. 4.00)</b>	<b>955.14</b>

Los datos considerados para la estimación del costo de impresión tanto para este subsistema como para el subsistema estación de carga se observa en la Tabla 4.54.

Tabla 4.54. Datos empleados para el cálculo de costo de impresión. Elaboración propia.

Concepto	Valor
Costo 1 kg de PLA	S/. 65.00
Potencia impresora 3D Creality CR - 10 Max	750 W
Tarifa de energía (Luz del Sur, 2024)	S/. 0.85 por kWh
Costo de impresión 1 h	S/. 0.056

Para estimar los costos de los elementos que serán manufacturados a través de impresión 3D se toma en consideración un costo de S/. 65.00 por 1 kg de PLA de color blanco (Fuente: SAISAC MECATRÓNICA). A su vez, se emplea el software Ultimaker Cura para estimar las características de la impresión por pieza, tomando en cuenta que se tiene una impresora 3D Creality CR - 10 Max. Lo anterior mencionado se ilustra en la Tabla 4.55.

Tabla 4.55. Costos de impresión 3D - Subsistema manipulador. Elaboración propia.

Ítem	Componente	Relleno (Infill)	Filamento usado (g)	Costo por material (S/.)	Tiempo de impresión (h)	Costo por energía (S/.)	Costo total (S/.)
1	Pieza para la traslación horizontal	20%	708	46.02	70:12	44.63	90.65
2	Pieza para la traslación vertical	20%	304	19.76	28:58	18.47	38.23
3	Soporte de NEMA 23	20%	41	2.67	6:35	4.19	6.86
4	Plataforma	20%	99	6.44	10:38	6.78	13.22

5	Cuerpo 1	20%	55	3.58	6:30	4.14	7.72
6	Cuerpo 2	20%	10	0.65	1:23	0.88	1.53
7	Cuerpo 3	20%	29	1.89	4:39	2.96	4.85
8	Cuerpo 4	20%	18	1.17	2:30	1.59	2.76
9	Cuerpo 5	20%	6	0.39	0:43	0.46	0.85
10	Apoyo 1	20%	13	0.85	1:54	1.21	2.06
11	Apoyo 2	20%	11	0.72	1:43	1.09	1.81
12	Apoyo cámara	20%	7	0.46	0:55	0.58	1.04
13	Caja de componentes electrónicos	20%	948	61.62	114:36	73.06	134.68
14	Tapa de caja de componentes electrónicos	20%	351	22.82	36:09	23.05	45.87
<b>Total en soles (S/. )</b>							<b>352.13</b>
<b>Total en dólares (Considerando un tipo de cambio de 1 US\$ = S/. 4.00)</b>							<b>88.03</b>

### 5.1.2. Costo de procesos de fabricación empleados

La Tabla 4.56 muestra los costos de los procesos de fabricación empleados para el caso del subsistema manipulador.

Tabla 4.56. Costo de los procesos de fabricación empleados - Subsistema manipulador. Elaboración propia.

Item	Proceso	Descripción	Cantidad	Costo unitario (S/.)	Subtotal (S/.)
1	Corte de v-slot	Sólo corte	43	5.00	215.00
2	Corte de varilla lisa	Sólo corte	3	5.00	15.00
3	Corte de cadena	Sólo corte	1	5.00	5.00
4	Corte de platina	Sólo corte	12	10.00	120.00

<b>Total en soles (S/.)</b>	<b>355.00</b>
<b>Total en dólares (Considerando un tipo de cambio de 1 US\$ = S/. 4.00)</b>	<b>88.75</b>

### 5.1.3. Costo de componentes electrónicos

La Tabla 4.57 muestra los costos de los componentes electrónicos del subsistema manipulador.

Tabla 4.57. Costo de los componentes electrónicos - Subsistema manipulador. Elaboración propia.

Item	Componente	Descripción	Cantidad	Costo unitario (S/.)	Subtotal (S/.)
1	Motor NEMA 23	Solo motor	2	120.00	240.00
2	Driver TB6560 para motor paso a paso	Solo driver	2	40.00	80.00
3	Motor DC Pololu	Motor + encoder magnético	4	207.80	831.20
4	Controlador de motores Roboclaw 2x15 A	Solo driver	2	399.80	799.60
5	Cámara USB MOKOSE	Cámara y conector USB	1	339.80	339.80
6	Transmisor/receptor de video 50 m Wireless HDMI Extender	Transmisor y receptor	1	215.48	215.48
7	Sensor de nivel de batería INA219	Solo sensor	1	11.20	11.20
8	Sensor de fin de carrera Beastronic	solo sensor	2	5.00	10.00
9	Switch general	Solo sensor	1	28.00	28.00
10	Raspberry Pi 4B	Raspberry Pi 4B + cable de alimentación + accesorios	1	440.00	440.00
11	Convertidor step - down LM2596	Solo convertidor	1	35.00	35.00
12	Convertidor step - up TBS1224C240Z	Solo convertidor	1	47.59	47.59

13	Solenoides	Solenoides + tornillos de sujeción (M5 x 10)	1	100.00	100.00
14	Batería	Batería + conectores	1	34.16	34.16
15	Módulo USB - TTL	Sólo módulo	1	15.00	15.00
16	Módulo de carga YX-1708	Sólo módulo	1	51.92	51.92
17	Módulo relé 12 V	Sólo módulo	1	29.00	29.00
<b>Total en soles (S/.)</b>					<b>3 307.95</b>
<b>Total en dólares (Considerando un tipo de cambio de 1 US\$ = S/. 4.00)</b>					<b>826.99</b>

## 5.2. Subsistema estación de carga

En este apartado se analizan los costos presentes en el subsistema estación de carga.

### 5.2.1. Costo de materiales

En la Tabla 4.58 se observa el resumen de los costos de los materiales de la estación de carga.

Tabla 4.58. Costo de los materiales - Subsistema estación de carga. Elaboración propia.

Ítem	Componente	Relleno (Infill)	Filament o usado (g)	Costo por material (S/.)	Tiempo de impresión (h)	Costo por energía (S/.)	Costo total (S/.)
1	Caja de componentes electrónicos	20%	228	14.82	27:27	17.49	32.31
2	Tapa de caja de componentes electrónicos	20%	76	4.94	8:04	5.14	10.08
<b>Total en soles (S/.)</b>							<b>42.39</b>
<b>Total en dólares (Considerando un tipo de cambio de 1 US\$ = S/. 4.00)</b>							<b>10.59</b>

### 5.2.2. Costo de componentes electrónicos

La Tabla 4.59 muestra los costos de los componentes electrónicos del subsistema estación de carga.

Tabla 4.59. Costo de los componentes electrónicos - Subsistema estación de carga. Elaboración propia.

Item	Componente	Descripción	Cantidad	Costo unitario (S/.)	Subtotal (S/.)
1	Fuente Switching de 12V	Fuente + cable de alimentación	1	47.94	47.94
<b>Total en soles (S/.)</b>					<b>47.94</b>
<b>Total en dólares (Considerando un tipo de cambio de 1 US\$ = S/. 4.00)</b>					<b>11.99</b>

### 5.3. Subsistema control remoto

La Tabla 4.60 muestra los costos de los componentes del subsistema control remoto.

Tabla 4.60. Costo de los componentes del subsistema control remoto. Elaboración propia.

Item	Componente	Descripción	Cantidad	Costo unitario (S/.)	Subtotal (S/.)
1	Rugged tablet RT - I17J	Tablet industrial + accesorios	1	2112.62	2112.62
2	DualShock 4	Mando + conector	1	279.00	279.00
<b>Total en soles (S/.)</b>					<b>2 391.62</b>
<b>Total en dólares (Considerando un tipo de cambio de 1 US\$ = S/. 4.00)</b>					<b>597.91</b>

### 5.4. Costo total del sistema

Por último, en la Tabla 4.61 se suman todos los subtotales anteriormente calculados con la finalidad de hallar el costo total del sistema.

Tabla 4.60. Costo total del sistema. Elaboración propia.

Item	Descripción	Subtotal (S/.)
1	Costo de los materiales del subsistema manipulador	4172.70
2	Costo de los procesos de fabricación empleados en el subsistema manipulador	355.00
3	Costo electrónico del subsistema manipulador	3307.95
4	Costo de materiales en la estación de carga	42.39
5	Costo electrónico del subsistema estación de carga	47.94
6	Costo subsistema control remoto	2391.62
<b>Total en soles</b>		<b>10 317.60</b>
<b>Total en dólares (Considerando un tipo de cambio de 1 US\$ = S/. 4.00)</b>		<b>2 579.40</b>

### 5.5. Planos mecánicos del sistema

La Tabla 4.62 muestra la lista de los planos de despiece y ensamble. Con respecto al código de identificación de cada plano, este se encuentra conformado por tres elementos: el primero hace referencia al número del plano; el segundo, al tamaño de hoja y el tercero hace referencia al tipo de plano, sea ensamble (E) o despiece (D), en conjunto con la enumeración respectiva. Por ejemplo, el plano N°1 con código de identificación 01-A3-D1 implica que es el plano 1, con tamaño de hoja A3 y plano de despiece N°1. La idea de establecer códigos de identificación para los planos en general es debido a que se tiene previsto proporcionar un manual de ensamblaje al usuario y una rápida identificación de alguna pieza que requiera algún mantenimiento.

Tabla 4.62. Lista de planos de despiece y ensamble. Elaboración propia.

Número	Nombre	Código de identificación
1	Pieza para traslación horizontal	01-A3-D1

2	Pieza para traslación vertical	02-A2-D2
3	Soporte NEMA 23	03-A2-D3
4	Cuerpo 1	04-A3-D4
5	Cuerpo 2	05-A3-D5
6	Cuerpo 3	06-A3-D6
7	Cuerpo 4	07-A3-D7
8	Cuerpo 5	08-A3-D8
9	Apoyo 1	09-A3-D9
10	Apoyo 2	10-A3-D10
11	Apoyo cámara	11-A3-D11
12	Plataforma	12-A3-D12
13	Subensamble estructura cámara	13-A3-E1
14	Caja electrónica manipulador	14-A3-D13
15	Tapa de caja electrónica del manipulador	15-A3-D14
16	Ensamble caja electrónica manipulador	16-A3-E2
17	Subensamble estructura principal	17-A0-E3
18	Subensamble base móvil	18-A0-E4
19	Ensamble general	19-A0-E4
20	Caja electrónica de la estación de carga	20-A3-D15
21	Tapa caja electrónica de la estación de carga	21-A3-D16
22	Ensamble caja electrónica estación de carga	22-A3-D17

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se llegaron a las siguientes conclusiones:

- Se diseñó un robot manipulador controlado a distancia para operar en interruptores de potencia, contando con tres subsistemas: subsistema manipulador, subsistema control remoto y subsistema estación de carga. Es posible realizar las adaptaciones necesarias para hacerlo un sistema completamente autónomo; sin embargo, esto complicaría el diseño tanto en el aspecto técnico (mayor complejidad en la programación del robot) como también desde el punto de vista regulatorio (pues es una tarea de alto impacto en una subestación eléctrica).
- Se investigó sobre los diferentes robots manipuladores que sirven de asistencia en operaciones del sector eléctrico, muchos de estos siendo controlados a distancia; mientras que otros, presentaban un modo de operación autónomo como modo auxiliar. Es a partir de aquí que se tuvo esto en cuenta para el diseño del robot.
- Se establecieron los requerimientos del sistema en base a lo investigado sobre el tema, siendo los más importantes los siguientes: la geometría, el montaje y la electrónica.
- Se desarrollaron conceptos de solución ante la problemática propuesta. Dos de estos empleaban manipuladores robóticos existentes; mientras que la última, un solenoide.
- Se estimó un presupuesto para la fabricación de todo el sistema, el cual es de S/. 10 317.60, cumpliendo con ser menor al costo máximo esperado del sistema

## RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

- Realizar una evaluación periódica del impacto del robot en las operaciones diarias y cómo este se puede adaptar a diferentes modelos de interruptores de potencia, pudiendo así simplificar el diseño. Así, esto permitirá realizar ajustes necesarios para maximizar su eficiencia y funcionalidad en la manipulación de los interruptores de potencia de media tensión.
- Se puede incorporar el uso de inteligencia artificial para lograr un mejor desempeño en la manipulación.
- Se recomienda implementar un programa de mantenimiento preventivo regular para el robot, asegurando su funcionamiento óptimo y prolongando su vida útil. Además, es fundamental capacitar a los operadores en el manejo del robot y en la resolución de problemas básicos, garantizando una operación segura y eficiente.
- En relación al trabajo futuro, es posible emplear tecnologías que permitan al robot poder adaptarse a diferentes entornos de subestaciones, adaptándose fácilmente a nuevos modelos de interruptores de potencia que ingresen al mercado.

## BIBLIOGRAFÍA

- Área Tecnológica. (s.f.). Obtenido de Area Tecnológica: <https://www.areatecnologia.com/como-se-distribuye-energia-electrica.htm>
- Del Rosario, E. (s.f.). Cálculo Básico de una Subestación Eléctrica. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Reporte de la empresa venezolana Kay Electric. (31 de enero de 2014). Accidente de arco eléctrico [Video]. Recuperado de [https://www.youtube.com/watch?v=d8Uki\\_kidy0](https://www.youtube.com/watch?v=d8Uki_kidy0)
- Reportaje del canal de noticias 24 Horas. (5 de noviembre del 2021). Trabajador se electrocutó en subestación de Luz del Sur [Video]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=DKXjzDALqA0>
- Mario F. M. Campos, Guilherme A. S. Pereira, Samuel R. C. Vale, Alexandre Q. Bracarense, ... Mauricio P. Oliveira G. A. Mayo de 2002). *IEEE Xplore*. Recuperado el 07 de 04 de 2023, de IEEE Xplore: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/document/1014261>
- Debenest, P., Guarnieri, M., Takita, K., Fukushima, E., Hirose, S., Tamura, K., . . . Shiga, F. (Setiembre de 2008). *IEEE Xplore*. Recuperado el 08 de 04 de 2023, de IEEE Xplore: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/document/4650964>
- Dhawan, Sanjeev. (2007). Analogy of Promising Wireless Technologies on Different Frequencies: Bluetooth, WiFi and WiMAX. Recuperado el 22 de 05 de 2024.
- Ting, L., Wang, K., Chen, D., Xie, Z., & Zhong, L. (2021). *IEEE Xplore*. Recuperado el 08 de 04 de 2023, de IEEE Xplore: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9616515&tag=1>
- Huang, R., Zhang, X., Huang, W., & Wang, Z. (octubre de 2016). *IEEE Xplore*. Recuperado el 08 de 04 de 2023, de IEEE Xplore: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/document/7745612>
- SafeRack*. (s.f.). Recuperado el 08 de 04 de 2023, de SafeRack: <https://www.saferack.com/glossary/hopper-car/>
- Tang, M., Gu, Y., Wang, S., & Liang, Q. (2019). *ScienceDirect*. Recuperado el 08 de 04 de 2023, de ScienceDirect: <https://www-sciencedirect->

com.ezproxybib.pucp.edu.pe/science/article/pii/S0921889018308340?ref=cra\_js\_challenge&fr=RR-1

Schneider Electric (s.f.). Circuit breakers - instructions for use. Recuperado el 08 de 04 de 2023, de <https://www.se.com/pe/es/download/document/889146EN01/>

ABB. (s.f.). VD4 - Instrucciones para la instalación y el uso 12 ... 36 kV - 630 ... 3150 A - 16 ... 50 kA. Recuperado el 08 de 04 de 2023, de [https://library.e.abb.com/public/f84356fe3c5f6fd7c1257b1300574789/MA\\_VD4-36kV-50KA\(ES\)V\\_647654041-1201.pdf](https://library.e.abb.com/public/f84356fe3c5f6fd7c1257b1300574789/MA_VD4-36kV-50KA(ES)V_647654041-1201.pdf)

Wireless Technology: Bluetooth, WiFi, WiMAX. (s.f.). Recuperado de <https://www.awirelesslife.com/wireless.html>

Cens Digital. (s.f.). Recuperado el 13 de 04 de 2023, de Cens Digital: <https://www.censdigital.com.co/ametros/#:~:text=la%20distancia%20m%C3%ADmima%20permitida%20es,facilidad%20de%20accesibilidad%20de%20personas.>

Alu-Stock, S. A. (s/f). Aluminio, Información técnica, historia y propiedades · Alu-Stock S.A. Alustock. Recuperado el 20 de noviembre de 2023, de <https://www.alu-stock.es/es/informacion-tecnica/el-aluminio/>

jnablog. (2021, febrero 26). Principales Propiedades del Acero Inoxidable. In Aceros. <https://jnaceros.com.pe/blog/principales-propiedades-acero-inoxidable/>

Hall, I. (2022, abril 25). Tipos de acero al carbono. Leecosteel.com. <https://www.leecosteel.com/es/news/post/carbon-steel-categories>

ABS. (s/f). Resinex.es. Recuperado el 20 de noviembre de 2023, de <https://www.resinex.es/tipos-de-polimeros/abs.html>

Filamento PETG: características y propiedades. (2023, julio 23). Dynapro 3D | Empresa dedicada al diseño digital e impresión 3D. <https://dynapro3d.com/filamento-petg-caracteristicas-y-propiedades/>

(S/f-b). Maderas20.com. Recuperado el 20 de noviembre de 2023

University of Southern California, U. o. (s.f.). *Iluminum Magazine*. Recuperado el 22 de 05 de 2024, de Iluminum Magazine: <https://illumin.usc.edu/wimax-the-next-generation-of-wireless-technology/>

Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2016). Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications—A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 367–392. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>

- Riel Lineal / Perfil de Aluminio (V-slot) 20×80 Negro Anodizado - Cimech 3d. (2024, June 28). Cimech 3d. <https://www.cimech3d.cl/producto/perfil-aluminio-v-slot-20x80-negro/>
- FILAMENTO PLA BLANCO – SAI SAC – 3D. (n.d.). <https://3d.saisac.pe/producto/filamento-pla-blanco/>
- Administracion. (2024, February 12). Principales Diferencias Clave entre Filamentos PLA, ABS, PETG y TPU. Cimech 3d. <https://www.cimech3d.cl/principales-diferencias-clave-entre-filamentos-pla-abs-petg-y-tpu/#:~:text=Si%20eres%20nuevo%20en%20la,para%20aplicaciones%20que%20de mandan%20flexibilidad.>
- Yujiannet. (n.d.). ¿Sabes lo que es la media de FOV, HFOV, VFOV DFOV para cámaras de seguridad? ¿Sabes Lo Que Es La Media De FOV, HFOV, VFOV DFOV Para Cámaras De Seguridad? Cámara De Seguridad De China, Cámara De Ahd 1080p. <https://www.mvteamcctv.com/es/news/Do-you-know-what-s-the-mean-of-FOV-HFOV-VFOV-DFOV-for-security-cameras.html>
- Kg, N. N. (n.d.). Pasadores cilíndricos ISO 2338 | norelem ES. [https://norelem.es/es/Vista-general-de-productos/Sistema-flexible-de-piezas-est%C3%A1ndar/03000/Pasadores-cil%C3%ADndricos-muelles-de-ajuste-extractor/Pasadores-cil%C3%ADndricos-ISO-2338/p/agid.28288?q=%3A%3AMM1199%3Aacero%3AMM5%3A0000000000000000000003%2523%2523%3AMM6%3A00000000000000000012%2523%252312](https://norelem.es/es/Vista-general-de-productos/Sistema-flexible-de-piezas-est%C3%A1ndar/03000/Pasadores-cil%C3%ADndricos-muelles-de-ajuste-extractor/Pasadores-cil%C3%ADndricos-ISO-2338/p/agid.28288?q=%3A%3AMM1199%3Aacero%3AMM5%3A00000000000000000003%2523%2523%3AMM6%3A00000000000000000012%2523%252312)
- Control, B. m. (2016). RoboClaw 2x15A Dual Channel Motor Controller Datasheet. Recuperado el 20 de 07 de 2024, de Basicmicro motion control: [https://downloads.basicmicro.com/docs/roboclaw\\_datasheet\\_2x15A.pdf](https://downloads.basicmicro.com/docs/roboclaw_datasheet_2x15A.pdf)
- YoungWonks. (2020, December 17). Raspberry Pi 4 Pinout. YoungWonks. <https://www.youngwonks.com/blog/Raspberry-Pi-4-Pinout>
- Relation between main battery voltage and motor voltage on RoboClaw 2x15A - BasicMicro. (2022, April 20). <https://forums.basicmicro.com/viewtopic.php?t=1184>
- ASTM International. (n.d.). *ASTM B221 - Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Extruded Bars, Rods, Wire, Profiles, and Tubes*. Retrieved from <https://www.astm.org>
- Corporación Limatambo. (2023). *Catálogo Limatambo Digital*. Retrieved from <https://www.corporacionlimatambo.com/wp-content/uploads/2023/08/CATALOGO-LIMATAMBO-DIGITAL-1.pdf>

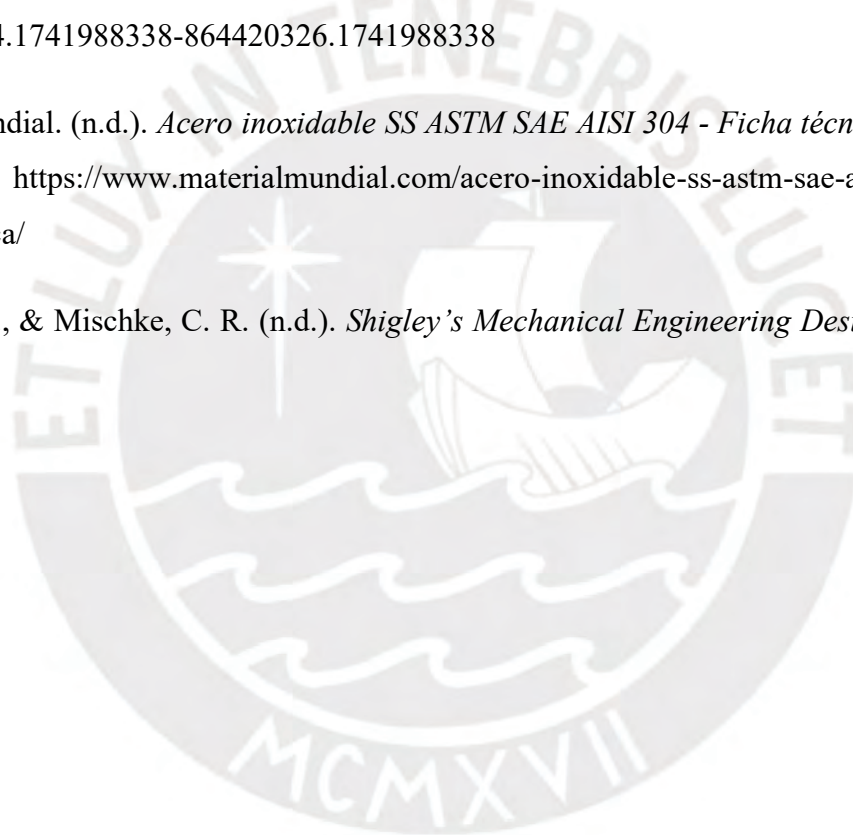
E-Zigurat. (n.d.). *Algunos comentarios sobre el pandeo*. Retrieved from <https://www.e-zigurat.com/es/blog/algunos-comentarios-sobre-el-pandeo/>

Maedler North America. (n.d.). *Ball pillow block bearing KP-000 bore 10mm, material zinc die-cast (PN 62561000)*. Retrieved from [https://maedlernorthamerica.com/partshop/ball-pillow-block-bearing-kp-000-bore-10mm-material-zinc-die-cast-pn-62561000/?srsltid=AfmBOopzYePIRXuZOxKC-\\_eWPerPvupVeatVw0tVStcV4cT08jp\\_M04V](https://maedlernorthamerica.com/partshop/ball-pillow-block-bearing-kp-000-bore-10mm-material-zinc-die-cast-pn-62561000/?srsltid=AfmBOopzYePIRXuZOxKC-_eWPerPvupVeatVw0tVStcV4cT08jp_M04V)

Maedler. (n.d.). *Ball bearings catalog (K43\_472\_EN)*. Retrieved from [https://smarthost.maedler.de/datenblaetter/K43\\_472\\_EN.pdf?\\_ga=2.213292311.245452924.1741988338-864420326.1741988338](https://smarthost.maedler.de/datenblaetter/K43_472_EN.pdf?_ga=2.213292311.245452924.1741988338-864420326.1741988338)

Material Mundial. (n.d.). *Acero inoxidable SS ASTM SAE AISI 304 - Ficha técnica*. Retrieved from <https://www.materialmundial.com/acero-inoxidable-ss-astm-sae-aisi-304-ficha-tecnica/>

Shigley, J. E., & Mischke, C. R. (n.d.). *Shigley's Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill.



## ANEXOS

## ANEXO A: Lista de requerimientos

LISTA DE REQUERIMIENTOS			Página 1 de 8
<b>PROYECTO</b>		<b>Robot que opere en interruptores de media tensión de 10 kV o 22.9 kV</b>	<b>Fecha:</b> 17 de abril de 2023
			<b>Revisado:</b> Julio César Tafur Sotelo
			<b>Elaborado:</b> France Steve Villarreal Sánchez
<b>Fechas (cambios)</b>	<b>Deseo o Exigencia</b>	<b>Descripción</b>	<b>Responsable</b>
<b>Función Principal</b>			
15/04/2023	E	Realizar la operación de cambio de estado del circuito gobernado por el interruptor de potencia (cerrado/abierto) a través del accionamiento de botones presentes en el interruptor. Esta operación se llevará a cabo mediante un control remoto.	France Steve Villarreal Sánchez
<b>Geometría</b>			
15/04/2023	E	Dimensiones apropiadas según el espacio disponible en la sala de interruptores de potencia de media tensión en la subestación eléctrica. Valor referencial del espacio disponible: 3 m de ancho y 4 m de alto.	France Steve Villarreal Sánchez
<b>Cinemática</b>			
15/04/2023	E	Velocidad de la superficie móvil del dispositivo de manipulación: 1 m/s.	France Steve Villarreal Sánchez
LISTA DE REQUERIMIENTOS			Página 2 de 8

Fechas (cambios)	Deseo o Exigencia	Descripción	Responsable
<b>Fuerzas</b>			
15/04/2023	E	Fuerza estimada para presionar el botón de cierre/apertura del circuito del interruptor de potencia de MT: 10 N	France Steve Villarreal Sánchez
<b>Energía</b>			



15/04/2023	E	<p>Se busca que el equipo de manipulación sea controlado a través de un control remoto, con lo cual es necesario el empleo de baterías. Además, la estación de carga debe ser capaz de garantizar el estado de carga completa en un tiempo adecuado, siendo esta última alimentada por la tensión de red disponible en la subestación (220 VAC trifásico 60 Hz).</p>	France Steve Villarreal Sánchez
<b>LISTA DE REQUERIMIENTOS</b>			Página 3 de 8
<b>Fechas (cambios)</b>	<b>Deseo o Exigencia</b>	<b>Descripción</b>	<b>Responsable</b>
<b>Señales</b>			

15/04/2023	E	<p>Señales de entrada:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Encendido/apagado del sistema.</li> <li>- Parada de emergencia.</li> <li>- Señales para iniciar las operaciones del robot .</li> </ul>	France Steve Villarreal Sánchez
15/04/2023	E	<p>Señales de salida:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Estado del circuito manipulado gobernado por el interruptor (cerrado/abierto).</li> <li>- Visualización de procedimiento.</li> <li>- Estado de conexión inalámbrica.</li> <li>- Nivel de energía disponible.</li> </ul>	
<b>Control</b>			
15/04/2023	E	Control de posición del robot	France Steve Villarreal Sánchez

<b>LISTA DE REQUERIMIENTOS</b>			Página 4 de 8
<b>Fechas (cambios)</b>	<b>Deseo o Exigencia</b>	<b>Descripción</b>	<b>Responsable</b>
<b>Electrónica (hardware)</b>			
15/04/2023	E	<p>Sensores y actuadores para la manipulación del interruptor:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensor para detectar la posición relativa del interruptor respecto al robot.</li> </ul>	France Steve Villarreal Sánchez

		<ul style="list-style-type: none"> <li>● Actuador para presionar el botón de cierre/apertura del circuito que gobierna el interruptor de potencia.</li> <li>● Sensor de nivel de batería.</li> <li>● Cámara para supervisión de procedimientos.</li> <li>● Interfaz para visualizar estado de operaciones.</li> </ul>	
15/04/2023	E	<p>Sensores y actuadores en la estación de carga de baterías:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Sensor de nivel de batería.</li> <li>● Sensores para detectar la presencia del robot.</li> </ul>	France Steve Villarreal Sánchez

<b>LISTA DE REQUERIMIENTOS</b>			Página 5 de 8
<b>Fechas (cambios)</b>	<b>Deseo o Exigencia</b>	<b>Descripción</b>	<b>Responsable</b>
<b>Software</b>			
15/04/2023	E	Empleo de un software de código abierto para la comunicación entre el robot y el usuario, el cual debe ser un ambiente virtual de fácil entendimiento.	France Steve Villarreal Sánchez
15/04/2023	E	Software para la manipulación robótica, este último brindado por el fabricante en caso de usarse un manipulador existente.	France Steve Villarreal Sánchez
<b>Comunicaciones</b>			

15/04/2023	E	La comunicación entre el control remoto, manipulado por el operario, y la unidad que envía y recibe información del estado actual de las variables a controlar del robot.	France Steve Villarreal Sánchez
15/04/2023	E	Modo manual auxiliar en control remoto, en caso de que el modo remoto no funcione adecuadamente.	France Steve Villarreal Sánchez
<b>Seguridad</b>			
15/04/2023	E	Según el método de William T. Fine (control de riesgos), la magnitud del riesgo es el producto de la consecuencia, la exposición y la probabilidad, en donde cada uno de estos parámetros presentan valores por asignar del 1 al 4 según su grado. Entonces, para garantizar que la probabilidad de que surja un accidente sea mínima, es necesario disminuir la exposición, esto se traduce en alejarse cierta distancia respecto al interruptor de potencia de MT a manipular. Un valor referencial de esta distancia de seguridad es de 5 m. (Fuente: CENS Perú)	France Steve Villarreal Sánchez

<b>LISTA DE REQUERIMIENTOS</b>			Página 6 de 8
<b>Fechas (cambios)</b>	<b>Deseo o Exigencia</b>	<b>Descripción</b>	<b>Responsable</b>
<b>Ergonomía</b>			
15/04/2023	E	El peso del sistema debe ser menor a 25 kg, dado que según el Ministerio de Vivienda, Construcción y	France Steve Villarreal Sánchez

		Saneamiento este es el peso máximo que puede cargar una persona.	
<b>Fabricación</b>			
15/04/2023	E	La superficie externa del robot debe ser de un material que permita aislar eléctricamente la parte electrónica del robot, pues podría verse alterada debido a la presencia de campos electromagnéticos significativos debido al alto nivel de tensión.	France Steve Villarreal Sánchez
<b>Montaje</b>			
15/04/2023	E	Los componentes electrónicos deben estar montados sobre la estructura interna del sistema manipulador, protegidos por una superficie aislante eléctricamente.	France Steve Villarreal Sánchez
15/04/2023	D	Tanto el robot propiamente dicho, como la estación de carga podrían consistir de varias partes de ser necesario para facilitar el ensamblaje/desensamblaje.	France Steve Villarreal Sánchez

<b>LISTA DE REQUERIMIENTOS</b>			Página 7 de 8
<b>Fechas (cambios)</b>	<b>Deseo o Exigencia</b>	<b>Descripción</b>	<b>Responsable</b>
<b>Transporte</b>			



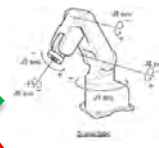





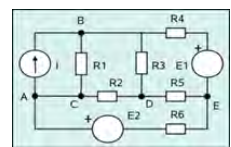
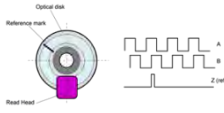


15/04/2023	E	El sistema manipulador robótico debe ser móvil. Además, de requerirse en algún momento de la manipulación, se podría fijar el sistema por un periodo de tiempo.	France Steve Villarreal Sánchez
<b>Uso</b>			
15/04/2023	D	Adaptable a diferentes modelos de interruptores de potencia.	France Steve Villarreal Sánchez
15/04/2023	D	Uso en interiores y exteriores.	France Steve Villarreal Sánchez
15/04/2023	D	Resistente al polvo.	France Steve Villarreal Sánchez
15/04/2023	E	Resistente a campos magnéticos elevados.	France Steve Villarreal Sánchez


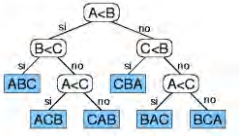












<b>LISTA DE REQUERIMIENTOS</b>			Página 8 de 8
<b>Fechas (cambios)</b>	<b>Deseo o Exigencia</b>	<b>Descripción</b>	<b>Responsable</b>
<b>Mantenimiento</b>			
15/04/2023	D	<p>Se espera que el mantenimiento se realice de manera periódica, el cual debe consistir en lo siguiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Limpieza semanal de la cámara de monitoreo.</li> <li>● Mantenimiento anual de la parte interna del robot, en donde se encuentra la parte electrónica.</li> </ul>	France Steve Villarreal Sánchez




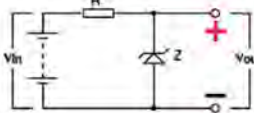

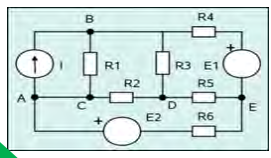






		<ul style="list-style-type: none"> <li>● Revisión mensual del estado de las baterías.</li> <li>● Limpieza semanal de la parte externa del robot.</li> </ul>	
<b>Presupuesto</b>			
15/04/2023	D	Aproximadamente US\$20 000, el cual podría verse modificado según el avance del proyecto.	France Steve Villarreal Sánchez
<b>Plazos (tiempo)</b>			
15/04/2023	D	Se considera que el desarrollo del proyecto se llevará a cabo en un periodo aproximado de 8 meses.	France Steve Villarreal Sánchez

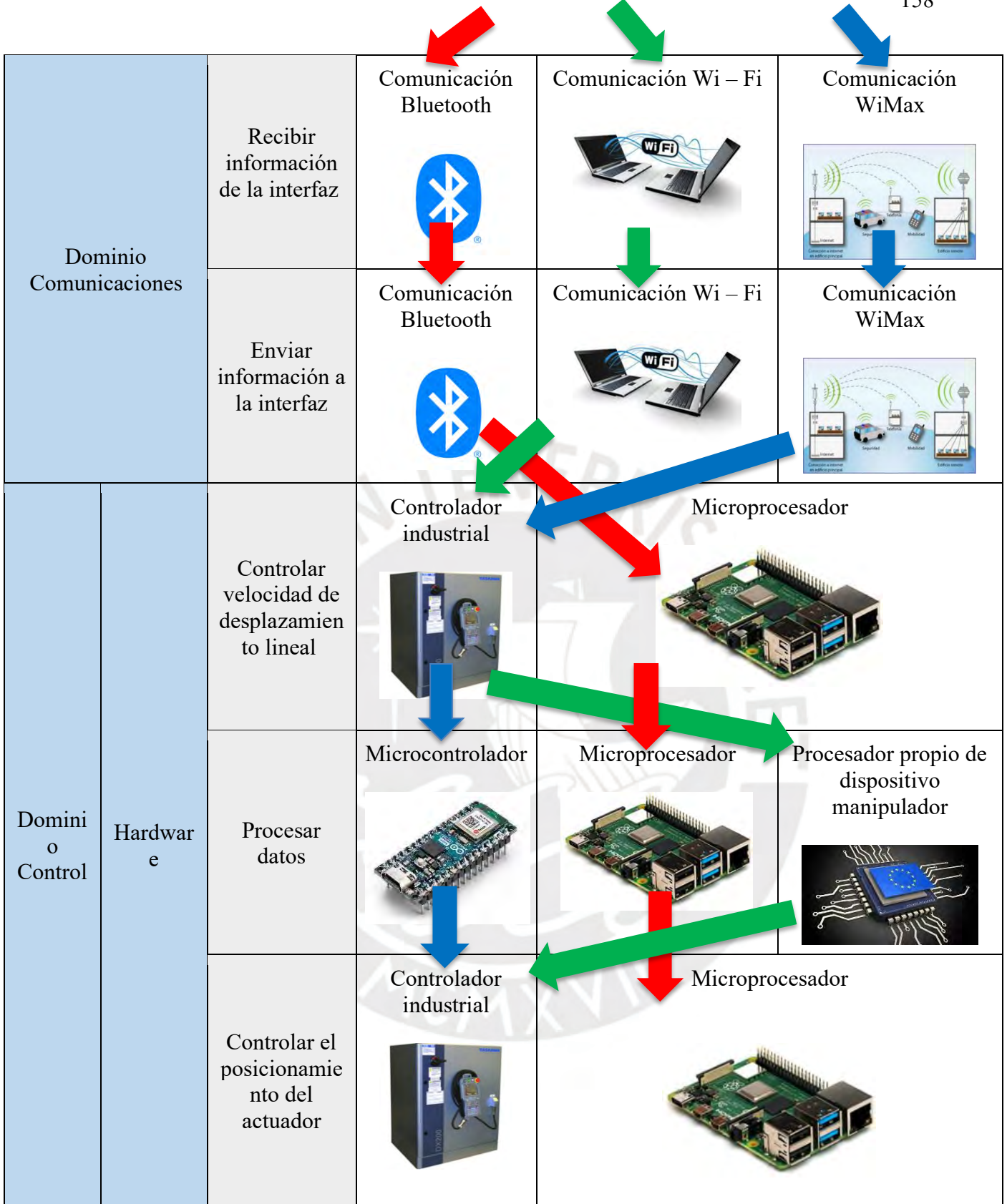
**ANEXO B: Matriz Morfológica**

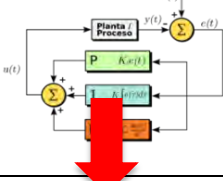
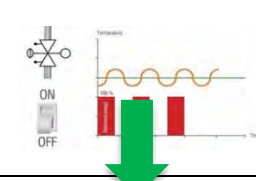
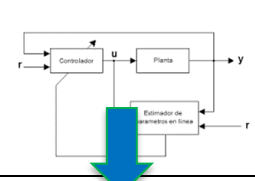


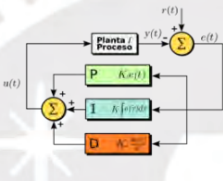
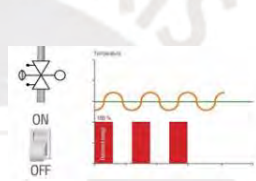
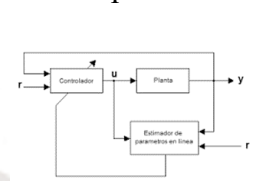
Rojo: Concepto de solución 1, Azul: Concepto de solución 2, Verde: Concepto de solución 3

Subsistema de manipulación		Portadores de funciones (Alternativas de solución)		
Dominio	Función (funciones parciales)	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Dominio Mecánico	Manipular interruptor de potencia	Estructura metálica móvil + piezas impresas + solenoide 	Manipulador robótico de 3 GDL adaptable + actuador lineal eléctrico 	Manipulador robótico de 5 GDL adaptable + extensión 
	Trasladar sistema	Ruedas circulares 	Llantas tipo oruga 	Ruedas omnidireccionales 
Dominio Sensores	Medir nivel de batería	Circuito integrado 	Sensor de nivel de batería 	Circuito electrónico 
	Medir velocidad de desplazamiento lineal	Encoders ópticos 	Sensor IMU 	Encoders magnéticos 







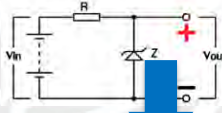



Dominio Sensores	Medir longitud de onda	<p>Sensor de color RGB</p> 		<p>Algoritmo interno + cámara</p> 
	Visualizar procedimiento	<p>Cámara infrarroja</p> 	<p>Cámara USB</p> 	<p>Cámara industrial</p> 
Dominio Actuadores	Accionar manipulación	<p>Motor DC</p> 	<p>Servomotor</p> 	<p>Motor paso a paso</p> 
	Accionar movimiento de traslación del sistema	<p>Motor DC</p> 	<p>Servomotor</p> 	<p>Motor paso a paso</p> 
	Accionar desplazamiento del actuador	<p>Motor DC</p> 	<p>Servomotor</p> 	<p>Motor paso a paso</p> 
















Dominio Energía	Activar/desactivar alimentación	Switch de encendido/apagado 	Pulsador de encendido/apagado 	Palanca de encendido/apagado 
	Acondicionar energía	Regulador con diodos Zener 	Integrados step - up / step -down y reguladores integrados 	Circuito electrónico 
	Almacenar energía	Batería de plomo y ácido 	Baterías de Ni - Cd 	Baterías de Li - ion 
	Energizar sensores	Fuente de alimentación DC 	Microprocesador 	
	Energizar actuadores	Alimentación de la red (220 VAC trifásico, 60 Hz) 		Fuente de alimentación DC 




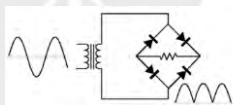
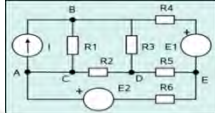





Domini o Control	Software	Controlar velocidad de desplazamien to lineal	Algoritmo de control PID 	Algoritmo de control ON/OFF 	Algoritmo de control adaptativo 
		Procesar datos	Software de código abierto 		Software industrial 
		Controlar el posicionamie nto del actuador	Algoritmo de control PID 	Algoritmo de control ON/OFF 	Algoritmo de control adaptativo 



Subsistema control remoto		Portadores de funciones (Alternativas de solución)		
Dominio	Función (funciones parciales)	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Dominio Energía	Almacenar energía	Baterías Li – ion 	Batería interna 	Baterías Li – Po 
	Activar/desactivar alimentación	Switch de encendido / apagado 	Pulsador de encendido / apagado 	Palanca de encendido/apagado 
	Acondicionar energía	Acondicionamiento interno 		
	Medir nivel de batería	Circuito electrónico de mando de consola 	Circuito electrónico en laptop 	Circuito electrónico en control remoto industrial 

Dominio Interfaz	Recibir instrucciones de accionamiento	Pantalla táctil de tablet industrial 	Pantalla de control remoto industrial 	Teclado de laptop 
	Procesar instrucciones	Procesador interno de tablet industrial 	Procesador interno de control remoto industrial 	Procesador interno de laptop 
	Enviar información	Comunicación Bluetooth + mando de consola 	Comunicación WiMax + control remoto industrial 	Comunicación Wi-Fi + laptop 
	Recibir información	Comunicación Bluetooth + laptop 	Comunicación WiMax + control remoto industrial 	Comunicación Wi-Fi 
	Mostrar información en la interfaz	Pantalla táctil de tablet industrial 	Pantalla de control remoto industrial 	Pantalla de laptop 

Subsistema estación de carga		Portadores de funciones (Alternativas de solución)		
Dominio	Función (funciones parciales)	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Dominio Energía	Activar / desactivar alimentación	<p>Switch de encendido / apagado</p> 	<p>Pulsador de encendido / apagado</p> 	<p>Palanca de encendido / apagado</p> 
	Acondicionar energía	<p>Transformador de voltaje + etapa rectificadora</p> 	<p>Circuito electrónico</p> 	<p>Fuente switching</p> 
	Energizar estación de carga	<p>Alimentación de la red (220 VAC trifásico, 60 Hz)</p> 	<p>Baterías de plomo y ácido</p> 	

## ANEXO C: Conceptos de solución

### Concepto de solución 1: Manipulador en base a estructura metálica e impresión 3D

En la Figura C.1, se puede observar una vista general del concepto de solución 1. Este consiste en un robot manipulador controlado por dos operarios. Uno de ellos se encuentra controlando a este robot a través de un mando de consola; mientras que el otro visualiza el procedimiento a través de una tablet industrial. Asimismo, la comunicación presente entre el subsistema control remoto y el subsistema manipulador es de tipo Bluetooth. A continuación, se analizará a detalle este concepto de solución a nivel de cada subsistema que lo conforma.

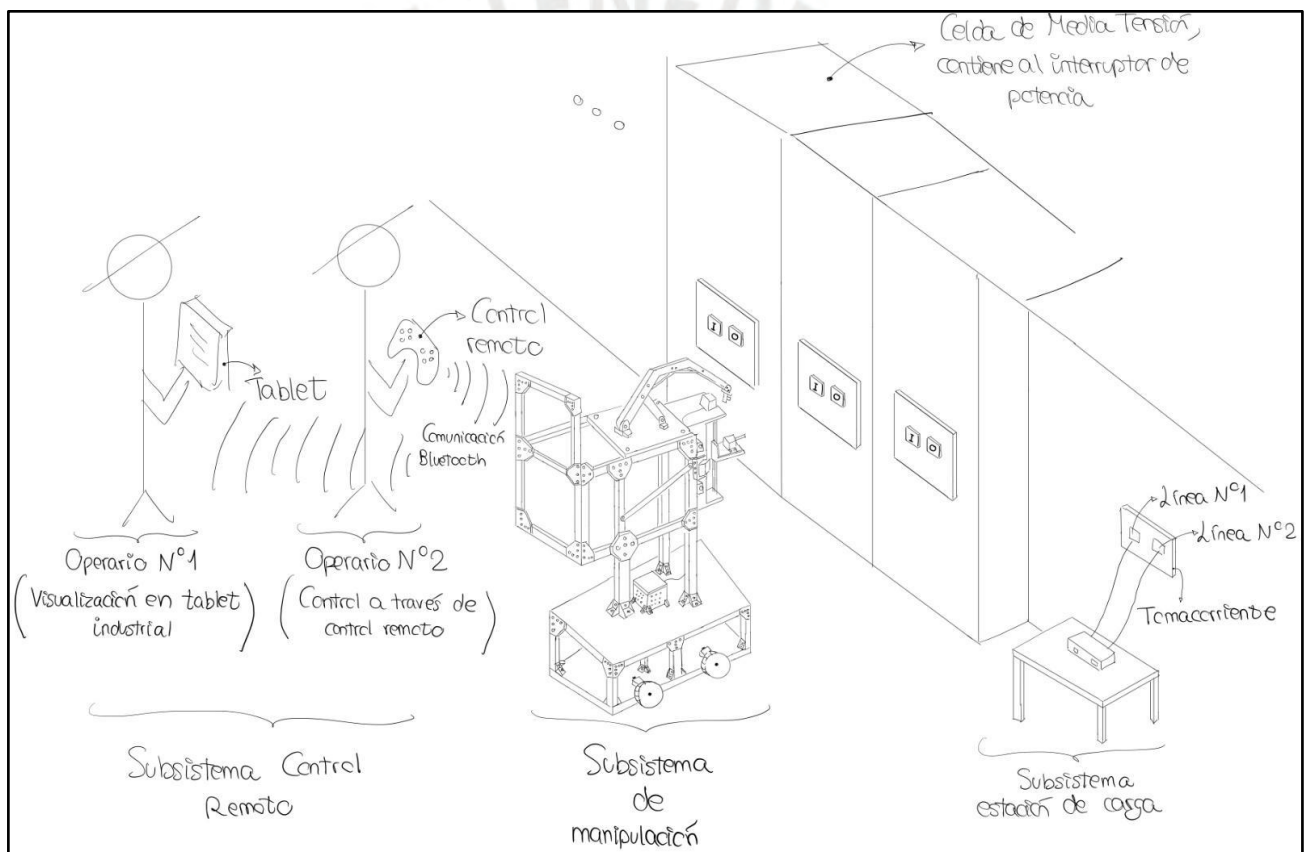


Figura C.1. Vista general - Concepto de solución 1. Elaboración propia.

### Concepto de solución 1: Subsistema de manipulación

En la Figura C.2 se muestra el sistema manipulador, en donde se observa que está compuesto por una estructura metálica, la cual a su vez tiene fijos motores paso a paso, husillos y varillas, esto con la finalidad de lograr que el solenoide presente desplazamientos en los ejes X e Y para realizar la manipulación de los botones (Figura C.3). Adicionalmente, existe una caja de componentes electrónicos la cual está fija en la base del sistema manipulador a través de uniones atornilladas.

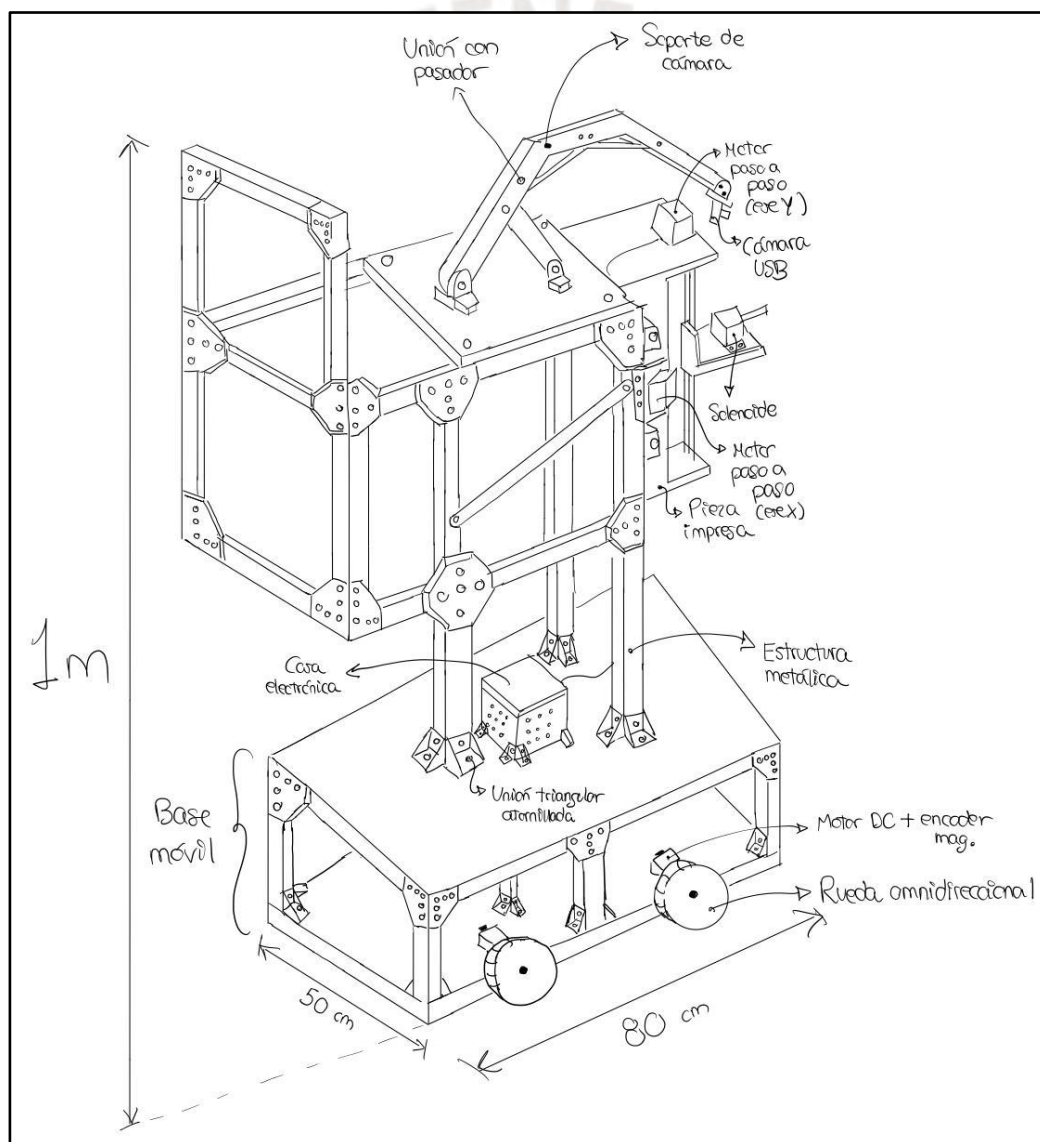


Figura C.2. Subsistema de manipulación del concepto de solución 1. Elaboración propia.

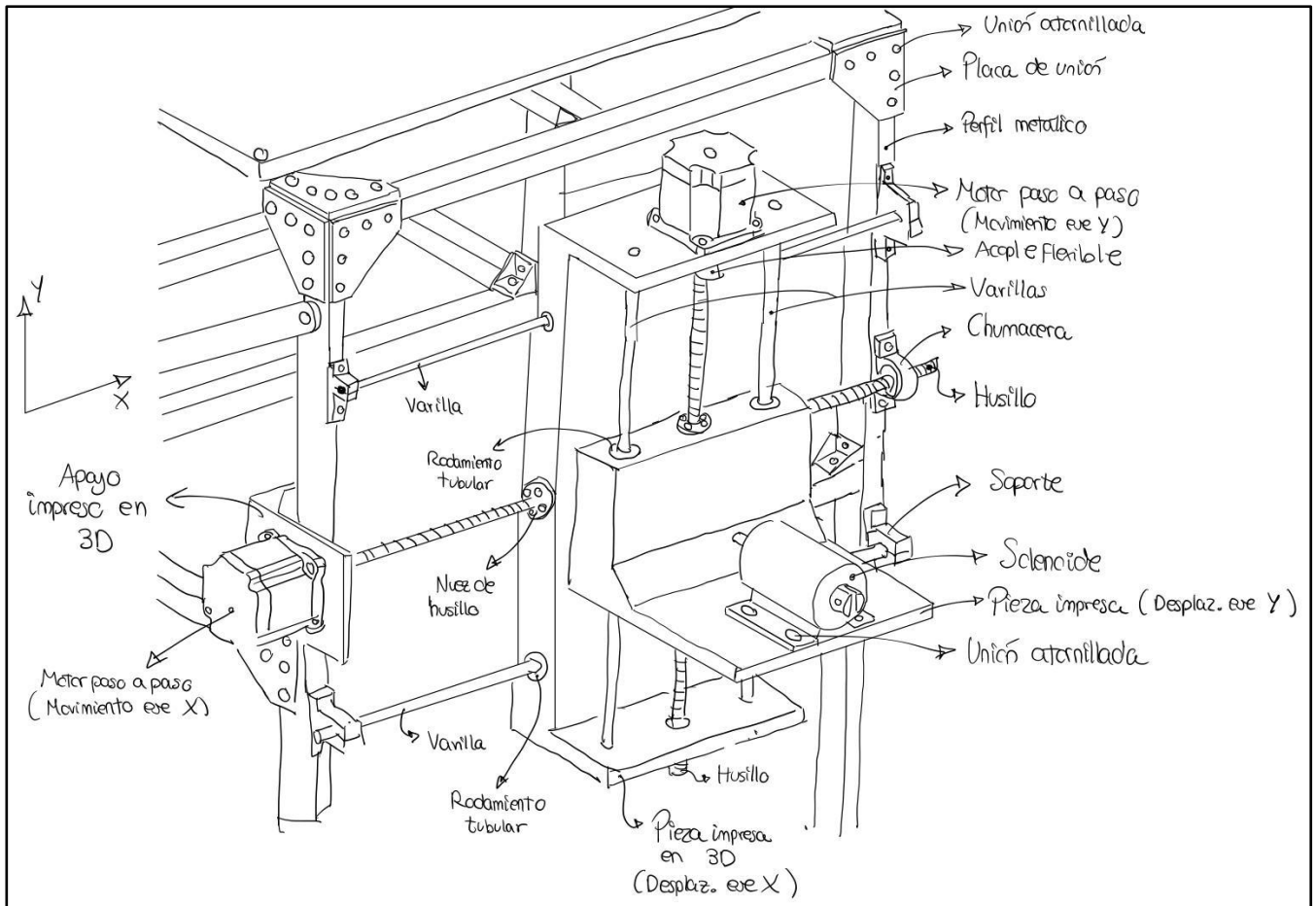


Figura C.3. Vista delantera del subsistema manipulador - Concepto de solución 1. Elaboración propia.

Es de notar que, de las figuras mostradas anteriormente, existe una elevación en la parte trasera de la estructura metálica (actuando como “manija”). Esto es así con la finalidad de realizar un traslado rápido en caso se desee mover al robot de un lugar a otro con una velocidad mayor a la máxima lograda por el robot (1 m/s).

Además, el movimiento del robot se logra mediante 4 ruedas omnidireccionales, cada una de estas siendo accionada por un motor DC acoplado. A su vez, existe un encoder magnético acoplado en el eje de cada uno de estos motores con la finalidad de medir su velocidad angular y con ello realizar un posterior lazo de control.

Como último punto del presente subsistema, en la Figura C.4 se señalan las dimensiones esperadas de la caja electrónica, así como en la Figura C.5 se observa una vista interna de la caja electrónica a través de un corte. En esta última, se encuentra una batería de iones de litio, en donde a través de reguladores y elevadores de voltaje, se obtendrá el nivel de tensión requerido para alimentar tanto a los sensores y actuadores, así como al microprocesador que controla todas las operaciones presentes en este subsistema.

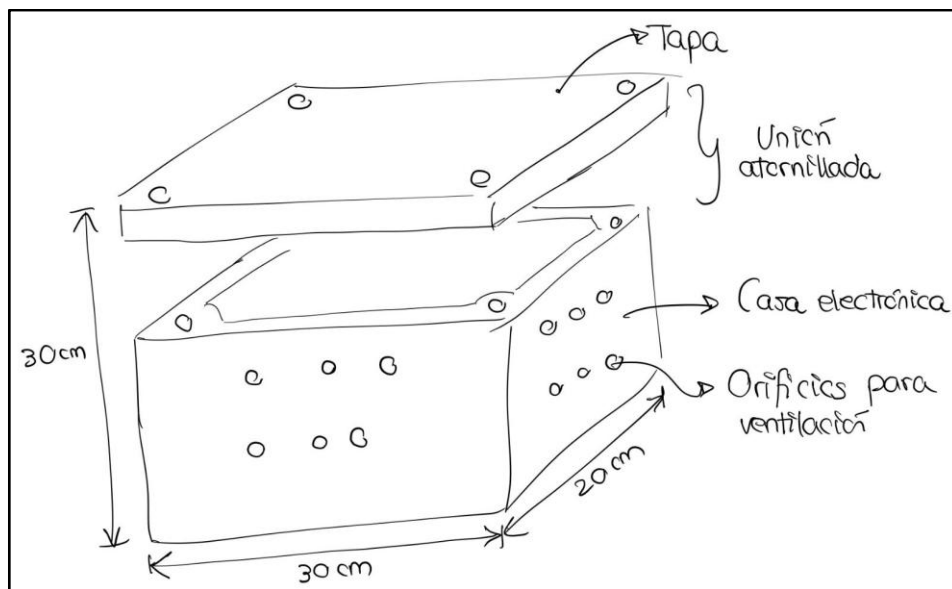


Figura C.4. Vista general de la caja electrónica - Concepto de solución 1. Elaboración propia.

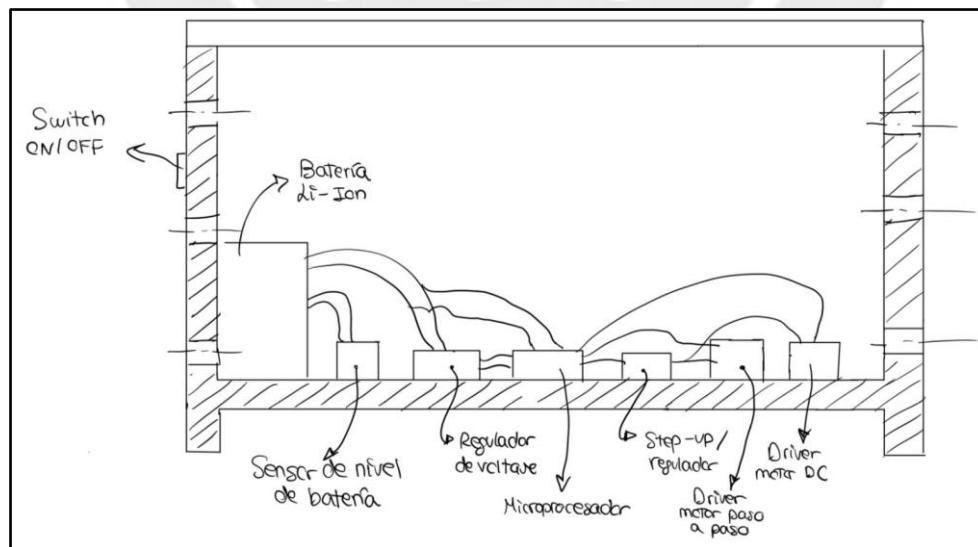


Figura C.5. Vista de corte en la caja electrónica - Concepto de solución 1. Elaboración propia.

### Concepto de solución 1: Subsistema control remoto

La Figura C.6 muestra el subsistema control remoto, el cual está conformado por dos operarios: uno de ellos se encuentra controlando al robot mediante un mando de consola; mientras que el otro, visualiza el procedimiento y el estado de las variables relacionadas a la tarea de manipulación del interruptor de potencia de media tensión.

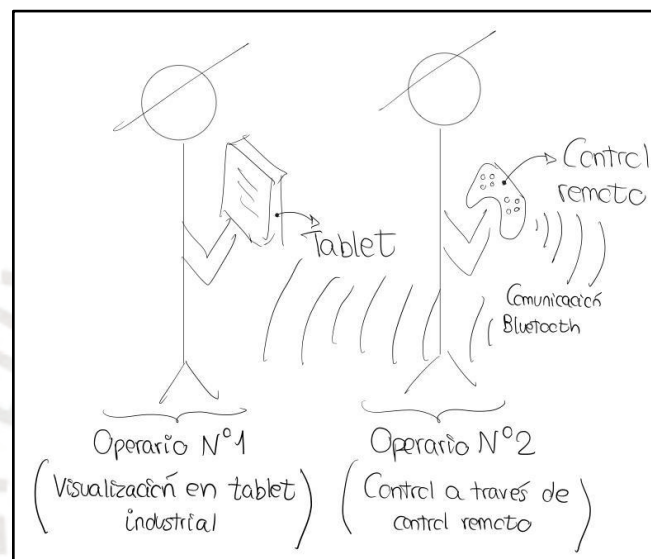


Figura C.6. Subsistema control remoto - Concepto de solución 1. Elaboración propia.

A su vez, en la Figura C.7 se observa la interfaz que se tendría en la laptop. Cabe resaltar que esta interfaz sería similar para los dos conceptos de solución restantes.

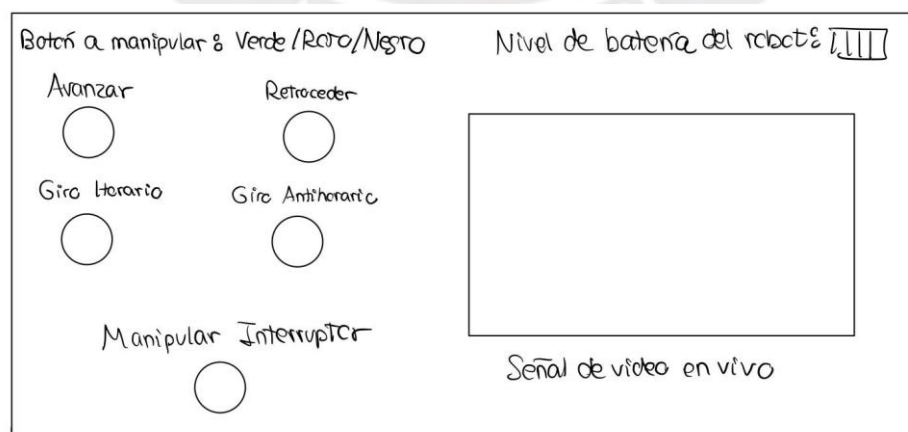


Figura C.7. Vista detallada de interfaz en laptop - Concepto de solución 1. Elaboración propia.

### Concepto de solución 1: Subsistema estación de carga

Las Figuras C.8 y C.9 muestran a rasgos generales la estación de carga del sistema manipulador, en donde la primera de ellas muestra los componentes de manera externa; mientras que la segunda, brinda una vista de la conexión de los componentes electrónicos que conforman este subsistema.

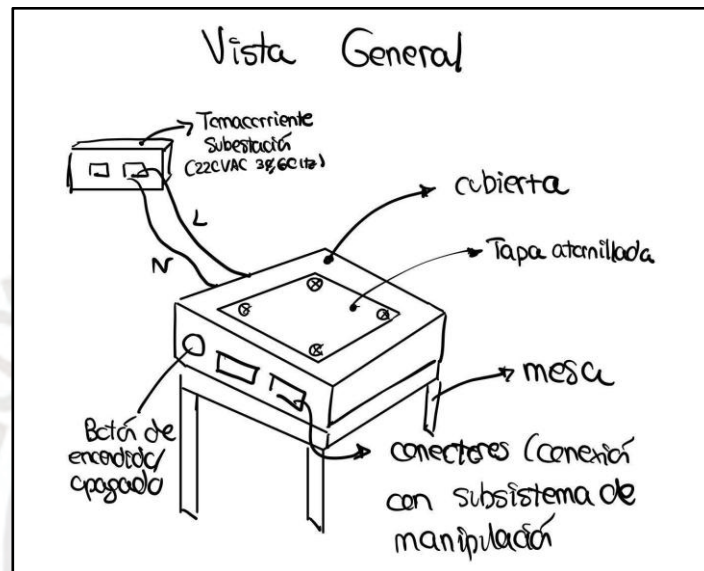


Figura C.8. Vista general subsistema de estación de carga - Concepto de solución 1. Elaboración propia.

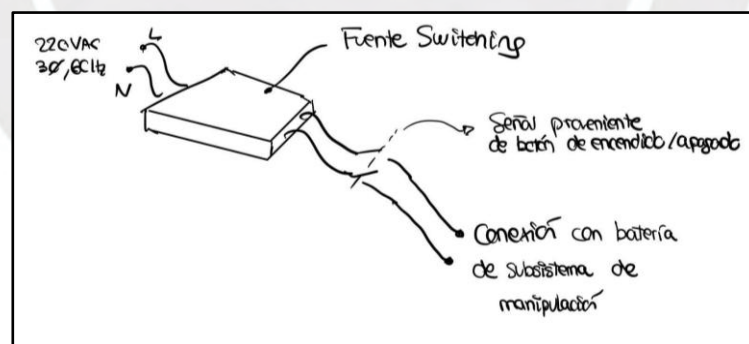


Figura C.9. Vista detallada de conexión de componentes electrónicos del subsistema estación de carga - Concepto de solución 1. Elaboración propia.

### Concepto de solución 2: Manipulador robótico de 3 GDL adaptable + actuador lineal

En la Figura C.10 se puede observar una vista general del concepto de solución 2, resaltando los elementos principales. Es importante mencionar que, en este caso tanto la manipulación del robot y la visualización del procedimiento se realiza mediante una laptop, en donde un primer operario se encuentra controlando el robot a través de esta en un cuarto de control. Asimismo, el segundo operario cumpliría el papel de supervisar que la manipulación se esté realizando de manera correcta.

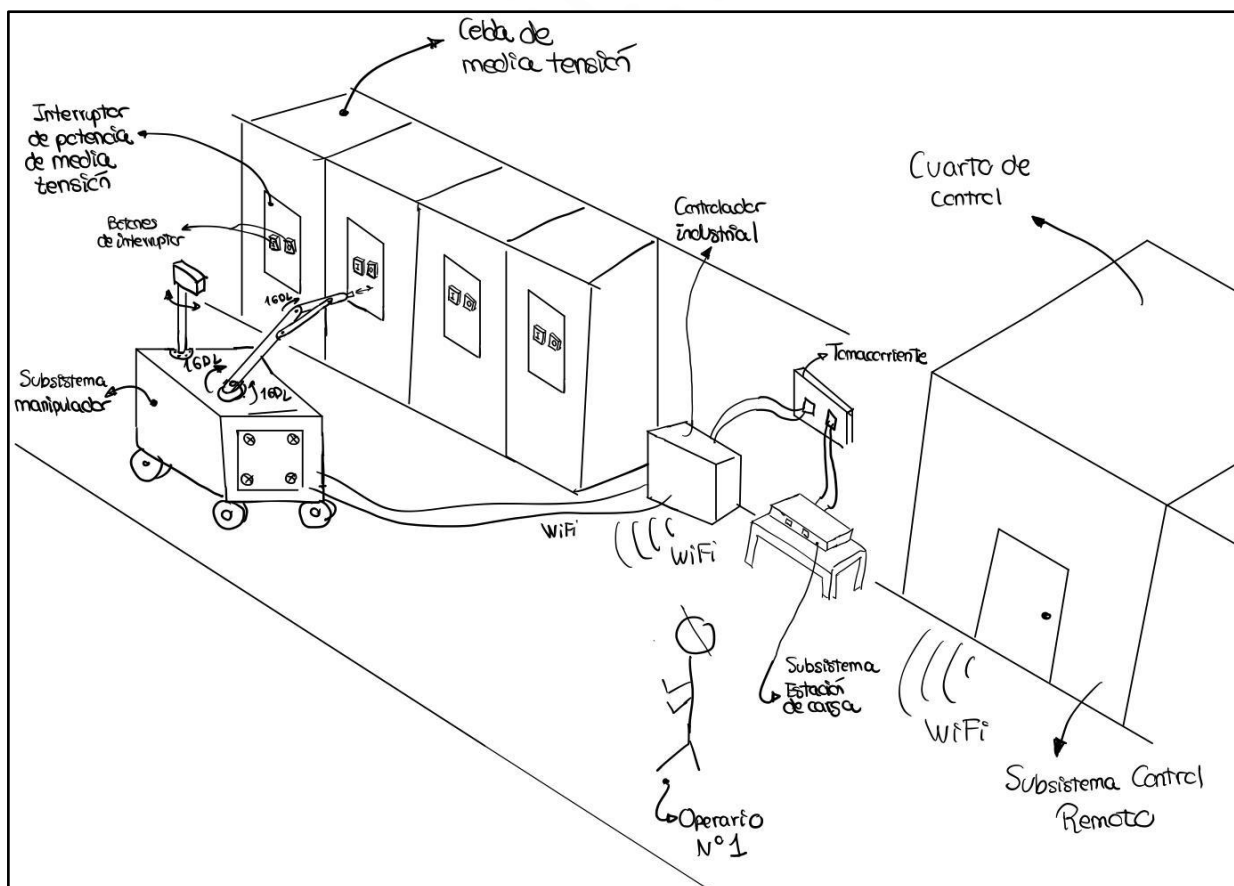


Figura C.10. Vista general concepto de solución 2. Elaboración propia.

### Concepto de solución 2: Subsistema de manipulación

En las Figuras C.11 y C.12 se muestra a detalle el subsistema manipulador, donde se observa la presencia de un manipulador robótico de 3 GDL, el cual está montado sobre la cubierta metálica de la parte electrónica de este subsistema. A su vez, la cámara infrarroja será la que

enviará la señal de video en todo momento de la manipulación; al mismo tiempo que detecta el color indicado por el operario en la laptop a través de un sensor RGB interno a la cámara. Asimismo, destacan algunas dimensiones generales. Por último, la Figura C.12 muestra la presencia de 4 motores paso a paso (cada uno acoplado a una rueda), los cuales permiten el desplazamiento lineal de todo el sistema.

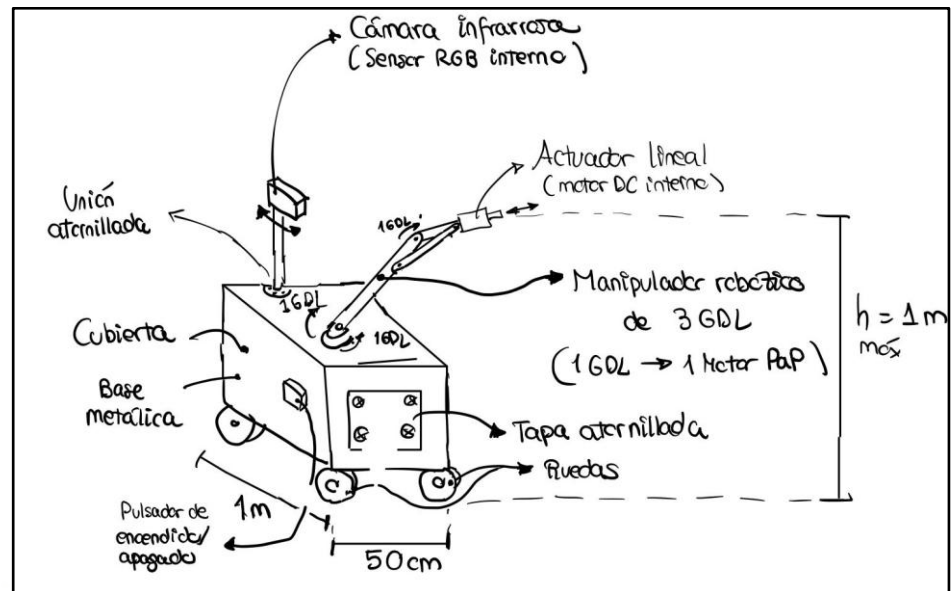


Figura C.11. Vista detallada de elementos del subsistema de manipulación - Concepto de solución 2. Elaboración propia.

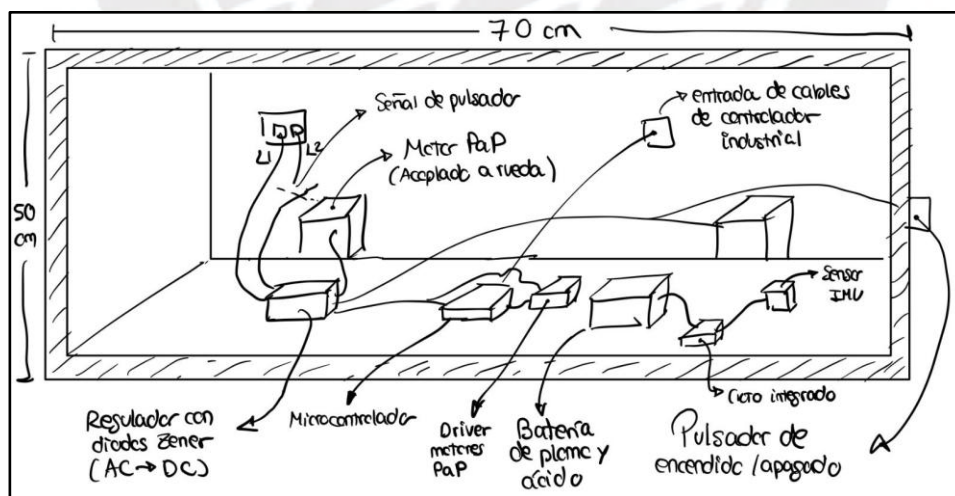


Figura C.12. Vista en corte de la base del manipulador - Concepto de solución 2. Elaboración propia.

### Concepto de solución 2: Subsistema control remoto

La Figura C.13 muestra el subsistema control remoto, el cual corresponde a la vista interior del cuarto de control, donde un operario controla y monitorea el procedimiento en todo momento.

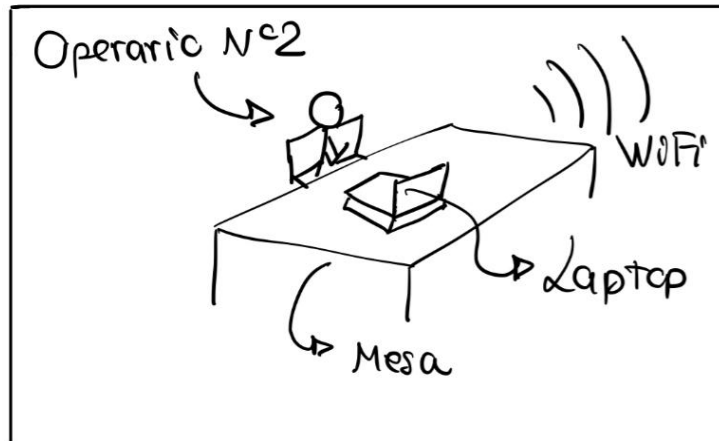


Figura C.13. Vista interna del cuarto de control - Concepto de solución 2. Elaboración propia.

### Concepto de solución 2: Subsistema de estación de carga

La Figura C.14 ilustra el subsistema de estación de carga, donde se puede observar que es similar al mostrado en el concepto anterior, siendo la única diferencia en esa vista la presencia de un switch de encendido y apagado. Asimismo, en la Figura C.15 se encuentra la vista de la parte electrónica de este subsistema, donde destaca un transformador y una etapa rectificadora de tensión.

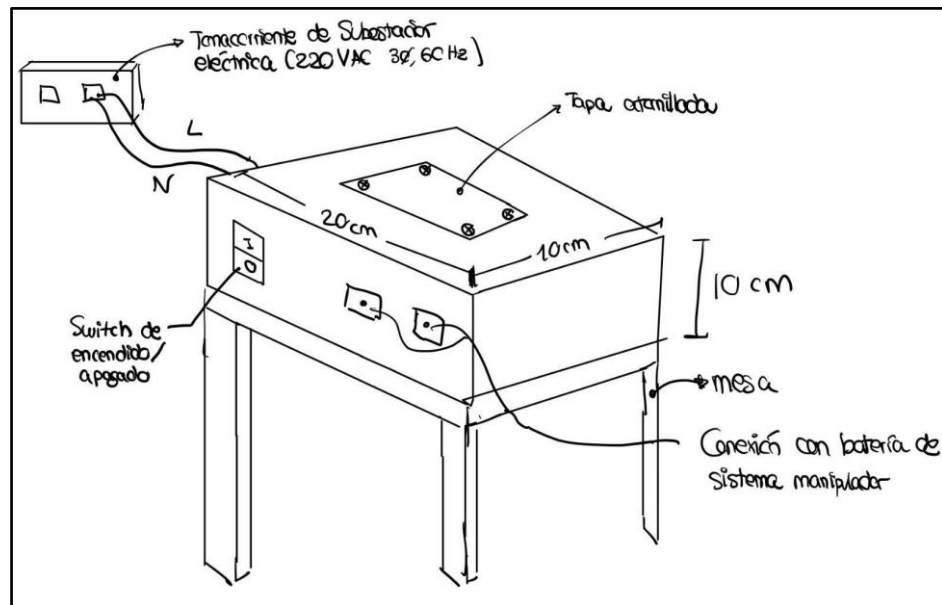


Figura C.14. Vista general del subsistema de estación de carga - Concepto de solución 2. Elaboración propia.

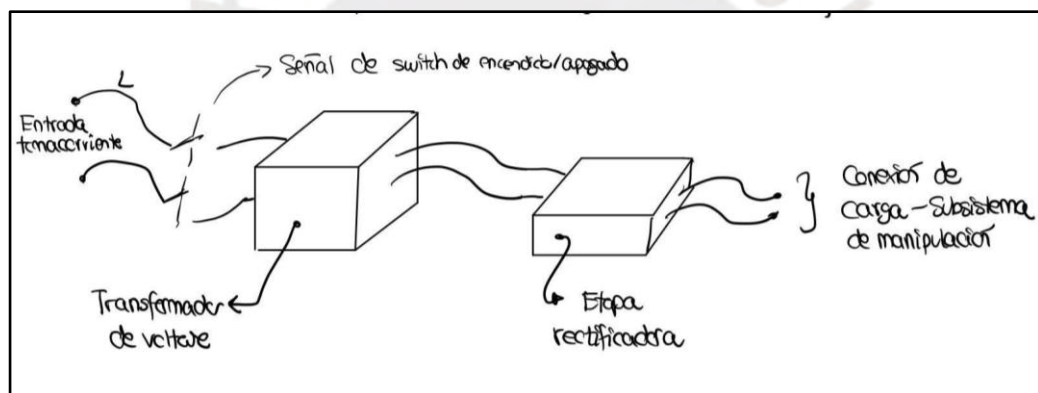


Figura C.15. Vista interna de cubierta de la estación de carga - Concepto de solución 2. Elaboración propia.

### Concepto de solución 3: Manipulador robótico de 5 GDL adaptable + extensión

La Figura C.16 muestra el concepto de solución 3. En este caso, se manipula el interruptor de potencia a través de un manipulador robótico de 5 GDL. Asimismo, este último será controlado mediante un control remoto industrial por un primer operario, mientras que el segundo visualizará el procedimiento en todo momento a través de una tablet industrial. Es importante mencionar que la comunicación entre los diferentes subsistemas se dará a través de una red WiMAX.

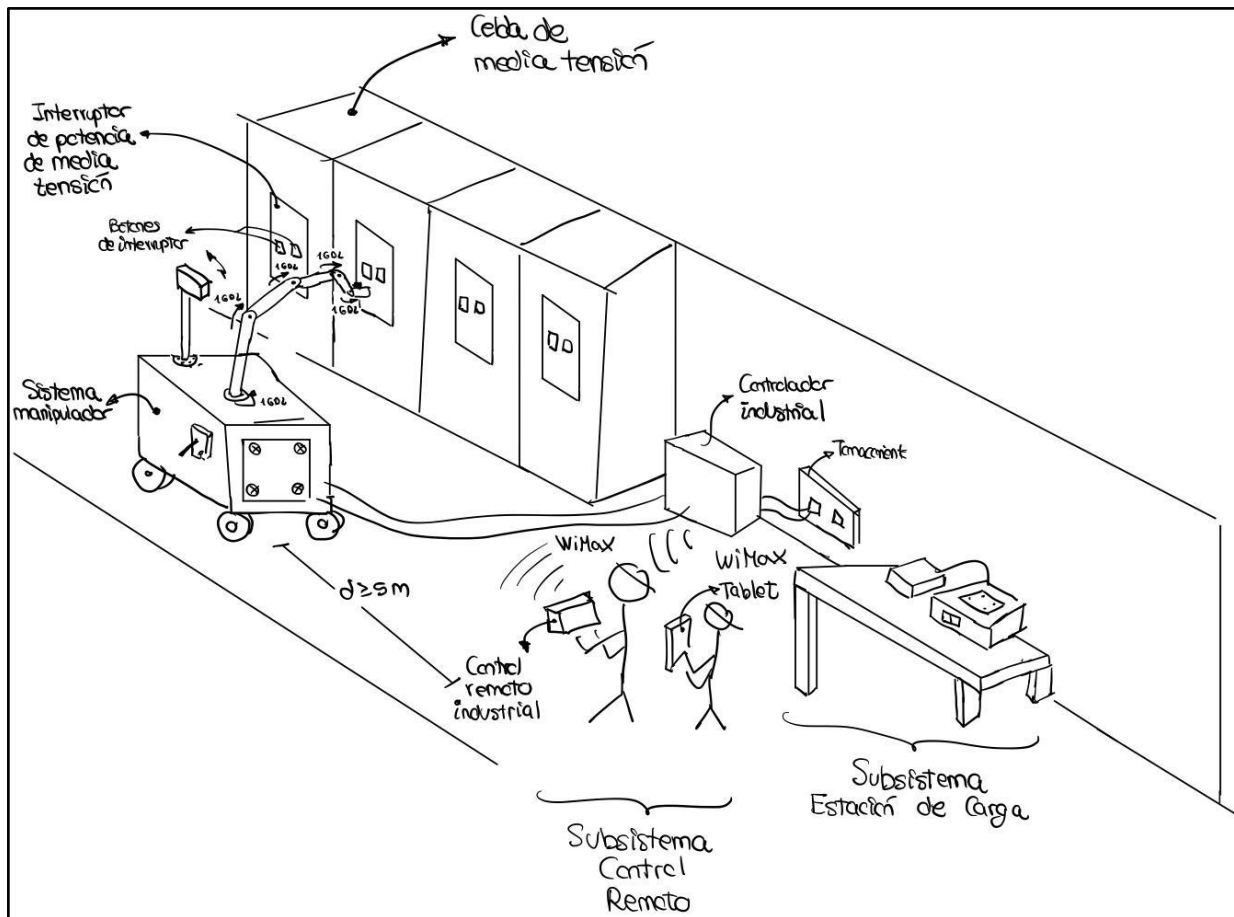


Figura C.16. Vista general - concepto de solución 3. Elaboración propia.

### Concepto de solución 3: Subsistema de manipulación

En las Figuras C.17 y C.18 se puede apreciar las partes principales del subsistema manipulador. En primer lugar, en la Figura C.17 muestra el exterior del subsistema manipulador, en donde se señalan las principales partes. Entre los principales elementos destacan los siguientes: un manipulador robótico 5 GDL, llantas tipo oruga para el desplazamiento lineal, un sensor de color RGB interno en la cámara industrial y una cubierta metálica en donde reposa el manipulador robótico. Cabe mencionar que la extensión en el robot manipulador es un elemento que se encuentra en contacto directo con los botones del interruptor, tomando la orientación deseada según el giro de los servomotores presentes en este manipulador. La Figura C.18 muestra el interior de la cubierta metálica, en donde algo a destacar es que existen servomotores con un encoder óptico acoplado en cada uno de estos.

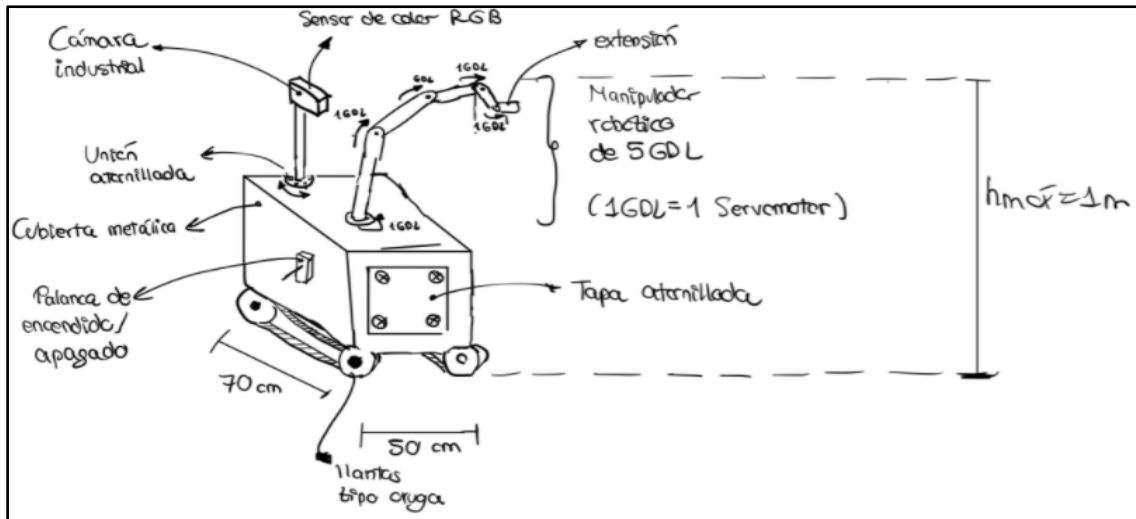


Figura C.17. Vista detallada subsistema de manipulación - Concepto de solución 3. Elaboración propia.

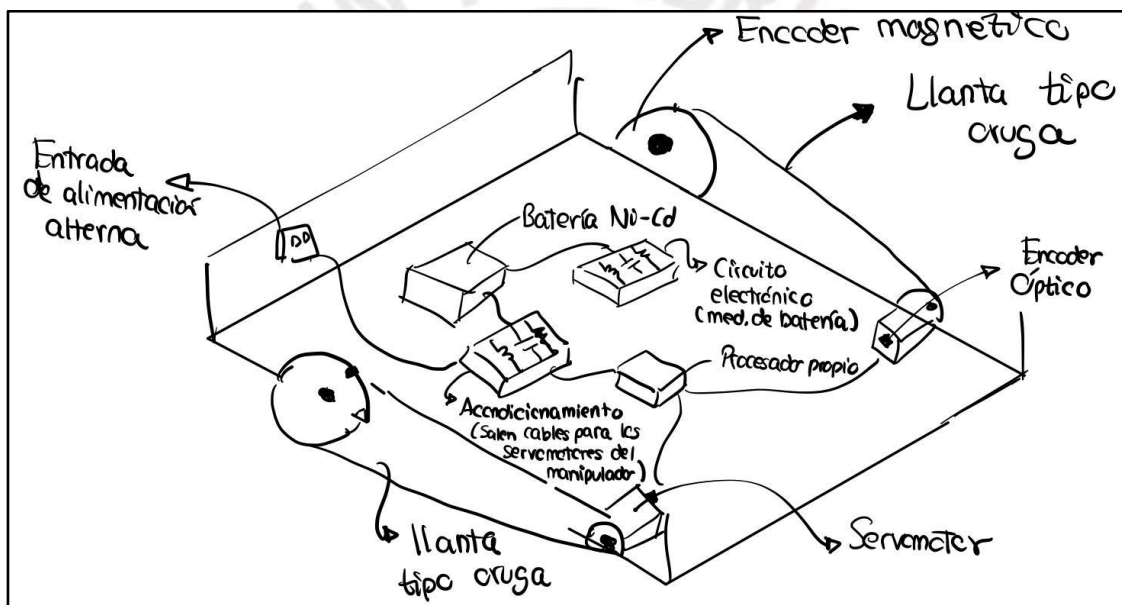


Figura C.18. Vista interior de cubierta metálica - Concepto de solución 3. Elaboración propia.

### Concepto de solución 3: Subsistema control remoto

En la Figura C.19 se observa el subsistema control remoto para el presente concepto de solución. Este se encuentra compuesto por un control remoto industrial para dirigir el manipulador robótico, el cual es empleado por un primer operario; asimismo, un segundo operario supervisa que el procedimiento se lleve a cabo de manera adecuada a través de una tablet industrial.

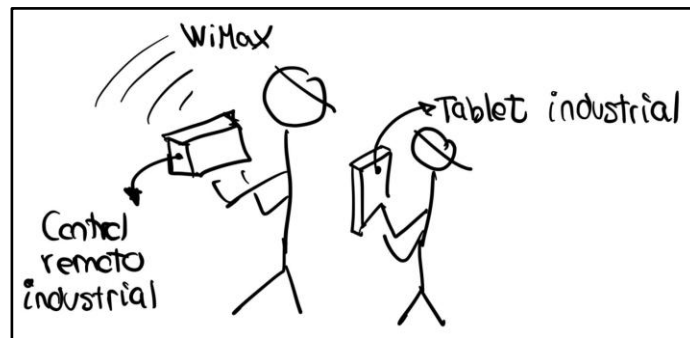


Figura C.19. Vista general del subsistema de control remoto - Concepto de solución 3. Elaboración propia.

### Concepto de solución 3: Subsistema de estación de carga

Finalmente, en las Figuras C.20 y C.21 se observan los principales elementos del subsistema de estación de carga para el concepto de solución 3.

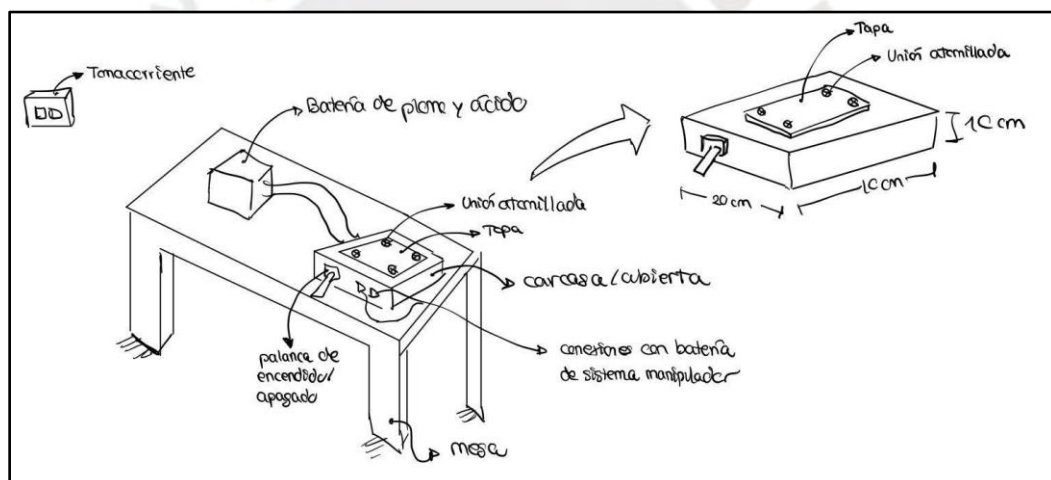


Figura C.20. Vista general del subsistema de estación de carga - Concepto de solución 3. Elaboración propia.



Figura C.21. Vista detallada de la parte electrónica del subsistema estación de carga - Concepto de solución 3. Elaboración propia.

## ANEXO D: Evaluación Técnico - Económica

En esta sección, los tres conceptos de solución serán evaluados mediante criterios técnicos y económicos, según los requerimientos del sistema. Es importante mencionar que este análisis toma como referencia una solución ideal, cuyos puntajes son asignados como el máximo (igual a 4), es en base a esto que se realiza dicha evaluación. A continuación, se detallarán cada uno de los criterios en cuestión.

### Criterios técnicos

#### A. Facilidad de montaje

Este aspecto es importante debido a que el sistema manipulador en cuestión será montado por los operarios/técnicos. Además, a mayor número de piezas y/o elementos, mayor será la complejidad del montaje.

- La **solución 1** tiene un puntaje de 3 debido a que emplea elementos relativamente simples, como lo son un solenoide y un sistema de ubicación por coordenadas x e y hecho de elementos comerciales.
- La **solución 2** tiene un puntaje de 2 debido a que hace uso de un manipulador robótico comercial de 3 GDL, siendo más complejo en términos de ensamblaje que el caso de la solución 1. Además, emplea un controlador industrial compatible con el sistema, esto implica que este controlador necesariamente debe ser usado en un lugar cercano a la alimentación de 220VAC para ser alimentado.
- La **solución 3** tiene un puntaje de 2 debido a que es similar a la solución 2, pues emplea un manipulador robótico y un controlador industrial.

## B. Eficiencia de comunicación inalámbrica

Vale la pena destacar que una buena comunicación inalámbrica favorece a que la información sea enviada de manera satisfactoria entre los diversos elementos que hagan uso de esta. Los datos mostrados en la Tabla D.1 fueron extraídos del artículo: “Analogy of Promising Wireless Technologies on Different Frequencies: Bluetooth, WiFi and WiMAX”.

Tabla D.1. Características de las alternativas de comunicación inalámbrica. (Sanjeev Dhawan, 2007)

Tecnología	Bluetooth	WiFi	WiMAX
Aplicación	Red de área personal	Wireless LAN, Internet	Conexión a internet de banda ancha
Rango	5 - 20 m	100 m	50 km
Velocidad de transmisión de datos	2 - 6 Mbps	54 - 108 Mbps	75 Mbps

De la tabla anterior, se puede concluir lo siguiente:

- La **solución 1** tiene un puntaje de 2, debido a que hace uso del tipo de comunicación Bluetooth, el cual tiene un alcance de aproximadamente 20 m como máximo.
- La **solución 2** tiene un puntaje de 3 debido a que la comunicación WiFi tiene una velocidad y rango aceptable para garantizar una comunicación eficaz, teniendo un mejor alcance que en el caso de la comunicación Bluetooth.
- La **solución 3** tiene un puntaje de 2 debido a que presenta un gran rango de alcance de 50 km y una velocidad de 75 Mbps. Sin embargo, el uso de esta

tecnología puede representar una mayor complejidad en el uso. (University of Southern California, s.f.)

### C. Facilidad de uso

Este criterio es uno de los más importantes a nivel técnico, puesto que de ello depende que tan rápido el usuario pueda manipular el interruptor de manera satisfactoria, cumpliendo con el tiempo esperado de manipulación.

- La **solución 1** tiene un puntaje de 3 pues el uso de un control remoto de consola es bastante práctico para la manipulación del robot.
- Las **soluciones 2 y 3** tienen un puntaje de 2 debido a que emplean manipuladores robóticos, pudiendo esto representar una mayor complejidad en el uso que en la solución 1.

### D. Facilidad de mantenimiento

El mantenimiento del sistema como tal debe ser simple y rápido, esto garantizará que se realice en un corto tiempo para poder continuar con las operaciones de manipulación a la brevedad posible.

- La **solución 1** tiene un puntaje de 3 ya que el mantenimiento de este sistema propuesto se simplifica a realizar una limpieza constante de las partes del robot, verificar el estado de los componentes y conexiones, siendo una tarea que no requiere mayor complejidad.

- Las **soluciones 2 y 3** presentan un puntaje de 2 ya que para realizar un mantenimiento a un manipulador robótico, podría ser necesario que sea llevado al fabricante o alguna persona externa familiarizada con este tipo de tecnologías.

#### Criterios económicos

##### E. Cantidad de componentes

Dado que se busca que el sistema manipulador sea móvil, se debe buscar que exista la menor cantidad de componentes, lo cual implica un menor peso en cada uno de los subsistemas presentes, así como una mayor facilidad de movimiento en el sistema manipulador.

- La **solución 1** tiene un puntaje de 3 debido a que emplea pocos componentes en comparación con las demás alternativas.
- Las **soluciones 2 y 3** tienen un puntaje de 2 debido a que un manipulador robótico representa una gran cantidad de elementos.

##### F. Costo de materiales

Acerca del costo de materiales, esto hace referencia al costo de los componentes que conforman cada concepto de solución.

- La **solución 1** presenta un puntaje de 3 debido a que emplea elementos entre un costo bajo y medio (estructura metálica, impresión 3D).
- Las **soluciones 2 y 3** presentan un puntaje de 2 y 1 respectivamente debido a que emplean manipuladores robóticos. Siendo la diferencia entre estos que la

solución 3 emplea un manipulador robótico de mayor cantidad de grados de libertad que la solución 2, lo cual se traduce en un mayor costo.

#### G. Consumo de energía

Este criterio es importante debido a que un mayor consumo de energía se traduce en un mayor costo que demandará un sistema en particular.

- La **solución 1** presenta un puntaje de 3, debido a que emplea elementos de consumo de potencia bajo a medio, como lo son los motores paso a paso, motores DC, o un solenoide.
- Las **soluciones 2 y 3** presentan un puntaje de 2 y 1 respectivamente debido que, al emplear manipuladores robóticos con su controlador, demandarán una gran cantidad de potencia, siendo esta tentativamente mayor en el caso del manipulador robótico de 5 GDL.

#### H. Costo de mantenimiento

Análogamente a lo desarrollado en el criterio llamado “facilidad de mantenimiento”, se tendría el siguiente análisis:

- La **solución 1** presenta un puntaje de 3 debido a que presenta elementos de baja complejidad, lo cual implica un menor costo de mantenimiento.
- Las **soluciones 2 y 3** presentan puntajes de 2 debido a que hacen uso de manipuladores robóticos, los cuales demandan un alto costo de mantenimiento.

### I. Facilidad de adquisición de materiales

- La **solución 1** presenta un puntaje de 3 debido a que no hace uso de componentes industriales como manipuladores robóticos y controladores industriales, pues estos los componentes presentes en esta solución se pueden encontrar en un mercado común.
- Las **soluciones 2 y 3** presentan un puntaje de 2 y 1 respectivamente debido a que se debe adquirir un manipulador robótico de tal forma que cumpla los requerimientos del sistema en cuanto a dimensionamiento principalmente. En el caso de la solución 3 este puntaje es menor debido a que encontrar un manipulador robótico de 5 GDL podría significar un desafío mucho mayor que en el caso de uno de 3 GDL.

Las Tablas D.2 y D.3 muestran la evaluación realizada. En las columnas se indica el puntaje (p) asignado (1 - 4), así como la multiplicación del puntaje con el peso del criterio (gp).

Tabla D.2 Análisis técnico. Elaboración propia.

Evaluación técnica									
Criterio técnico	g	Sol 1		Sol 2		Sol 3		Sol Ideal	
		P	gp	p	gp	p	gp	p	gp
Facilidad de montaje	3	3	9	2	6	2	6	4	12
Eficiencia de comunicación inalámbrica	3	2	6	3	9	3	9	4	12
Facilidad de uso	3	3	9	2	6	2	6	4	12
Facilidad de mantenimiento	2	3	6	2	4	2	4	4	8
Sumatoria			30		25		25		44
xi			0.68		0.57		0.57		1

Tabla D.3. Análisis económico. Elaboración propia.

Evaluación económica									
Criterio económico	g	Sol 1		Sol 2		Sol 3		Sol Ideal	
		P	gp	p	gp	p	gp	p	gp
Cantidad de componentes	3	3	9	2	6	2	6	4	12
Costo de materiales	3	3	9	2	6	1	3	4	12
Consumo de energía	3	3	9	2	6	1	3	4	12
Costo de mantenimiento	2	3	6	2	4	2	4	4	8
Fácil adquisición de materiales	2	3	6	2	4	1	2	4	8
Sumatoria			39		26		18		52
xi			0.75		0.5		0.35		1

La Figura D.1 muestra la comparación de los conceptos de solución propuestos en base a los resultados obtenidos al analizar los criterios técnicos y económicos.

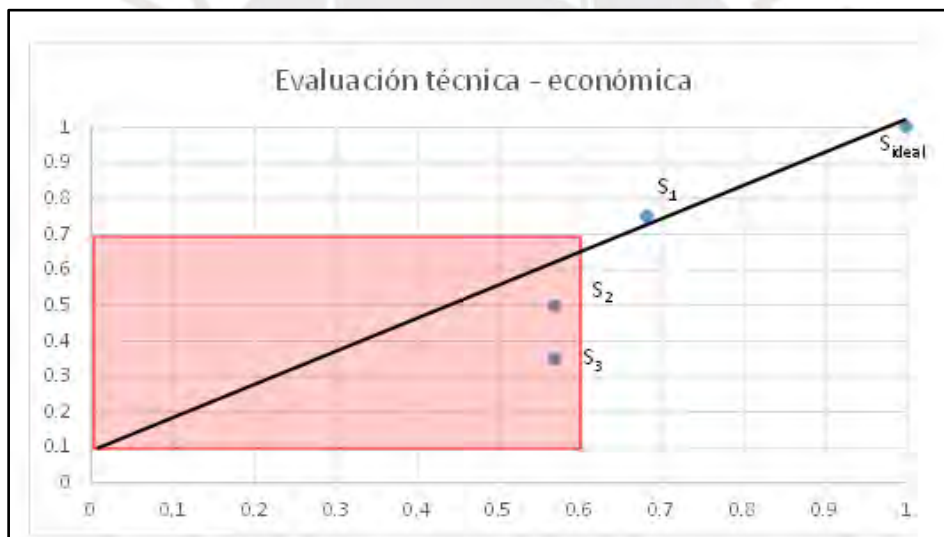


Figura D.1. Resultados evaluación técnica - económica. Elaboración propia.

Según la metodología en cuestión, las soluciones que se encuentren debajo de 0.6 tanto para el caso de la parte técnica como para la parte económica quedan automáticamente descartadas, pues no satisfacen las condiciones mínimas necesarias para ser consideradas como una posible solución final. Es así que se descartan las soluciones S<sub>2</sub> y S<sub>3</sub>, quedando como solución ganadora la solución 1, la cual se encuentra más cerca a la solución ideal respecto a las otras dos soluciones.

**ANEXO E: Código Python empleado para pruebas realizadas de detección de color**

```

import numpy as np
import cv2
# Captar video a través una cámara externa
webcam = cv2.VideoCapture(1)

# Se inicia el bucle que analizará constantemente el video
while(1):

    # Sacando tomas de imágenes del video en tiempo real
    _, imageFrame = webcam.read()
    # Convierte la imagen proveniente de formato RGB a HSV
    hsvFrame = cv2.cvtColor(imageFrame, cv2.COLOR_BGR2HSV)
    # Se setea el rango de valores RGB del color rojo
    red_lower = np.array([136, 87, 111], np.uint8)
    red_upper = np.array([210, 255, 255], np.uint8)
    #se crea una máscara para extraer el color rojo
    red_mask = cv2.inRange(hsvFrame, red_lower, red_upper)
    # Se setea el rango de valores RGB del color verde
    green_lower = np.array([25, 120, 120], np.uint8)
    green_upper = np.array([90, 255, 200], np.uint8)

    #se crea una máscara para extraer el color verde
    green_mask = cv2.inRange(hsvFrame, green_lower, green_upper)
    # Se setea el rango de valores RGB del color negro
    black_lower = np.array([0, 0, 0], np.uint8)
    black_upper = np.array([50, 50, 50], np.uint8)
    #se crea una máscara para extraer el color negro
    black_mask = cv2.inRange(hsvFrame, black_lower, black_upper)
    # Se aplica una transformación morfológica a la imagen (en este caso dilatación)
    kernel = np.ones((5, 5), "uint8")
    # Para el color rojo
    red_mask = cv2.dilate(red_mask, kernel)
    res_red = cv2.bitwise_and(imageFrame, imageFrame,
                              mask = red_mask)
    # Para el color verde
    green_mask = cv2.dilate(green_mask, kernel)
    res_green = cv2.bitwise_and(imageFrame, imageFrame,
                                 mask = green_mask)
    # Para el color azul
    black_mask = cv2.dilate(black_mask, kernel)
    res_black = cv2.bitwise_and(imageFrame, imageFrame,
                                 mask = black_mask)

```

```
# Creación de contorno para encerrar zona de color rojo
contours, hierarchy = cv2.findContours(red_mask,
                                     cv2.RETR_TREE,
                                     cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
```

```
for pic, contour in enumerate(contours):
    area = cv2.contourArea(contour)
    if(area > 300):
        x, y, w, h = cv2.boundingRect(contour)
        imageFrame = cv2.rectangle(imageFrame, (x, y),
                                   (x + w, y + h),
                                   (0, 0, 255), 2)

        cv2.putText(imageFrame, "Rojo", (x, y),
                    cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 1.0,
                    (0, 0, 255))
```

```
# Creación de contorno para encerrar zona de color verde
contours, hierarchy = cv2.findContours(green_mask,
                                     cv2.RETR_TREE,
                                     cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
```

```
for pic, contour in enumerate(contours):
    area = cv2.contourArea(contour)
    if(area > 300):
        x, y, w, h = cv2.boundingRect(contour)
        imageFrame = cv2.rectangle(imageFrame, (x, y),
                                   (x + w, y + h),
                                   (0, 255, 0), 2)

        cv2.putText(imageFrame, "Verde", (x, y),
                    cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,
                    1.0, (0, 255, 0))
```

```
# Creación de contorno para encerrar zona de color negro
contours, hierarchy = cv2.findContours(black_mask,
                                     cv2.RETR_TREE,
                                     cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
```

```
for pic, contour in enumerate(contours):
    area = cv2.contourArea(contour)
    if(area > 300):
        x, y, w, h = cv2.boundingRect(contour)
        imageFrame = cv2.rectangle(imageFrame, (x, y),
                                   (x + w, y + h),
```

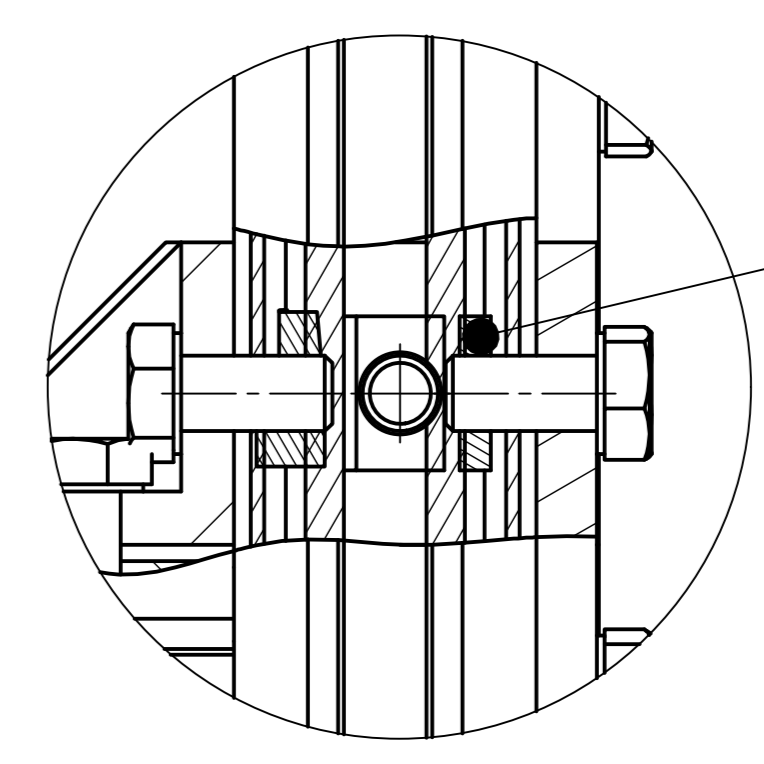
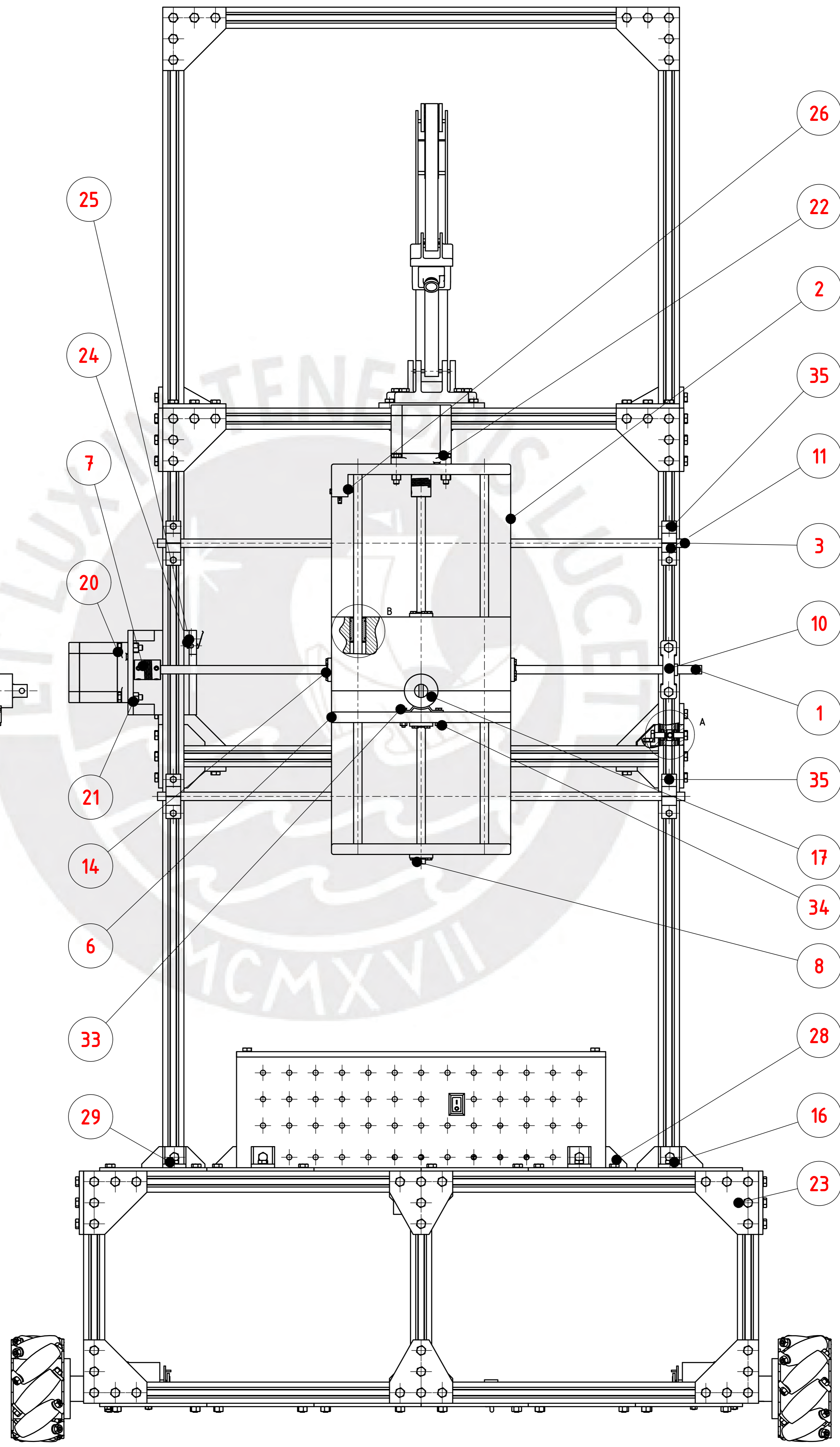
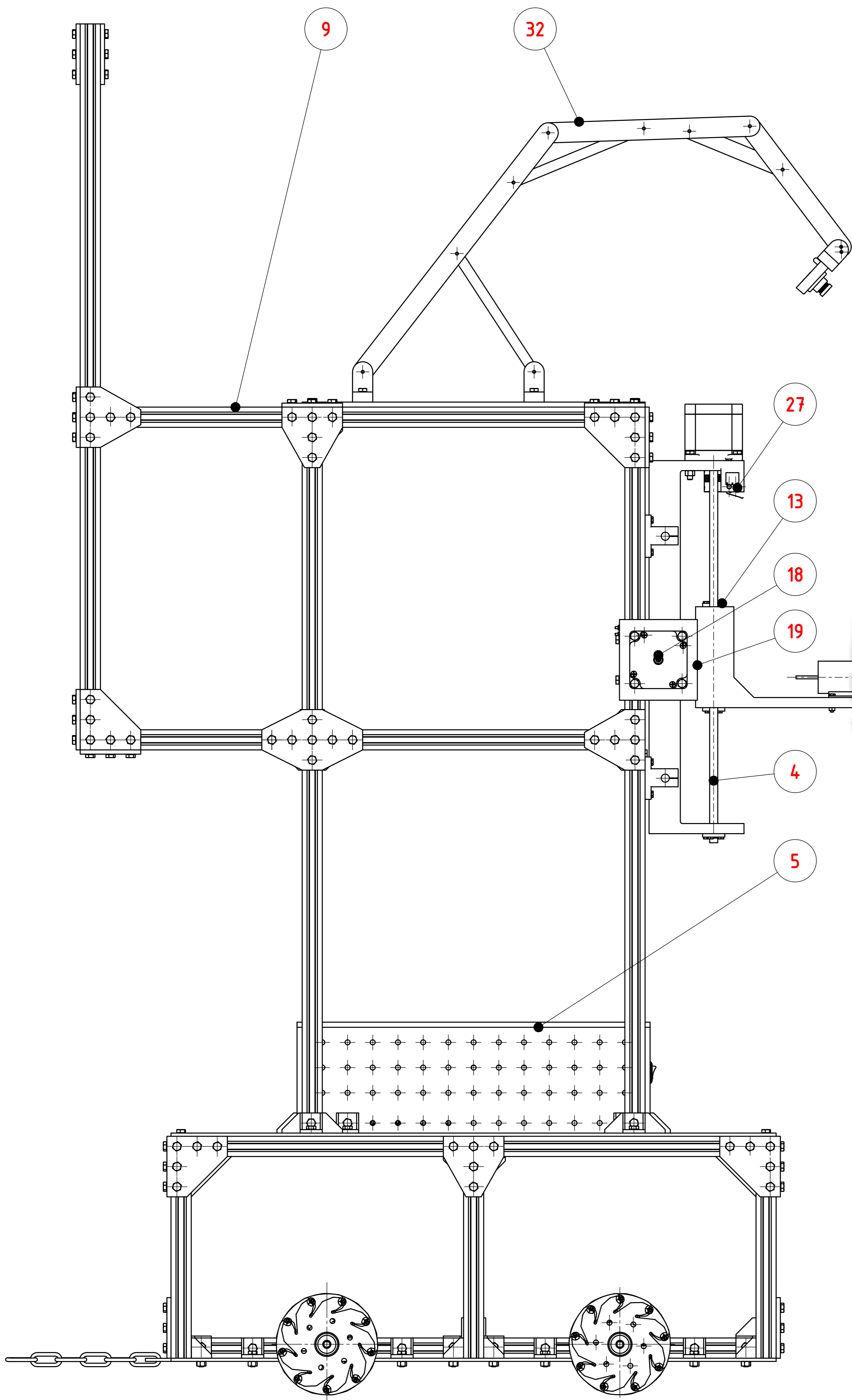
```
(0, 0, 0), 2)
```

```
cv2.putText(imageFrame, "Negro", (x, y),  
            cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX,  
            1.0, (0, 0, 0))
```

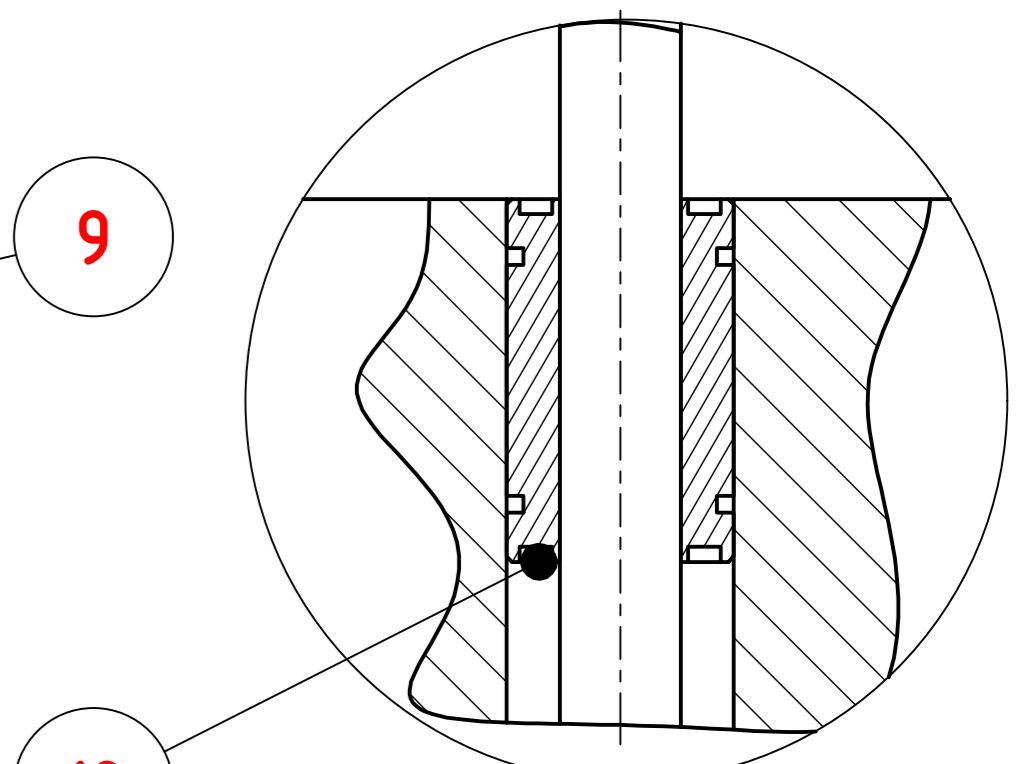
```
# Finalización del programa si se presiona la tecla q  
cv2.imshow("Multiple Color Detection in Real-Time", imageFrame)  
if cv2.waitKey(10) & 0xFF == ord('q'):  
    cap.release()  
    cv2.destroyAllWindows()  
    break
```



**ANEXO F: Planos mecánicos y diagramas electrónicos**



DETALLE A  
ESCALA (2 : 1)

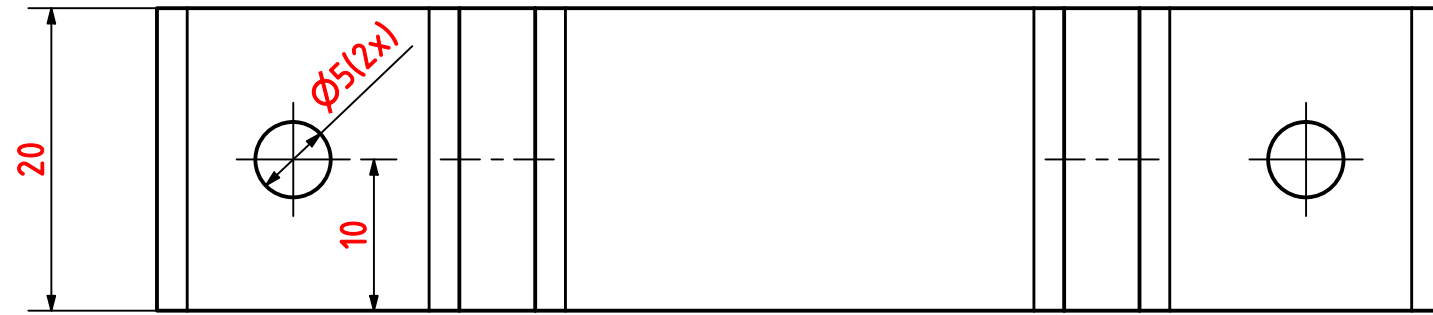


DETALLE B  
ESCALA (2 : 1)

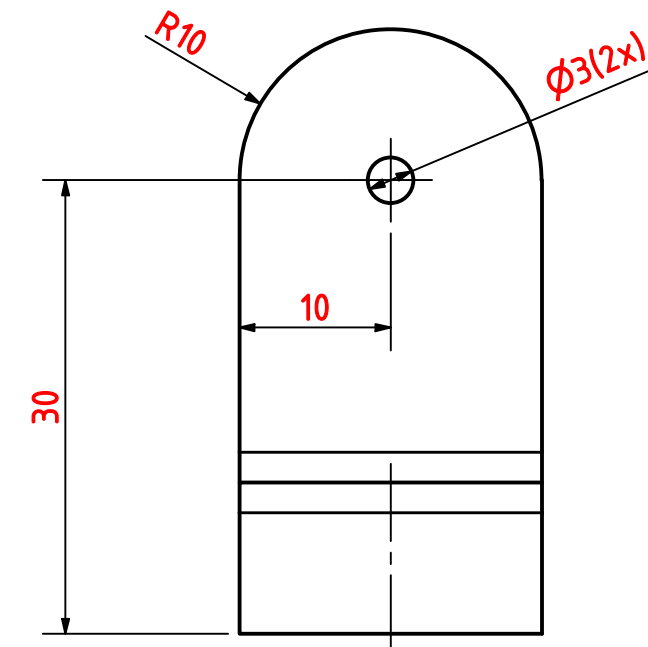
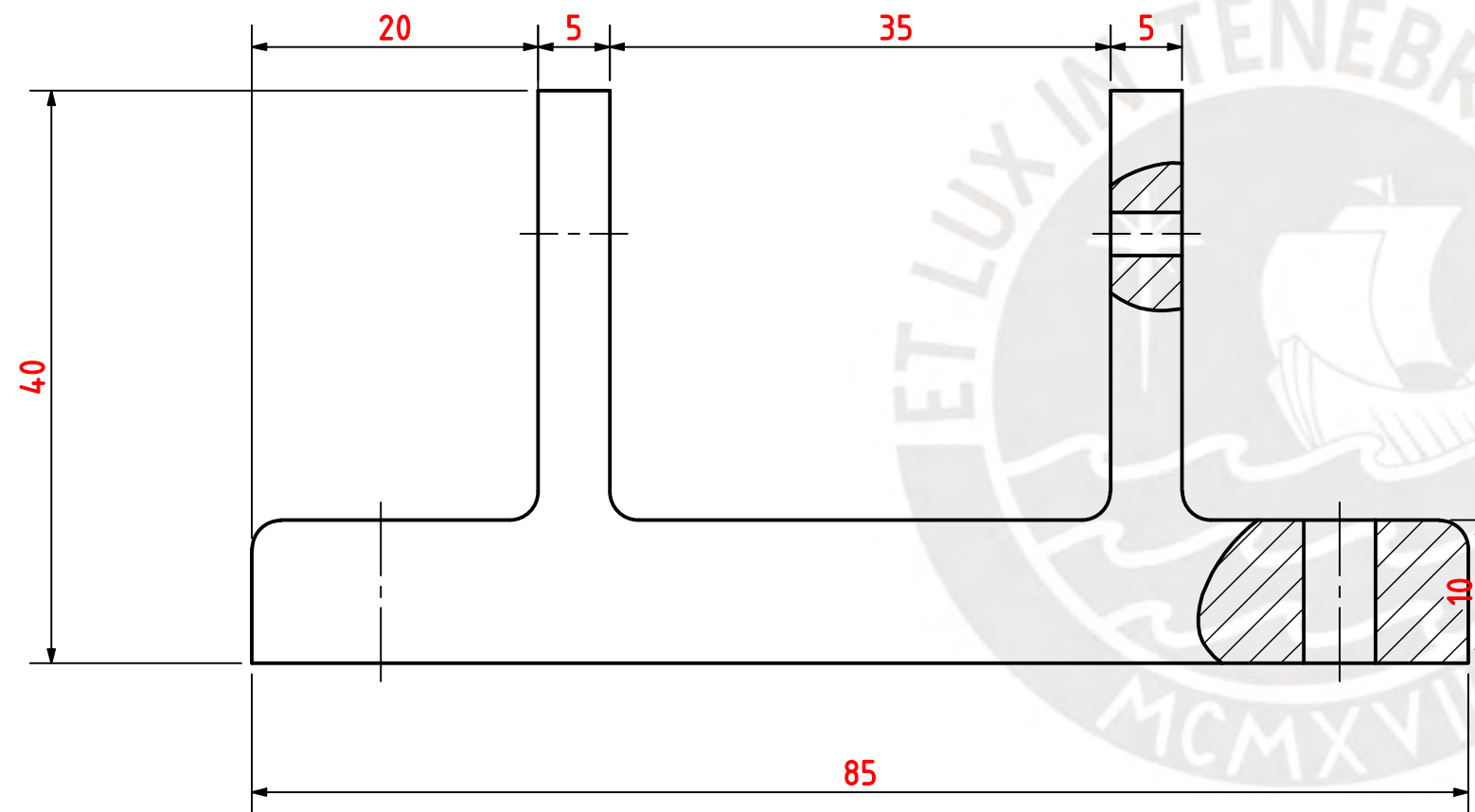
35	8	TORNILLO HEXAGONAL M3 x 10	AS 1110	Steel, Mild
34	4	TUERCA HEXAGONAL M3 x 0.5	ANSI B18.2.4.2M	Steel, Mild
33	4	TORNILLO HEXAGONAL M3 x 16	AS 1110	Steel, Mild
32	1	SUBENSAMBLE ESTRUCTURA CÁMARA		
31	32	TUERCA HEXAGONAL M3	AS 1112	Steel, Mild
30	24	TUERCA HEXAGONAL M5	AS 1112	Steel, Mild
29	18	TORNILLO HEXAGONAL M5 x 12	AS 1110	Steel, Mild
28	8	ÁNGULO DE ESQUINA DE 90° PARA V-SLOT 20 x 20		Steel
27	2	TORNILLO HEXAGONAL M2 x 20	AS 1110	Steel, Mild
26	4	TUERCA HEXAGONAL M2	AS 1112	Steel, Mild
25	2	TORNILLO HEXAGONAL M2 x 25	AS 1110	Steel, Mild
24	2	LIMIT SWITCH		
23	1	BASE MÓVIL		
22	4	TORNILLO HEXAGONAL M5 x 25	AS 1110	Steel, Mild
21	16	TUERCA HEXAGONAL M5x0.8	ANSI B18.2.4.2M	Steel, Mild
20	12	TORNILLO HEXAGONAL M5 x 20	AS 1110	Steel, Mild
19	1	SOPORTE NEMA 23		Steel, Mild
18	2	NEMA 23		
17	1	SOLENOIDE LINEAL		
16	14	TORNILLO HEXAGONAL M5 x 10	AS 1110	Steel, Mild
15	13	TUERCA CABEZA MARTILLO DESLIZANTE M5 PARA V - SLOT 20x20		
14	20	TORNILLO HEXAGONAL M2.5 x 8	AS 1110	Steel, Mild
13	5	TUERCA HUSILLO		
12	8	RODAMIENTO LINEAL LM8UU		
11	4	BRACKET VERTICAL SK8		
10	1	KP-08 CHUMACERA VERTICAL (Ø8 mm)		
9	1	ESTRUCTURA PRINCIPAL		
8	1	HUSILLO VERTICAL 8x36		Steel, Mild
7	2	ACOPLE FLEXIBLE 8x8		
6	1	PIEZA PARA TRASLACIÓN VERTICAL		PLÁSTICO PLA
5	1	ENSAMBLE CAJA ELECTRÓNICA MANIPULADOR		
4	2	VARILLA LISA VERTICAL 8x36.5		Steel, Cast
3	2	VARILLA LISA HORIZONTAL 8x50		Steel, Mild
2	1	PIEZA PARA TRASLACIÓN HORIZONTAL		PLÁSTICO PLA
1	1	HUSILLO 8x50		Steel, Mild
IT	CANT	NOMBRE	NORMA	MATERIAL

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FCI - ING. MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN	TFC 2 - -HORARIO 09M3	ESCALA
	<b>ENSAMBLE MANIPULADOR</b>	<b>1:2</b>
20193492	VILLARREAL SÁNCHEZ, FRANCE STEVE	FECHA: 15/11/2023
REVISADO POR:	JULIO CÉSAR TAFUR SOTELO	LÁMINA: A0



REDONDEOS NO INDICADOS R2



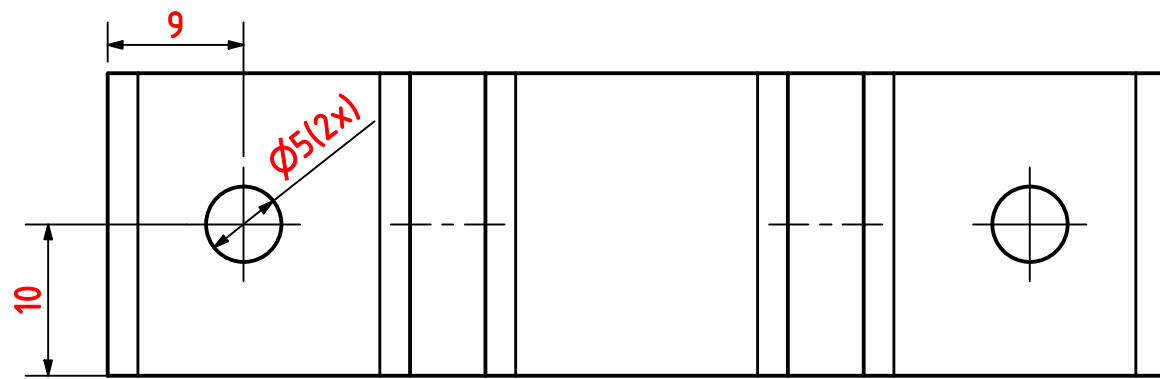
ACABADO SUPERFICIAL

TOLERANCIA GENERAL

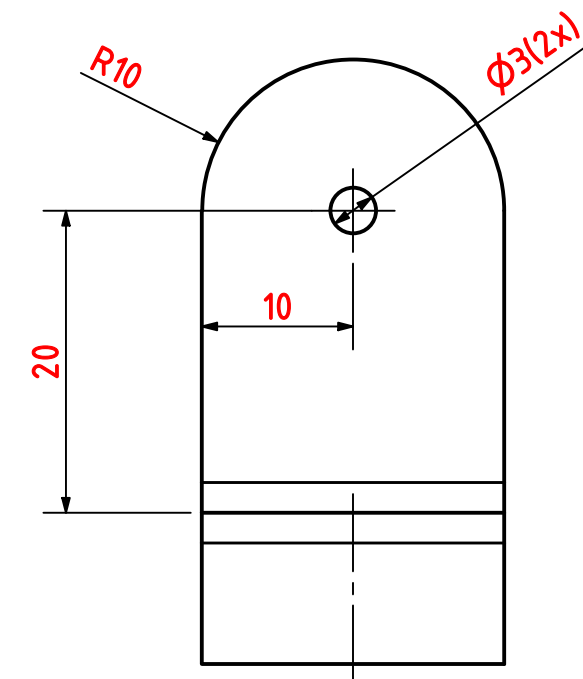
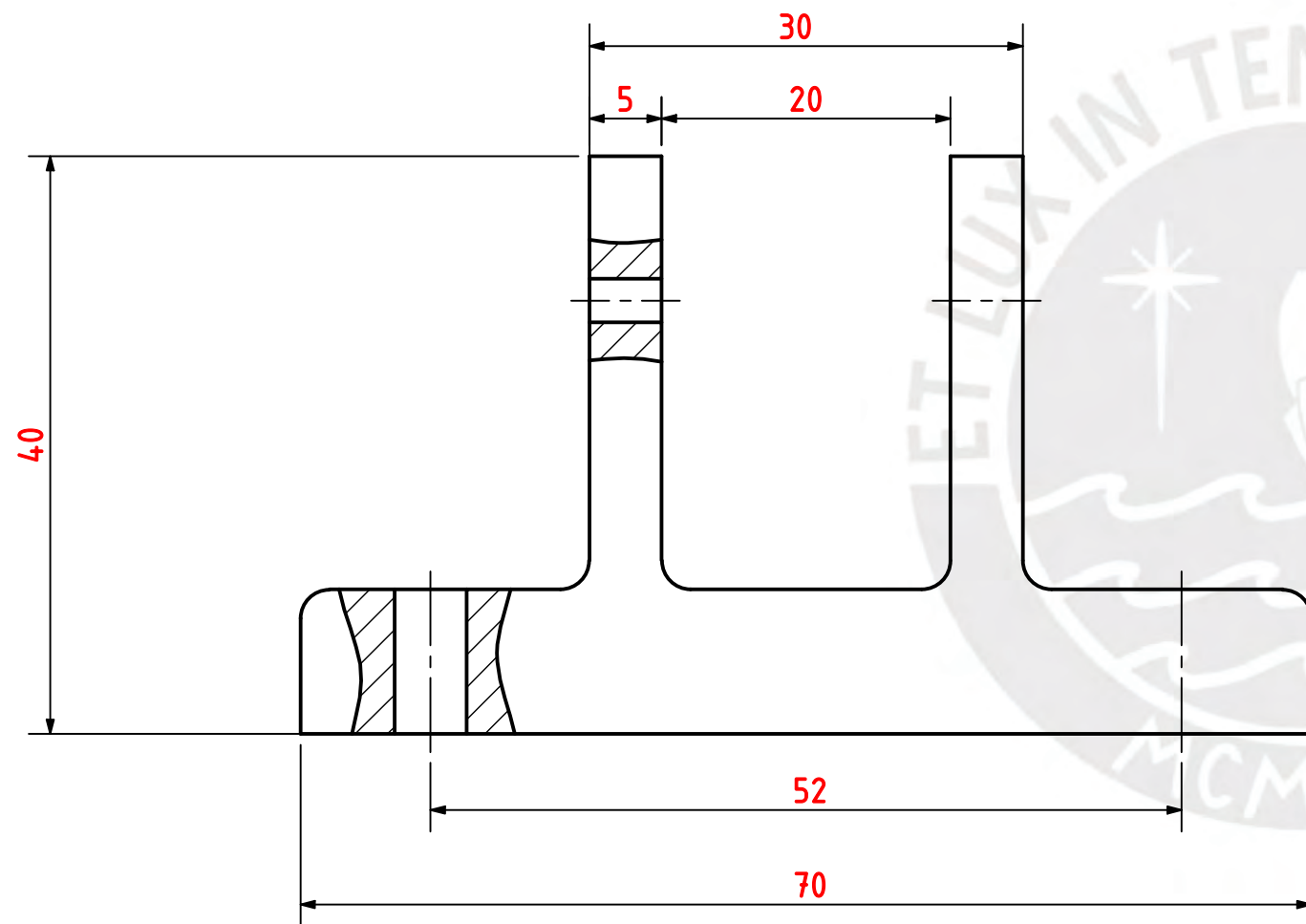
MATERIAL

IMPRESIÓN EN PLA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TFC - 2 - -HORARIO10M3	ESCALA
	APOYO 1	2:1
20193492	VILLARREAL SÁNCHEZ, FRANCE STEVE	FECHA: 17/09/2023
REVISADO POR:	JULIO CÉSAR TAFUR SOTELO	LÁMINA: A3



REDONDEOS NO INDICADOS R2



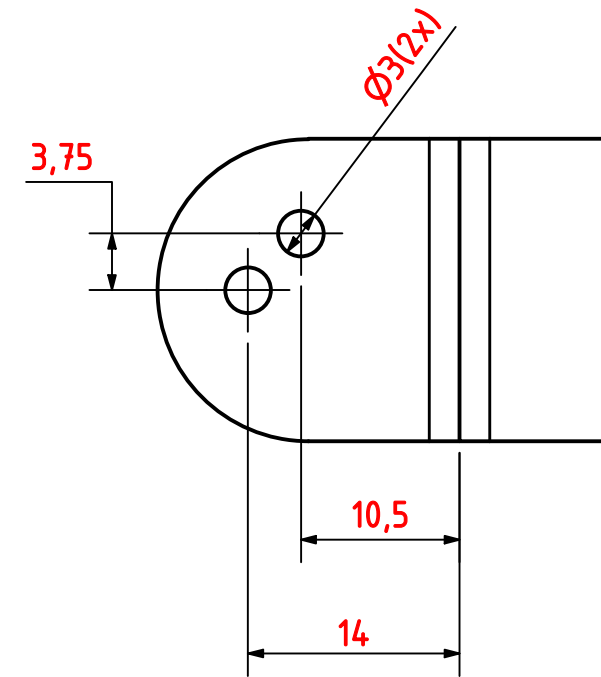
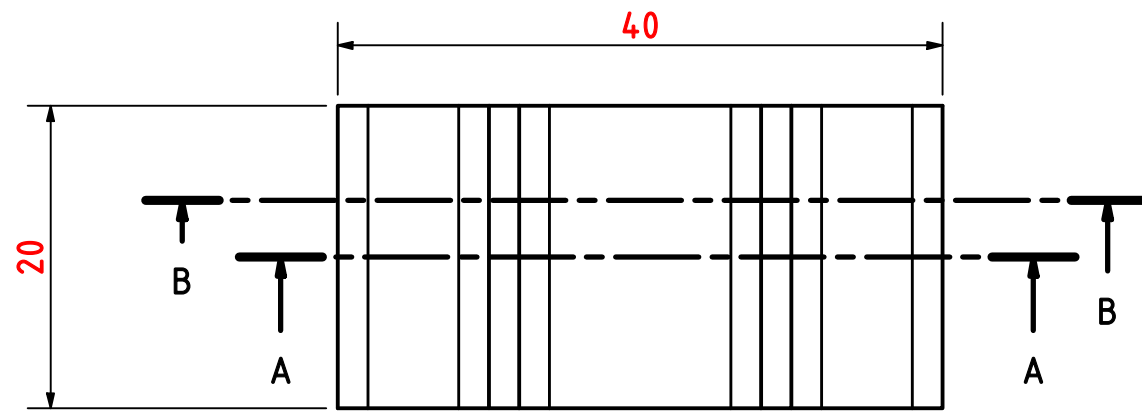
ACABADO SUPERFICIAL

TOLERANCIA GENERAL

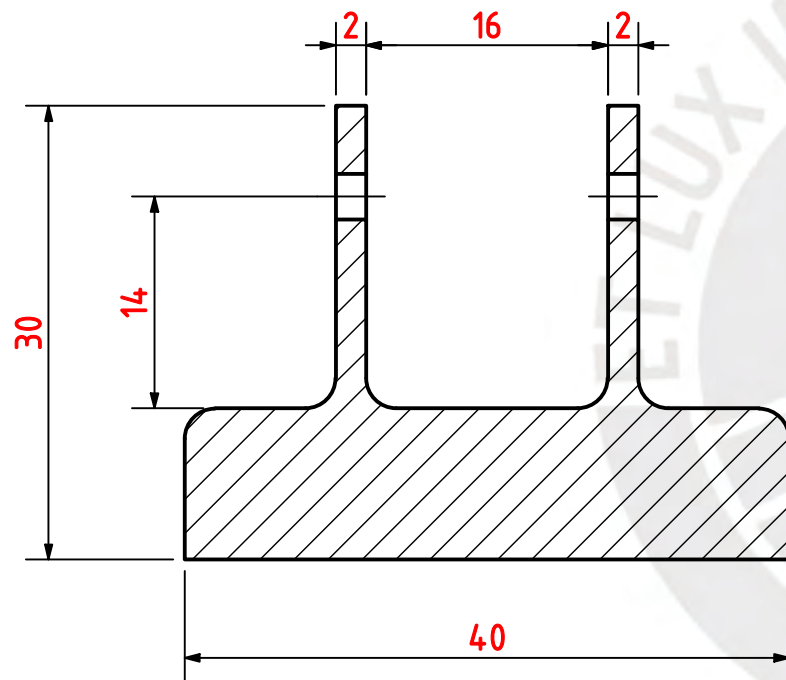
MATERIAL

IMPRESIÓN EN PLA

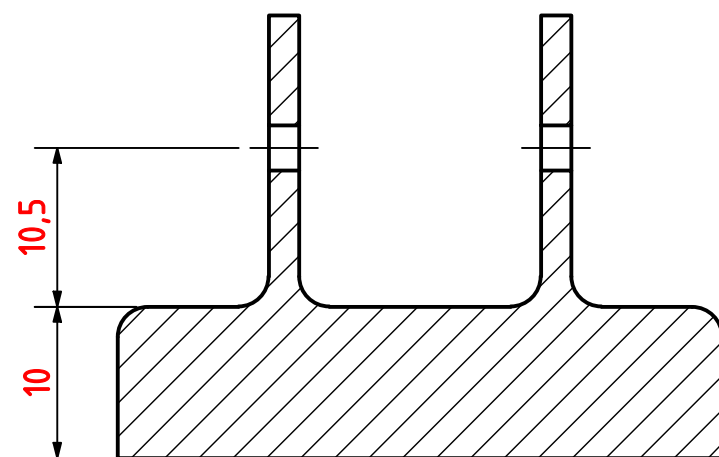
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TFC 2 - -HORARIO10M3	ESCALA
	<b>APOYO 2</b>	2:1
20193492	VILLARREAL SÁNCHEZ, FRANCE STEVE	FECHA: 18/09/2023
REVISADO POR:	JULIO CÉSAR TAFUR SOTELO	LÁMINA: A3



**CORTE A-A**



**CORTE B-B**



**REDONDEOS NO INDICADOS R2**

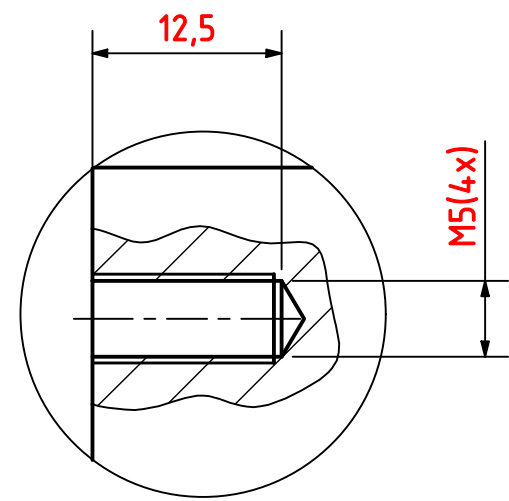
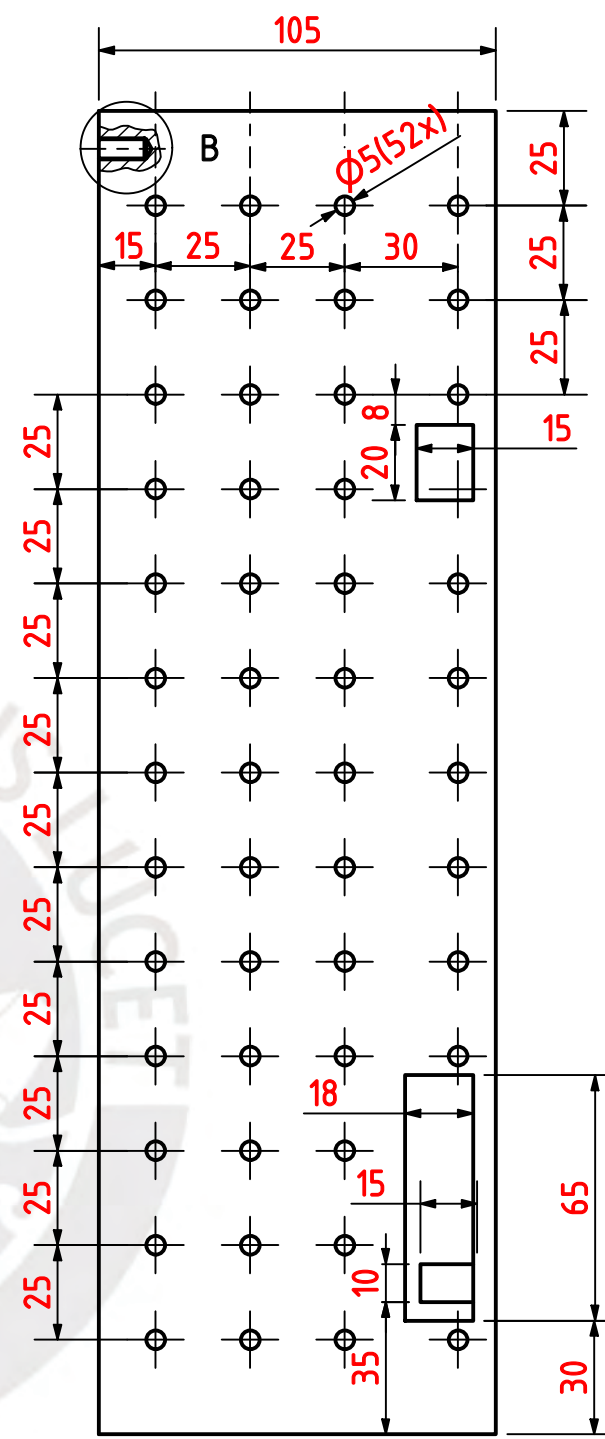
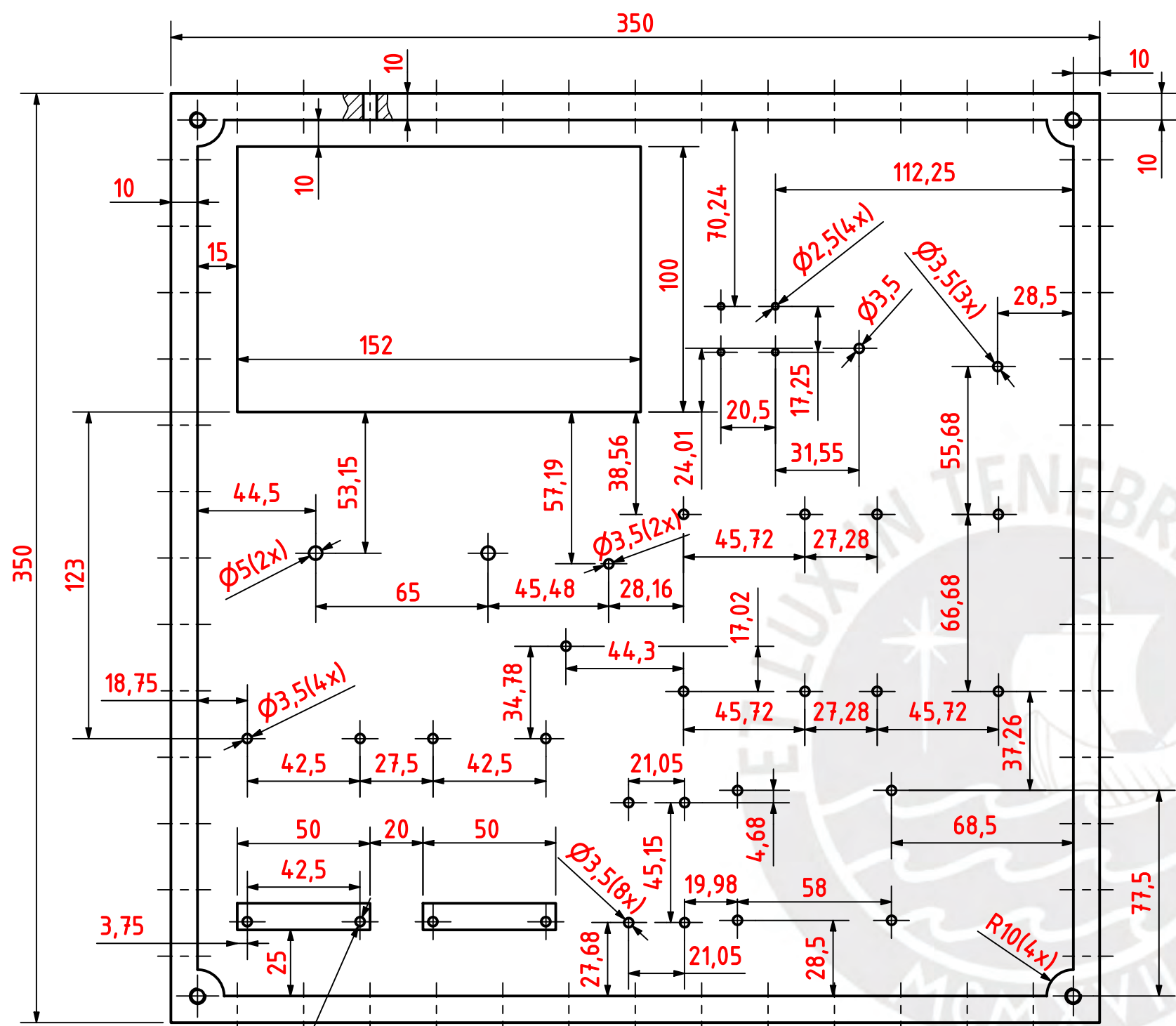
ACABADO SUPERFICIAL

TOLERANCIA GENERAL

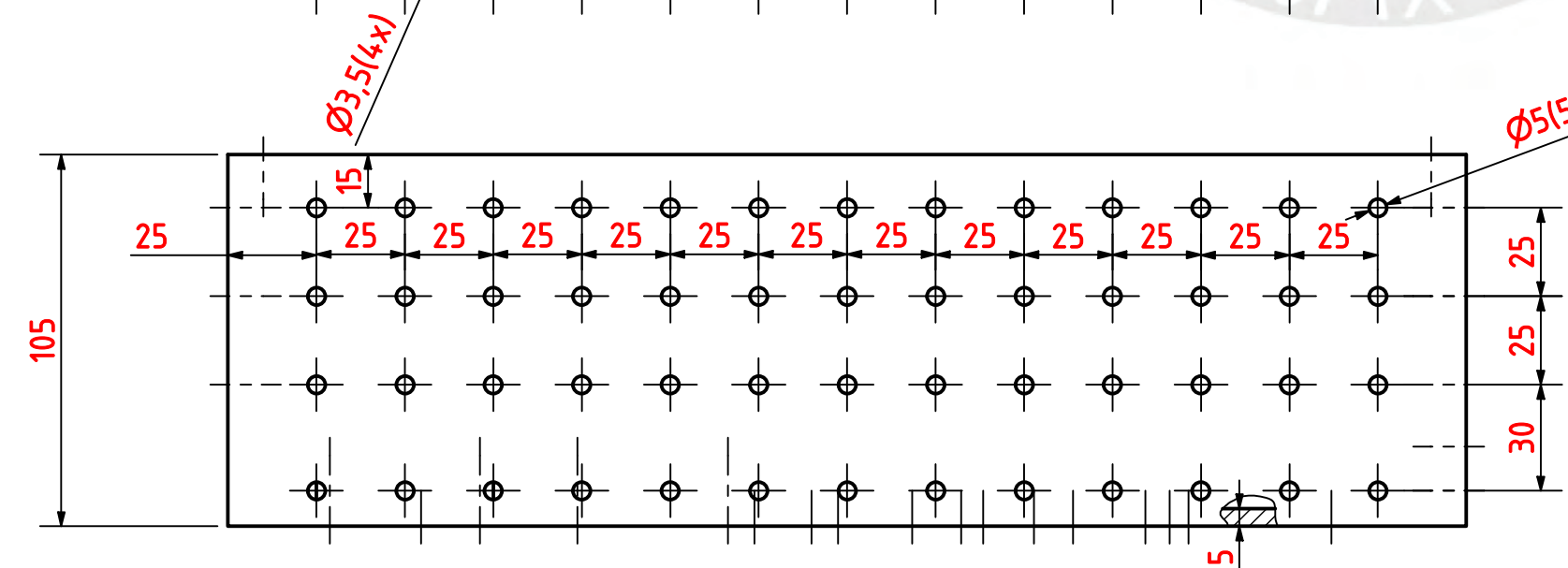
MATERIAL

IMPRESIÓN DE PLA

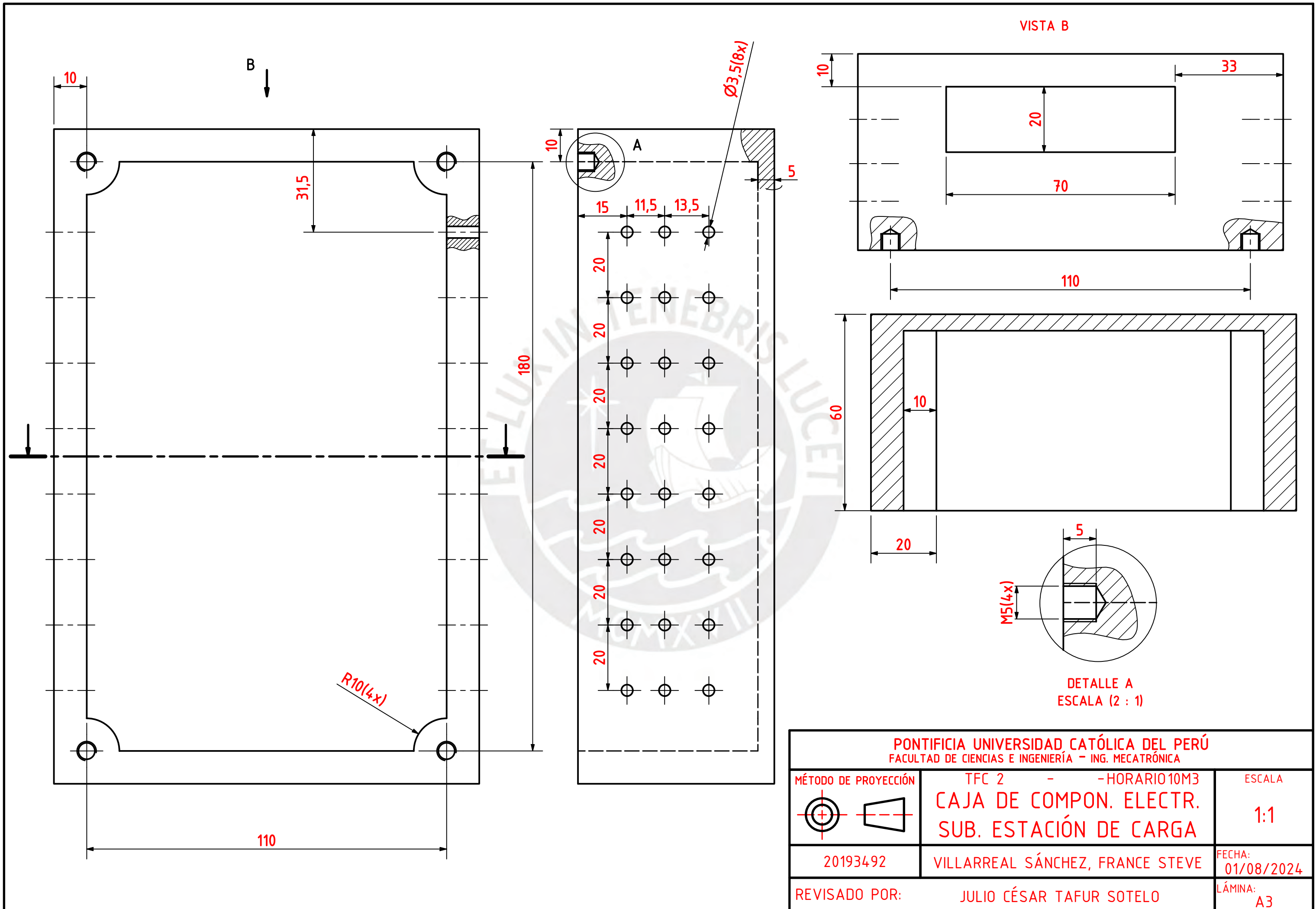
<b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ</b> FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC 2 - -HORARIO10M3	ESCALA <b>2:1</b>
20193492	VILLARREAL SÁNCHEZ, FRANCE STEVE	FECHA: 18/09/2023
REVISADO POR:	JULIO CÉSAR TAFUR SOTELO	LÁMINA: A3



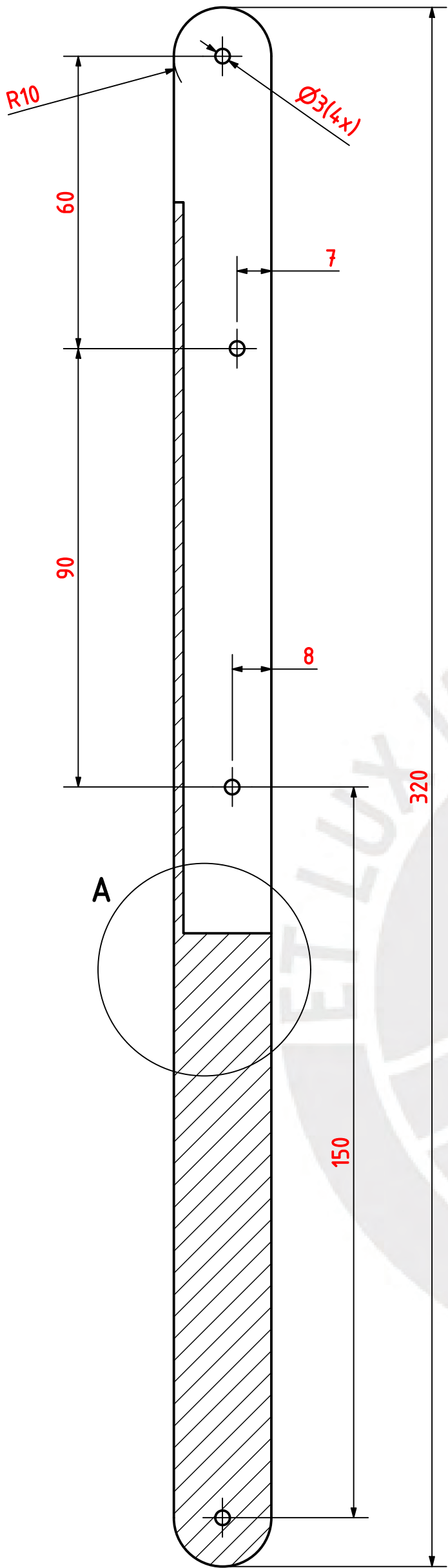
DETALLE B  
ESCALA (2 : 1)



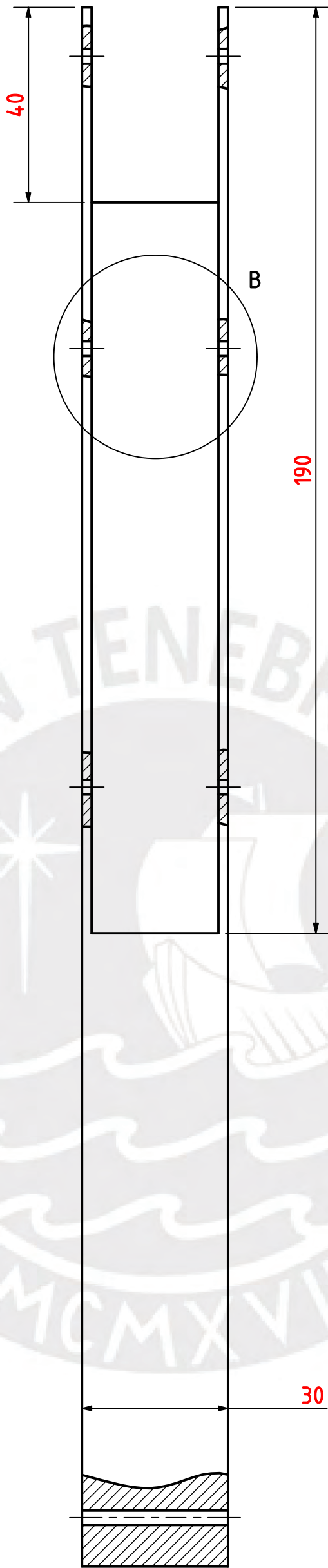
<b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ</b> FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC 2 - HORARIO 10M3 <b>CAJA ELECTRÓNICA MANIPULADOR</b>	ESCALA <b>1:2</b>
20193492	VILLARREAL SÁNCHEZ, FRANCE STEVE	FECHA: 30/07/2024
REVISADO POR:	JULIO CÉSAR TAFUR SOTELO	LÁMINA: A3



<b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ</b> FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC 2 - -HORARIO10M3 <b>CAJA DE COMON. ELECTR.</b> <b>SUB. ESTACIÓN DE CARGA</b>	ESCALA <b>1:1</b>
20193492	VILLARREAL SÁNCHEZ, FRANCE STEVE	FECHA: 01/08/2024
REVISADO POR:	JULIO CÉSAR TAFUR SOTELO	LÁMINA: A3



SECCIÓN A-A

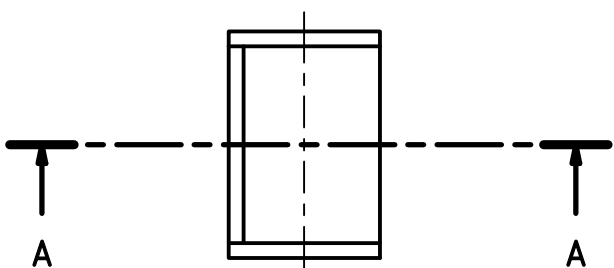


ACABADO SUPERFICIAL

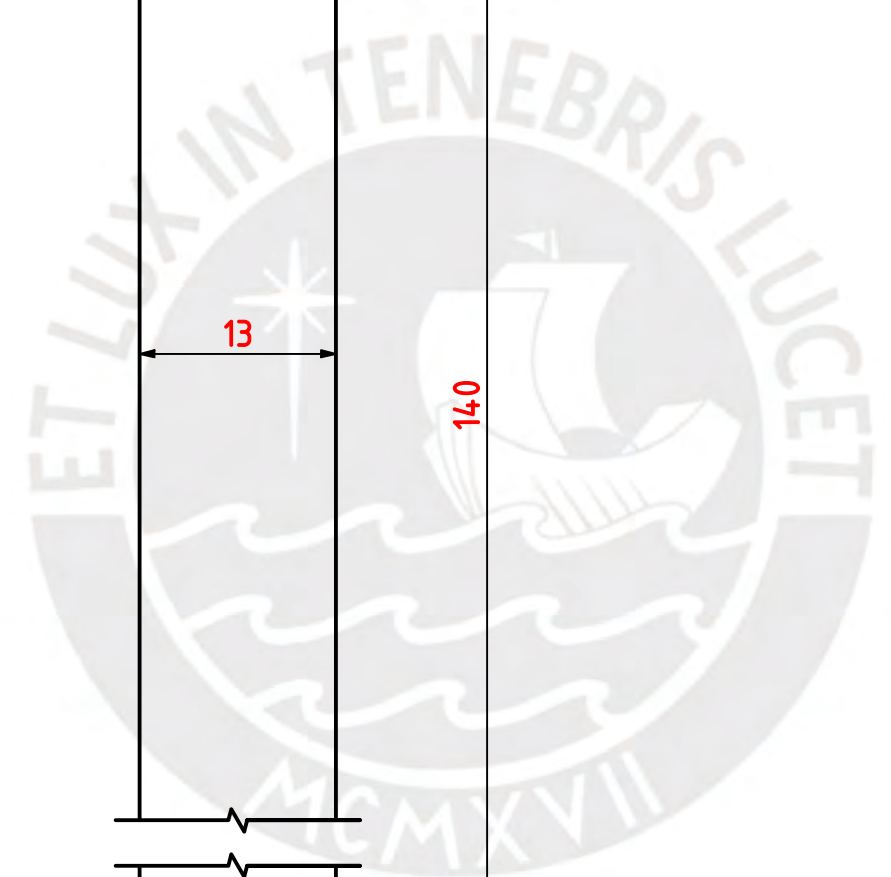
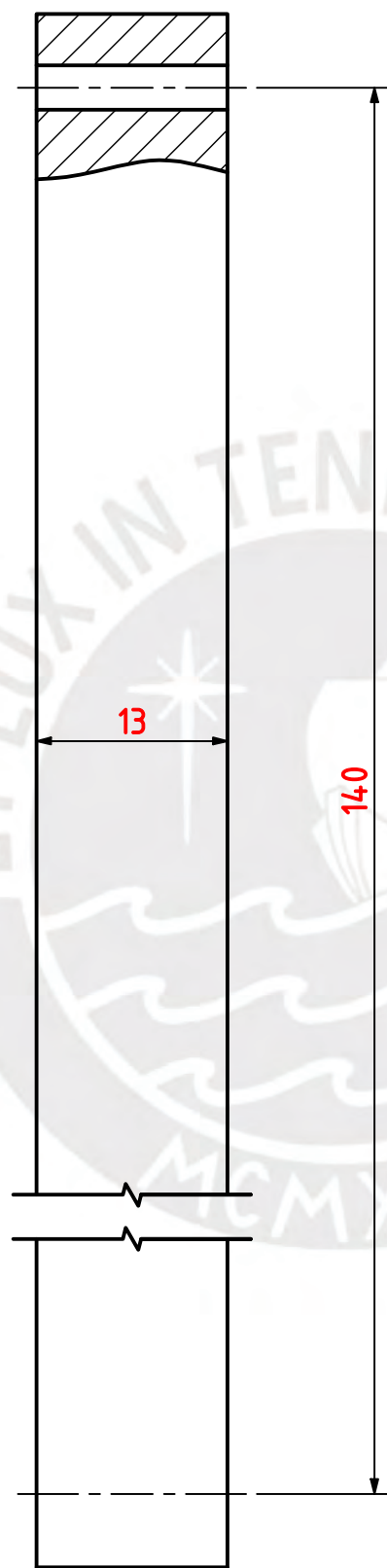
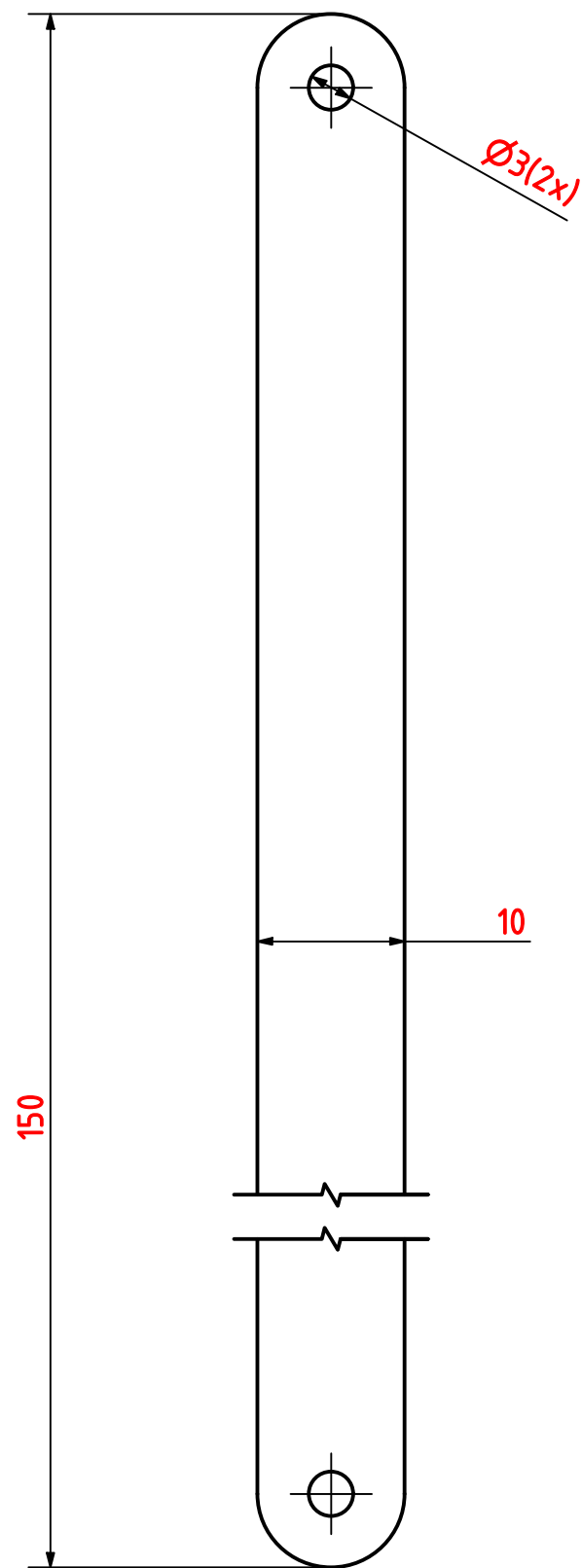
TOLERANCIA GENERAL

MATERIAL

IMPRESIÓN DE PLA



<b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ</b> FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC 2 - -HORARIO10M3	ESCALA <b>1:1</b>
<b>CUERPO N°1</b>		
20193492	VILLARREAL SÁNCHEZ, FRANCE STEVE	FECHA: 18/09/2023
REVISADO POR: JULIO CÉSAR TAFUR SOTELO		LÁMINA: A3



ACABADO SUPERFICIAL

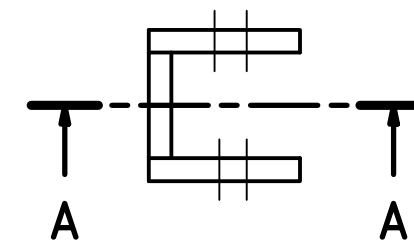
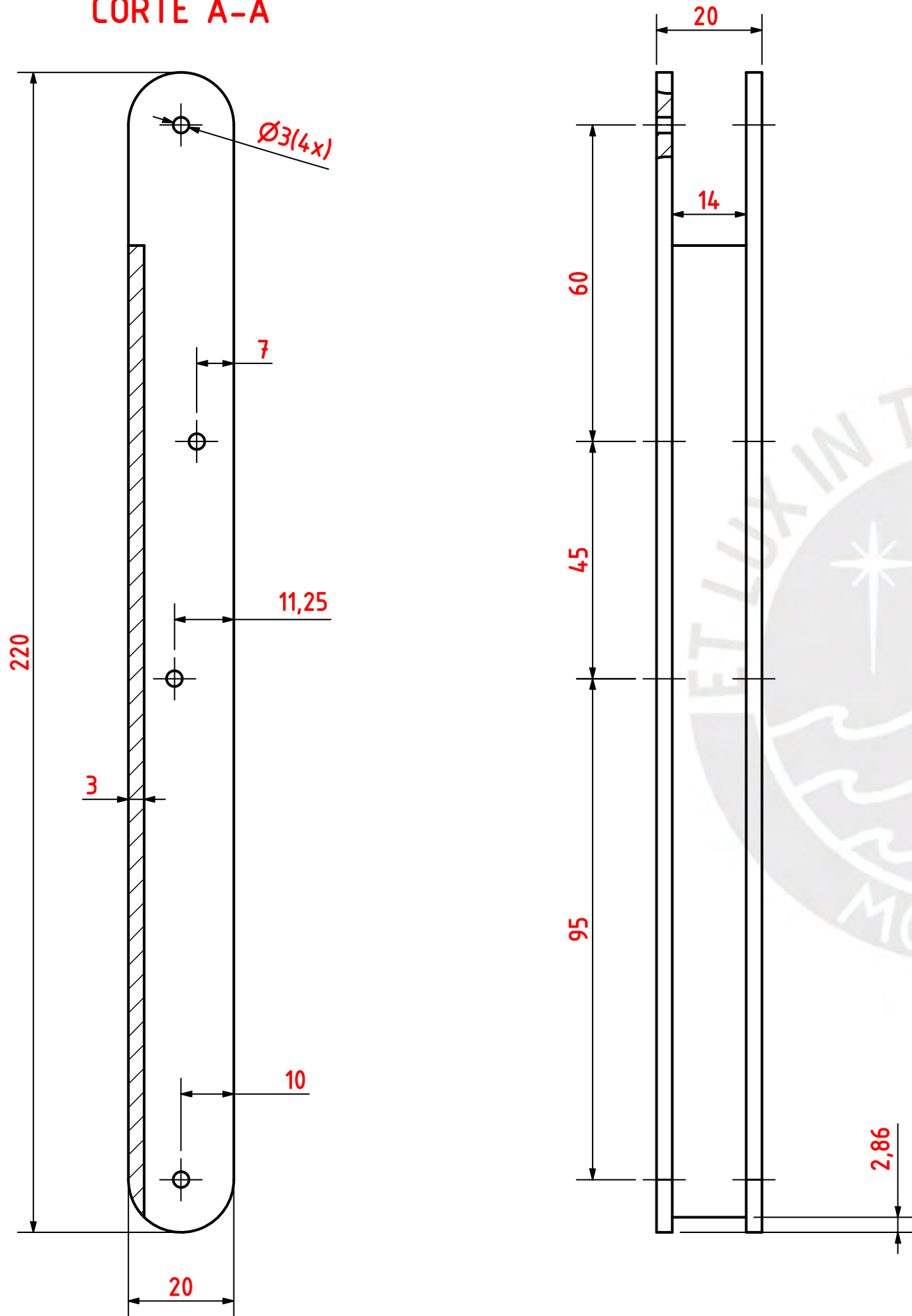
TOLERANCIA GENERAL

MATERIAL

IMPRESIÓN DE PLA

<b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ</b> FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC 2 - -HORARIO10M3	ESCALA 1:2
20193492	VILLARREAL SÁNCHEZ, FRANCE STEVE	FECHA: 18/09/2023
REVISADO POR:	JULIO CÉSAR TAFUR SOTELO	LÁMINA: A3

**CORTE A-A**

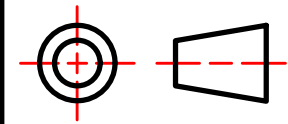


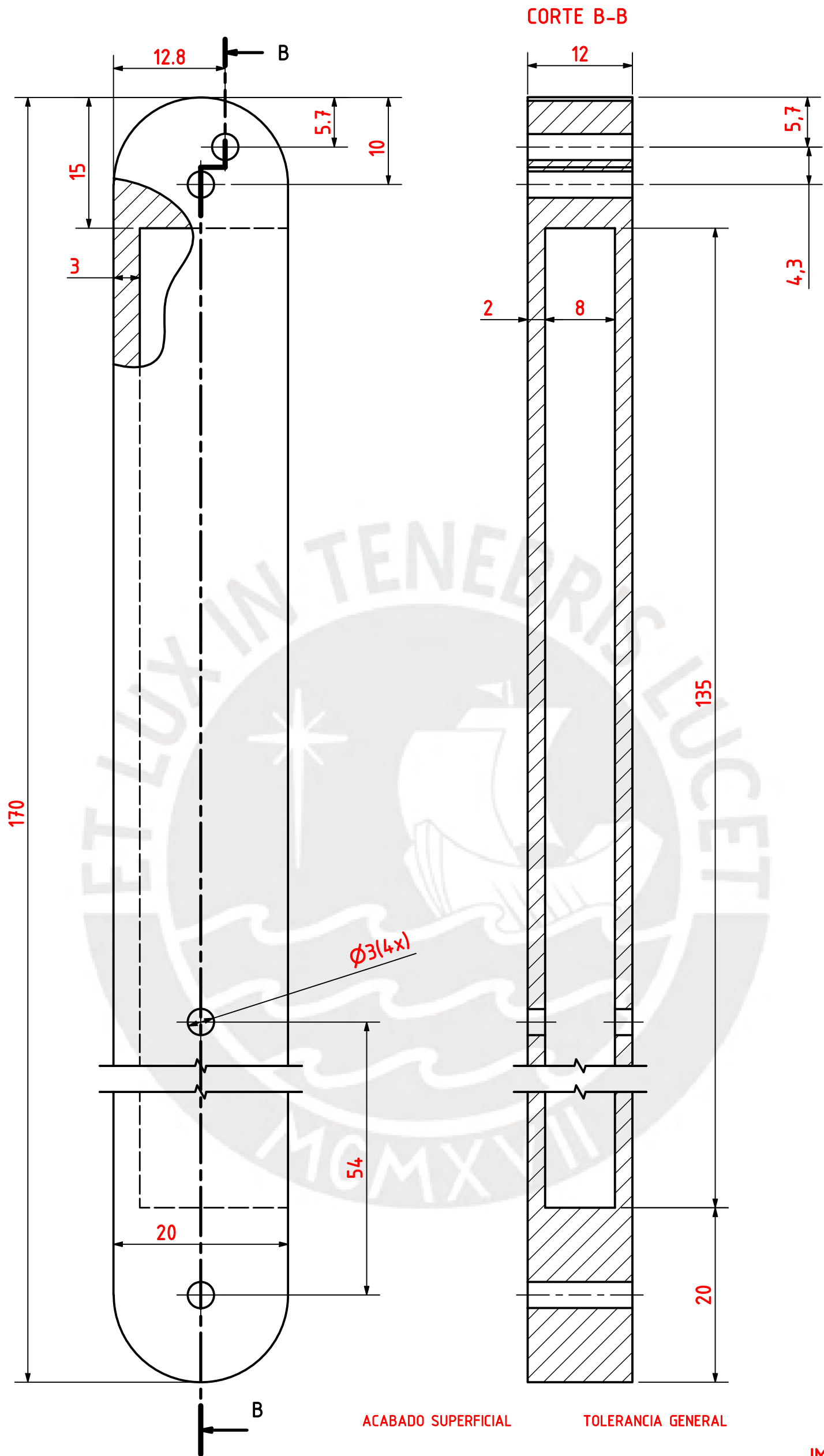
ACABADO SUPERFICIAL

TOLERANCIA GENERAL

MATERIAL

IMPRESIÓN DE PLA

<b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ</b> FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC 2 - -HORARIO10M3	ESCALA 1:1
<b>CUERPO N°3</b>		
20193492	VILLARREAL SÁNCHEZ, FRANCE STEVE	FECHA: 18/09/2023
REVISADO POR:	JULIO CÉSAR TAFUR SOTELO	LÁMINA: A3



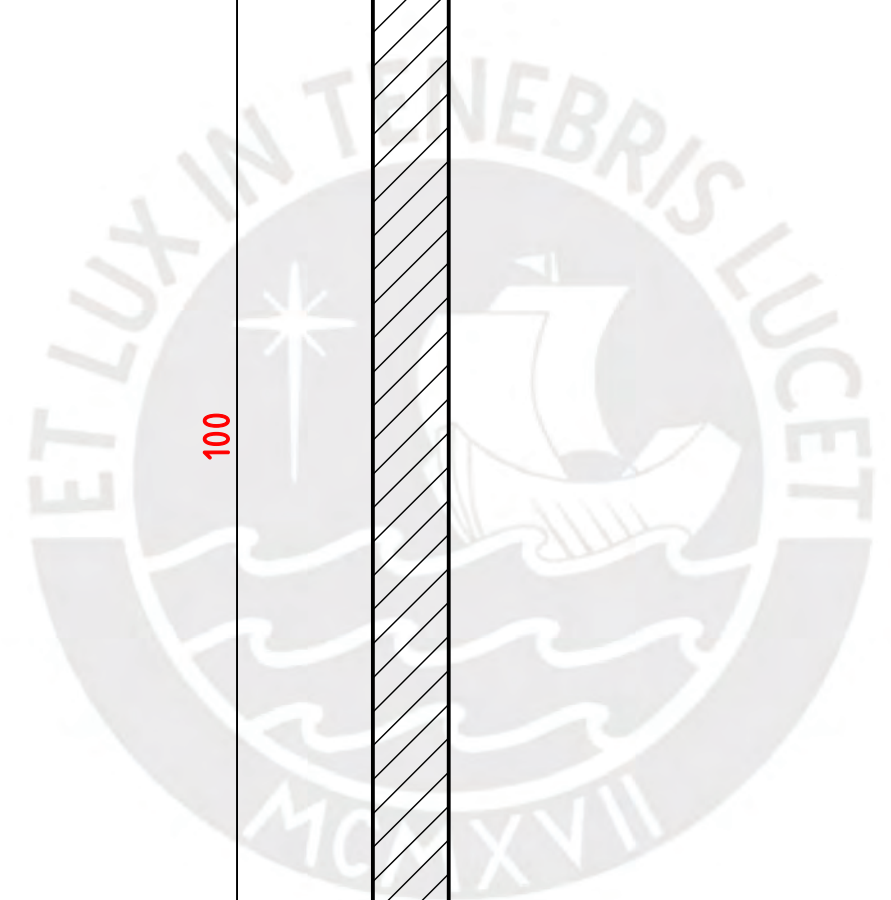
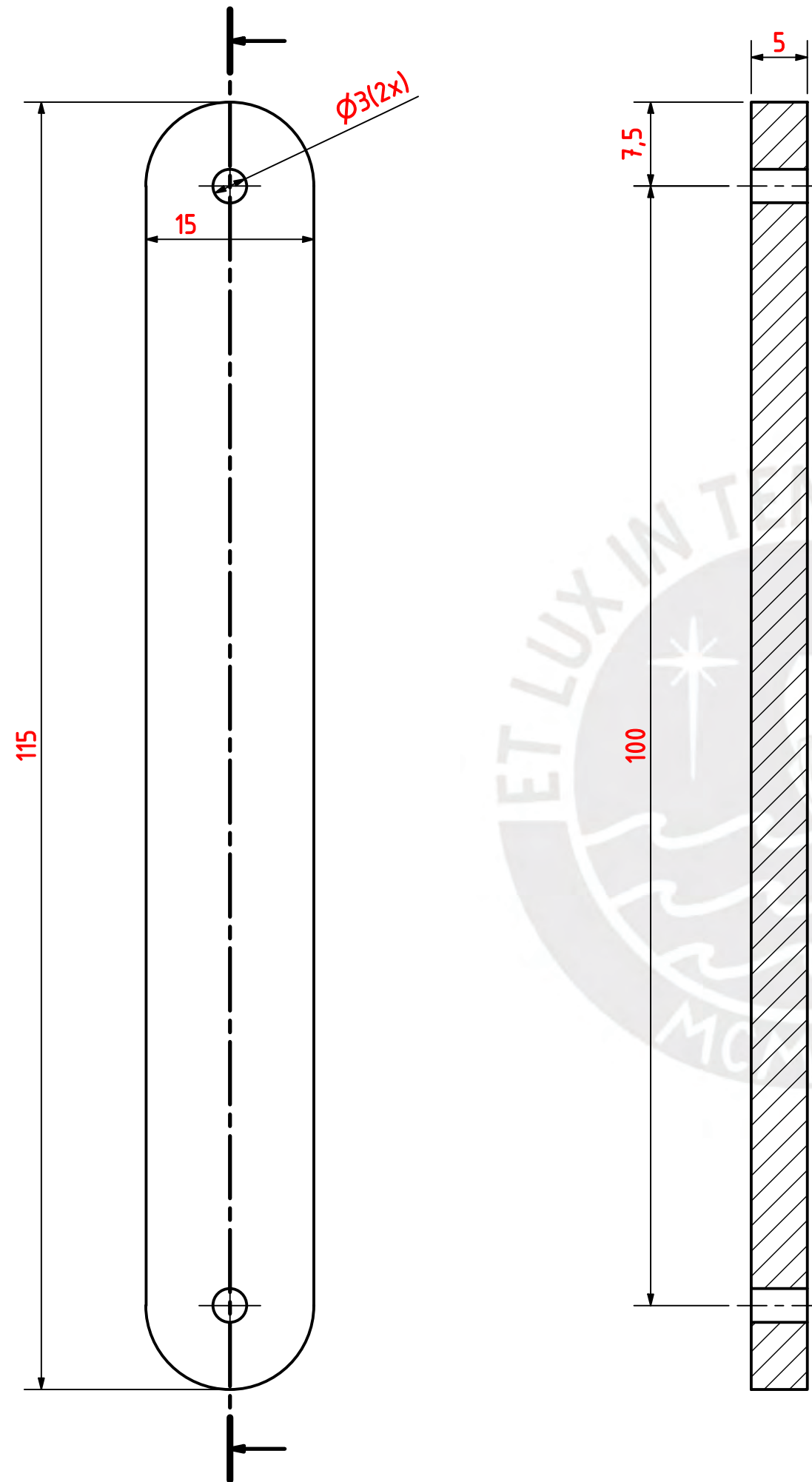
ACABADO SUPERFICIAL

TOLERANCIA GENERAL

MATERIAL

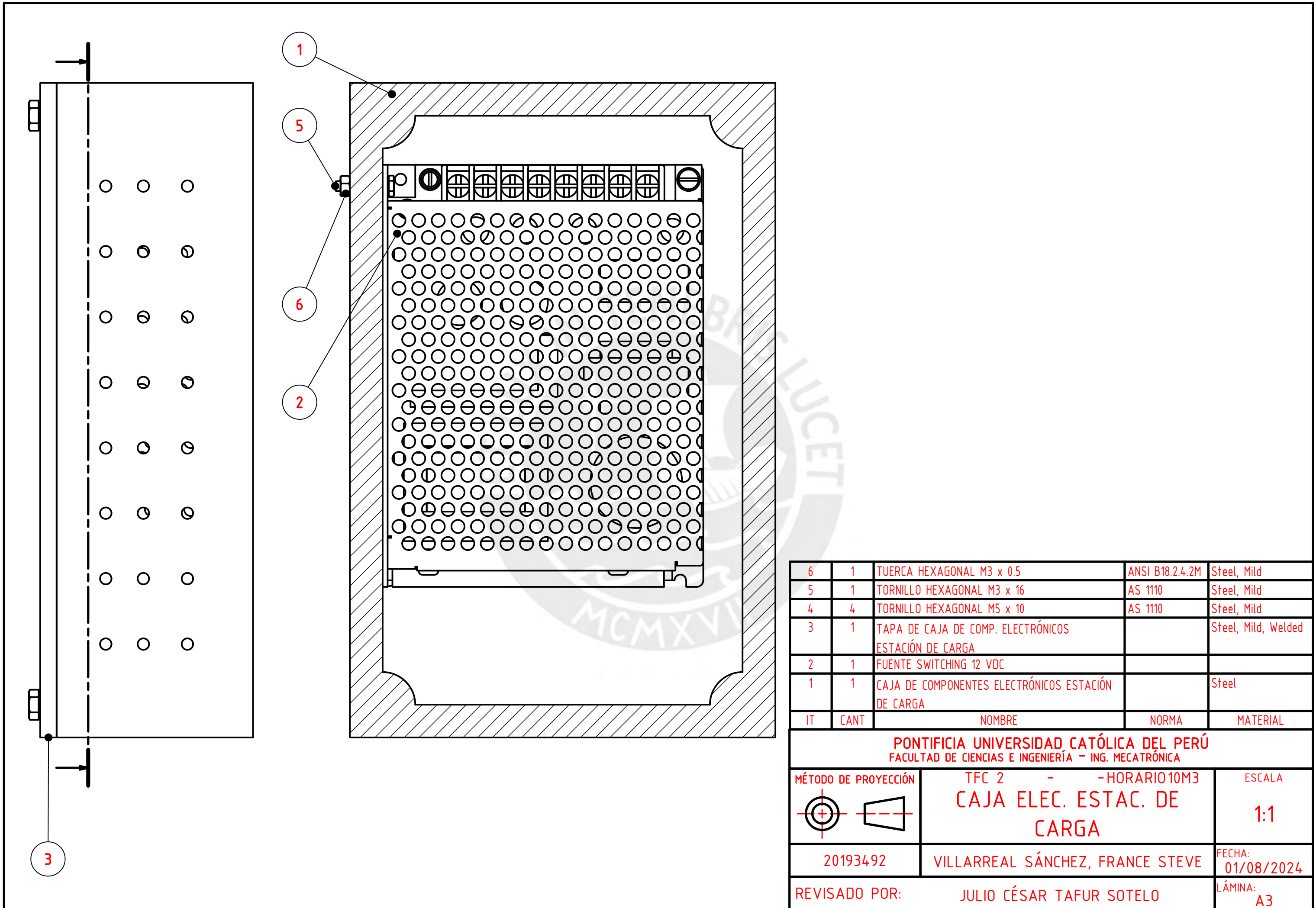
IMPRESIÓN DE PLA

<b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ</b> FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC 2 - -HORARIO10M3	ESCALA <b>1:1</b>
<b>CUERPO N°4</b>		
20193492	VILLARREAL SÁNCHEZ, FRANCE STEVE	FECHA: 18/09/2023
REVISADO POR:	JULIO CÉSAR TAFUR SOTELO	LÁMINA: A3



ACABADO SUPERFICIAL TOLERANCIA GENERAL MATERIAL  
IMPRESIÓN DE PLA

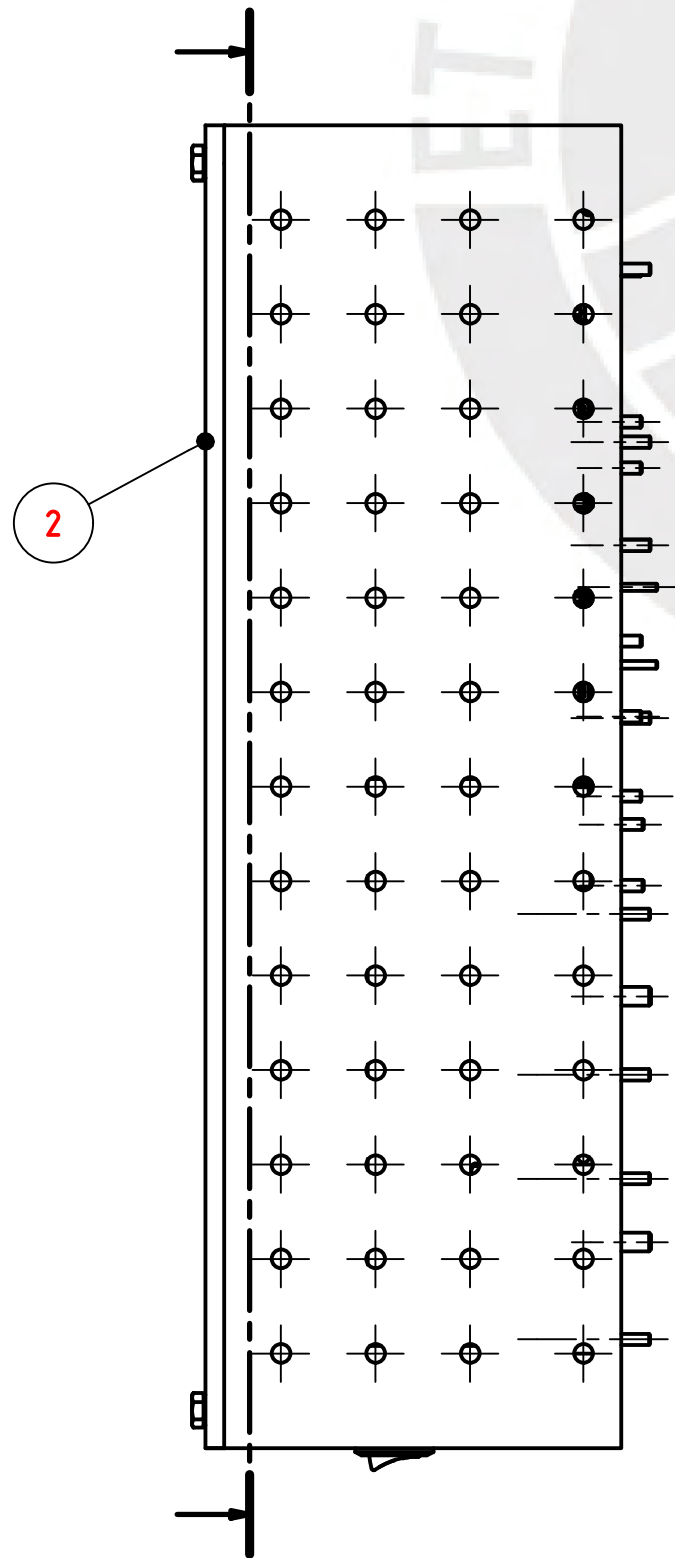
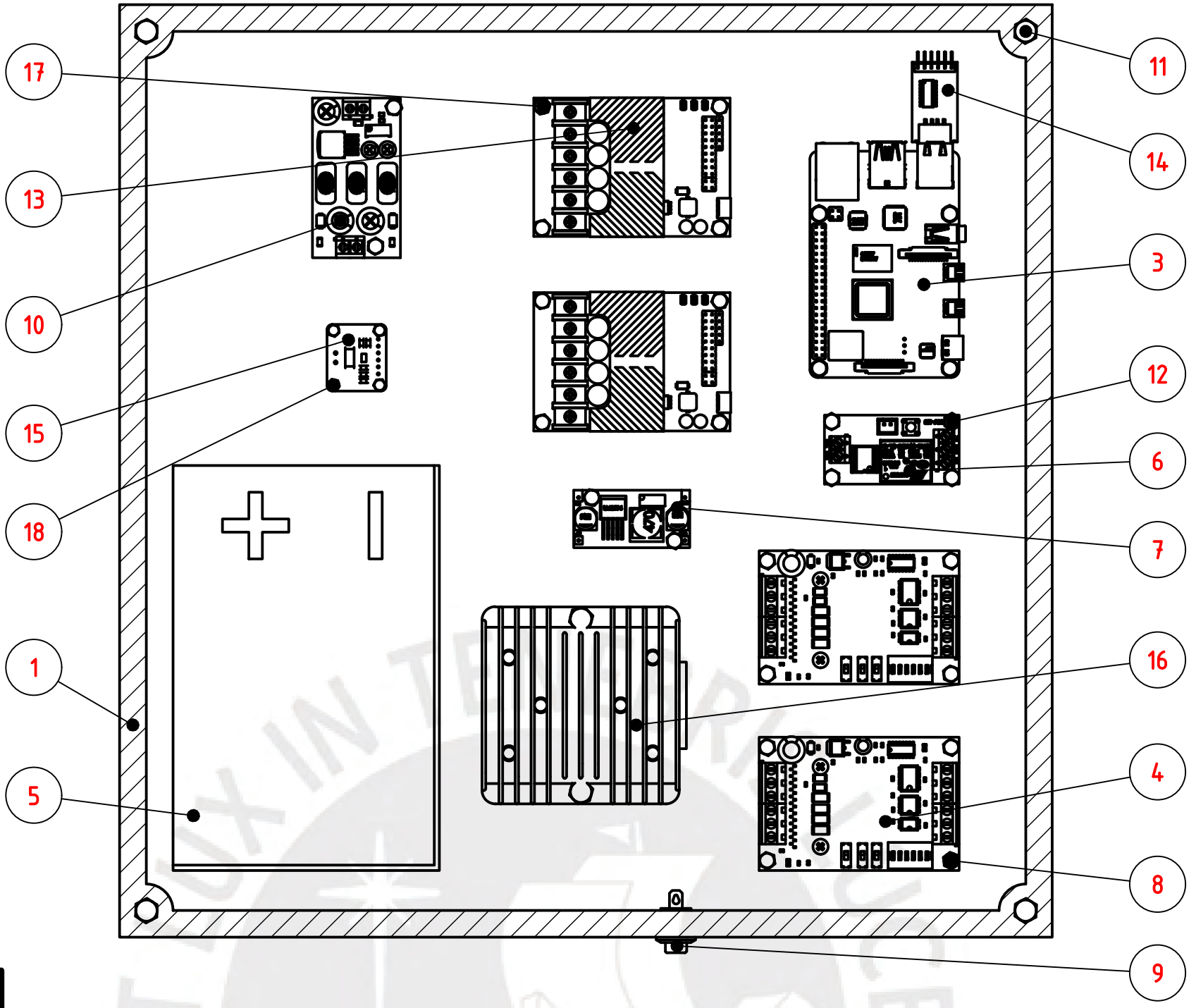
<b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ</b> FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC 2 - HORARIO 10M3	ESCALA 1:1
<b>CUERPO N°5</b>		
20193492	VILLARREAL SÁNCHEZ, FRANCE STEVE	FECHA: 18/09/2023
REVISADO POR:	JULIO CÉSAR TAFUR SOTELO	LÁMINA: A3



6	1	TUERCA HEXAGONAL M3 x 0.5	ANSI B18.2.4.2M	Steel, Mild
5	1	TORNILLO HEXAGONAL M3 x 16	AS 1110	Steel, Mild
4	4	TORNILLO HEXAGONAL M5 x 10	AS 1110	Steel, Mild
3	1	TAPA DE CAJA DE COMP. ELECTRÓNICOS ESTACIÓN DE CARGA		Steel, Mild, Welded
2	1	FUENTE SWITCHING 12 VDC		
1	1	CAJA DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS ESTACIÓN DE CARGA		Steel
IT	CANT	NOMBRE	NORMA	MATERIAL

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

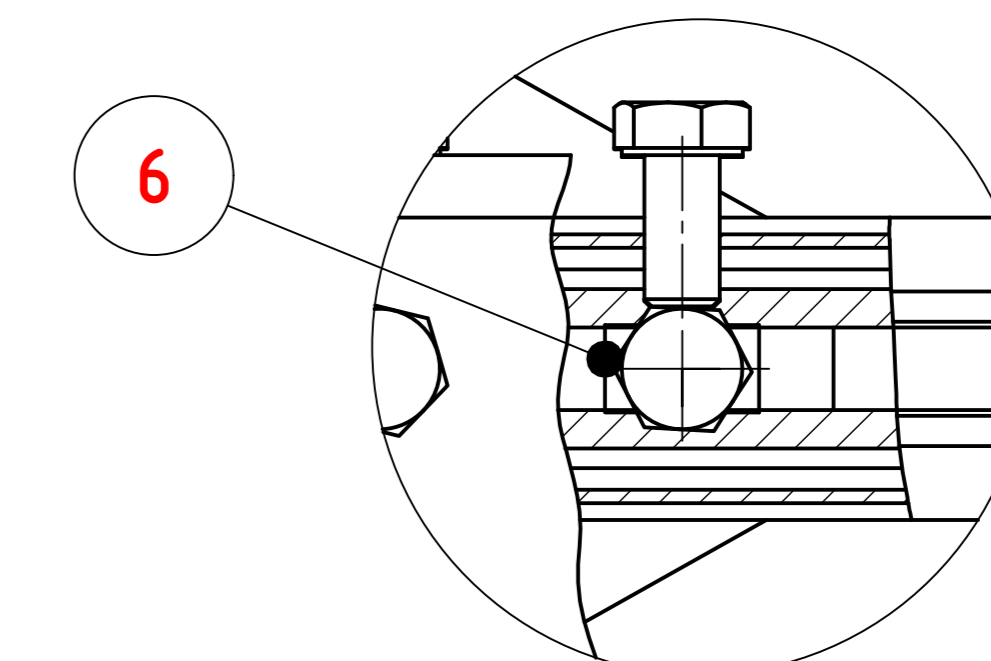
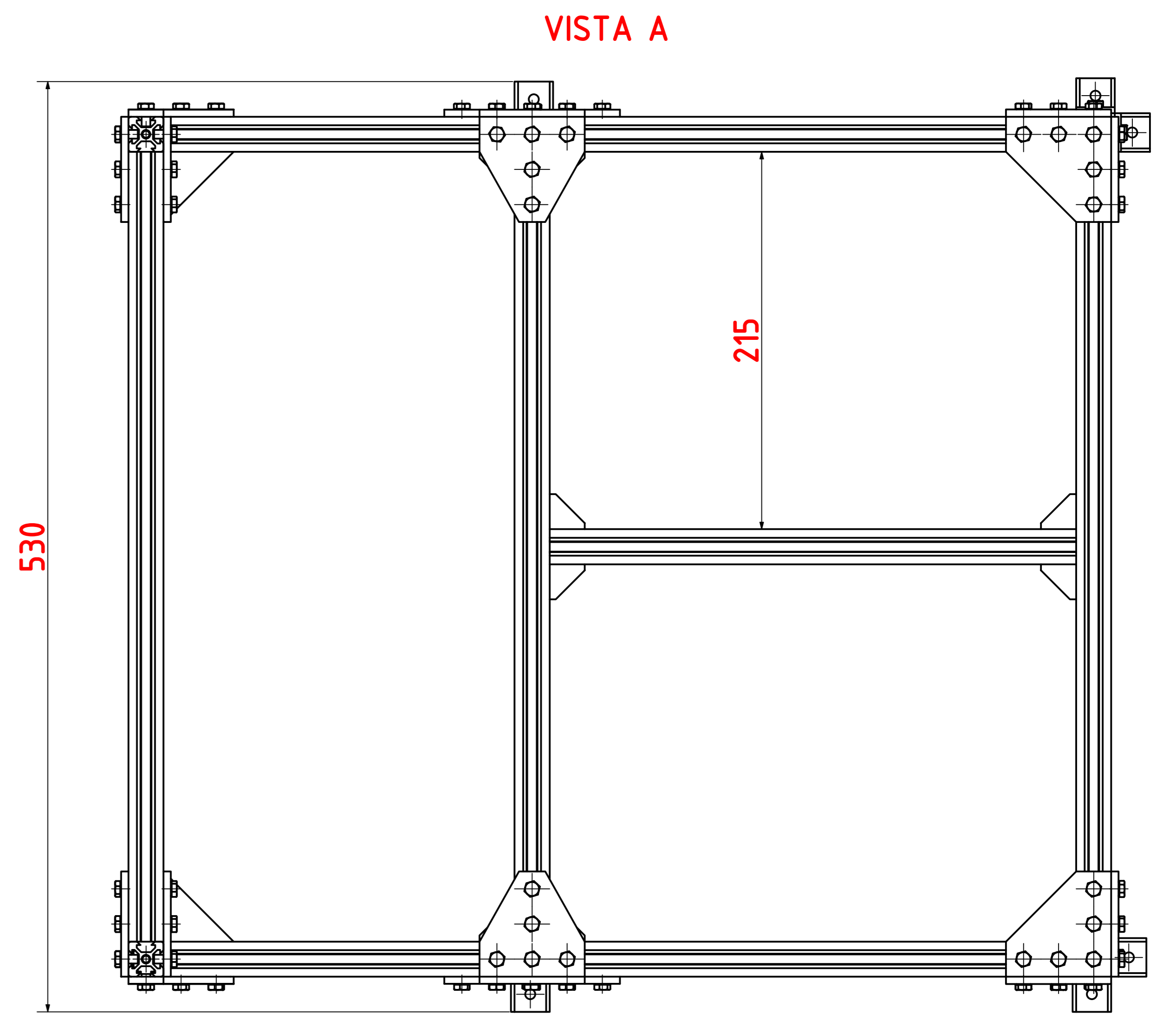
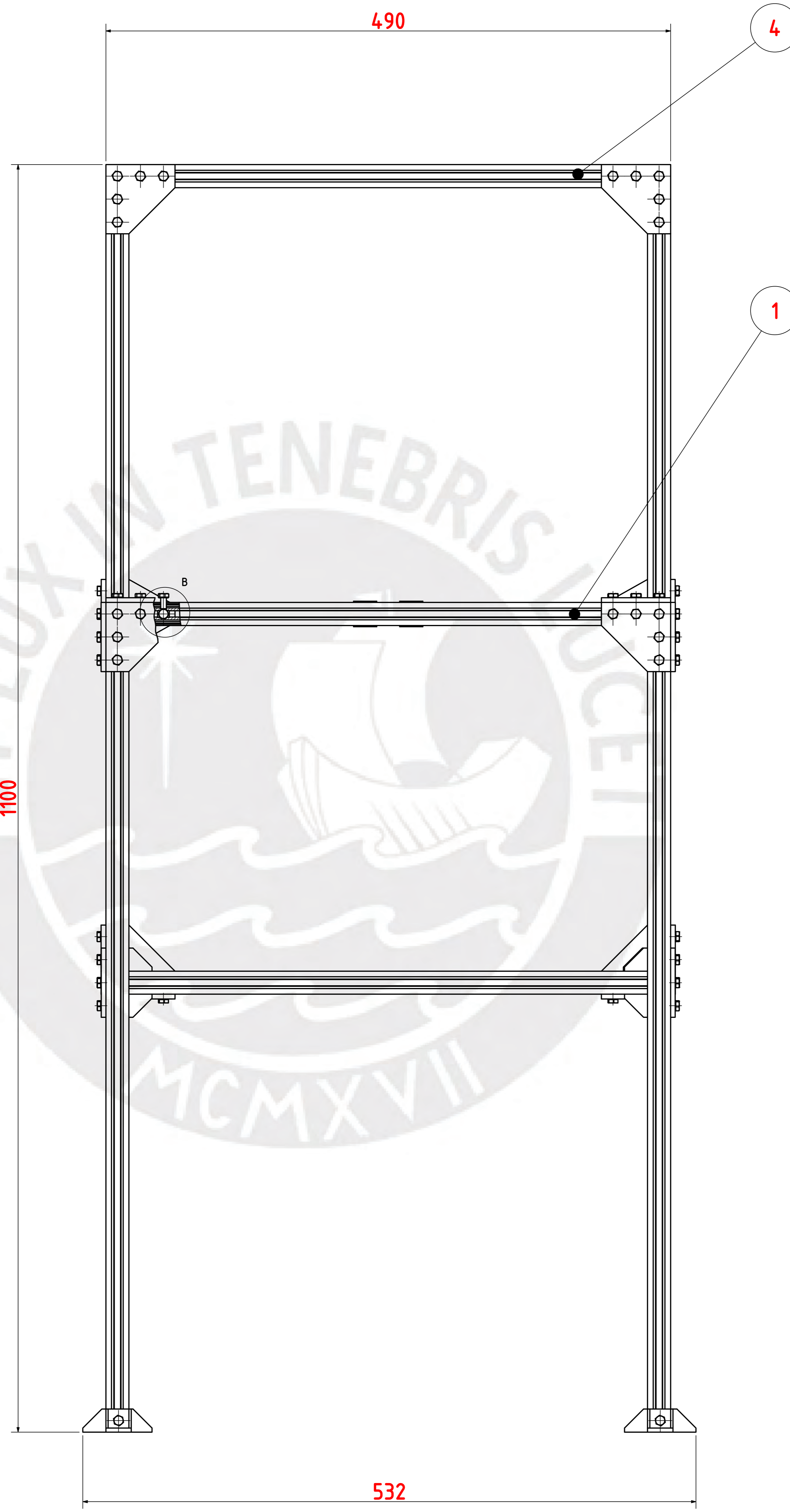
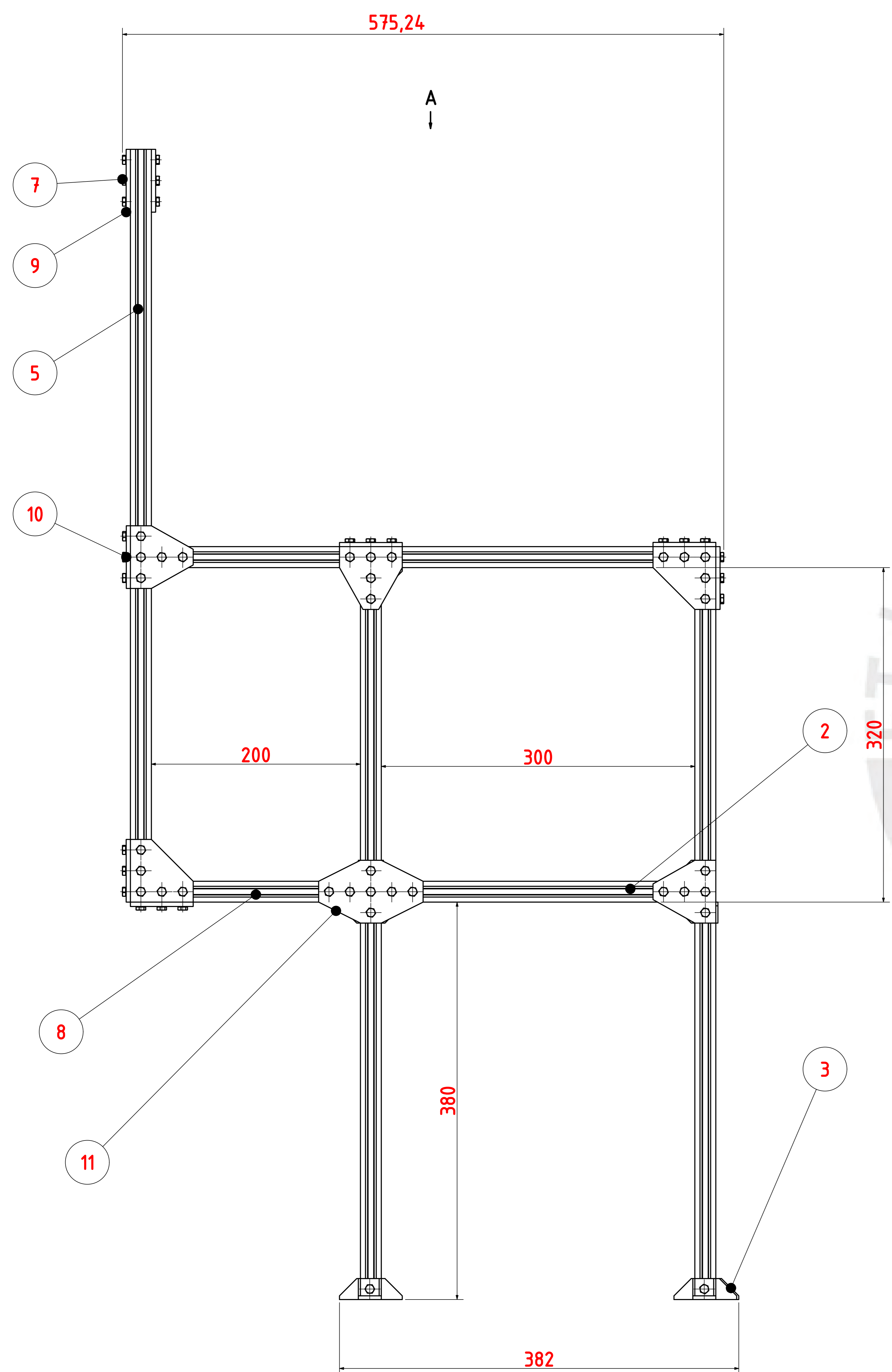
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TFC 2 - -HORARIO10M3	ESCALA
	<b>CAJA ELEC. ESTAC. DE CARGA</b>	<b>1:1</b>
20193492	VILLARREAL SÁNCHEZ, FRANCE STEVE	FECHA: 01/08/2024
REVISADO POR:	JULIO CÉSAR TAFUR SOTELO	LÁMINA: A3



18	4	TORNILLO HEXAGONAL M2 x 16	AS 1110	Steel, Mild
17	8	TORNILLO HEXAGONAL M3 x 16	AS 1110	Steel, Mild
16	1	CONVERTIDOR 12 - 24 VDC TBS1224C240Z		
15	1	INA219		
14	1	MÓDULO USB - TTL		
13	2	ROBOCLAW 2X15 A		
12	12	TORNILLO HEXAGONAL M3 x 12	AS 1110	Steel, Mild
11	6	TORNILLO HEXAGONAL M5 x 16	AS 1110	Steel, Mild
10	1	MÓDULO DE CARGA YX-1708		
9	1	SWITCH GENERAL		
8	8	TORNILLO HEXAGONAL M3 x 30	AS 1110	Steel, Mild
7	1	LM2596 DC-DC STEPDOWN		
6	1	RELÉ 12 VDC		
5	1	BATERÍA 12 VDC		
4	2	DRIVER TB6560		Generic
3	1	RASPBERRY PI 4B		
2	1	TAPA CAJA ELECTRÓNICA MANIPULADOR		Steel, Mild, Welded
1	1	CAJA ELECTRÓNICA MANIPULADOR		Steel, Mild, Welded
IT	CANT	NOMBRE	NORMA	MATERIAL

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

MÉTODO DE PROYECCIÓN	TFC 2 - -HORARIO10M3	ESCALA
	<b>ENSAMBLE CAJA ELECTRÓNICA MANIPULADOR</b>	1:2
20193492	VILLARREAL SÁNCHEZ, FRANCE STEVE	FECHA: 30/07/2024
REVISADO POR:	JULIO CÉSAR TAFUR SOTELO	LÁMINA: A3



DETALLE B  
ESCALA (2 : 1)

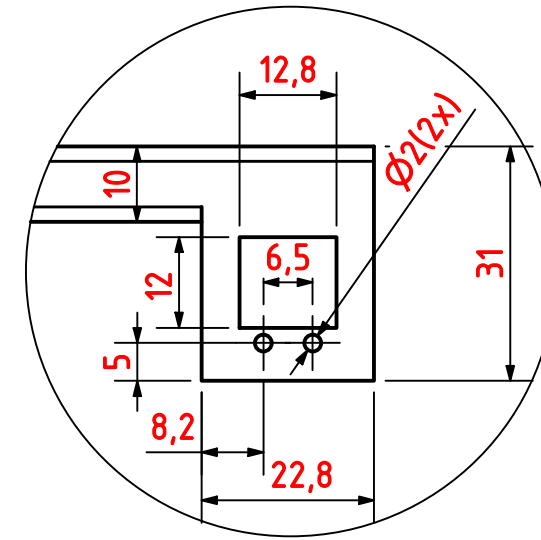
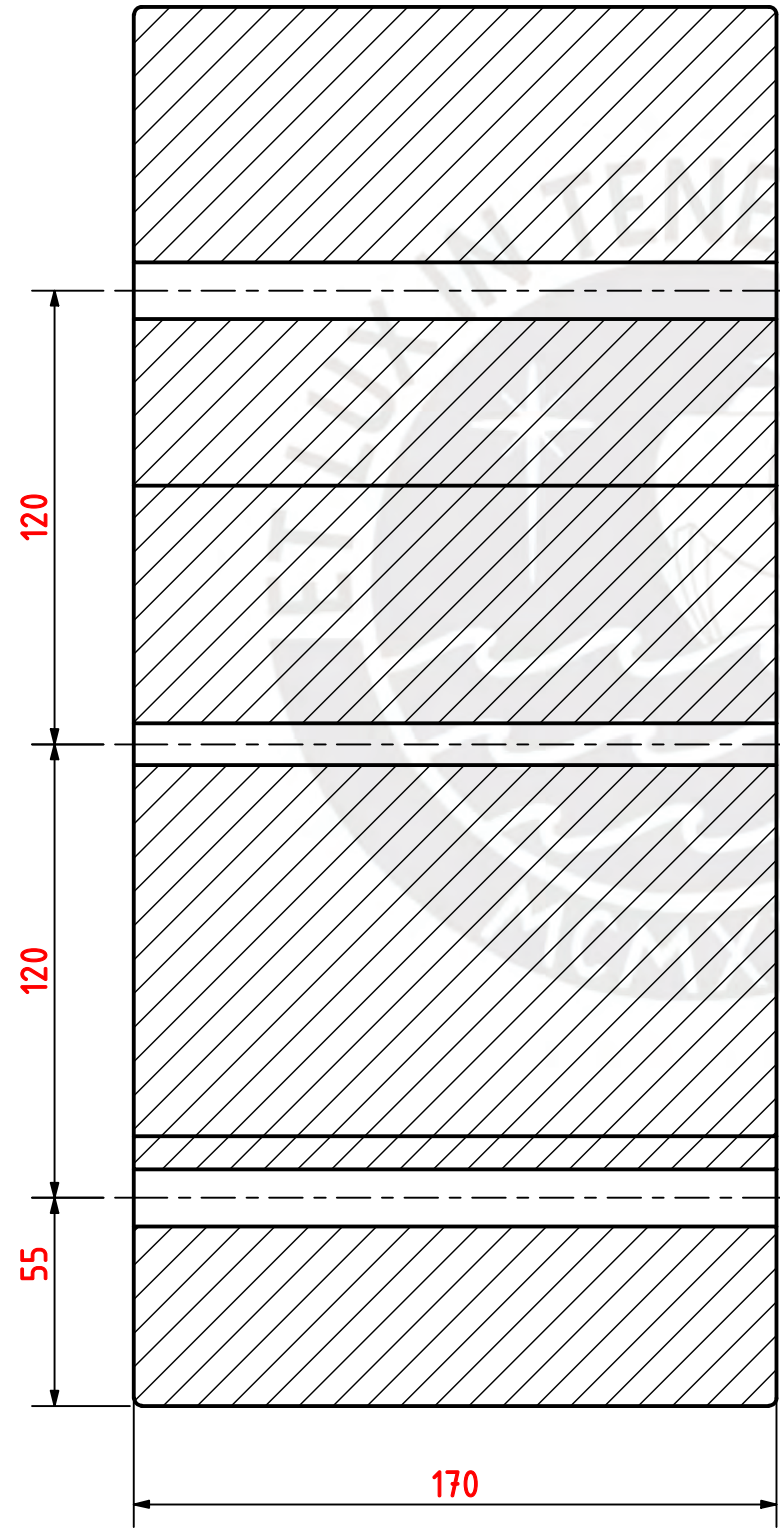
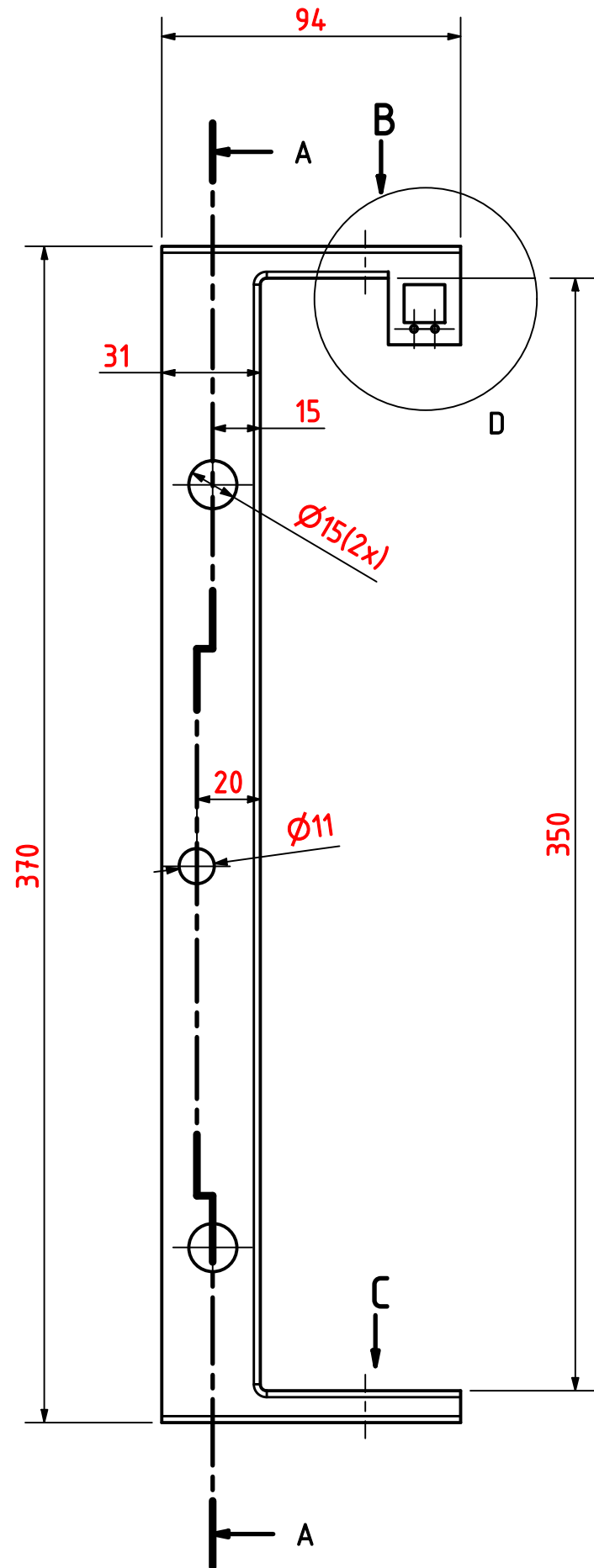
11	2	PLACA DE UNIÓN EN CRUZ V-SLOT 20x20		Aluminio 6063
10	10	PLACA DE UNIÓN EN T PARA V-SLOT 20x20		Aluminio 6063
9	16	PLACA DE UNIÓN EN TRIÁNGULO V-SLOT 20x20		Aluminio 6063
8	4	V-SLOT 20x20x150		Aluminio 6063
7	206	TORNILLO HEXAGONAL M5 x 10	AS 1110	Acero al carbono
6	206	TUERCA CABEZA MARTILLO DESLIZANTE M5 V-SLOT 20x20		Aluminio 6063
5	6	V-SLOT 20x20x800		Aluminio 6063
4	7	V-SLOT 20x20x460		Aluminio 6063
3	77	ÁNGULO DE ESQUINA DE 90° PARA V-SLOT 20x20		
2	5	V-SLOT 20x20x300		Aluminio 6063
1	2	V-SLOT 20x20x840		Aluminio 6063
IT	CANT	NOMBRE	NORMA	MATERIAL

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ING. MECATRONICA

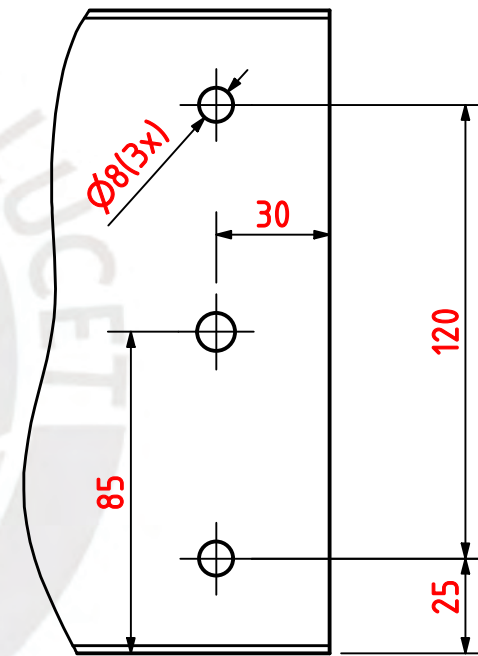
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TFC 2 - -HORARIO 09M3	ESCALA
	<b>ESTRUCTURA PRINCIPAL</b>	<b>1:2</b>
20193492	VILLARREAL SÁNCHEZ, FRANCE STEVE	FECHA: 15/11/2023
REVISADO POR:	JULIO CÉSAR TAFUR SOTELO	LÁMINA: A3

REDONDEOS NO INDICADOS R2

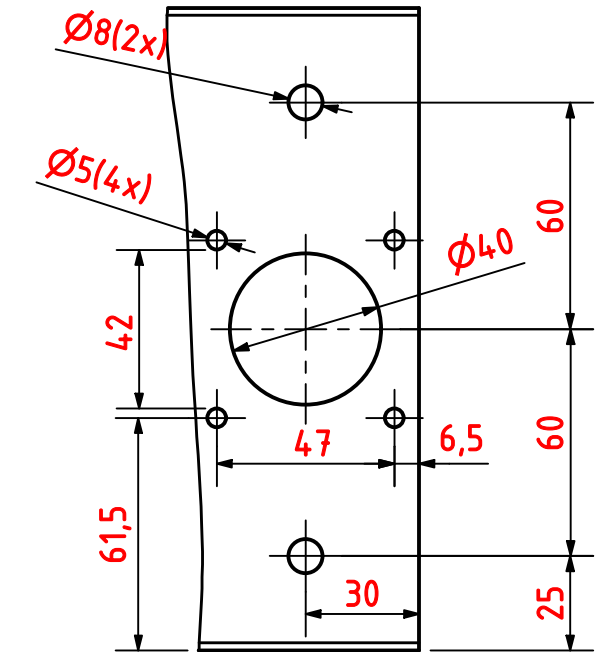
CORTE A-A



DETALLE D  
ESCALA (1 : 1)



VISTA C



VISTA B

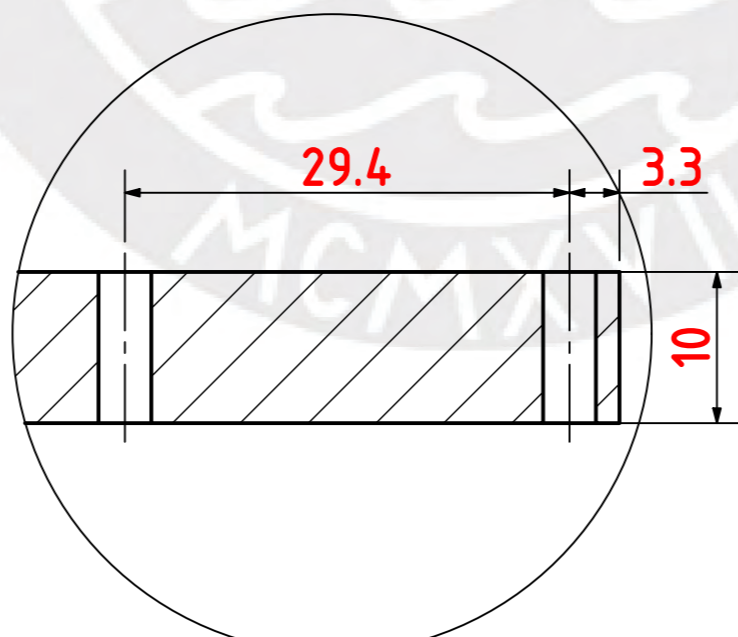
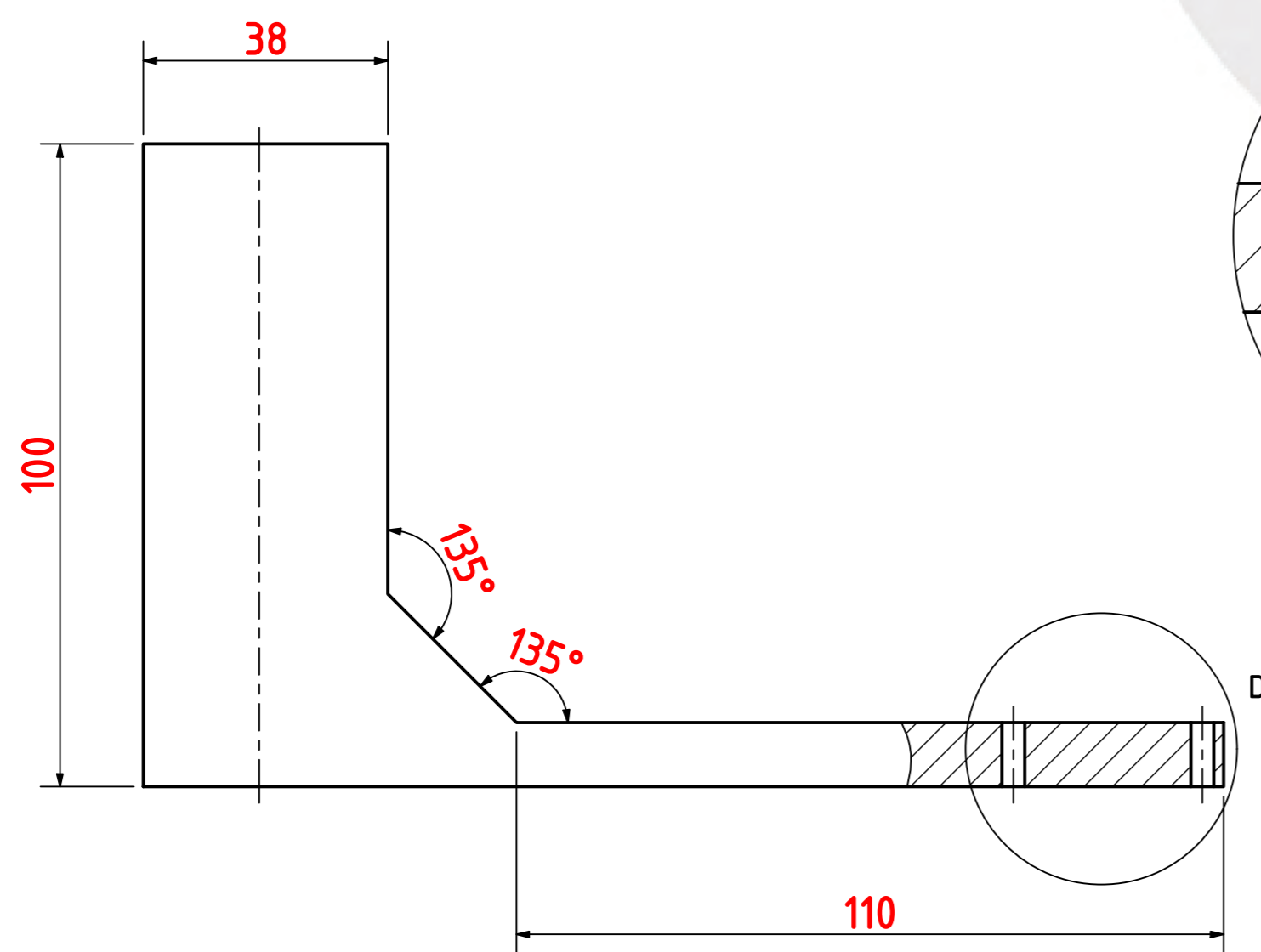
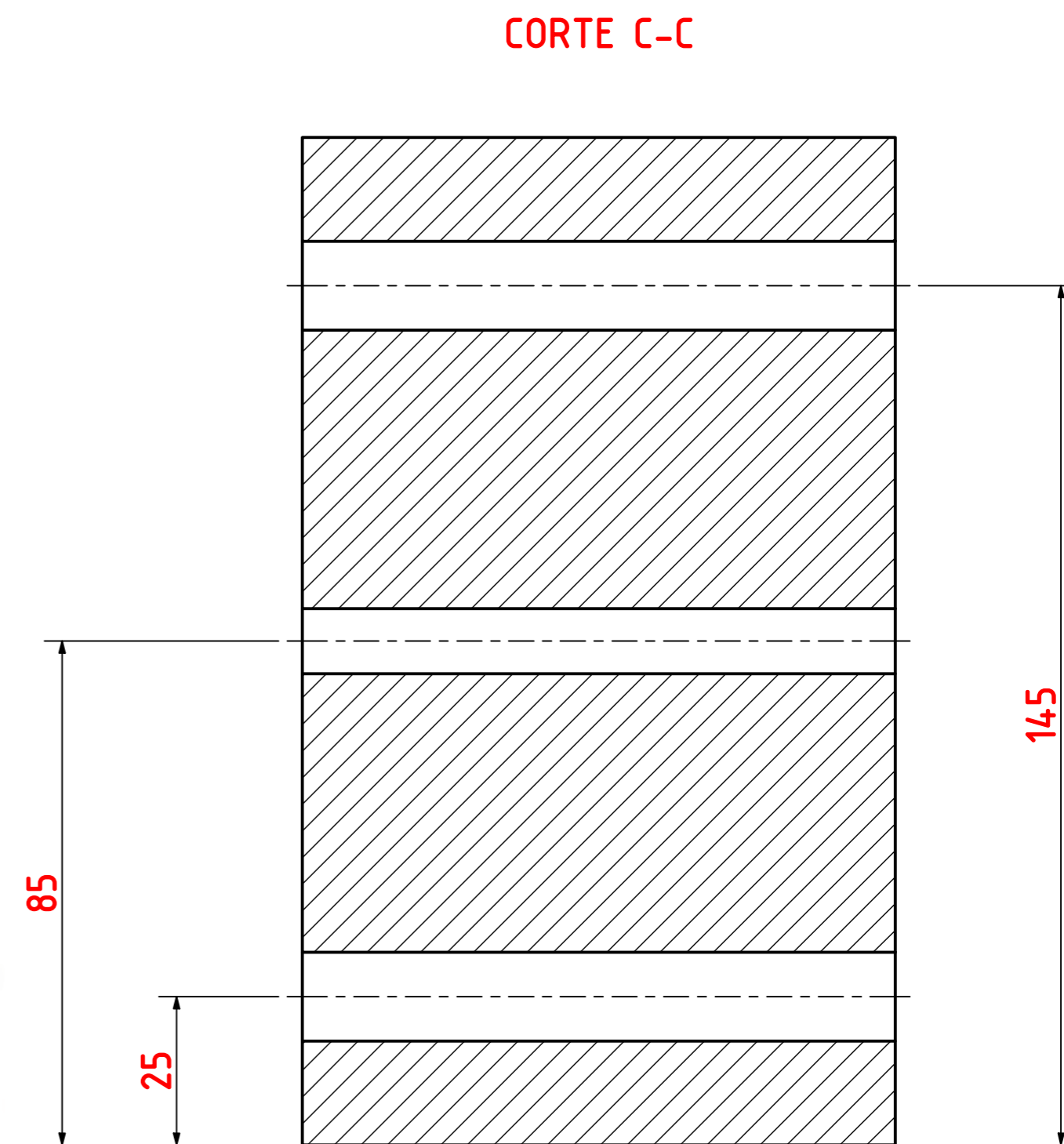
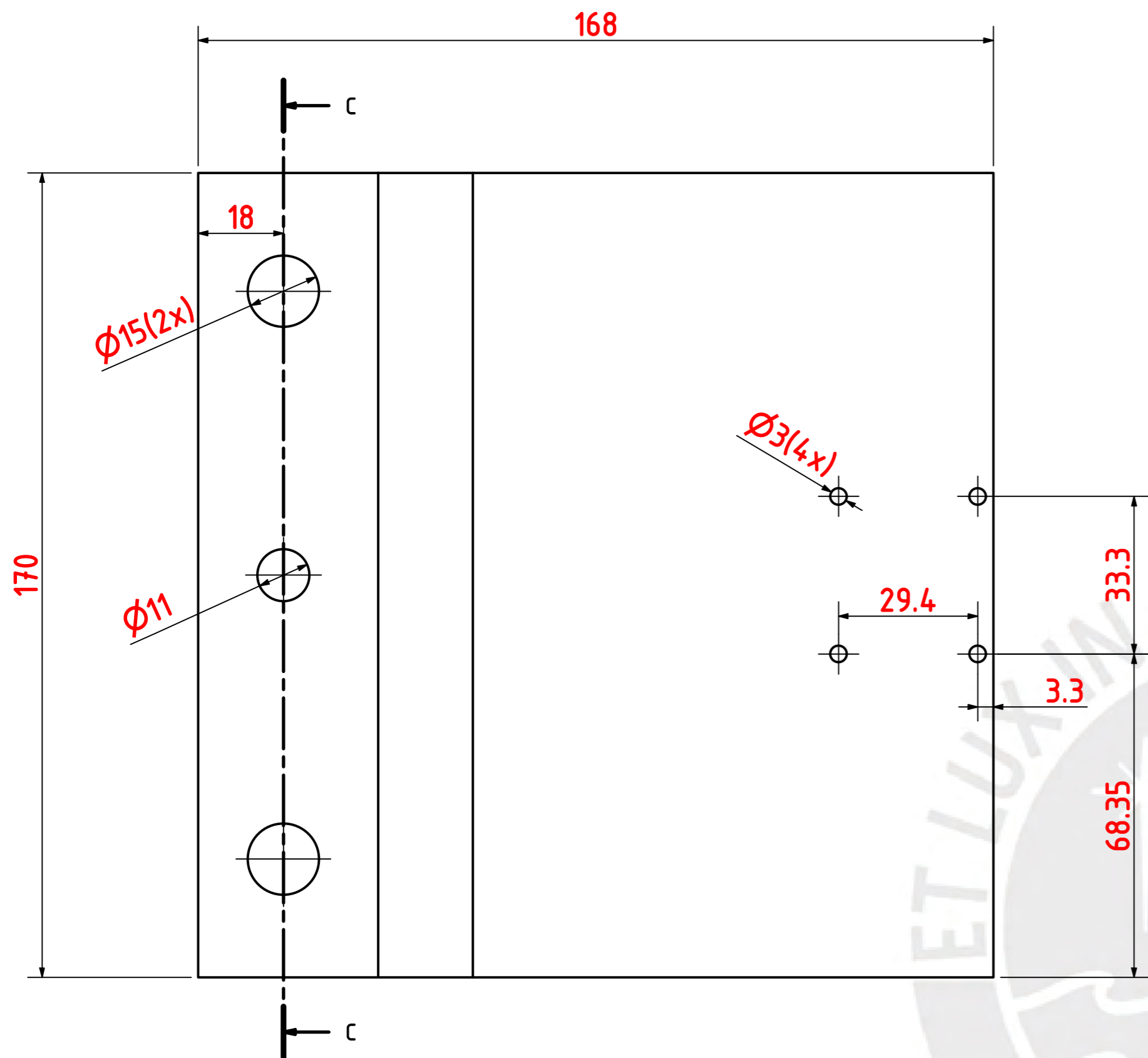
ACABADO SUPERFICIAL

TOLERANCIA GENERAL

MATERIAL

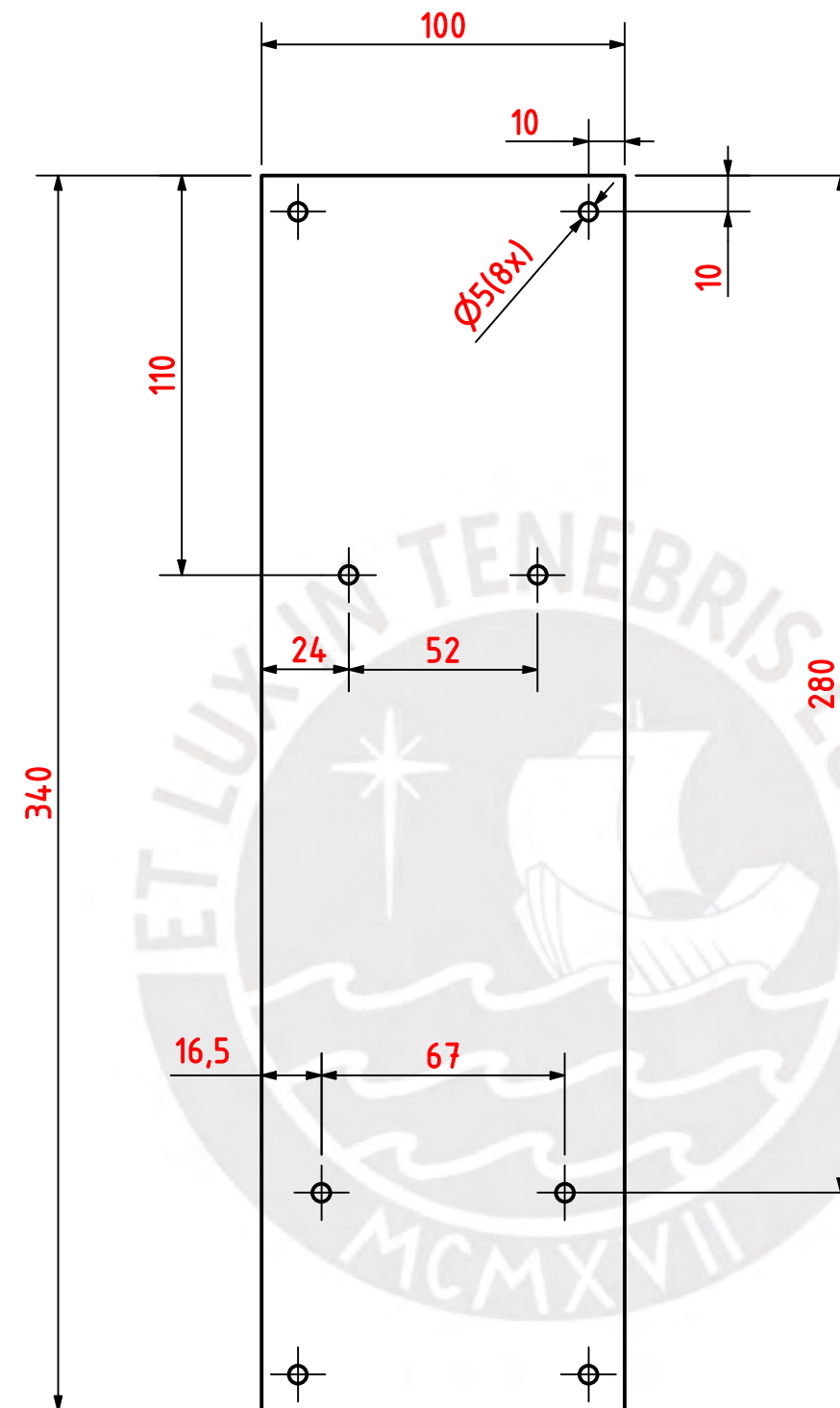
IMPRESIÓN DE PLA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TFC 2 - -HORARIO10M3	ESCALA
	PIEZA PARA TRASLACIÓN HORIZONTAL	1:2
20193492	VILLARREAL SANCHEZ, FRANCE STEVE	FECHA: 17/09/2023
REVISADO POR:	JULIO CESAR TAFUR SOTELO	LÁMINA: A3



DETALLE D  
ESCALA (2 : 1)

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC 2 - HORARIO 10M3 <b>PIEZA PARA TRASLACIÓN VERTICAL</b>	ESCALA <b>1:1</b>
20193492	VILLARREAL SÁNCHEZ, FRANCE STEVE	FECHA: 30/07/2024
REVISADO POR:	JULIO CÉSAR TAFUR SOTELO	LÁMINA: A3



ESPESOR 5

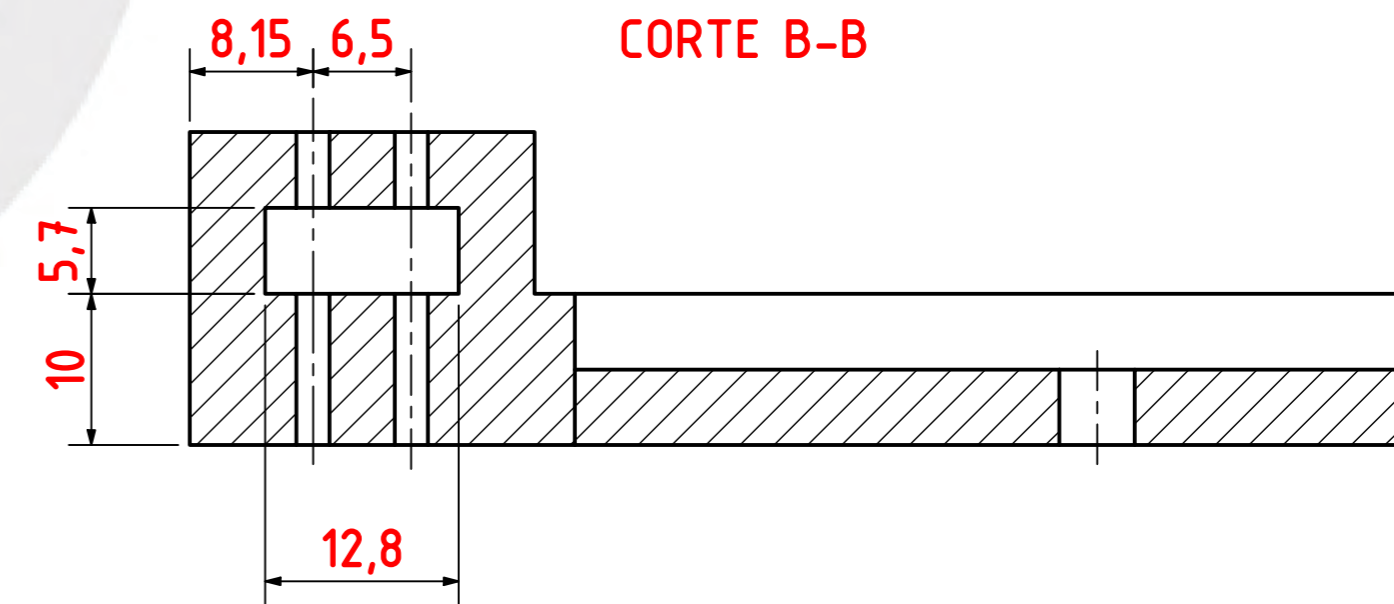
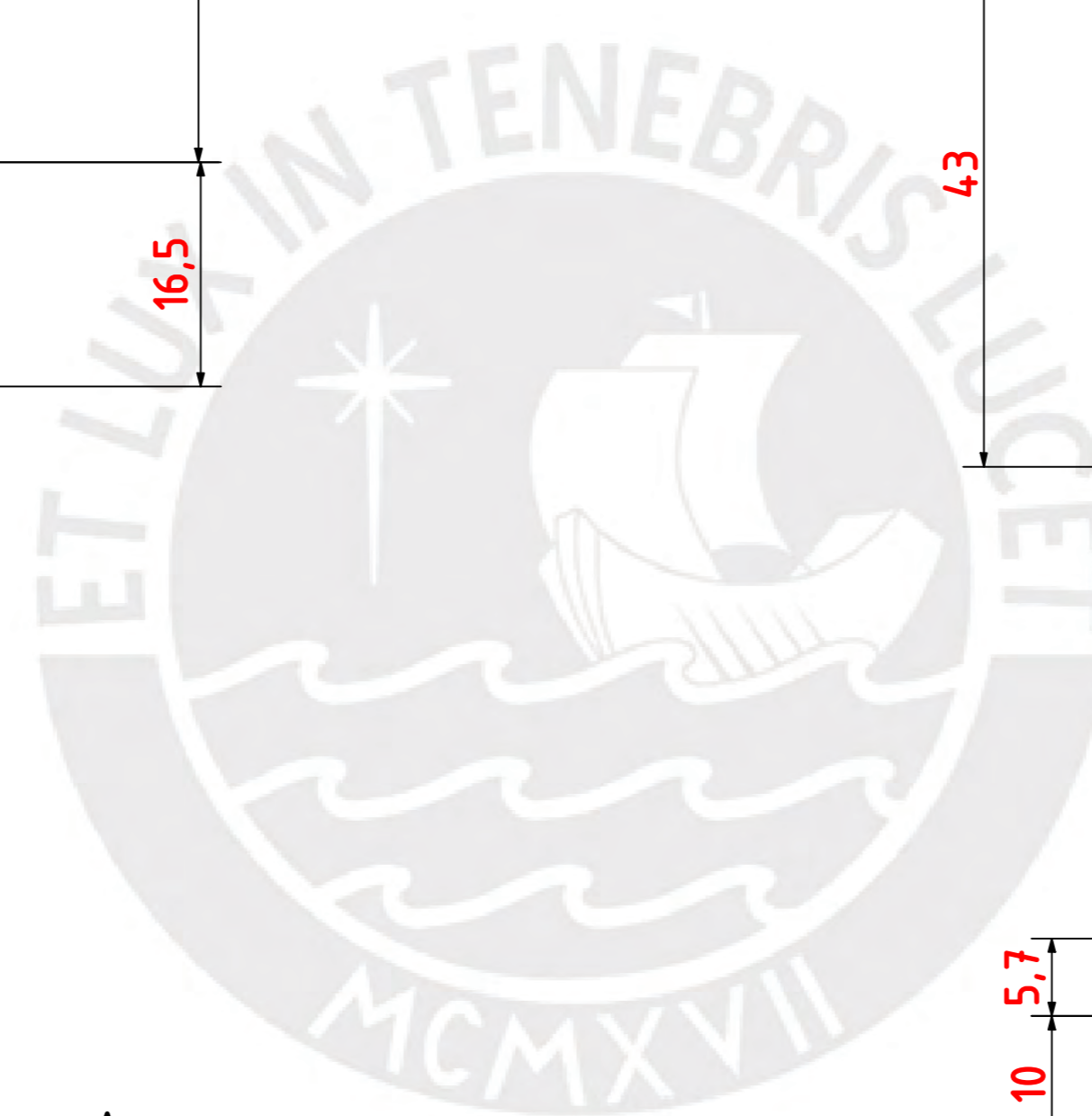
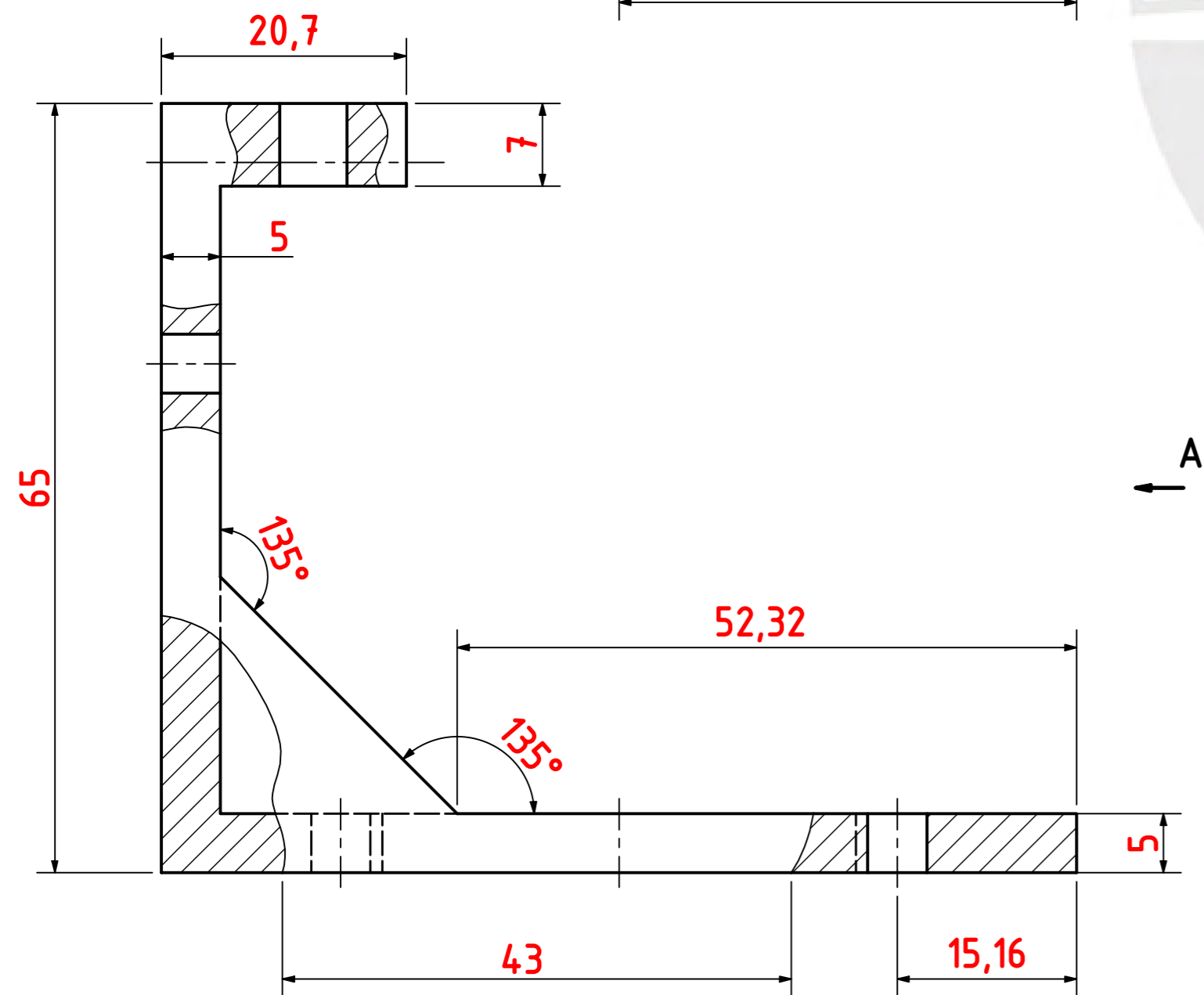
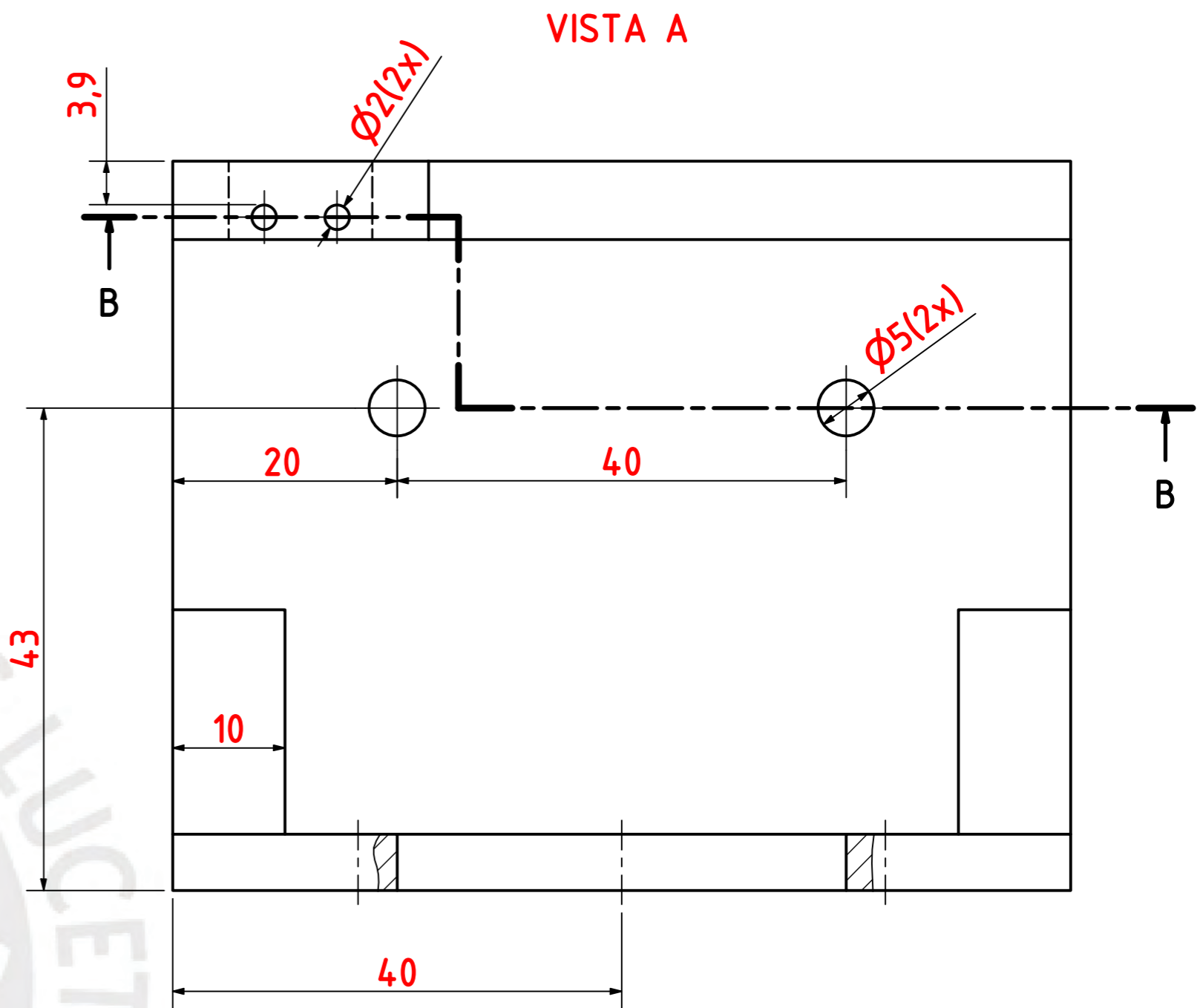
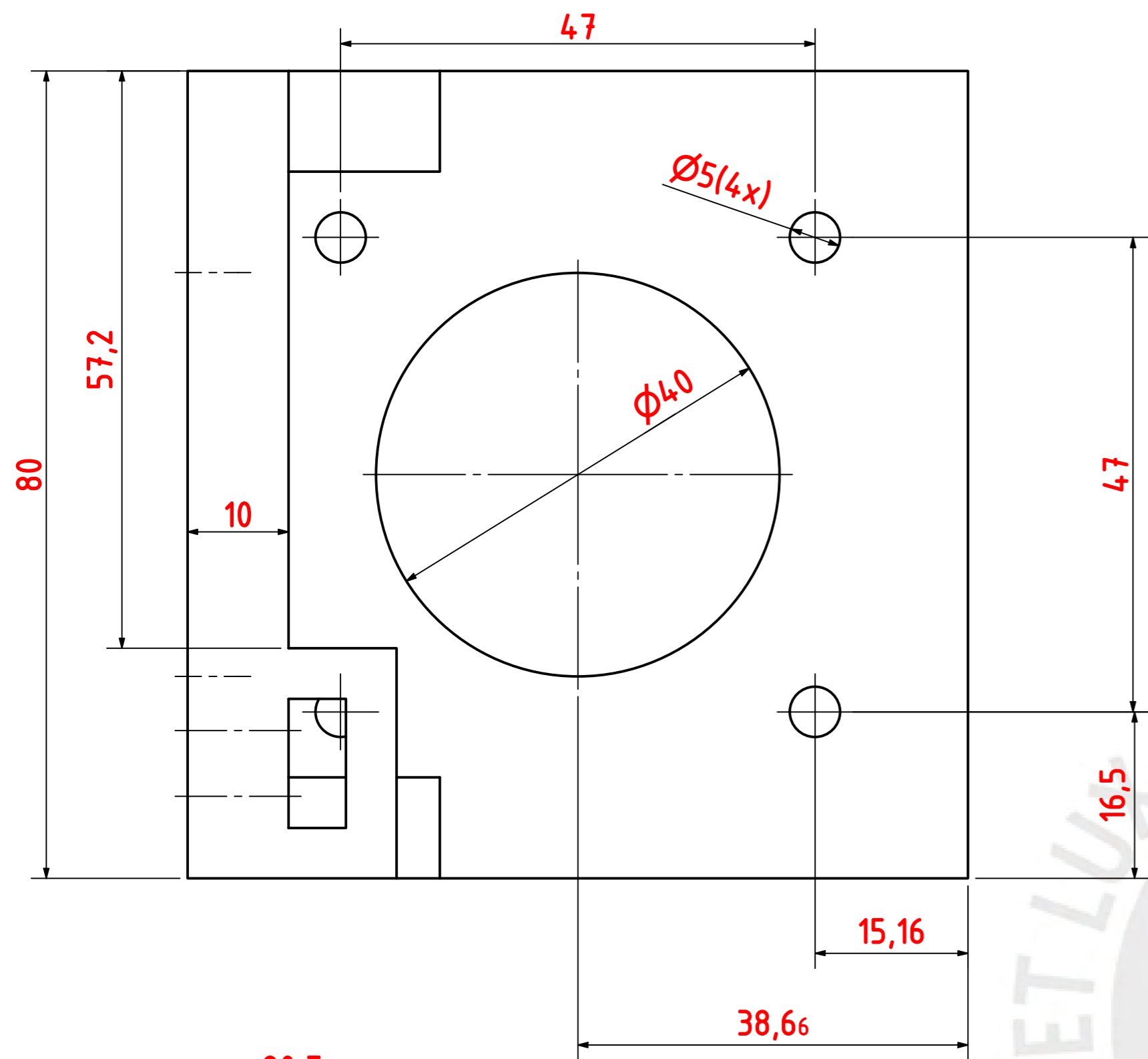
ACABADO SUPERFICIAL

TOLERANCIA GENERAL

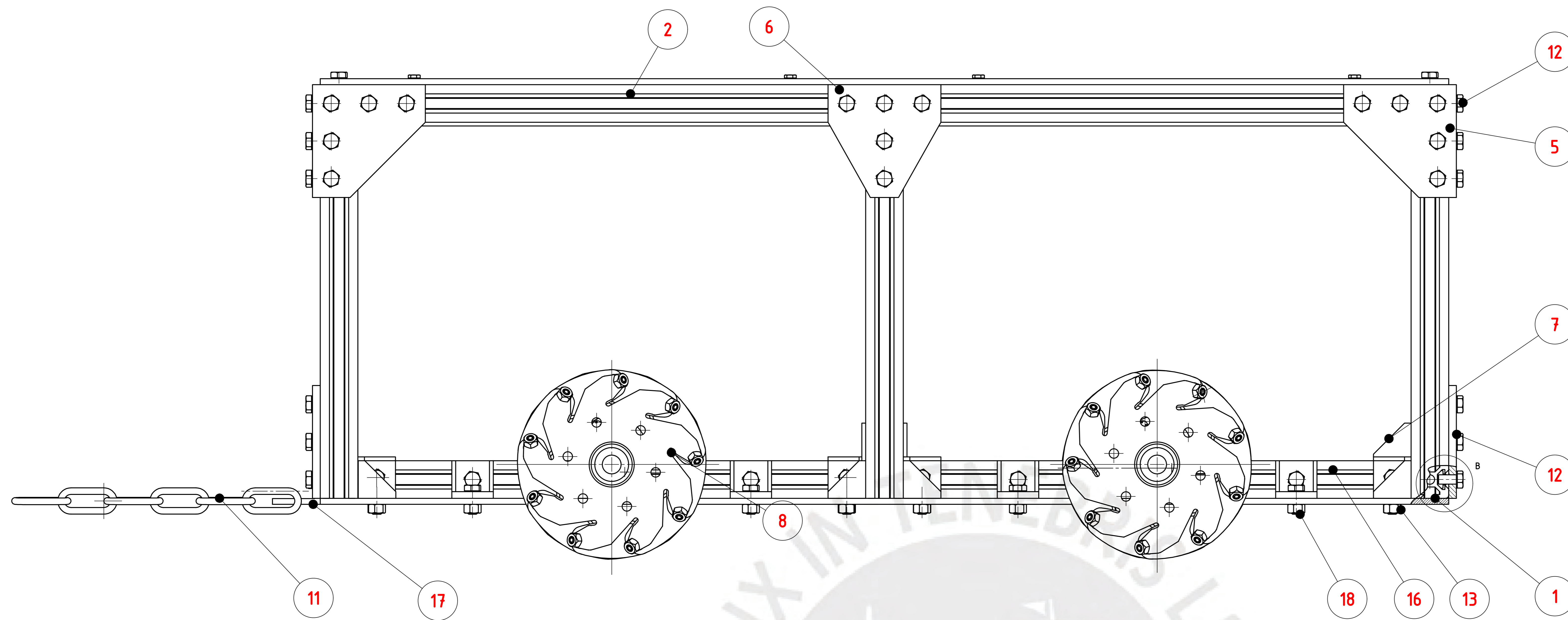
MATERIAL

MDF

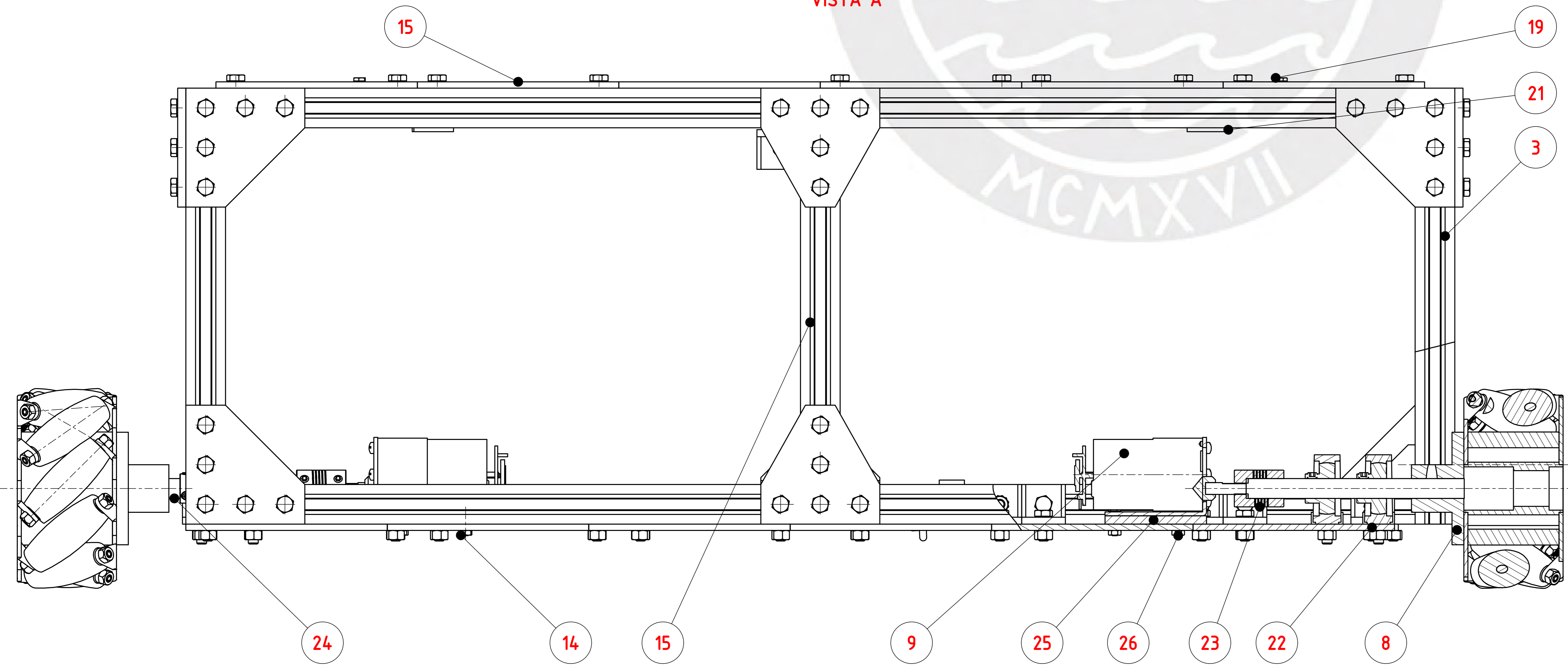
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TFC 2 - -HORARIO10M3	ESCALA
	PLATAFORMA	1:2
20193492	VILLARREAL SÁNCHEZ, FRANCE STEVE	FECHA: 17/09/2023
REVISADO POR:	JULIO CÉSAR TAFUR SOTELO	LÁMINA: A3



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC 2 - HORARIO 10M3	ESCALA <b>2:1</b>
20193492	VILLARREAL SÁNCHEZ, FRANCE STEVE	FECHA: 30/07/2024
REVISADO POR:	JULIO CÉSAR TAFUR SOTELO	LÁMINA: A2



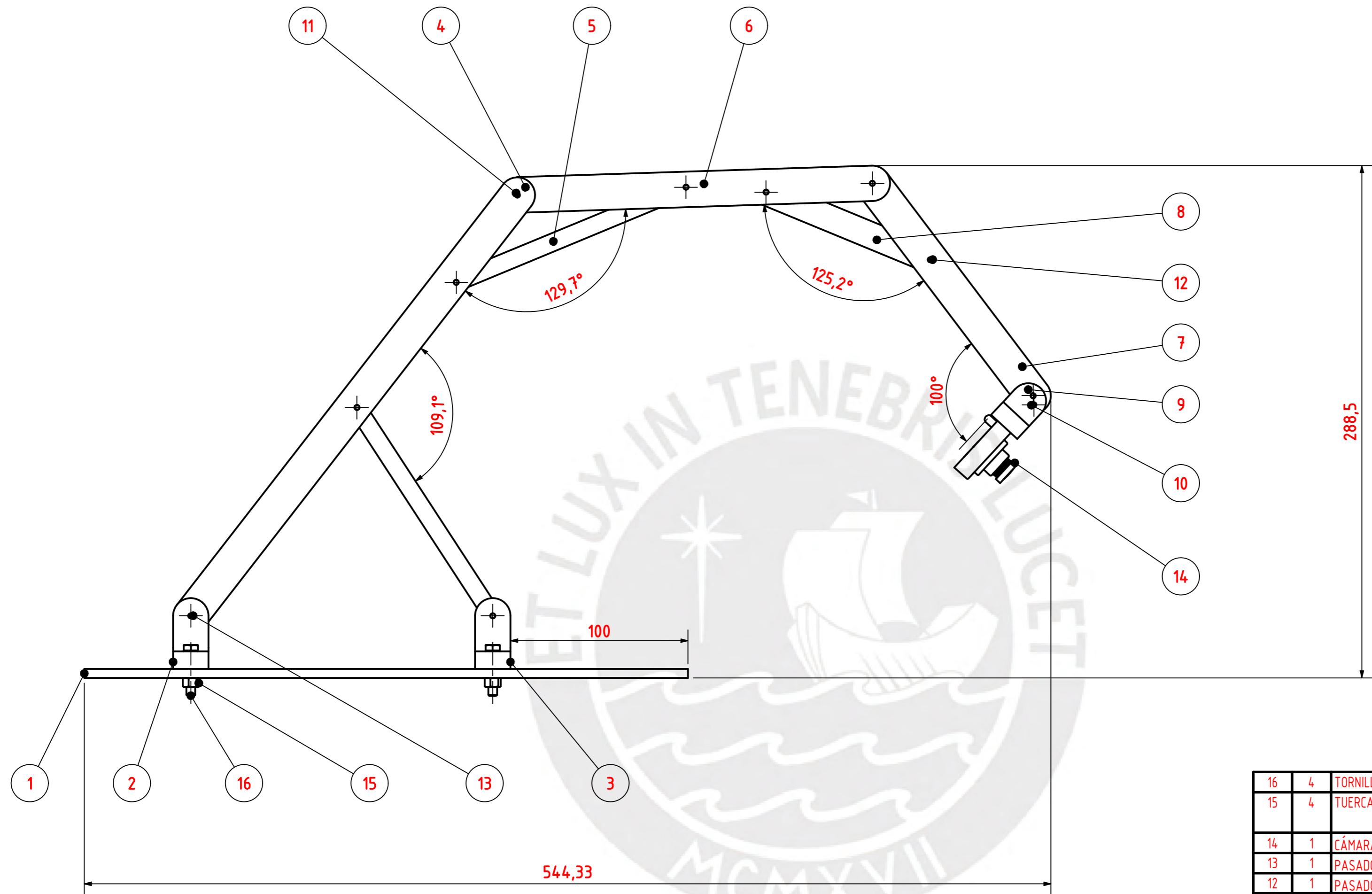
VISTA A



26	16	TORNILLO HEXAGONAL - M3 x 12	AS 1110	Steel, Mild
25	4	BASE IMPRESA MOTOR DC		Steel, Mild, Welded
24	4	EJE 10mm		Steel, Mild, Welded
23	4	ACOPLE FLEXIBLE 6 - 10 mm		
22	8	SOPORTE DE PIE CON RODAMIENTO INTERNO		
21	2	CANAL EN U		Steel, Mild, Welded
20	142	TUERCA CABEZA MARTILLO DESLIZANTE (Ø5) PARA V-SLOT 20x20		Смазь
19	8	TORNILLO HEXAGONAL M3 x 12	AS 1110	
18	70	TORNILLO HEXAGONAL M5 x 12	AS 1110	Steel, Mild
17	1	ÁNGULO DE 90°		Aluminio 6061
16	2	V-SLOT 20x20x270		Generic
15	3	V-SLOT 20x20 x180		Generic
14	23	TUERCA HEXAGONAL M3	AS 1112	Steel, Mild
13	68	TUERCA HEXAGONAL M5	AS 1112	Steel, Mild
12	146	TORNILLO HEXAGONAL M5 x 10	AS 1110	
11	1	CADENA		Aluminio
10	2	Platina 5"x1/16"x600mm		Aluminio
9	4	MOTOR DC + SOPORTE + ENCODER MAGNÉTICO		
8	4	RUEDA MECANUM 100 + ACOUPLE		Aluminio
7	69	ÁNGULO DE ESQUINA DE 90° PARA V-SLOT 20 x 20		Aluminio
6	6	PLACA DE UNIÓN EN T V-SLOT 20x20		Aluminio
5	12	PLACA DE UNIÓN EN TRIÁNGULO V-SLOT 20x20		Aluminio
4	1	V-SLOT 20x20x560		Aluminio 6063
3	6	V-SLOT 20x20x150		Aluminio 6063
2	7	V-SLOT 20x20x600		Aluminio 6063
1	12	PLATINA 4"x1/8"x100		Aluminio 6061
IT	CANT	NOMBRE	NORMA	MATERIAL

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

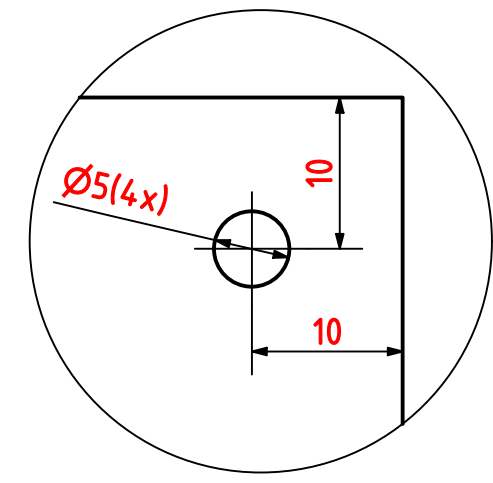
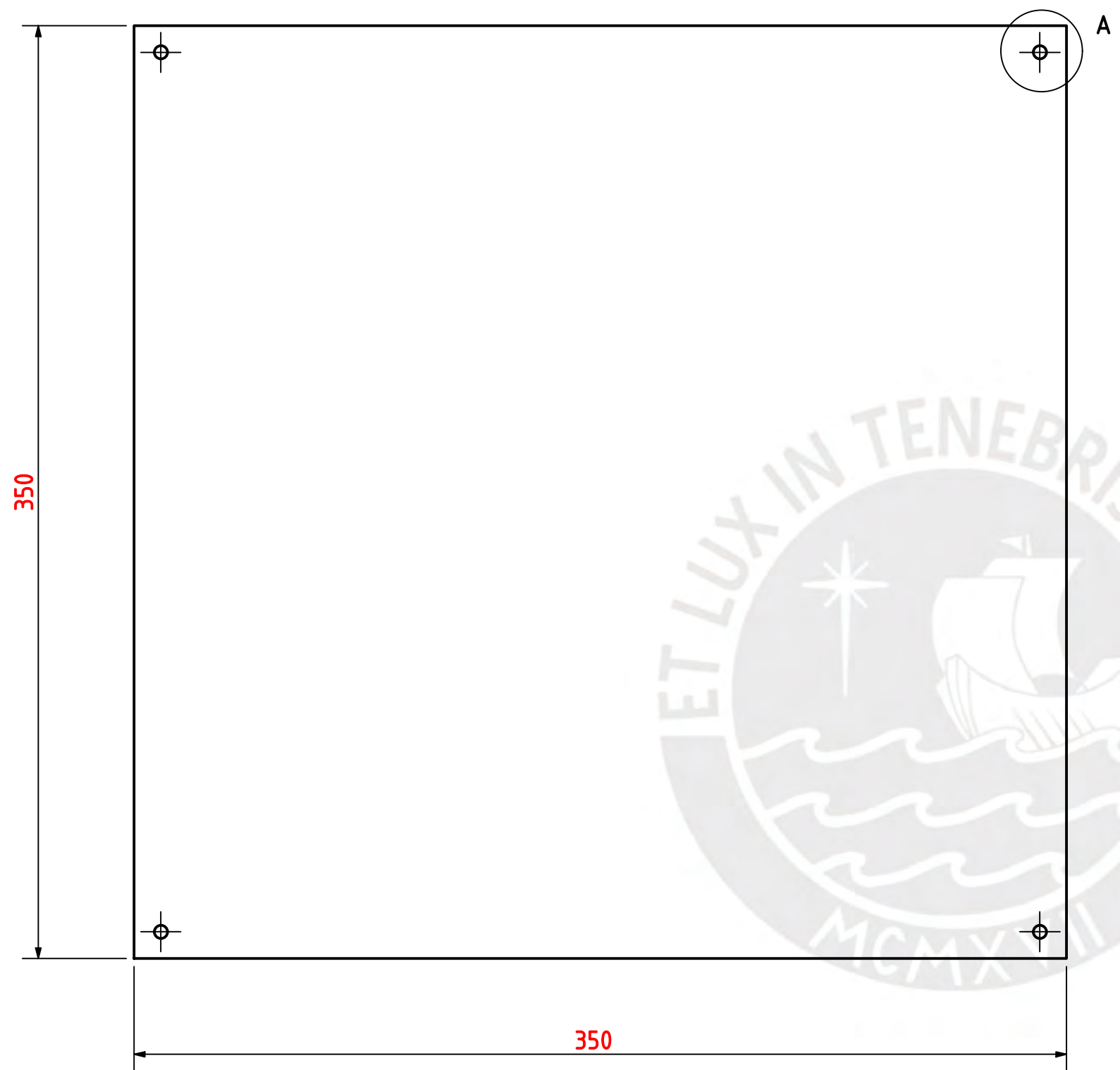
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TFC 2 - -HORARIO 10M3	ESCALA
	<b>BASE MÓVIL</b>	<b>1:1</b>
20193492	VILLARREAL SÁNCHEZ, FRANCE STEVE	FECHA: 15/11/2023
REVISADO POR:	JULIO CÉSAR TAFUR SOTELO	LÁMINA: A0



16	4	TORNILLO HEXAGONAL M5 x 25	AS 1110	
15	4	TUERCA M5x0.8	ANSI B18.2.4.2M	
14	1	CÁMARA USB		
13	1	PASADOR CILÍNDRICO 3 x 45	ISO 2338	ACERO INOXIDABLE
12	1	PASADOR CILÍNDRICO 3 x 12	ISO 2338	ACERO INOXIDABLE
11	4	PASADOR CILÍNDRICO 3 x 30	ISO 2338	ACERO INOXIDABLE
10	5	PASADOR CILÍNDRICO 3 x 20	ISO 2338	ACERO INOXIDABLE
9	1	APOYO CÁMARA		PLÁSTICO PLA
8	1	CUERPO N°5		PLÁSTICO PLA
7	1	CUERPO N°4		PLÁSTICO PLA
6	1	CUERPO N°3		PLÁSTICO PLA
5	2	CUERPO N°2		PLÁSTICO PLA
4	1	CUERPO N°1		PLÁSTICO PLA
3	1	APOYO N°2		PLÁSTICO PLA
2	1	APOYO N°1		PLÁSTICO PLA
1	1	Plataforma		PLÁSTICO PLA
IT	CANT	NOMBRE	NORMA	MATERIAL

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

MÉTODO DE PROYECCIÓN	TFC 2 - -HORARIO 10M3	ESCALA
	<b>SUBENSAMBLE ESTRUCTURA CÁMARA</b>	1:2
20193492	VILLARREAL SÁNCHEZ FRANCE STEVE	FECHA: 30/07/2024
REVISADO POR:	JULIO CÉSAR TAFUR SOTELO	LÁMINA: A3

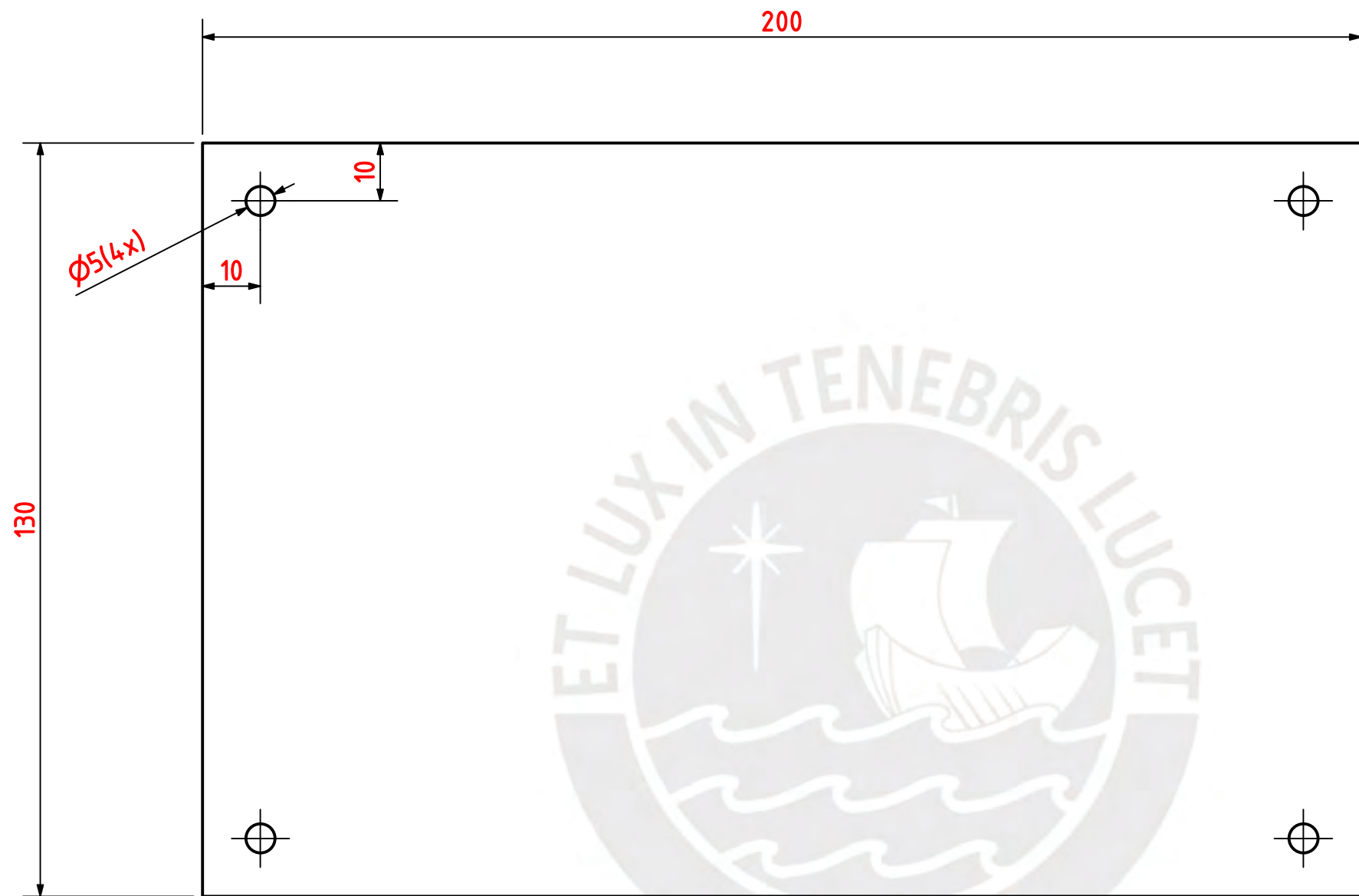


DETALLE A  
ESCALA (2 : 1)

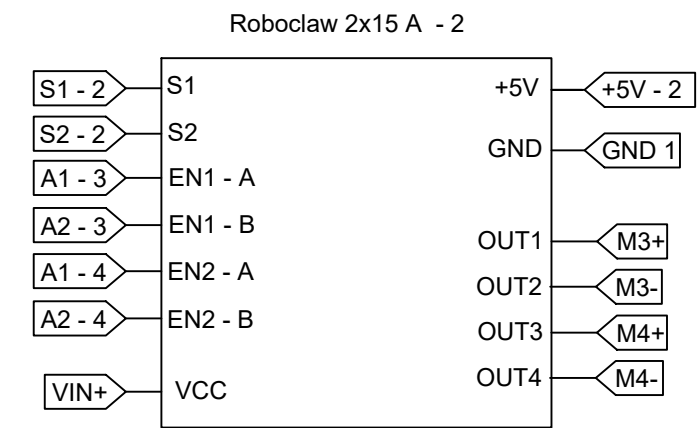
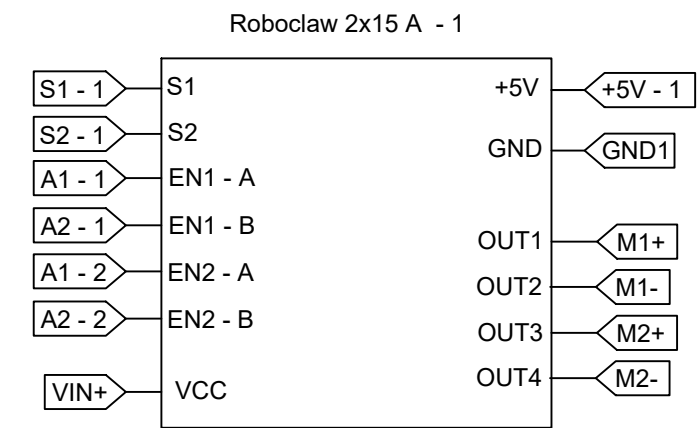
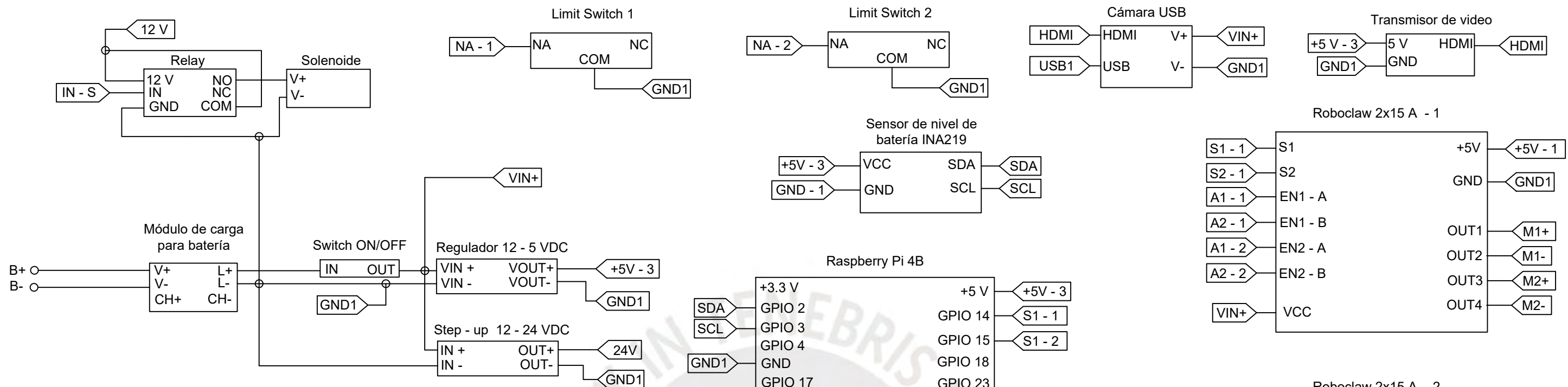
ESPESOR 5

ACABADO SUPERFICIAL TOLERANCIA GENERAL MATERIAL  
IMPRESIÓN DE PLA

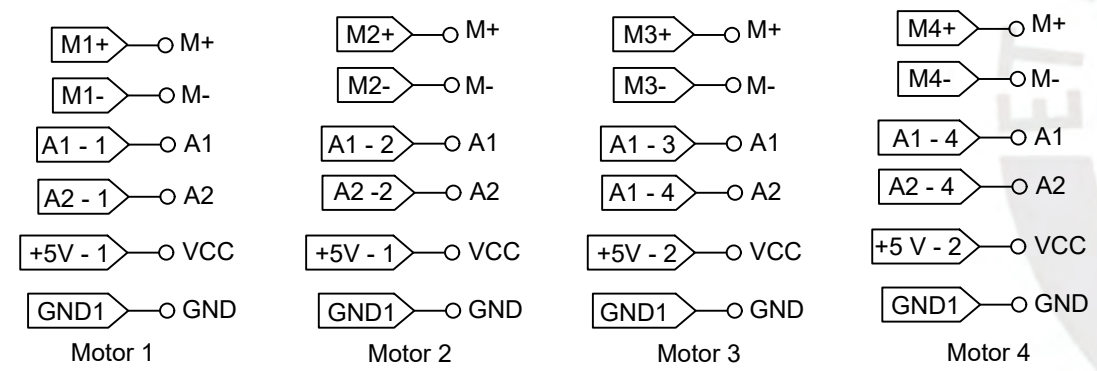
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ING. MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC 2 - -HORARIO10M3 <b>TAPA CAJA ELECTRÓNICA          MANIPULADOR</b>	ESCALA <b>1:2</b>
20193492	VILLARREAL SÁNCHEZ, FRANCE STEVE	FECHA: 17/09/2023
REVISADO POR:	JULIO CESAR TAFUR SOTELO	LÁMINA: A3



<b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ</b> FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ING. MECATRÓNICA		
<b>MÉTODO DE PROYECCIÓN</b> 	TFC 2 - -HORARIO10M3 <b>TAPA DE CAJA ELEC. EST.          DE CARGA</b>	ESCALA <b>1:1</b>
20193492	VILLARREAL SÁNCHEZ, FRANCE STEVE	FECHA: <b>01/08/2024</b>
REVISADO POR:	JULIO CÉSAR TAFUR SOTELO	LÁMINA: <b>A3</b>



**Conexión con motores DC**



**Conexión con motores PaP**

