

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**DISEÑO DE SISTEMA CON BRAZO ROBÓTICO PARA REALIZAR  
PIPETEO Y MANIPULACIÓN DE MUESTRAS EN EXPERIMENTOS  
DE SENSIBILIDAD A FÁRMACOS CON BACTERIA  
MYCOBACTERIUM TUBERCULOSIS**

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

**AUTOR:**

Santiago Alexander Baldeon Pozo

**ASESOR:**

Roberto Sumiyoshi Furukawa Fukuda

Lima, 2026

### Informe de Similitud

Yo, Roberto Sumiyoshi Furukawa Fukuda, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado

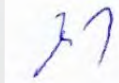
DISEÑO DE SISTEMA CON BRAZO ROBÓTICO PARA REALIZAR PIPETEO Y MANIPULACIÓN DE MUESTRAS EN EXPERIMENTOS DE SENSIBILIDAD A FÁRMACOS CON BACTERIA MYCOBACTERIUM TUBERCULOSIS,

del autor Santiago Alexander Baldeon Pozo,

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 17%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 14/02/2026.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima 14/02/2026

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: Furukawa Fukuda, Roberto Sumiyoshi	
DNI: 41787019	Firma 
ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0003-0514-1817">https://orcid.org/0000-0003-0514-1817</a>	

## DEDICATORIA

*A mi madre, por todo su amor, confianza e inspiración que me han brindado para alcanzar este gran logro.*

*A mi novia, por su paciencia, amor y apoyo incondicional y siempre poder convertir un día malo en un día bueno.*

*A mis abuelos, por educarme y apoyarme en cada decisión que he tomado.*

*A mi asesor Msc. Roberto Furukawa por sus recomendaciones cada vez que tuve alguna pregunta y guiarme en la dirección correcta a lo largo del proceso de la elaboración del trabajo de tesis.*

## RESUMEN

La tuberculosis multirresistente (TB-MDR) representa un grave problema de salud pública a nivel global, exacerbado por el incremento de variantes resistentes a antibióticos. En Perú, la alta prevalencia de casos ha generado una urgente necesidad de sistemas seguros y eficaces para la manipulación y experimentación con *Mycobacterium tuberculosis*, garantizando la seguridad del personal que efectúa las pruebas.

Con el objetivo de aportar en la solución de esta problemática, la presente tesis trata sobre el diseño de un sistema mecatrónico que emplea un brazo robótico para la manipulación de muestras y el pipeteo automático a placas de Petri de muestras en experimentos de sensibilidad a fármacos de la bacteria tuberculosis. El desarrollo se basó en la metodología VDI 2206, que promueve una integración flexible y retroalimentación constante en el diseño. El sistema incluye un brazo robótico con gripper especializado para manejar tubos y placas de Petri de manera precisa. Además, incluye una estación de pipeteo automatizada para realizar la siembra de muestras minimizando los errores. Finalmente, los componentes se albergan dentro de una cabina de bioseguridad clase II.

Los resultados preliminares obtenidos mediante simulaciones y cálculos indican que el sistema cumple con los requerimientos establecidos, garantizando precisión en el pipeteo y manipulación segura. Se observó una alta eficiencia en la automatización de tareas repetitivas y una significativa reducción en el riesgo de contagio para los operarios. El diseño integra una lógica de control robusta, materiales resistentes a la exposición bacteriana y una interfaz eficiente al usuario.

En conclusión, este sistema representa una solución innovadora y escalable para laboratorios que manejan patógenos peligrosos. Su implementación no solo mejorará la seguridad del personal, sino que también permitirá realizar experimentos con mayor rapidez y confiabilidad, contribuyendo al avance en el tratamiento de la tuberculosis resistente. Se recomienda validar el sistema con pruebas físicas para confirmar los resultados simulados.

## ÍNDICE

<b>1. CAPÍTULO I: ANTECEDENTES AL DISEÑO</b>	<b>1</b>
1.1. Problemática	1
1.2. Propuesta de solución	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo General	4
1.3.2. Objetivos Específicos	4
1.4. Alcance	5
1.5. Metodología	5
<b>2. CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE</b>	<b>7</b>
2.1. Fundamento teórico	7
2.2. Estado del arte	11
2.2.1. Sistema Integrado	11
2.2.1.1. Productos Comerciales	11
2.2.1.2. Artículos Científico	12
2.2.1.3. Patentes	13
2.2.2. Subsistema de Brazo Robótico	14
2.2.2.1. Productos Comerciales	14
2.2.2.2. Artículo Científico	14
2.2.2.3. Patentes	15
2.2.3. Subsistema de manipulación de muestras y pipeteo	15
2.2.3.1. Productos Comerciales	15
2.2.3.2. Artículos Científicos	17
2.2.3.3. Patentes	17
<b>3. CAPÍTULO III: DISEÑO CONCEPTUAL</b>	<b>19</b>
3.1. Lista de requerimientos	19
3.2. Estructura de Funciones	21
3.2.1. Diagrama de estructura de funciones	22
3.3. Matriz Morfológica	32
3.4. Conceptos de solución	33
3.5. Evaluación técnica-económica	33
3.5.1. Criterios técnicos	33
3.5.2. Criterios económicos	37
3.6. Selección del concepto de solución óptimo	40
<b>4. CAPÍTULO IV: DISEÑO DEL SISTEMA INTEGRADO</b>	<b>41</b>
4.1. Diseño integrador del proyecto.	43
4.1.1. Diagrama de operaciones	43
4.1.2. Diagrama de bloques	44
4.1.3. Selección de materiales de fabricación	45
4.1.4. Selección de componentes principales	47
4.2. Diseño mecánico.	53
4.2.1. Dimensionamiento del sistema	53
4.2.2. Diseño de riel lineal para brazo robótico	53
4.2.3. Diseño de pinza robótica	59

4.2.4. Diseño de soporte de apertura de muestras	66
4.2.5. Diseño de carcasa electrónica.	67
4.2.6. Planos mecánicos y de ensamble	70
4.3. Diseño electrónico	70
4.3.1. Selección de componentes electrónicos	70
4.3.2. Diagramas de conexión	74
4.3.3. Selección de fuente de energía	76
4.3.4. Diseño de tarjetas electrónicas	79
4.3.5. Distribución de componentes eléctrico-electrónicos.	82
4.4. Diseño de sistema de control.	83
4.4.1. Diagrama de flujo	83
4.4.2. Variables por monitorear y controlar	83
4.4.3. Estrategia de control	84
4.4.4. Selección de controlador	88
4.4.5. Interfaz	90
<b>5. CAPÍTULO V: COSTOS DEL SISTEMA</b>	<b>92</b>
5.1. Costos de los componentes mecánicos	92
5.2. Costos de los componentes eléctricos	93
5.3. Costos de fabricación	94
5.4. Costos totales	95
<b>6. CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>96</b>
6.1. Conclusiones	96
6.2. Recomendaciones	98
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>99</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Mecanismo de acción y mutaciones de resistencia más conocidos de los fármacos antituberculosos. (Fuente: González-Martin, 2014)	2
Tabla 2.1. Comparación de productos comerciales de sistemas integrados. (Fuente: Elaboración propia)	11
Tabla 2.2. Comparación de artículos científicos de sistemas integrados. (Fuente: Elaboración propia)	12
Tabla 2.3. Comparación de productos comerciales de brazos robóticos. (Fuente: Elaboración propia)	14
Tabla 2.4. Comparación de productos comerciales: estaciones de pipeteo. (Fuente: Elaboración propia)	17
Continuación de Tabla 2.4.	17
Tabla 2.5. Comparación de artículos científicos de pinzas robóticas. (Fuente: Elaboración propia)	17
Tabla 3.1. Tabla de comparación de criterios técnicos (Fuente: Elaboración propia)	36
Tabla 3.2. Tabla de comparación de criterios económicos (Fuente: Elaboración propia)	40
Tabla 4.1. Selección de materiales para carcasa de HMI. (Fuente: Elaboración propia)	45
Tabla 4.2. Selección de materiales para plataforma móvil. (Fuente: Elaboración propia)	46
Tabla 4.3. Selección de materiales para componentes impresos, (Fuente: Elaboración propia)	46
Tabla 4.4. Comparación de estaciones de pipeteo. (Fuente: Elaboración propia)	48
Tabla 4.5. Comparación de brazos robóticos. (Fuente: Elaboración propia)	49
Tabla 4.6. Comparación de cabinas de bioseguridad. (Fuente: Elaboración propia)	51
Tabla 4.7. Selección de motores DC para mecanismo de guía lineal. (Fuente: Elaboración propia)	57
Tabla 4.8. Selección de servomotores para el gripper. (Fuente: Elaboración propia)	64
Tabla 4.9. Coeficientes para modelo de material de 5 parámetros Mooney-Rivlin para TPU. (Fuente: San Martín, 2022)	64
Tabla 4.10. Selección de sensor de fin de carrera para guía lineal. (Fuente: Elaboración propia)	70
Tabla 4.11. Selección de microcontrolador para el control del gripper. (Fuente: Elaboración propia)	71
Tabla 4.12. Selección de microchip para el control del módulo de pipeteo. (Fuente: Elaboración propia)	73
Tabla 4.13. Características sensor capacitivo LJC30A3-H-Z/BX (NPN-NO). (Fuente: Elaboración propia)	74
Tabla 4.14. Valores de potencia para cada elemento del sistema. (Fuente: Elaboración propia)	77
Tabla 4.15. Selección de regulador de voltaje DC-DC. (Fuente: Elaboración propia)	79
Tabla 4.16. Variables por monitorear y controlar. (Fuente: Elaboración propia)	84
Tabla 4.17. Selección de PLC para el sistema. (Fuente: Elaboración propia)	89
Tabla 4.18. Selección de HMI para el sistema. (Fuente: Elaboración Propia)	90
Tabla 5.1. Costo de componentes mecánicos para fabricación del sistema. (Fuente: Elaboración Propia)	92
Tabla 5.2. Costo de componentes electrónicos. (Fuente: Elaboración Propia)	93
Tabla 5.3. Costo de fabricación del sistema. (Fuente: Elaboración propia)	95
Tabla 5.4. Costo total del sistema. (Fuente: Elaboración Propia)	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Tendencia de casos aprobados por sospecha o confirmación de MDR + RR y n° de XDR por ps. Perú. 1996 – 2023. (Fuente: DPCTB, 2024)	1
Figura 2.1. Prueba de sensibilidad indirecta en medio Middlebrook 7H10 o 7H11. (Fuente: Organismo Andino de Salud - Convenio Hipólito Unanue, 2018)	10
Figura 2.2. Partes del proceso del experimento de sensibilidad a fármacos (Fuente: Elaboración propia)	10
Figura 2.3. Sistema con brazo robótico para dispensación de fármacos. (Fuente: US, Patente US5341854A)	11
Figura 2.4. Brazo Robótico diseñado para uso en cabinas de bioseguridad. (Fuente: Berkay and Gokalp, (2017)	14
Figura 2.5. Brazo robótico para manipulación de tubos de ensayo. (Fuente: US, Patente US10031149B2)	15
Figura 2.6. Gripper GEP2000 (Fuente: Zimmer Group, s.f)	16
Figura 2.7. Gripper de doble garra RM-MGBD-08 (Fuente: Robust Motion, s.f)	16
Figura 2.8. Esquema detallado del aparato de pipeteo automático (US, Patente: US9084993B2, 2011)	18
Figura 2.9. Gripper multi-eje para robot de automatización en laboratorio (US, Patente: US20210086373A1, 2021)	18
Figura 3.1. Caja negra del sistema (Fuente: Elaboración propia)	22
Figura 3.2 Diagrama de estructura de funciones (Fuente: Elaboración propia)	24
Figura 3.3 Dominio de Energía (Fuente: Elaboración propia)	25
Figura 3.4 Dominio de Interfaz (Fuente: Elaboración propia)	26
Figura 3.5 Dominio de Comunicación (Fuente: Elaboración propia)	27
Figura 3.6 Dominio de Sensores (Fuente: Elaboración propia)	37
Figura 3.7 Dominio de Actuadores (Fuente: Elaboración propia)	29
Figura 3.8 Dominio de Control (Fuente: Elaboración propia)	30
Figura 3.9 Dominio Mecánico (Fuente: Elaboración propia)	31
Figura 3.10. Evaluación técnica-económica en gráfico de dispersión	41
Figura 4.1. Modelo 3D del concepto de solución óptimo. (Fuente: Elaboración Propia)	42
Figura 4.2. Subsistema de brazo robótico - CSO. (Fuente: Elaboración propia)	43
Figura 4.3. Zona de ingreso de muestras y placas - CSO. (Fuente: Elaboración propia)	43
Figura 4.4. Diagrama de operaciones del sistema. (Fuente: Elaboración propia)	43
Figura 4.5. Diagrama de bloques del sistema. (Fuente: Elaboración propia)	44
Figura 4.6. Pipeteadora automática D-ONE Assist Plus. (Fuente: INTEGRA Biosciences AG, 2023)	49
Figura 4.7. Brazo robótico Dobot MG400. (Fuente: Shenzhen Yuejiang Technology Co, 2023)	50
Figura 4.8. Rango de movimiento de Dobot MG400. (Fuente: Shenzhen Yuejiang Technology Co, 2023)	50
Figura 4.9. Distribución al interior de la cabina. (Fuente: Elaboración propia)	52
Figura 4.10. Cabina de bioseguridad NU-543-500E. (Fuente: LabGard)	52
Figura 4.11. Diseño 3D del mecanismo de riel lineal para el brazo robótico. (Fuente: Elaboración propia)	53
Figura 4.12. Propiedades de la base diseñada. (Fuente: Elaboración propia)	54
Figura 4.13. DCL de la base diseñada. (Fuente: Elaboración propia)	54
Figura 4.14. Ingreso de datos de la carga y la guía lineal (Fuente: Oriental Motor USA Corp, 2024)	56
Figura 4.15. Resultados de cálculo (Fuente: Oriental Motor USA Corp, 2024)	56

Figura 4.16. Deformación total de los componentes principales de la guía lineal diseñada. (Fuente: Elaboración propia)	58
Figura 4.17. Esfuerzo equivalente Von Mises de la base del brazo robótico en el riel lineal. (Fuente: Elaboración propia)	57
Figura 4.18. Pinza robótica del sistema. (Fuente: Elaboración propia)	60
Figura 4.19. DCL de placa de Petri	60
Figura 4.20. DCL de pinza robótica. (Fuente: Elaboración propia)	60
Figura 4.21. DCL del tubo de muestras. (Fuente: Elaboración propia)	62
Figura 4.22. Esfuerzo equivalente en las garras de la pinza robótica. (Fuente: Elaboración propia)	65
Figura 4.23. Deformación en las garras de la pinza robótica. (Fuente: Elaboración propia)	65
Figura 4.24. Deformación de la pinza robótica para una carga de 10.34 N. (Fuente: Elaboración propia)	65
Figura 4.25. Esfuerzo equivalente en biela de pinza robótica. (Fuente: Elaboración propia)	66
Figura 4.26. Soporte para apertura de muestras. (Fuente: Elaboración propia)	67
Figura 4.27. Carcasa para componentes electrónicos. (Fuente: Elaboración propia)	68
Figura 4.28. Diagrama de cordones de soldadura para carcasa electrónica. (Fuente: Elaboración propia)	68
Figura 4.29. Sensor de fuerza MF01. (Fuente: Alpha)	72
Figura 4.30. Diagrama de conexiones de componentes principales. (Fuente: Elaboración propia)	75
Figura 4.31. Conexiones de los microcontroladores. (Fuente: Elaboración propia)	76
Figura 4.32. Llave termomagnética 2x16A Btdin.	77
Figura 4.33. Diagrama de fuerza para la energización del PLC. (Fuente: Elaboración propia)	78
Figura 4.34. Fuente conmutada 24 VDC.	78
Figura 4.35. Módulo Ethernet para arduino Nano ENC28J60.	79
Figura 4.36. Diagrama esquemático de la PCB para el gripper. (Fuente: Elaboración propia)	81
Figura 4.37. Diseño y modelo 3D de la PCB. (Fuente: Elaboración propia)	81
Figura 4.38. Diagrama esquemático de PCB para estación de pipeteo. (Fuente: Elaboración propia)	82
Figura 4.39. Diseño de PCB para estación de pipeteo. (Fuente: Elaboración propia).	82
Figura 4.40. Modelo 3D de componentes dentro de la carcasa electrónica. (Fuente: Elaboración propia).	82
Figura 4.41. Diagrama de flujo del sistema. (Fuente: Elaboración propia).	83
Figura 4.42. Diagrama de control para la plataforma lineal. (Fuente: Elaboración propia)	85
Figura 4.43. Respuesta al escalón de ganancia 0.3 del sistema. (Fuente: Elaboración propia)	86
Figura 4.44. Referencia vs salida del sistema controlado. (Fuente: Elaboración propia)	87
Figura 4.45. Diagrama de control para la posición del TCP. (Fuente: Elaboración propia)	88
Figura 4.46. Switch industrial Scalance XC208. (Fuente: Siemens AG)	90
Figura 4.47. Diseño de interfaz gráfica en HMI KTP400 Basic. (Fuente: Elaboración propia).	91

## 1. CAPÍTULO I: ANTECEDENTES AL DISEÑO

### 1.1. Problemática

Los esfuerzos globales por controlar la bacteria de la tuberculosis (TB) se ven afectados por el surgimiento de variantes de TB resistentes a los antibióticos existentes. En 2022, 10.6 millones de personas fueron diagnosticadas con tuberculosis (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2023). Entre todos los diagnosticados, se estima que 410000 pacientes desarrollaron tuberculosis multirresistente (TB-MDR) o tuberculosis resistente a rifampicina (TB-RR), siendo 208000 los pacientes que perdieron la vida debido a esta variante. Se presenta notoria la necesidad de un proceso eficaz, rápido y sobre todo seguro de diagnóstico de esta enfermedad y sus variantes resistentes a fármacos. En el Perú, la tuberculosis constituye un significativo desafío de salud debido a la forma de contagio y las condiciones del sistema sanitario. Aproximadamente el 20% de la población peruana se encuentra infectada con el bacilo de la tuberculosis (OMS, 2023). En adición, Perú ha sido el país con mayor severidad de TB-MDR y tuberculosis extensamente resistente en América (Jave, 2017). En la Figura 1.1 se puede observar un gráfico con los casos notificados de TB resistente a medicamentos y pruebas de sensibilidad rápida entre 1996 y 2023 en el Perú.

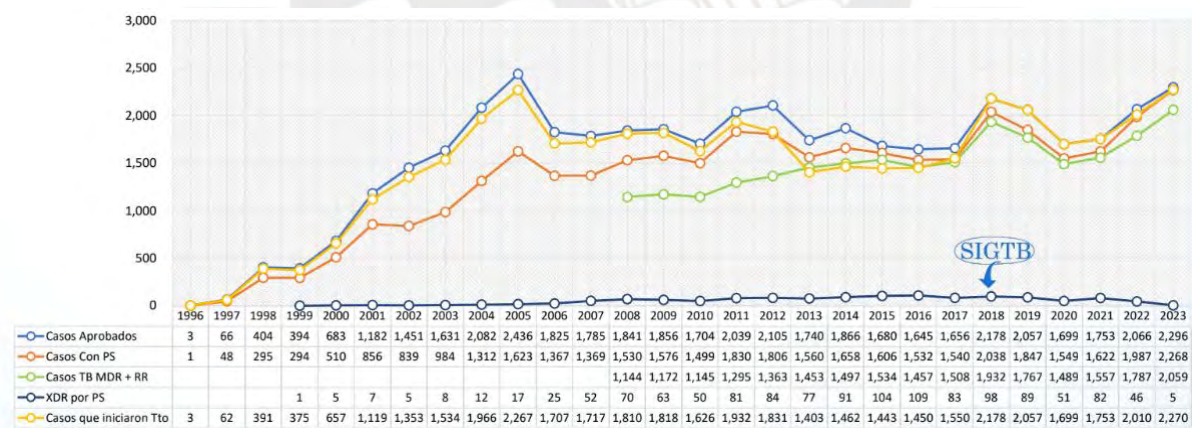


Figura 1.1. Tendencia de casos aprobados por sospecha o confirmación de MDR + RR y n° de XDR por ps.

Perú. 1996 – 2023. (Fuente: DPCTB, 2024)

En la actualidad, son los técnicos de laboratorio quienes son los encargados de realizar los experimentos con la bacteria *Mycobacterium tuberculosis*. Tradicionalmente todo el proceso se realizaba con intervención humana. Sin embargo, se han desarrollado dispositivos que realizan las pruebas de sensibilidad que pueden determinar si una muestra preparada tiene TB-MDR. Uno de los

dispositivos que realiza este proceso se llama GeneXpert MTB/RIF; la cual identifica el Complejo Mycobacterium tuberculosis y detecta mutaciones más frecuentes en el gen *rpoβ* asociadas a resistencia a rifampicina (RIF), directo de muestras de pacientes con síntomas de tuberculosis en menos de dos horas. Esta prueba de naturaleza genotípica es posible sólo cuando se conoce el gen mutado asociado a la resistencia a la RIF, el gen *rpoβ* (Boehme et al., 2010). GeneXpert es útil para detectar resistencia a otras drogas que no estén programadas. Al igual que en este caso, las demás pruebas basadas en estudios de naturaleza genotípica, requieren la secuenciación del ADN de la bacteria mutada y así poder realizar un análisis para localizar el gen relacionado con una mutación en particular. En la Tabla 1.1 se pueden observar las mutaciones conocidas asociadas a los medicamentos de primera línea para tratar la TB.

Tabla 1.1. Mecanismo de acción y mutaciones de resistencia más conocidos de los fármacos antituberculosos.

(Fuente: González-Martin, 2014)

Antibiótico	Acción del fármaco	Gen de la mutación	Consecuencia de la mutación	Frecuencia mutaciones
Isoniazida (H)	Inhibe síntesis de ácidos micólicos de pared celular	katG	No se activa el profármaco	55%
		inhA	Altera enzima en la síntesis de pared	32%
Rifampicina (R)	Inhibe ARN polimerasa en síntesis de proteínas	<i>rpoβ</i>	Altera la diana del fármaco	95-98%
Etambutol (E)	Inhibe síntesis de arabinogalactano de pared	embB	Altera la diana del fármaco	50-68%
Fluoroquinolonas (FQ)	Inhibe ADN girasa en síntesis de ADN	gyrA	Altera la diana del fármaco	55-80%
Pirazinamida (Z)	Inhibe síntesis de ácidos micólicos. Altera equilibrio energético transmembrana	pncA	No se altera el profármaco	74-94%

Este requerimiento se vuelve un problema cuando se investiga nuevas mutaciones de TB-MDR o TB-XDR, ya que, al no conocerse la mutación específica no se puede realizar este experimento. Existe una alternativa que son estudios de naturaleza fenotípica, los cuáles evalúan directamente la respuesta de las bacterias a los fármacos mediante pruebas de sensibilidad in vitro.

Es claro que nuevas tecnologías deben surgir para tratar el problema del desarrollo de resistencia a antibióticos de diversas bacterias como *Mycobacterium tuberculosis*. Como se mencionó para cumplir tal objetivo es necesario realizar experimentos con la bacteria, así como sus variantes. Dichos experimentos requieren ciertas medidas de seguridad, esto debido al riesgo de contraer la enfermedad al manipular muestras de pacientes con TB.

En una visita al Laboratorio de la Unidad de Investigación en Tuberculosis en el Instituto de Medicina Tropical Alexander von Humboldt, perteneciente a la universidad Cayetano Heredia, se pudieron identificar ciertas partes del procedimiento de preparación de muestras para prueba de sensibilidad que involucran a personal de laboratorio. Este personal cumple con los lineamientos de la OMS, la cual especifica que todo laboratorio de TB debe cumplir con ciertas medidas de bioseguridad para minimizar riesgos tomando en cuenta; códigos de práctica, equipamiento, diseño de laboratorio, seguimiento sanitario, entrenamiento y manejo de desechos. Todas estas medidas se toman debido a la naturaleza infecto-contagiosa de la enfermedad. Los bacilos de la tuberculosis, con un tamaño que varía entre  $0,2-0,7 \times 1-10 \mu\text{m}$ , tienen la capacidad de permanecer en el aire, lo que aumenta el riesgo de contagio para el personal que trabaja con muestras o interactúa directamente con pacientes de tuberculosis. Este riesgo se incrementa para el personal de laboratorio que manipula las muestras. Todo ello debido al tiempo prolongado de exposición, la cercanía física con las mismas, y la posible limitación de espacio en áreas pequeñas o salas de trabajo. Por tanto, existe la necesidad de un sistema automatizado que reduzca la manipulación directa de muestras contaminadas, minimice errores en la siembra bacteriana y garantice condiciones estandarizadas para ensayos fenotípicos de sensibilidad a fármacos.

## **1.2. Propuesta de solución**

La propuesta de solución es realizar el diseño mecatrónico de un sistema que emplea un brazo robótico para poder manipular muestras de pacientes infectados con *Mycobacterium tuberculosis* y poder realizar la prueba de sensibilidad a antibióticos. Este sistema emplea un brazo robótico para la manipulación de muestras de esputo de pacientes, los tubos de ensayo, entre otros materiales empleados durante el procedimiento de los experimentos. Dicho brazo robótico realiza las tareas de manera automática para poder tener un nivel mayor de seguridad ante muestras de tuberculosis MDR o XDR

en el desarrollo de tareas repetitivas, reduciendo la exposición del personal. El brazo robótico contará con gripper diseñado para poder asegurar un agarre seguro de los tubos de ensayo y una alta precisión en el desarrollo del experimento. Además, el sistema contará con un pipeteador automático para el traslado de muestras bacterianas de un recipiente a otro. Finalmente, para asegurar un correcto diagnóstico, el sistema deberá ser fabricado con materiales que no se vean afectados por las condiciones del experimento o en caso ocurra algún imprevisto y sea expuesto a bacterias. Validando todos los módulos por medio de simulaciones por computador y cálculos matemáticos.

### 1.3. Objetivos

#### 1.3.1. Objetivo General

Diseñar un sistema mecatrónico que integre un brazo robótico para la manipulación de muestras de la bacteria *Mycobacterium tuberculosis* descontaminadas y diluidas, y un módulo de pipeteo automatizado; orientado a automatizar experimentos de sensibilidad a fármacos, con el fin de mejorar la seguridad operativa y la repetibilidad del proceso.

#### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Revisar y analizar el estado del arte de tecnologías mecatrónicas aplicadas a la automatización de ensayos microbiológicos, incluyendo sistemas con brazos robóticos, estaciones de pipeteo y la normativa de bioseguridad aplicable.
- Definir y estructurar los requerimientos funcionales, operativos y de bioseguridad del sistema, considerando la normativa aplicable al manejo de la bacteria *Mycobacterium tuberculosis*, las necesidades del laboratorio y las limitaciones técnicas existentes.
- Desarrollar el diseño conceptual del sistema, la estructuración funcional y la evaluación técnico-económica para seleccionar el concepto de solución óptimo que satisface los requerimientos operativos y de bioseguridad.
- Diseñar el subsistema mecánico, abarcando el modelado 3D de la estructura, el diseño del gripper especializado, la guía lineal para el desplazamiento del brazo robótico y el análisis por elementos finitos para validar su integridad estructural y funcionalidad.

- Diseñar una configuración de localización de cada subsistema en el espacio de trabajo, tomando en cuenta su funcionalidad y el flujo de trabajo.
- Diseñar el subsistema electrónico, incluyendo la selección de sensores, actuadores y dispositivos de potencia, así como la elaboración de diagramas eléctricos y el diseño de las tarjetas electrónicas necesarias.
- Diseñar el subsistema de control, definiendo la arquitectura basada en PLC, la lógica de operación, el control de los subsistemas principales, la comunicación entre módulos y el desarrollo de la interfaz hombre-máquina (HMI) para la operación del sistema.
- Validar el desempeño técnico del sistema integrado mediante simulaciones computacionales, evaluando precisión en la manipulación, secuencia de tareas y viabilidad operativa.
- Estimar los costos totales de implementación del sistema, considerando componentes mecánicos, electrónicos, materiales de fabricación, mano de obra y costos de integración, con el fin de determinar la viabilidad económica del diseño.

#### **1.4. Alcance**

El presente trabajo se desarrollará como un trabajo de investigación con el propósito de plantear un concepto de solución óptimo para la problemática especificada. En ese sentido, el alcance del trabajo será diseñar un modelo óptimo validado por simulaciones por computadora.

#### **1.5. Metodología**

Se emplea la metodología de diseño mecatrónico basada en la norma VDI 2206 (Jansch y Birkhofer, 2006) para el desarrollo conceptual del sistema propuesto. Esto ocurre debido a la flexibilidad y la retroalimentación constante de las tareas que deben realizarse en secuencia. En el primer paso, representado en el cuadro izquierdo, se evidencia la iteración entre las etapas previas y posteriores, lo que nos permite realizar ajustes y mejorar continuamente el sistema. En primer lugar, se define una problemática específica junto con una propuesta de solución correspondiente, seguida por el planteamiento de objetivos generales y específicos relacionados con dicha propuesta. Posteriormente, se define un marco teórico que contextualiza los temas relevantes del trabajo, seguido por una investigación del estado del arte en sistemas que realizan experimentos con fármacos, pruebas de

sensibilidad, etc. Luego, se elabora una lista de requerimientos que guían una estructura de funciones. Con base en esta estructura, se proponen conceptos de solución y se evalúan técnica y económicamente. Luego, se procede a seleccionar el concepto de solución óptimo preliminar detallado que sirve como base para la implementación y validación subsiguiente. En ese momento, se idean mejoras al concepto de solución óptima escogido y se realiza el desarrollo preliminar del mismo.

Para realizar el diseño preliminar del sistema se desarrollará principalmente en 3 dominios principales. El diseño mecánico de cada subsistema se realizará considerando la selección de materiales y los cálculos de resistencia de materiales. Para el modelado 3D se empleará el software Inventor, mientras que se empleará el software Ansys para el análisis por elementos finitos de las estructuras diseñadas. El diseño electrónico se basa en el diagrama de bloques realizado en la aplicación LucidChart. Posteriormente se analizarán los circuitos a emplear en el software Proteus y finalmente se desarrollarán tarjetas electrónicas impresas empleando el software Eagle de Autodesk. Respecto a los actuadores y sensores del sistema, estos se seleccionarán tomando en cuenta disponibilidad, consumo energético, costos, precisión, entre otros. Para ello también se realizan cálculos, por ejemplo, la selección del motor del sistema de guía lineal se calculará el torque requerido en función de la masa del brazo robótico, la fricción del riel y la aceleración deseada. Para el diseño del sistema de control en primer lugar, se desarrolla el diagrama de flujo del proceso por medio del software Lucidchart. Posteriormente se realiza la lógica de control a emplear. Luego, se realiza la codificación para el controlador lógico programable (PLC) por medio del software Tia Portal. La interfaz para el HMI también se desarrollará en el software Tia Portal, priorizando claridad visual y facilidad de operación para el usuario final.

Finalmente, se derivan conclusiones del proceso de diseño y se ofrecen recomendaciones para acciones futuras. Esta metodología establece los pasos a seguir para alcanzar los objetivos del proyecto, especificando las actividades relacionadas con el diseño, la simulación y la selección de componentes en cada etapa.

## 2. CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se aborda el marco teórico referente a la bacteria *Mycobacterium tuberculosis* y temas relacionados a la resistencia y pruebas de la misma; asimismo, el estado de tecnología considerado para el diseño del sistema, así como los fundamentos teóricos relacionados. Se recopila información relacionada con sistemas integrados con brazo robótico de uso en laboratorios. Además, de los subsistemas relacionados, como lo es el subsistema de brazo robótico, el subsistema de manipulación y de pipeteo. Para cada subsistema se revisan los productos comerciales, artículos científicos y patentes. Toda la información revisada será de utilidad para desarrollar los diferentes conceptos de solución.

### 2.1. Fundamento teórico

#### 2.1.1. Tuberculosis

Se trata de una enfermedad infectocontagiosa causada principalmente por la bacteria *Mycobacterium tuberculosis*. Esta patología afecta principalmente los pulmones y se manifiesta clínicamente mediante tos persistente con expectoración, fiebre, pérdida de peso, sudoración nocturna y fatiga. La transmisión ocurre por vía aérea, a través de la inhalación de aerosoles generados por personas con tuberculosis pulmonar activa, quienes expulsan los bacilos al toser, estornudar o hablar. Debido a este mecanismo de transmisión, la tuberculosis representa un riesgo elevado para el personal que manipula muestras respiratorias o trabaja en contacto cercano con pacientes infectados.

#### 2.1.2. Sobre la bacteria *Mycobacterium tuberculosis*

*Mycobacterium tuberculosis* es un bacilo ácido–alcohol resistente (BAAR), aerobio estricto, no esporulado, no capsulado, inmóvil y de crecimiento lento. Presenta una morfología alargada y ligeramente curvada, con dimensiones aproximadas entre 0,2–0,7  $\mu\text{m}$  de ancho y 1–10  $\mu\text{m}$  de longitud. Aunque puede teñirse débilmente como grampositivo, no se clasifica dentro de este grupo debido a la estructura particular de su pared celular. Esta pared presenta un alto contenido lipídico, especialmente una capa de ácidos micólicos, que le confiere hidrofobicidad, baja permeabilidad y la característica resistencia ácido–alcohol observada en las tinciones de Ziehl–Neelsen. La combinación de esta estructura celular y la capacidad del microorganismo para entrar en estados metabólicos latentes

contribuye a su notable resistencia a condiciones ambientales adversas, así como a ciertos antibióticos y a la respuesta inmunitaria del huésped (González-Martin, 2014).

### 2.1.3. Mecanismos de resistencia a medicamentos antituberculosos en *Mycobacterium tuberculosis*

La resistencia a fármacos de la bacteria tuberculosis se debe principalmente a mutaciones en genes blanco; sin embargo, una proporción de aislamientos fármaco-resistentes no presentan mutaciones en dichos genes, sugiriendo la participación de otros mecanismos.

- **Permeabilidad reducida de la pared celular micobacteriana:** La resistencia intrínseca en MTB se debe a que posee una pared celular compleja constituida por una gran cantidad de lípidos, proteínas y polisacáridos que le confieren una característica hidrófoba con permeabilidad celular restringida para un gran número de compuestos antibacterianos.
- **Modificación y degradación enzimática de medicamentos:** La producción de enzimas se trata de un mecanismo de respuesta bacteriana a los antibióticos, ya que estas utilizan una serie de estrategias para superar las propiedades tóxicas de los antibióticos.
- **Fármaco-resistencia adquirida:** En bacterias, la resistencia genética generalmente es mediada a través de la adquisición de genes exógenos. No obstante, para la MTB no se han observado mecanismos de adquisición de genes de resistencia por dichos elementos. Existen diferentes genes que se asocian con la resistencia de tuberculosis con algún tipo de medicamento en especial. Los genes *katG* y *inhA* se asocian con la resistencia a isoniazida, el gen *rpoB* se asocia con la resistencia a rifampicina, el gen *gyrA/gyrB* se asocia con resistencia a fluoroquinolonas.

La resistencia del complejo *M. tuberculosis* a los fármacos es de origen cromosómico (debida a mutaciones cromosómicas permanentes), y además es aceptado que haya la posibilidad que surjan mutaciones espontáneas que causen resistencia sin exposición previa al tratamiento. Desde un punto de vista epidemiológico se distinguen 2 tipos de resistencia: la resistencia adquirida, observada en pacientes que han recibido tratamiento previo, en los que podría haberse generado debido a un uso, indicación y absorción inadecuados de los fármacos; y la resistencia primaria, asociada a pacientes que no han recibido tratamiento antes y que podría ser debida al contagio de un paciente con TB resistente o ser generada en el propio paciente de forma espontánea. La combinación de estos mecanismos explica la complejidad del tratamiento de cepas multirresistentes (TB-MDR) y extensamente resistentes (TB-

XDR), así como la necesidad de metodologías de detección y manipulación que aseguren precisión y bioseguridad en entornos de laboratorio.

#### **2.1.4. Métodos para la detección de resistencia bacteriana a antibióticos**

Desde un punto de vista microbiológico, una cepa es resistente a un antibiótico cuando el 1% o más de la población bacteriana de un cultivo es capaz de crecer y multiplicarse en presencia de una concentración determinada de este fármaco. Para determinar la susceptibilidad de una bacteria a un grupo de antibióticos se realizan pruebas basadas en estudios de dos naturalezas: estudios fenotípicos y estudios genotípicos. Un tipo de prueba microbiológica fenotípica es conocida como antibiograma. Para detectar la resistencia se establece la proporción de bacterias resistentes comparando el crecimiento de la cepa con antibiótico con una dilución 1/100 de la cepa sin antibiótico que actúa como control. Esta interpretación se conoce como método de las proporciones y las concentraciones críticas, y fue establecido por Cannetti y Grosset en 1963. Las técnicas rutinarias del antibiograma se basan en un estudio fenotípico y el principio mencionado anteriormente observando el crecimiento microbiano en presencia de diferentes antibióticos (March-Rosselló, 2017). Dentro de las técnicas se conoce como *gold standard* o estándar máximo del antibiograma la cual es la dilución en agar. Esta consiste en una serie de placas con agar y concentraciones crecientes de un determinado antimicrobiano, diluido en el propio medio, a las que se añade el inóculo bacteriano estandarizado. Otras técnicas incluyen macrodilución y microdilución en caldo, tiras con un gradiente de antibiótico, y requieren unas 17 horas para la obtención de resultados. La fiabilidad de estos métodos permite clasificarlos, con respecto al antibiograma obtenido mediante el *gold standard*, como agreements (concordancia), minor errors (resultado erróneo de una sensibilidad intermedia), major errors (falsa resistencia) y very major errors (falsa sensibilidad) (González-Martin 2017).

Respecto a las pruebas de naturaleza fenotípica, destacan MODS (Microscopic Observation Drug Susceptibility) y las pruebas realizadas en medios sólidos Middlebrook 7H10/7H11. MODS utiliza placas de 24 pocillos y un microscopio invertido para identificar microcolonias características, mientras que los métodos en medio sólido consisten en sembrar diluciones estandarizadas de la muestra en placas de Petri con y sin antibiótico, comparando posteriormente el crecimiento obtenido (March-Rosselló, 2017).

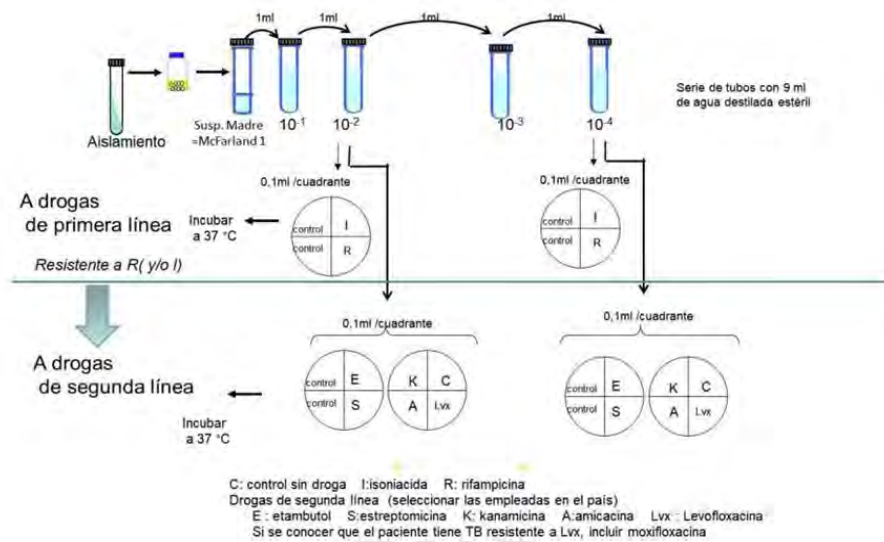


Figura 2.1. Prueba de sensibilidad indirecta en medio Middlebrook 7H<sub>10</sub> o 7H<sub>11</sub>. (Fuente: Organismo Andino de Salud - Convenio Hipólito Unanue, 2018)

La Figura 2.1 ilustra el procedimiento general de la prueba de sensibilidad indirecta en medio sólido según la Guía Técnica para el Diagnóstico Bacteriológico de la Tuberculosis (2018). Por su parte, la Figura 2.2 resume las etapas principales del proceso: apertura de los tubos de muestra, siembra en placas y cerrado. Aunque estos procedimientos son robustos, involucran manipulaciones manuales que requieren precisión volumétrica, repetibilidad y condiciones estrictas de bioseguridad. Estas características hacen que diversas etapas del proceso sean candidatas idóneas para su automatización.

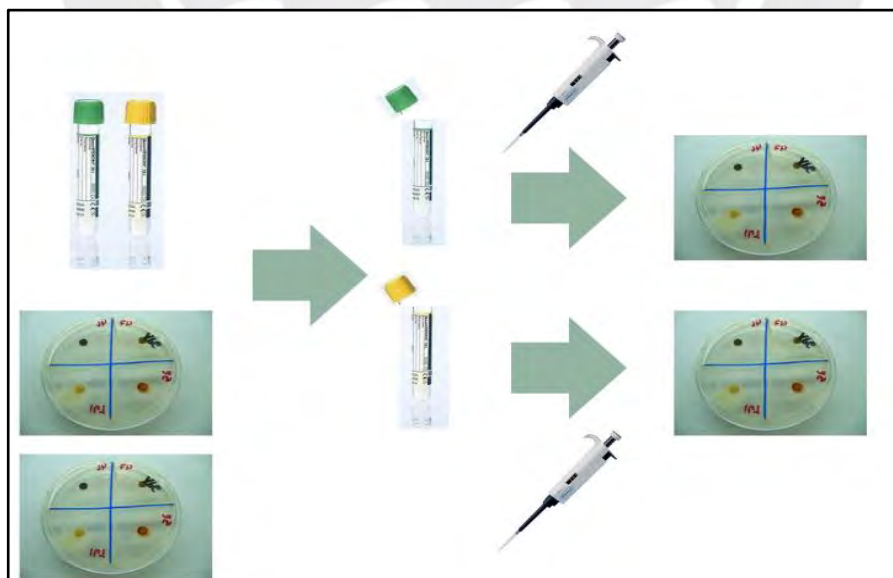


Figura 2.2. Partes del proceso del experimento de sensibilidad a fármacos (Fuente: Elaboración propia)

## 2.2. Estado del arte

Para identificar soluciones existentes, se revisó literatura científica, patentes y productos comerciales relacionados con automatización de laboratorios que manipulan muestras biológicas.


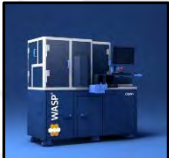

### 2.2.1. Sistema Integrado

Se presentan a continuación los resultados de la investigación referente a un sistema integrado de manipulación de muestras de la bacteria *Mycobacterium tuberculosis* y realización de pruebas de sensibilidad a antibióticos.

#### 2.2.1.1. Productos Comerciales

Se presenta la Tabla 2.1 la cual muestra la comparación entre los productos comerciales de sistemas integrados. El detalle de cada producto se puede observar en el Anexo A.

Tabla 2.1. Comparación de productos comerciales de sistemas integrados. (Fuente: Elaboración propia)

	<b>AUTOPLAK (Sener Diagnostics)</b> 	<b>Wasp / Wasp DT (Copan)</b> 	<b>BD Kiestra - Inoqula (BD Kiestra)</b> 
Característica	Siembra de placas de Petri	Procesamiento de muestras (cultivo en placa, esparcimiento, agitación).	Inocula muestras líquidas y no líquidas en caldos y placas
Tipo de muestras	Microbianas.	Diversos	Líquidos y no líquidos
Tiempo de operación	Depende de la carga	4 - 6 h	2 - 3 h
Cantidad de placas / 1h	125-140 placas/h	130 placas/h	-
Uso de brazo robótico	Si	Si	Si
Precio	120000 US\$	-	-

### 2.2.1.2. Artículos Científico

Se presenta la Tabla 2.2 la cual muestra la comparación entre los productos comerciales de sistemas integrados. El detalle de cada producto se puede observar en el Anexo A.

Tabla 2.2. Comparación de artículos científicos de sistemas integrados. (Fuente: Elaboración propia)

	<b>A mobile robot chemist</b> 	<b>Xie, Y. et al. (2023)</b> <b>“Inverse design of chiral functional films by a robotic AI-guided system”</b> 	<b>Sasaki et al. (2025)</b> <b>“Robotic System for Chemical Experiment Automation with Dual Demonstration of End-effector and Jig Operations”</b> 
Característica	Un sistema robótico químico que automatiza los experimentos químicos en un laboratorio; realiza síntesis, caracterización y planificación; componente robótico móvil para llevar a cabo tareas.	Un sistema robótico/de inteligencia artificial cuyo ciclo abarca el diseño, la fabricación y la caracterización de películas quirales. Incluye un robot móvil, estaciones de trabajo automatizadas para la preparación de películas.	Sistema de automatización de experimentos químicos que utiliza un manipulador móvil, plantillas y efectores finales; la doble demostración permite a los químicos mostrar el movimiento y las operaciones.
Tipo de muestras	Probables precursores químicos, mezclas de reacción, quizás películas finas/materiales (dependiendo de la aplicación específica).	Los materiales incluyen películas poliméricas transparentes, capas de película teñidas, colorantes, sustratos; películas con anisotropía.	Las muestras son mezclas químicas reactivas/líquidos; reactivos, disolventes; generalmente tareas de manipulación de líquidos en flujo.
Tiempo de operación	Normalmente se realizan muchos experimentos al día; los ciclos por experimento dependen del tiempo de síntesis y medición; pueden ser horas por ciclo.	El tiempo de ciclo por película depende de los pasos de preparación, teñido, estiramiento, apilamiento y caracterización; no es extremadamente rápido para operaciones densas o complejas.	El artículo informa de la realización de cientos de experimentos de forma continua durante varios días. Por lo tanto, los tiempos de ciclo son del orden de minutos u horas por experimento.
Grado de la automatización	Alta: desde la preparación hasta la ejecución, la planificación está automatizada.	Medio-alto: incluye diseño (IA), fabricación (procesamiento) y medición.	Alta automatización en tareas de manipulación de líquidos (pipeteo, dilución) y control de movimiento.
Uso de brazo robótico	Sí	Sí	Sí

### 2.2.1.3. Patentes

- **US5341854A - Robotic drug dispensing system:**

La invención se refiere a un sistema robótico automatizado para dispensar fármacos de viales a contenedores de líquidos, como bolsas intravenosas o jeringuillas. Un robot selecciona un vial y un recipiente adecuado y los transporta a una estación de procesamiento junto con una aguja que puede ser de doble punta. En la estación de procesamiento, el contenido del vial se transfiere al contenedor. Parte del contenido del contenedor puede transferirse al vial para reconstituir y/o lavar el contenido del vial y puede agitar el vial. Este sistema emplea un brazo robótico, el cual puede tener dedos de agarre con una superficie de agarre para sujetar un vial y otra superficie de agarre para sujetar una aguja o un recipiente de solución.

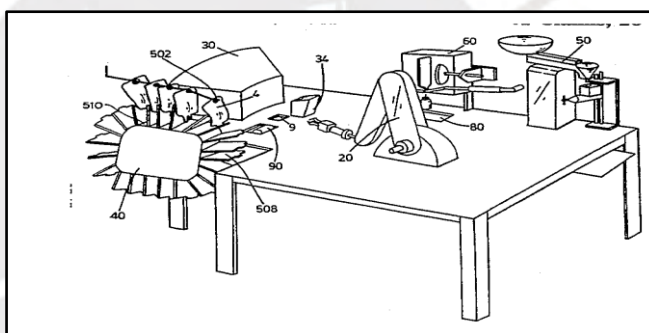


Figura 2.3. Sistema con brazo robótico para dispensación de fármacos. (Fuente: US, Patente US5341854A)




## 2.2.2. Subsistema de Brazo Robótico

A continuación, se muestran los resultados de la investigación sobre brazos robóticos que son empleados para manipulación de muestras biológicas o en entorno de laboratorio. Algunos comprenden un sistema de manipulación integrado, sin embargo, se hará más énfasis en ello en el siguiente inciso.

### 2.2.2.1. Productos Comerciales

Se presenta la Tabla 2.3 la cual muestra la comparación entre los productos comerciales de sistemas integrados. El detalle de cada producto se puede observar en el Anexo A.

Tabla 2.3. Comparación de productos comerciales de brazos robóticos. (Fuente: Elaboración propia)

	<b>UR5e (Fabricante: Universal Robots)</b> 	<b>YuMi Robot (Fabricante: ABB Robotics)</b> 	<b>KR4 Agilus (Fabricante: KUKA)</b> 
Característica	Tareas precisas y meticulosas.	Manipulación de muestras médicas	Fiabilidad y precisión; manipulación de muestras de sangre.
Alcance (mm)	850	559	600
Carga (kg)	5	0.5*2 = 1	4
Peso (kg)	20.6	38	27
Precio (US\$)	2973.99	14181.13	22000

#### 2.2.2.2. Artículo Científico

- **Remote Controlled Robotic Arm Design for Biosafety Cabinets:**

En el artículo se diseña un brazo robótico que puede controlarse de manera remota para su uso dentro de cabinas de bioseguridad. Ello con el objetivo de evitar que el personal autorizado se exponga a materiales biológicos peligrosos durante el trabajo de laboratorio. Diseñaron una unidad de control remoto, que simula los movimientos de la muñeca simultáneamente con un sensor acelerómetro y giroscopio o un circuito joystick, para manejar el brazo robótico con un sistema de transferencia de imágenes.

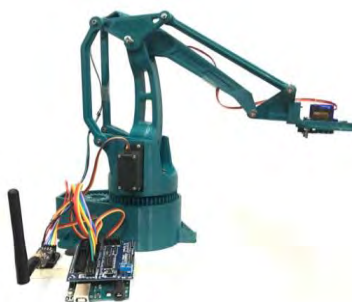


Figura 2.4. Brazo Robótico diseñado para uso en cabinas de bioseguridad. (Fuente: Berkay and Gokalp, (2017)

### 2.2.2.3. Patentes

- **US10031149B2 - Robotic system for sorting sample tubes:**

La patente proporciona un sistema robotizado para la manipulación y clasificación de tubos de muestras. En particular un sistema para clasificar tubos de muestras codificados de forma única en las ubicaciones deseadas para las operaciones de procesamiento y análisis de las muestras. El brazo robótico es un brazo robótico de ensamblaje de cumplimiento selectivo (SCARA). Con 3 segmentos de brazos horizontales con diversas morfologías de movimiento.

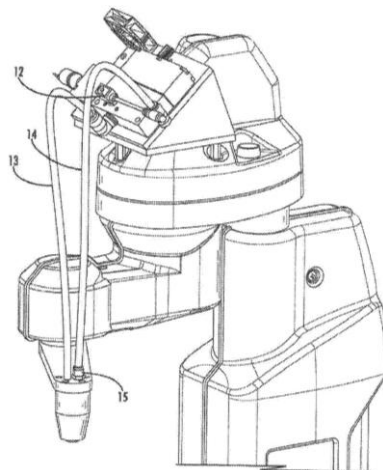


Figura 2.5. Brazo robótico para manipulación de tubos de ensayo. (Fuente: US, Patente US10031149B2)

### 2.2.3. Subsistema de manipulación de muestras y pipeteo

#### 2.2.3.1. Productos Comerciales

- **GEP2000 Gripper (Fabricante: Zimmer Group):** Es un gripper de accionamiento eléctrico para piezas pequeñas diseñado principalmente para tareas de montaje y manipulación de piezas pequeñas, como tubos de ensayo en la automatización de laboratorios. Para estas tareas el gripper ofrece fuerzas de agarre ajustables de entre 80 y 500 Newtons y carreras de garras de entre 6 y 16 mm en sus diferentes variantes. En adición cuenta con los 32 conjuntos de datos de piezas programables, el reconocimiento de piezas (en un rango de +/- 0,05 mm) y la fuerza de agarre ajustable.



Figura 2.6. Gripper GEP2000 (Fuente: Zimmer Group, s.f)

- **RM-MGBD-08 Double claw micro gripper (Fabricante: Robust Motion):** Gripper accionado por un servomotor. El agarre, velocidad y fuerza son controlados de manera separada. Estos grippers se pueden emplear para la sujeción de tubos de ensayo. Todo ello gracias a un modo de uso llamado el modo de sujeción, con el cuál puedes determinar la fuerza de sujeción.

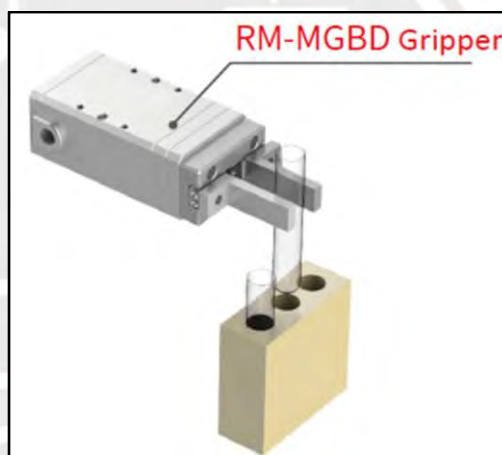


Figura 2.7. Gripper de doble garra RM-MGBD-08 (Fuente: Robust Motion, s.f)

Tabla 2.4. Comparación de productos comerciales: estaciones de pipeteo. (Fuente: Elaboración propia)

	<b>Gilson PIPETMAX</b>	<b>Integra VIAFLO ASSIST</b>	<b>Opentrons OT-2</b>
Característica	Estación de pipeteo automatizada de sobremesa con opciones de cabezal de 1/4/8 canales y software trilution.	Robot de pipeteo que automatiza protocolos montando una pipeta electrónica VIAFLO	Plataforma abierta de manipulación de líquidos de sobremesa que acepta pipetas electrónicas intercambiables.
Soporte de material de laboratorio	Placas ANSI/SBS (96/384), reservorios, tubos; rango de volumen ~1–1200 $\mu$ L	Placas y reservorios estándar	Compatible con cualquier material de laboratorio estándar ANSI/SBS


Continuación de Tabla 2.4.

Rendimiento	Decenas o cientos de placas por día	Eimiento depende del tipo de pipeta VIAFLO usada.	Carias placas al día
Error sistemático	$\pm 0.25 - 9.6\mu\text{L}$	$\pm 0.60 - 3.75\mu\text{L}$	$\pm 0.15 - 7\mu\text{L}$
Precio (US\$)	-	460.66	15275

### 2.2.3.2. Artículos Científicos

Se presenta la Tabla 2.5 la cual muestra la comparación entre los productos comerciales de sistemas integrados. El detalle de cada producto se puede observar en el Anexo A.

Tabla 2.5. Comparación de artículos científicos de pinzas robóticas. (Fuente: Elaboración propia)

	<b>Design and Development of Soft Actuator for Handling Chemical Laboratory Instrumentation and IoT Monitoring</b> 	<b>Towards Flexible Biolaboratory Automation: Container Taxonomy-Based, 3D-Printed Gripper Fingers</b> 
Característica	3 garras flexibles	2 garras flexibles
Tipo de accionamiento	Neumático	Eléctrico
Carga (kg)	0.2	1.5
Tipo de productos	Vasos de precipitados y tubos de ensayo	Placas de Petri, tubos de muestra.

### 2.2.3.3. Patentes

- US9084993B2 - Pipetting apparatus with a pipetting head comprising a multiplicity of pipetting channels disposed in an arrangement pattern:** El aparato de pipeteo incluye una cabeza de pipeteo con una cantidad de canales de pipeteo dispuesta en un patrón de arreglo. Cada canal de pipeteo incluye un émbolo y un cilindro. La pluralidad de canales de pipeteo incluye al menos dos grupos de canales de pipeteo con diferentes diámetros, incluyendo un grupo de canales de pipeteo más grandes y un grupo de canales de pipeteo más pequeños. Cada uno de los al menos dos grupos de canales de pipeteo está dispuesto en un patrón de disposición en el cabezal de pipeteo. Las puntas de pipeta más grandes se comunican con el grupo de canales de

pipeteo más grandes o las puntas de pipeta más pequeñas se comunican con el grupo de canales de pipeteo más pequeños (Naumann, 2011).

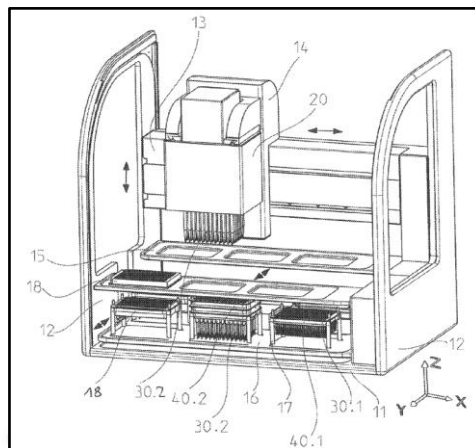


Figura 2.8. Esquema detallado del aparato de pipeteo automático (US, Patente: US9084993B2, 2011)

- **US20210086373A1 - Multi-axis gripper for laboratory automation robot:**

La patente citada se refiere en general a sistemas automatizados de laboratorio para llevar a cabo procesos científicos tales como experimentos, y más particularmente a un gripper para un robot automatizado de laboratorio para tales sistemas automatizados de laboratorio. El gripper provisto en el actuador final del robot puede agarrar la placa de microtitulación que contiene las muestras y transferir las muestras entre los distintos instrumentos. El sujetador puede recuperar selectivamente una placa de microtitulación concreta de una superficie o «nido» asociado a un instrumento y colocar la placa de microtitulación en un “nido” asociado a otro instrumento, según se desee (Riff, 2021).

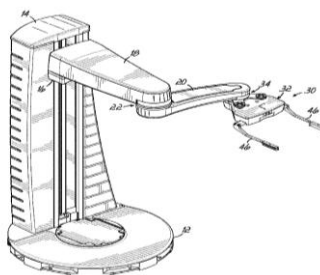


Figura 2.9. Gripper multi-eje para robot de automatización en laboratorio (US, Patente: US20210086373A1, 2021)

### 3. CAPÍTULO III: DISEÑO CONCEPTUAL

#### 3.1. Lista de requerimientos

En esta sección se presentan los requerimientos del sistema a desarrollar. Estos requerimientos se basan en la revisión bibliográfica realizada, así como, las necesidades y limitaciones identificadas. Dicha lista está compuesta por requerimientos divididos en distintos ámbitos como lo son: función principal, geometría, cinemática, fuerzas, materiales, energía, señales, monitoreo, sensores, condiciones de operación, seguridad, ergonomía, mantenimiento, fabricación, ensamblaje y costo. Asimismo, cada requerimiento tendrá la naturaleza de exigencia (E) o deseo (D), esto se puede ver en formato de tabla en el Anexo B.

**Función Principal:** El sistema debe llevar a cabo una prueba de sensibilidad a fármacos a partir de una muestra de esputo de la bacteria *Mycobacterium tuberculosis*, de manera precisa y sin contaminación. Respecto a los pasos que se deben completar considerar los vistos en el diagrama de flujo del antibiograma para tuberculosis. Este proceso consiste en recibir el tubo de muestra y las placas de Petri con agar. Luego se abre el tubo con la dilución. Posteriormente, se procede a realizar el pipeteo de la dilución en la placa de Petri, es decir, se traslada por medio de una pipeta el contenido del tubo a una placa. Se espera 10 minutos para homogeneizar y una vez homogeneizado se cierra la tapa y se entrega como producto.

**Geometría:** El sistema cerrado similar a una cabina de seguridad incluye todos los componentes del sistema listados a continuación: zona de ingreso de muestras; brazo robótico, montado en base móvil lineal; zona de apertura de muestras; y zona de estación de pipeteo. El sistema contará con unas dimensiones máximas de 1700 mm de largo, 800 mm de ancho y 1600 mm de alto. Esto considerando las dimensiones de cada elemento interno, así como, la ergonomía de los usuarios al emplearlo. Respecto al brazo robótico a emplear, este deberá tener un alcance máximo de 400 mm y una altura extendida de 500 mm. Con respecto al módulo de pipeteo, éste deberá tener unas dimensiones de 420 mm de largo, 300 mm de ancho y 540 mm de alto.

**Cinemática:** El sistema integrado no es un sistema móvil. No obstante, el brazo robótico de 4 grados de libertad tendrá un movimiento encima de una superficie plana dentro del sistema con una

velocidad no mayor a 100 mm/s. El gripper también tendrá 1 grados de libertad, para poder abrir la tapa del tubo tendrá que dar más de 3 vueltas (aproximadamente 1080°).

**Fuerzas:** El sistema cuenta con dos funciones primordiales, en primer lugar, está el brazo robótico que deberá ser capaz de transportar las muestras las cuales no deberán sobrepasar los 0.1 kg. En segundo lugar, la carga que deberá soportar la mesa de trabajo será el peso de todos los elementos que albergará, es decir; un brazo robótico, una pipeteadora y celdas para almacenar las muestras. Todo ello con un peso aproximado de 30 kg.

**Energía:** Para la alimentación del sistema se requiere utilizar energía eléctrica de 220 VAC - 60 Hz ya que se energiza directamente de la red eléctrica del lugar de trabajo. Para cada componente se realizará el acondicionamiento respectivo.

**Materia:** Se trabajará con placas de Petri de vidrio y tubos de muestra también de vidrio con tapa de polipropileno; dentro de las cuáles se transportará la muestra con bacteria *Mycobacterium tuberculosis*. Esta muestra con la bacteria será sometida a un experimento de naturaleza fenotípica al ser expuesta a los antibióticos a estudiar; los mismos tendrán diversos tipos de mecanismos para combatir la bacteria. Finalmente, como salida del sistema se tiene la muestra dentro de la placa de Petri y como desecho los tubos que contenían inicialmente la muestra.

**Ergonomía:** La interfaz y la parada de emergencia con los que los usuarios interactúan deben estar a 1 m de altura sobre el suelo como mínimo para un correcto uso con una postura adecuada. De manera complementaria, para el ingreso de muestras se contará con puertas de fácil acceso y manipulación.

**Señales:** Se requieren señales de entrada las cuáles controlan el funcionamiento del sistema y proporcionan información importante para el control de las muestras. Para ello se necesita:

- 1 señal de encendido del sistema.
- 1 señal de parada de emergencia.
- 1 señal de apagado del sistema.

Todo ello lo ingresa el usuario y el código de barras único de cada muestra. Finalmente como señales de salida:

- 1 señal de proceso realizado correctamente o falla en el proceso.
- 1 señal de cantidad de pruebas.

**Control:** Para el sistema se deberá controlar la posición del brazo robótico para poder realizar el movimiento de las muestras y placas. Además, deberá contar con un control de velocidad para la plataforma móvil en la cual se desplaza linealmente el brazo robótico. De igual forma, se tendrá que controlar la estación de pipeteo, su posición y velocidad. Para el gripper también se deberá controlar la velocidad de rotación del grado de libertad del gripper.

**Electrónica:** Los requerimientos de electrónica son el controlador, los sensores y los actuadores.

Se emplea un PLC como controlador maestro y microcontroladores como esclavos. Se emplea un actuador lineal y 2 fines de carrera para el subsistema de movimiento del brazo robótico. Para el subsistema de manipulación o gripper, se emplea 1 motor. Todos los componentes electrónicos deben cumplir con normativas y estándares industriales, garantizando la seguridad y eficiencia en su operación, para este diseño se consideran como estándares necesarios: ISO 9001, UL 508 e IP 54.

**Interfaz:** Se tiene un nivel de comunicación entre el usuario y el sistema mediante la interfaz. De manera complementaria, un nivel de comunicación entre los componentes internos del sistema.

**Seguridad:** La estación incluirá un botón de parada de emergencia en caso de que la seguridad de operación de alguno de los sistemas se vea comprometida. Asimismo, la zona de trabajo del brazo robótico está limitada por una cubierta para evitar interacción directa entre los usuarios y el brazo robótico. Dado que *Mycobacterium tuberculosis* es un agente patógeno de alto riesgo, el laboratorio debe estar diseñado y operado conforme a los requisitos de BSL-3 (nivel de bioseguridad 3). De acuerdo al sistema se puede emplear la norma de seguridad para cabinas de bioseguridad NSF Standard 49 o EN-12469. Ambas para poder determinar la cabina de seguridad biológica (BSC) a emplear, de clase II o clase III, que ofrece protección tanto para el personal como para el entorno. De acuerdo a la norma, la cabina debe estar equipada con filtros HEPA (High Efficiency Particulate Air) para la entrada y salida de aire, asegurando la retención de partículas biológicas.

**Fabricación:** Se emplea el uso de materiales y accesorios disponibles en el mercado nacional o internacional, con preferencia en el mercado nacional para la facilidad en adquisición de repuestos.

### 3.2. Estructura de Funciones

En esta sección se presenta la estructura de funciones en la cual se dividen las funciones principales del sistema en bloques de dominio. Estas funciones se encuentran interconectadas teniendo

una distribución de señales, energía y materia para determinar de forma visual el comportamiento del sistema. Para comenzar con el procedimiento se realiza, como primer paso, la caja negra del sistema y posteriormente el diagrama de estructura de funciones donde se visualiza de forma dinámica los bloques, dominios, subsistemas, entradas y salidas del sistema.

### 3.2.1. Caja negra del sistema

La caja negra (Black Box) es una herramienta útil para identificar la función principal y las entradas y salidas del sistema. En la Figura 3.1 se observa la caja negra y sus entradas y salidas de materia, señales y energía. Estos se detallan a continuación.

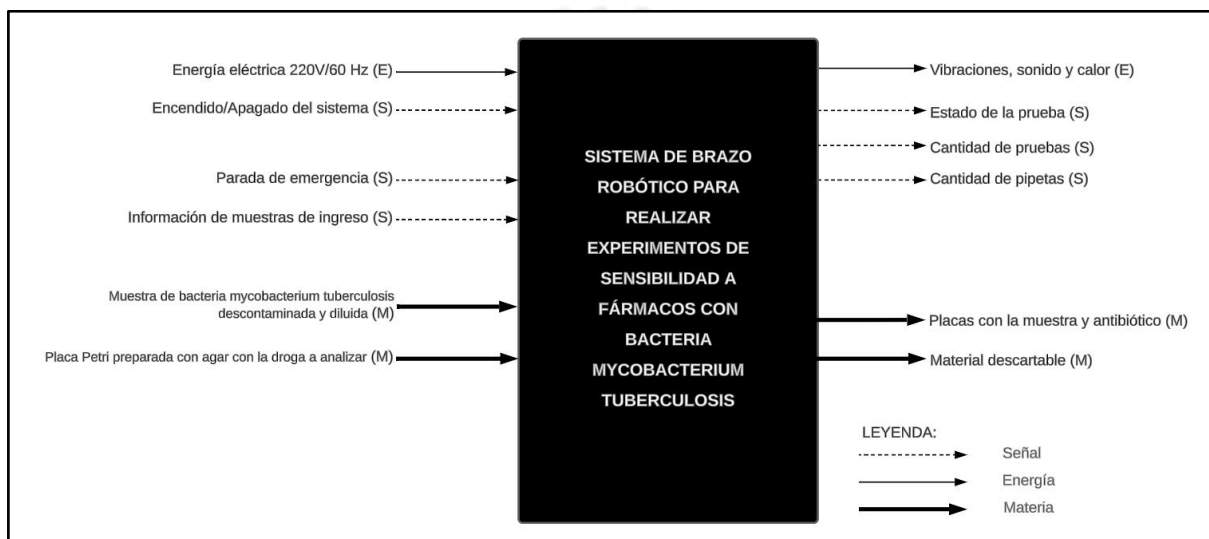


Figura 3.1. Caja negra del sistema (Fuente: Elaboración propia)

#### Señales de Entrada

- **Energía eléctrica 220V/60 Hz:** El sistema se alimenta mediante una fuente de energía eléctrica estándar de 220V y 60Hz, que es la distribución eléctrica convencional a nivel nacional.
- **Encendido/Apagado del sistema:** Esta señal controla la energización y desenergización del sistema. Es esencial para iniciar o detener las operaciones del sistema según las necesidades del usuario.
- **Parada de emergencia manual:** Es una señal generada al activar un botón físico de parada. Proporciona un medio rápido y accesible para detener el sistema en caso de emergencia.
- **Información de muestras de ingreso:** Señal correspondiente a la información de la muestra y la identificación de la bacteria.

- **Muestra de bacteria *Mycobacterium tuberculosis* descontaminada y diluida:** Representa la bacteria que será sometida a la prueba de sensibilidad a fármacos, puede ser una variante MDR o XDR. Esta muestra ha sido sometida a un proceso de descontaminación y dilución.
- **Placa de Petri preparada con agar con la droga a analizar:** Representa la placa que contiene el antibiótico con el que se realizará la prueba de sensibilidad a fármacos, preparado para el ensayo.

### Señales de salida

En esta sección, se describen detalladamente las salidas del sistema:

- **Vibraciones, sonido y calor:** Estas son formas de energía liberadas durante el funcionamiento del sistema.
- **Estado de la prueba:** Señal que muestra si es que la prueba se realiza correctamente así hubo algún error en el proceso.
- **Cantidad de pruebas:** Señal con la información correspondiente a la cantidad de pruebas realizadas durante ese ciclo de trabajo y durante el historial.
- **Cantidad de pipetas:** Señal que muestra cuántas pipetas hay aún disponibles dentro de la estación, en caso sean muy pocas se mandará una alerta en la interfaz.
- **Placas con la muestra y antibiótico:** Después de realizarse la prueba de sensibilidad, las placas con las muestras son regresadas para el tratamiento correspondiente que los técnicos realizan.
- **Material descartable:** Son los instrumentos que se emplean para la prueba y que deben ser cambiados de una muestra a otra. Por lo que los que ya han sido usados son retirados para ser desechados.

#### 3.2.1. Diagrama de estructura de funciones

En el siguiente apartado se expondrá la estructura de funciones que permite identificar la interacción entre los dominios que definen el sistema, a través de la interconexión de las funciones a través de señales, energía y/o materia. En la Figura 3.2 se presenta la estructura de funciones que recopila la información antes mencionada. En el Anexo C se puede observar con mejor detalle. Los dominios que se consideran son: dominio interfaz, dominio energía, dominio comunicación, dominio sensores, dominio control, dominio de actuadores y dominio mecánico.

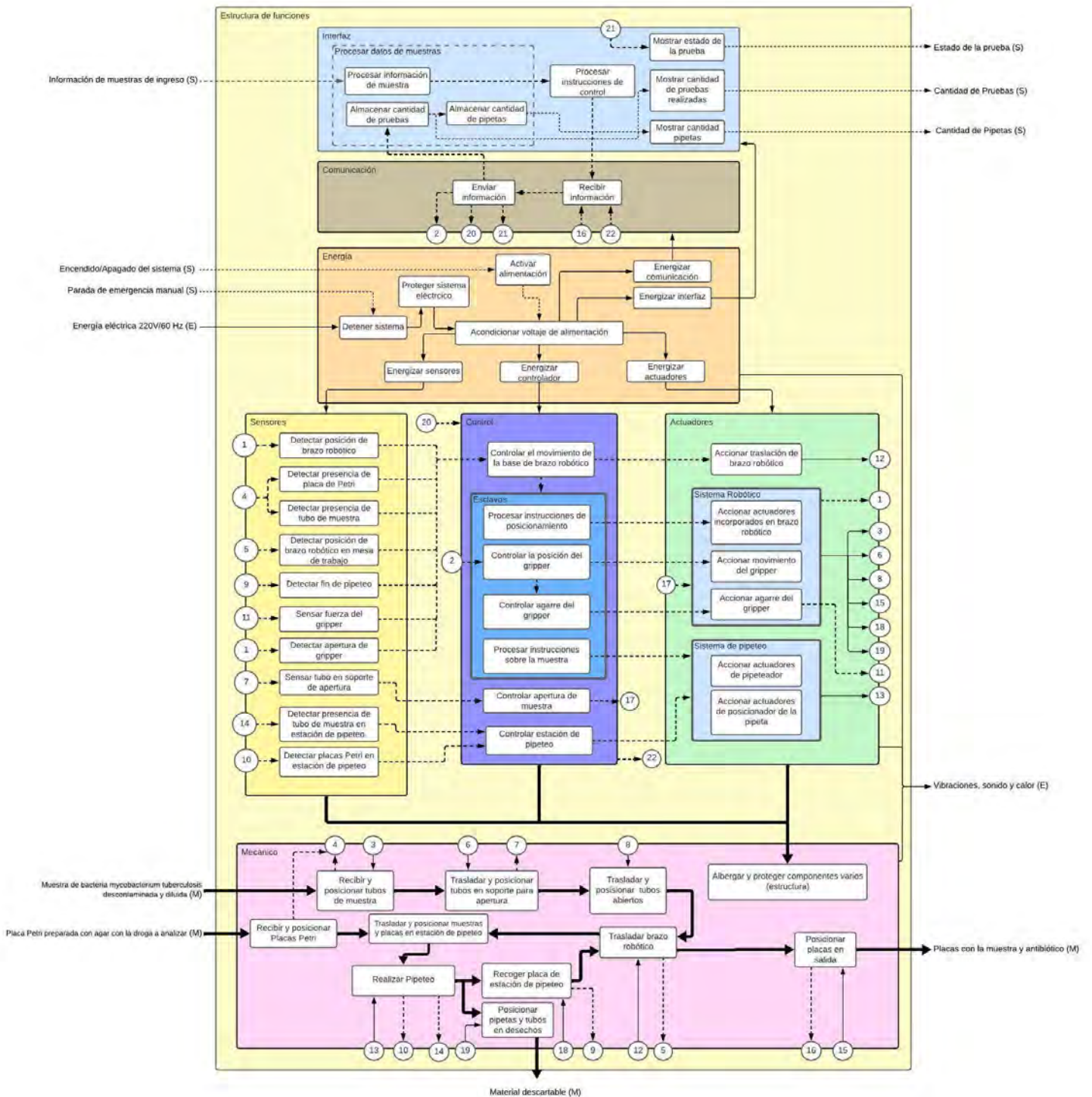


Figura 3.2 Diagrama de estructura de funciones (Fuente: Elaboración propia)

### 3.2.3. Funciones de la estructura de funciones

#### Dominio de Energía:

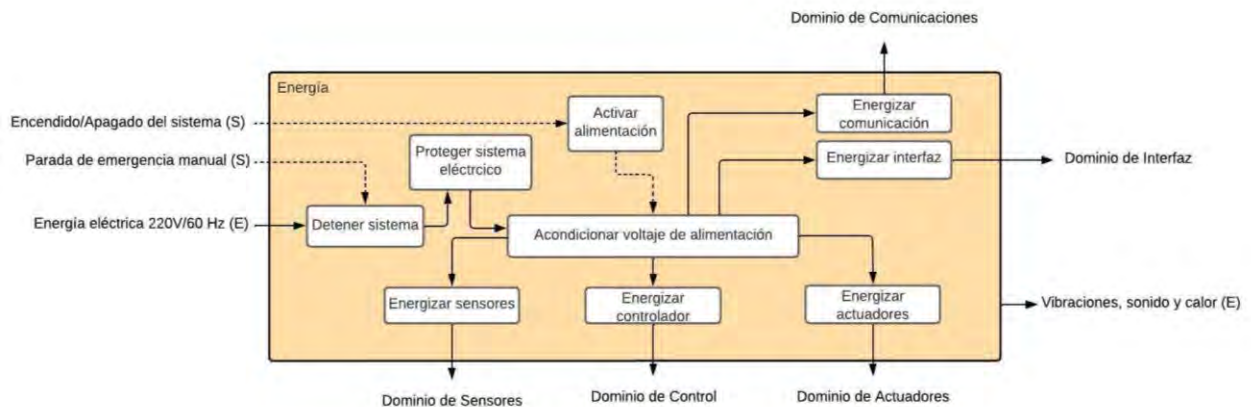


Figura 3.3 Dominio de Energía (Fuente: Elaboración propia)

Este bloque se encarga de proveer energía a los otros subsistemas para la activación de toda la estación modular. En la Figura 3.3, se pueden observar las funciones que presenta, las cuales se describen a continuación:

- **Activar alimentación:** Produce la señal de activación de energía del sistema.
- **Acondicionar voltaje de alimentación:** Regular el voltaje entrante (220 V/60 Hz) al sistema para cada dominio que lo requiera solo si se realiza el encendido del sistema.
- **Proteger sistema eléctrico:** Protección del sistema eléctrico para evitar el daño de los componentes internos de cada dominio del sistema.
- **Detener sistema:** El sistema se interrumpe en caso de que se active una parada de emergencia.
- **Energizar sensores:** Acondiciona la energía en base a los diversos niveles de voltaje que requieren los sensores para controlar las variables del proceso.
- **Energizar controlador:** Acondiciona la energía para el suministro de voltaje de los diversos componentes del dominio de control.
- **Energizar comunicación:** Acondiciona la energía tomando en cuenta los distintos niveles de voltaje requeridos por los elementos de comunicación para intercomunicación entre la interfaz y los controladores.

- **Energizar actuadores:** Acondiciona la energía que ingresa a los actuadores en base a los diferentes voltajes que requiera, esto para realizar acciones de movimiento en diversos elementos mecánicos.
- **Energizar interfaz:** Acondiciona la energía que ingresa a la interfaz para permitir la interacción entre el sistema y el usuario.

### Dominio de Interfaz

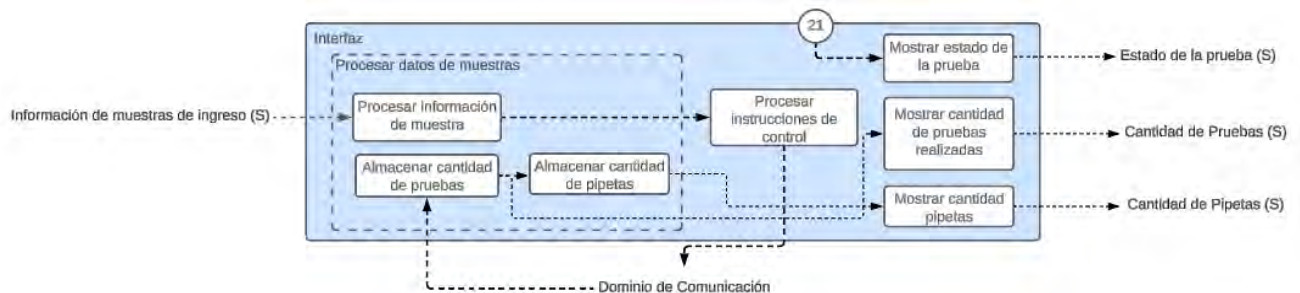


Figura 3.4 Dominio de Interfaz (Fuente: Elaboración propia)

En la interfaz se generará la interacción de la estación modular y su funcionamiento con el usuario.

En la Figura 3.4, se pueden observar las funciones que presenta, las cuales se describen a continuación.

- **Procesar información de muestra:** Procesa la información respecto a la muestra ingresada y la prueba que se va a realizar.
- **Almacenar cantidad de pruebas:** Se guarda en memoria la cantidad de pruebas efectuadas.
- **Almacenar cantidad de pipetas:** Se actualiza cuantas pipetas quedan almacenadas.
- **Procesar instrucciones de control:** Se procesan las instrucciones de la prueba que se realizará para poder realizar el control del mecanismo.
- **Mostrar estado de la prueba:** Se muestra el proceso de la prueba, es decir, si la prueba se realizó efectivamente o si hubo algún posible error.
- **Mostrar cantidad de pruebas realizadas:** Se muestra la cantidad de pruebas realizadas en la jornada de trabajo.
- **Mostrar cantidad de pipetas:** Se muestran cuántas pipetas quedan y si es necesario ingresar nuevas pipetas al sistema.

## Dominio de Comunicaciones

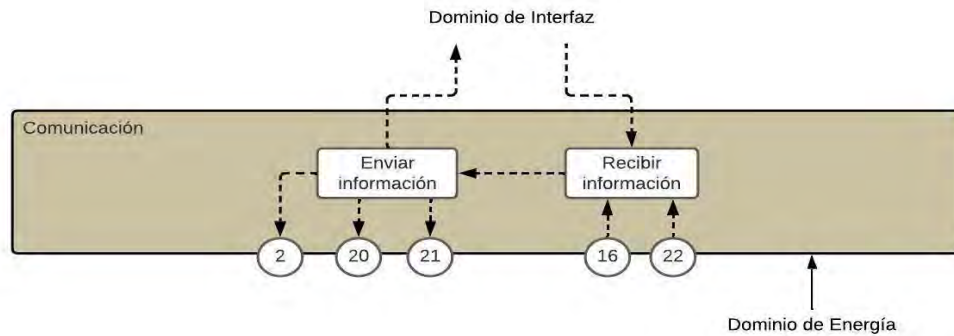


Figura 3.5 Dominio de Comunicación (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 3.5 se presenta el dominio de comunicación permite la conexión de la interfaz con el resto del sistema, para el procesamiento de datos a través de los siguientes bloques de funciones.

- **Enviar información:** Permite la transferencia de datos e instrucciones ingresados en la interfaz, hacia los módulos de la estación. Además, recibe la información de la cantidad de muestras y las instrucciones de control.
- **Recibir información:** Permite la transferencia de datos y señales recopiladas de la estación modular hacia la interfaz y el módulo de control.

## Dominio de Sensores

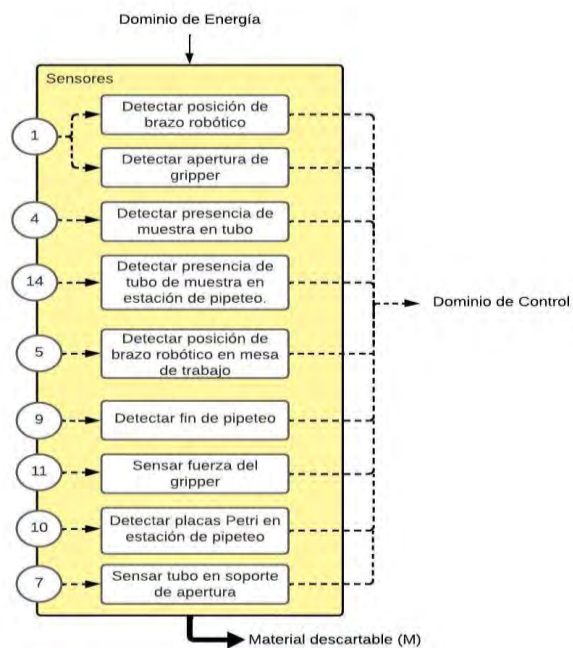


Figura 3.6 Dominio de Sensores (Fuente: Elaboración propia)

En este bloque se detallan las funciones de los sensores que son requeridos para el funcionamiento del sistema. Empleados en la manipulación de las muestras, como en el traslado y movimiento del brazo robótico. En la Figura 3.6, se pueden observar las funciones que presenta, las cuales se describen a continuación:

- **Detectar posición de brazo robótico:** Se detecta la posición en la que se encuentra el brazo robótico, particularmente hacia donde se encuentra el gripper en el entorno de trabajo.
- **Detectar apertura de gripper:** Asegurarse de que el ensamblaje o la manipulación de componentes se realice de manera segura y precisa
- **Detectar presencia de tubo de muestra:** Sensar el ingreso de una nueva muestra que ingresa en el sistema.
- **Detectar presencia de placa de Petri:** Se sensa el ingreso de las placas de Petri preparadas.
- **Detectar presencia de tubo de muestra en estación de pipeteo:** Sensa la presencia del tubo con la muestra, abierto en la estación de pipeteo, listo para el proceso.
- **Detectar posición de brazo robótico en mesa de trabajo:** Se refiere a la capacidad de monitorear y determinar la ubicación y la orientación precisa del brazo robótico en el entorno de trabajo.
- **Detectar fin de pipeteo:** Garantiza que hubo un correcto pipeteo de una muestra a la placa de Petri cumpliendo con las cantidades requeridas.
- **Sensar fuerza del gripper:** Se sensa la fuerza que el gripper le aplica al objeto que manipule.
- **Detectar placas de Petri en estación de pipeteo:** Se sensa la presencia de placas de Petri en la estación de pipeteo.
- **Sensar tubo en soporte de apertura:** Se sensa la presencia del tubo cerrado con la muestra en la estructura de soporte.

## Dominio de Actuadores

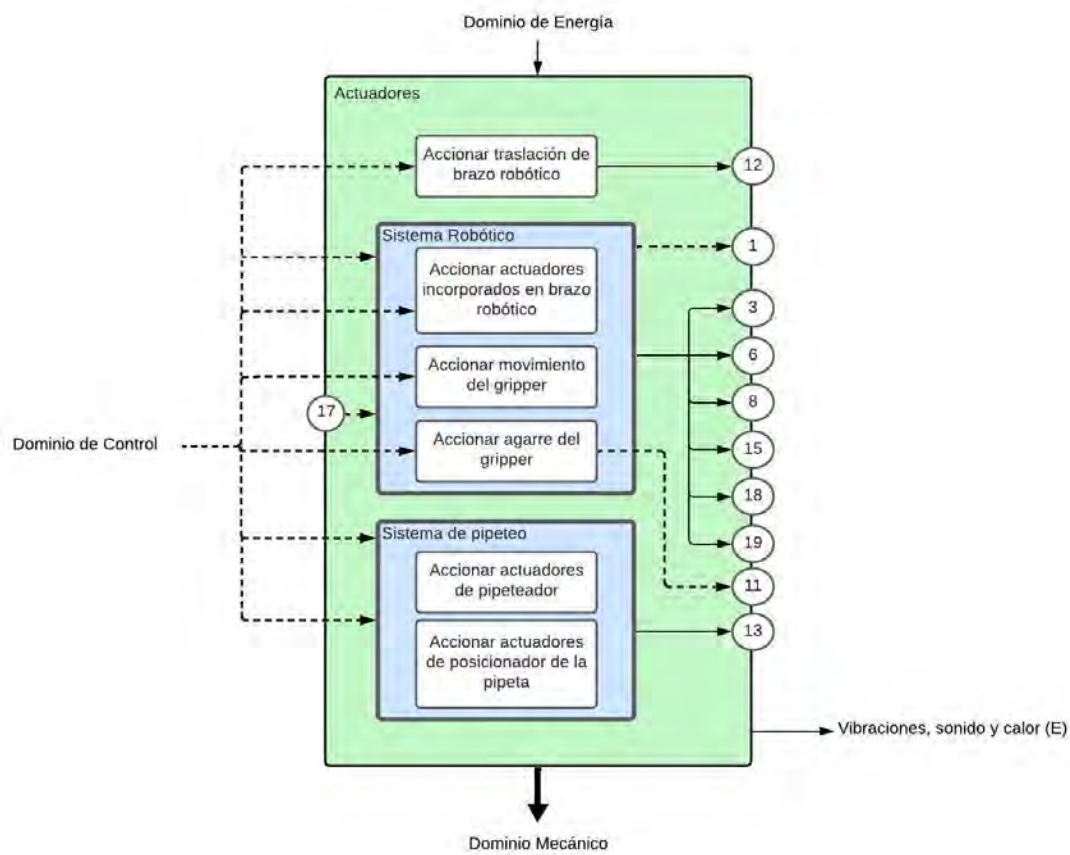


Figura 3.7 Dominio de Actuadores (Fuente: Elaboración propia)

El dominio de actuadores se encarga de ejecutar acciones físicas específicas dentro de la estación modular, permitiendo la interacción con las piezas, herramientas y otros componentes del sistema. En la Figura 3.7, se aprecian las funciones que presenta, las cuales se describen a continuación:

- **Accionar traslación de brazo robótico:** Acciona el actuador lineal que traslada el brazo robótico a lo largo del sistema.
- **Accionar actuadores incorporados en el brazo robótico:** Acciona los actuadores que permiten el movimiento del brazo robótico en sus diferentes grados de libertad.
- **Accionar movimiento del gripper:** Se acciona los movimientos de rotación del gripper para su posicionamiento.
- **Acciona el agarre del gripper:** Se acciona el actuador principal del gripper para el agarre.
- **Accionar actuadores de pipeteador:** Se acciona el mecanismo de pipeteo automático.

- **Accionar actuadores de posicionador de la pipeta:** Se accionan los mecanismos de posicionamiento en la estación de pipeteo, los cuales con principalmente motores paso a paso.

### Dominio de Control

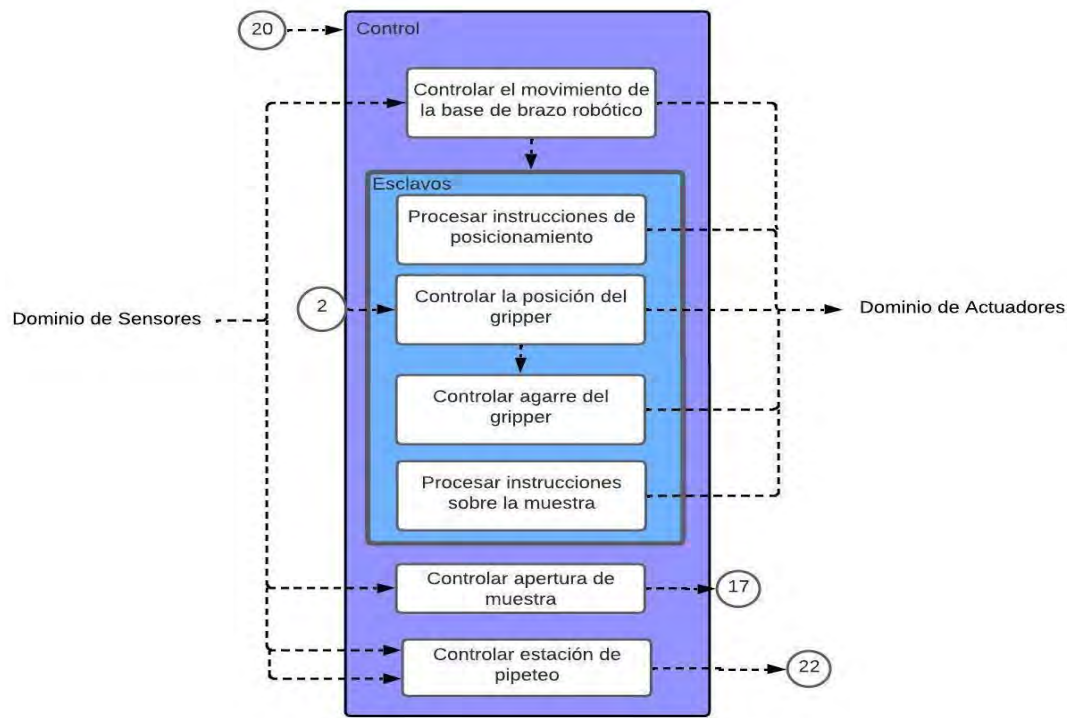


Figura 3.8 Dominio de Control (Fuente: Elaboración propia)

En el control del sistema y procesamiento de la información (Figura 3.8), se reciben datos tanto de los sensores conectados directamente al controlador y de los dispositivos de comunicación que envían los datos de los sensores. Se realiza la gestión y coordinación de los controladores electrónicos y sistemas de automatización que supervisan y controlan las operaciones del sistema.

- **Procesar instrucciones de posicionamiento:** Procesa las instrucciones de control para el posicionamiento del brazo robótico y del gripper.
- **Procesar instrucciones sobre la muestra:** Implica garantizar que la muestra se desarrolle de manera precisa y eficiente de acuerdo con las especificaciones.
- **Controlar posición del gripper:** Esta función garantiza la localización exacta del gripper para asegurar la correcta manipulación de distintos objetos.
- **Controlar el movimiento del brazo robótico:** Implica gestionar y ejecutar comandos destinados a mover el brazo robótico y las muestras.

- **Controlar el agarre del gripper:** Permite controlar la presión aplicada para sujetar diversos objetos de manera segura.
- **Controlar la estación de pipeteo:** Permite controlar la operación de pipeteo, considerando cantidades y posicionamiento.
- **Controlar apertura de muestra:** Permite controlar el brazo robótico para desarrollar la apertura del tubo de muestra en el soporte destinado a ello.

### Dominio Mecánico

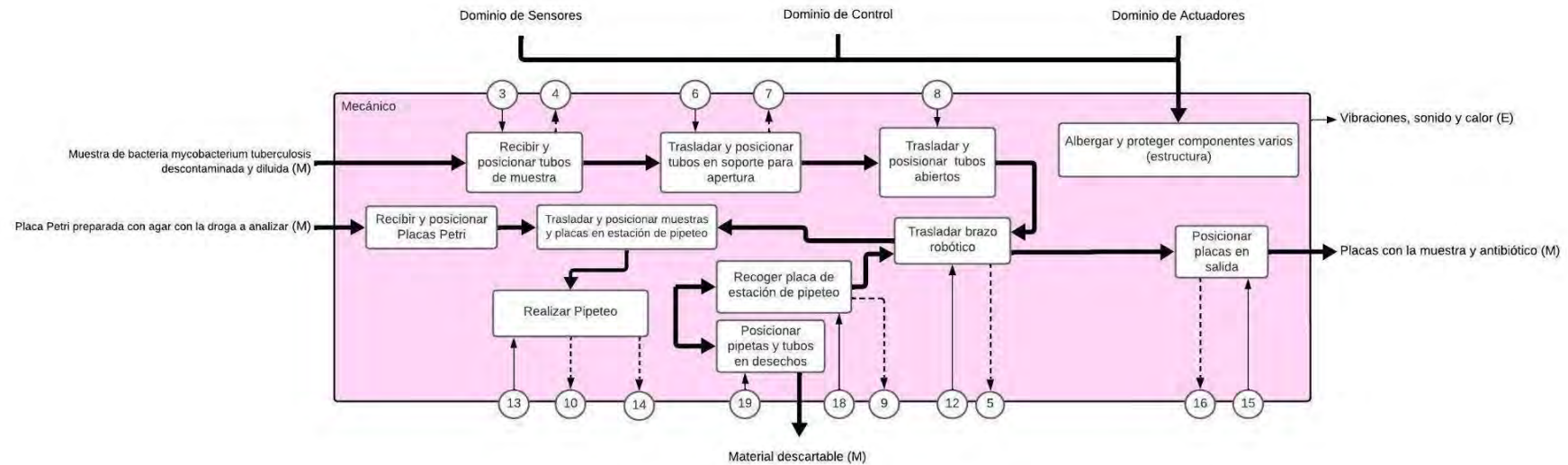


Figura 3.9 Dominio Mecánico (Fuente: Elaboración propia)

Este dominio se encarga de gestionar los aspectos mecánicos relacionados con el movimiento, posicionamiento y desarrollo de la prueba en las muestras bacterianas. En la Figura 3.9, se pueden observar las funciones que presenta, las cuales se describen a continuación:

- **Recibir y posicionar tubos de muestra:** Su tarea consiste en recibir los tubos con muestras de tuberculosis, para luego posicionar los tubos en la ubicación adecuada en el sistema.

- **Recibir y posicionar placas de Petri:** Su tarea consiste en recibir las placas preparadas con agar y antibióticos, para luego posicionarlas en la estación de pipeteo.
- **Trasladar y posicionar tubos en soporte para apertura:** Traslada los tubos con muestras y los coloca en el soporte destinado a la apertura de tubos.
- **Trasladar y posicionar tubos abiertos:** Una vez abiertos los tubos se trasladan de esa forma a la estación de pipeteo.
- **Trasladar brazo robótico:** Encargado de mover el brazo robótico a las ubicaciones necesarias para desempeñar las tareas como la apertura de tubos o el posicionamiento de muestras.
- **Recoger placa de estación de pipeteo:** Una vez culminado el pipeteo se recoge la placa de Petri de esta estación.
- **Trasladar y posicionar muestras y placas en estación de pipeteo:** Se llevan tanto las muestras, como las placas en la estación de pipeteo.
- **Realizar pipeteo:** La estación de pipeteo realiza la movilización de las diluciones de los tubos a las placas de Petri por medio de una pipeta para precisión.
- **Posicionar pipetas y tubos en desechos:** Una vez empleadas las placas y los tubos con muestra, éstos deben ser llevados y tratados como desechos biológicos.
- **Posicionar placas de salida:** Una vez culminada la prueba se posiciona la placa en la zona de salida del sistema.
- **Albergar y proteger componentes varios:** Esta función se encarga de proporcionar una estructura robusta que albergue y proteja todos los componentes necesarios para el funcionamiento del sistema.

### 3.3. Matriz Morfológica

La matriz morfológica recopila una serie de alternativas para el diseño de un concepto de solución por cada función mostrada en la estructura de funciones. Se realizó la matriz morfológica dividida por dominios al igual que la estructura de funciones, contemplando los mismos dominios. Además, se realizó una división por colores indicando los componentes que se emplearán en cada alternativa de concepto de solución. La matriz morfológica se encuentra en el Anexo D de la presente tesis.

### 3.4. Conceptos de solución

Los bosquejos de los conceptos de solución, que derivan de la matriz morfológica presentada en el inciso anterior, se pueden apreciar en el Anexo E del presente documento.

### 3.5. Evaluación técnica-económica

#### 3.5.1. Criterios técnicos

Los criterios técnicos que han sido elegidos para realizar la comparación de los conceptos de solución son: Robustez, Confianza, precisión, rapidez, ergonomía y facilidad de mantenimiento.

- **Precisión:** La precisión se refiere a la capacidad de un sistema para repetir la misma tarea con mínimas variaciones y producir resultados consistentes. En un sistema que manipula muestras biológicas, la precisión garantiza que cada proceso se realiza de manera óptima, reduciendo los errores y asegurando la calidad de la manipulación.

La precisión es inequívocamente el criterio más importante y fundamental para garantizar la eficiencia y eficacia en un sistema de manipulación de muestras bacterianas. La repetibilidad y precisión de los componentes robóticos, como el riel lineal, brazo robótico y gripper, determinan la calidad del proceso de siembra. Asimismo, la precisión de los sensores es vital para asegurar que los errores y defectos sean detectados y corregidos de forma adecuada.

El concepto de solución 1 (CS1) utiliza HMI, un controlador lógico-programable (PAC) y tiene un algoritmo de control especializado para cada tarea. Asimismo, el uso de un servomotor para el desplazamiento del brazo. Su diseño de control basado en retroalimentación hace que los servomotores sean más precisos. Ello lo convierte en una opción precisa que garantiza la repetibilidad. Por ello se le otorga un puntaje de 4. El CS2 utiliza un LCD táctil que, aunque es eficiente, no es tan preciso como un HMI industrial. Además, emplea un controlador PID para cada tarea de control. Por ello se le otorga un puntaje de 2. El CS3 destaca por utilizar una pantalla LED. Asimismo, se apoya en algoritmos únicos por subsistema para el control. Sin embargo, los sensores empleados no aseguran una calidad de variables tan elevada. Por ello se le otorga un puntaje de 3.

Peso relativo:  $g = 4$ .

Evaluación CS1:  $p = 4$ .

Evaluación CS2:  $p = 2$ .

Evaluación CS3:  $p = 3$ .

- **Robustez:** La robustez se define como la capacidad que tiene un sistema para adaptarse a diferentes entornos sin que su desempeño se vea afectado. Es un aspecto importante para garantizar que el módulo pueda completar todo el proceso y asegurar resultados consistentes y confiables.

La traslación del brazo robótico, por ser fundamental para un posicionamiento estable; la sujeción y adaptabilidad del gripper a los tubos de muestra y las placas de Petri; y la calidad de la siembra de muestras, son factores que determinan la robustez. En conclusión, la resistencia a variaciones y cambios en el entorno es esencial para un proceso eficiente y libre de errores.

Todos los conceptos de solución emplean una cabina de bioseguridad de clase II para una seguridad garantizada en términos biológicos. En temas de robustez, esta cabina puede soportar todas las cargas y además proteger los componentes varios del sistema sin problema.

El CS1 utiliza un servomotor industrial y un riel especial para un movimiento estable del brazo. Por ellos se le otorga una puntuación de 3. El CS2 utiliza un LCD táctil que puede ser menos duradero y resistente que otras soluciones industriales. Por otro lado, los componentes elegidos para este CS2 son los más económicos, por ello se le otorga un puntaje de 2. El CS3 utilizará una computadora industrial IPC y componentes de alta resistencia. Por ello se le otorga un puntaje de 4.

Peso relativo:  $g = 4$ .

Evaluación CS1:  $p = 3$ .

Evaluación CS2:  $p = 2$ .

Evaluación CS3:  $p = 4$ .

- **Rapidez:** Este criterio considera la rapidez de operación de cada uno de los componentes, desde velocidades de transferencia de datos, tiempo de sensado, movimiento de los componentes.

La rapidez es importante para garantizar la eficiencia y eficacia en el sistema de manipulación de muestras. La rapidez de los componentes mecánicos como el riel lineal, la velocidad del

brazo robótico, así como el accionamiento del gripper; influyen en dicha característica. Por otro lado, la velocidad de procesamiento del controlador también es fundamental para el proyecto. El CS1 utiliza una HMI, un controlador lógico programable (PLC), ello implica una rapidez moderada. El riel accionado por el servomotor y el mecanismo de faja es moderadamente rápido. Por ello se le otorga un puntaje de 3. El CS2 utiliza una pantalla capacitiva que, no es tan rápida como las demás alternativas. De manera complementaria, el uso del mecanismo de piñón-cremallera justifica otorgarle un puntaje de 2. El CS3 emplea un riel para el traslado del brazo robótico basado en un mecanismo de husillo, el cuál condiciona la velocidad de movimiento del brazo. Por ello se le otorga un puntaje de 2.

Peso relativo:  $g = 4$ .

Evaluación CS1:  $p = 3$ .

Evaluación CS2:  $p = 2$ .

Evaluación CS3:  $p = 2$ .

- **Ergonomía:** La ergonomía del sistema se refiere al nivel de adaptación a las dimensiones físicas, en este caso, de los operarios del sistema. El sistema de manipulación de muestras de bacteria *Mycobacterium tuberculosis* requiere de usuarios para el ingreso de muestras y placas, además de interacción con la interfaz y botones. Por esta razón el criterio usado para la asignación de los puntajes es a través de los componentes de interfaz, parada de emergencia e ingreso y salida de muestras, los cuales requieren de intervención humana.

La ergonomía es de elevada importancia, pues de ella depende en cierta medida el bienestar de los usuarios. Dependiendo de la ubicación de los componentes con los que interactúan los operarios, se puede facilitar su acceso y manipulación.

El CS1 utiliza HMI que se encuentra en una zona accesible al frente. Para el ingreso de muestras la caja desplegable se encuentra a una altura en la cual el usuario no debe agacharse. Por ello se le otorga un puntaje de 4. El CS2 utiliza una pantalla capacitiva táctil que se encuentra a una altura baja justificando otorgarle un puntaje de 2. El CS3 utiliza una pantalla LED, ubicada en una zona accesible. Además de un acceso sencillo a las muestras. Por ello se le otorga un puntaje de 4.

Peso relativo:  $g = 2$ .

Evaluación CS1:  $p = 4$ .

Evaluación CS2:  $p = 3$ .

Evaluación CS3:  $p = 4$ .

- Seguridad:** Al trabajar el sistema con muestras de una bacteria altamente contagiosa y además de alta complejidad como lo son las variantes MDR y extremadamente resistente de la bacteria, se debe considerar la seguridad como un criterio importante. Todos los conceptos de solución emplean la misma cabina de bioseguridad implementada con filtros de aire HEPA y todos los requerimientos de seguridad establecidos. El CS1 posee nada más una entrada y una salida del sistema, las cuales pueden ser manipuladas de manera sencilla y segura. Por ello se le otorga un puntaje de 4. El CS2 requiere de una apertura total del sistema para la remoción de placas inoculadas, por lo que el riesgo es un poco mayor, justificando así su puntaje de 3. Finalmente, el CS3 es similar al CS1 en este apartado por lo que también tendrá un puntaje de 4

Peso relativo:  $g = 3$ .

Evaluación CS1:  $p = 4$ .

Evaluación CS2:  $p = 2$ .

Evaluación CS3:  $p = 4$ .

- Resumen y comparación:** A continuación, se presenta la Tabla 3.1 en la que se recopila los resultados de la evaluación de los criterios técnicos revisados y justificados anteriormente.

Tabla 3.1. Tabla de comparación de criterios técnicos (Fuente: Elaboración propia)

Evaluación técnica									
Criterio técnico	Sol 1			Sol 2		Sol 3		Sol Ideal	
	g	P	gp	p	gp	p	gp	p	gp
Presición	4	4	16	2	8	3	12	4	16
Robustez	3	3	9	2	6	4	12	4	12
Rapidez	4	3	12	2	8	2	8	4	16
Seguridad	3	4	12	2	6	4	12	4	12
Ergonomía	2	4	8	3	6	4	8	4	8
Sumatoria			57		34		52		64
$\bar{x}$			0.89		0.53		0.81		1

### 3.5.2. Criterios económicos

Para realizar la comparación de los conceptos de solución, los criterios económicos que han sido elegidos son la cantidad de componentes, la cantidad de energía requerida para su funcionamiento, el costo de mantenimiento y el costo de componentes.

- **Cantidad de componentes:** La cantidad de componentes hace referencia a la cantidad de elementos a utilizar para hacer que el proyecto sea funcional y cumpla con los requerimientos. Mientras menos componentes necesite, mayor será el puntaje asignado.

La cantidad de componentes es considerada ya que cada elemento tiene un impacto significativo en la rentabilidad del proyecto en general. Ignorar la importancia de cualquier componente puede llevar a decisiones erróneas, por lo que es esencial determinar todos los aspectos involucrados para tomar decisiones informadas y maximizar los beneficios.

El punto de comparación principal será los componentes de traslado del brazo robótico y posicionamiento de la estación de pipeteo debido a que son las piezas que varían en complejidad entre conceptos de solución. El CS1 utiliza una estación de pipeteo con cabezal móvil en XYZ, lo que implica el uso de motores, guías lineales y sensores adicionales para controlar el movimiento en todos sus ejes. Es por ello que se le asigna un puntaje de 2. El CS2 solo utiliza una estación de pipeteo XY, o sea que la micropipeta solo se mueve verticalmente. El movimiento horizontal será a través del movimiento de su placa base, por ello se le da un puntaje de 3. El CS3 emplea un sistema de pipeteo similar al CS2. Debido a esas razones se le da un puntaje de 3

Peso relativo:  $g = 3$ .

Evaluación CS1:  $p = 2$ .

Evaluación CS2:  $p = 3$ .

Evaluación CS3:  $p = 3$ .

- **Cantidad de energía:**

La cantidad de energía se enfoca en la energía total consumida por todo el sistema. Se valorará con más puntaje las alternativas que consuman menos energía.

Es esencial considerar la cantidad de energía consumida, ya que el uso eficiente de la energía puede tener un impacto directo en los costos operativos y la sostenibilidad de cualquier proyecto o proceso. Ignorar esta variable puede llevar a una subestimación de los costos a largo plazo y afectar negativamente la competitividad y la rentabilidad.

Entre todas las alternativas no hay una gran diferencia entre el consumo de los sensores y actuadores según el tipo que son, así que el criterio estará en base a la cantidad de actuadores necesarios. El CS1 emplea diversos servomotores para el movimiento, tanto del brazo como de la estación de pipeteo y el gripper, por lo que tendrá una puntuación de 3. El CS2 tiene como principales actuadores motores de paso a paso de menor consumo y algunos servomotores, en ese caso tendrá una puntuación de 4. Por último, el CS3 emplea motores DC por lo que su puntaje será de 2.

Peso relativo:  $g = 3$ .

Evaluación CS1:  $p = 3$ .

Evaluación CS2:  $p = 4$ .

Evaluación CS3:  $p = 2$ .

- **Costo de mantenimiento:**

El costo de mantenimiento se refiere al gasto asociado con el cuidado y la preservación de cada elemento y el sistema en sí. Se tomará como mayor puntaje cuando el costo es más económico. Incluir el costo de mantenimiento en una evaluación económica es esencial, ya que afecta directamente a la rentabilidad a largo plazo de un proyecto. Ignorar estos costos puede llevar a decisiones financieras deficientes.

El CS1 está conformado por una guía lineal para el movimiento del brazo, la cual presenta un mecanismo de faja. El mantenimiento de este tipo de mecanismos no es de alta complejidad, al igual que los mecanismos de la estación de pipeteo. En ese caso se le otorga un puntaje de 4. Para el CS2, se diseña el gripper y su mecanismo de accionamiento, por lo que es más sencillo de mantener, sin embargo, el uso de neumática complejiza un poco este apartado. Además, el mecanismo piñón-cremallera requiere de mayor tiempo de reparación en caso de alguna falla.

Por ello se le da un puntaje de 3. EL CS3 tiene componentes sencillos de mantener y de mediana complejidad, por ello recibe un puntaje de 3.

Peso relativo:  $g = 2$ .

Evaluación CS1:  $p = 4$ .

Evaluación CS2:  $p = 3$ .

Evaluación CS3:  $p = 3$ .

- **Costo de componentes:**

El costo de componentes hace referencia al costo de adquisición de las partes o piezas individuales necesarias para construir el sistema.

La consideración del costo de los componentes en una evaluación técnica económica es crítica, ya que estos elementos representan una parte importante de los gastos totales. Pasar por alto estos costos puede llevar a decisiones financieras erróneas y afectar negativamente la rentabilidad y eficiencia del proyecto o producto.

Todos los conceptos emplean un brazo robótico, una cabina de bioseguridad y una estación de pipeteo; por lo que el punto de comparación principal será el subsistema de control debido a que en el mercado nacional no existe mucha variedad de controladores. El CS1 opta por utilizar un PLC, el cual es un controlador mucho más sencillo de conseguir en el mercado nacional que un PAC o una PC industrial, por lo que se establece un puntaje de 3. El CS2 utiliza como controlador un PAC (Controlador de Automatización Programable), el cual no es sencillo de conseguir en el mercado nacional, así que el costo de importación debe ser añadido al costo total de la pieza. Sin embargo, los demás componentes son de materiales baratos y las alternativas de sensores también lo son, por ello se le otorga un puntaje de 3. En el CS3 se utiliza una PC industrial como controlador, los cuales son más caros que un PLC debido al costo de los procesadores Intel y la memoria que utiliza internamente, por ello tiene un puntaje de 2.

Peso relativo:  $g = 3$ .

Evaluación CS1:  $p = 3$ .

Evaluación CS2:  $p = 3$ .

Evaluación CS3:  $p = 2$ .

- **Resumen y comparación:** A continuación, se presenta la Tabla 3.2 en la que se recopila los resultados de la evaluación de los criterios económicos revisados y justificados anteriormente.

Tabla 3.2. Tabla de comparación de criterios económicos (Fuente: Elaboración propia)

Evaluación económica									
Criterio económico	Sol 1		Sol 2		Sol 3		Sol Ideal		
	g	P	gp	p	gp	p	gp	p	
Cantidad de componentes	3	3	9	3	9	3	9	4	12
Cantidad de energía	3	3	9	4	12	2	6	4	12
Costo de mantenimiento	2	4	8	3	6	3	6	4	8
Costo de componentes	3	3	9	3	9	2	6	4	12
Sumatoria			35		36		27		44
<b>xi</b>			0.8		0.82		0.61		1

### 3.6. Selección del concepto de solución óptimo

Tras la evaluación de cada uno de los criterios técnicos y económicos se procede con el análisis de cada una de las soluciones y sus promedios correspondientes en un gráfico de dispersión, para así hallar el concepto de solución óptimo, el cual cuente con los ponderados que mejor se acerca a la solución ideal. En la Figura 3.3 se presenta el gráfico dispersión mencionado, donde podemos observar que el concepto de solución que permite obtener los mejores puntajes según los criterios técnicos y económicos es el CS1.

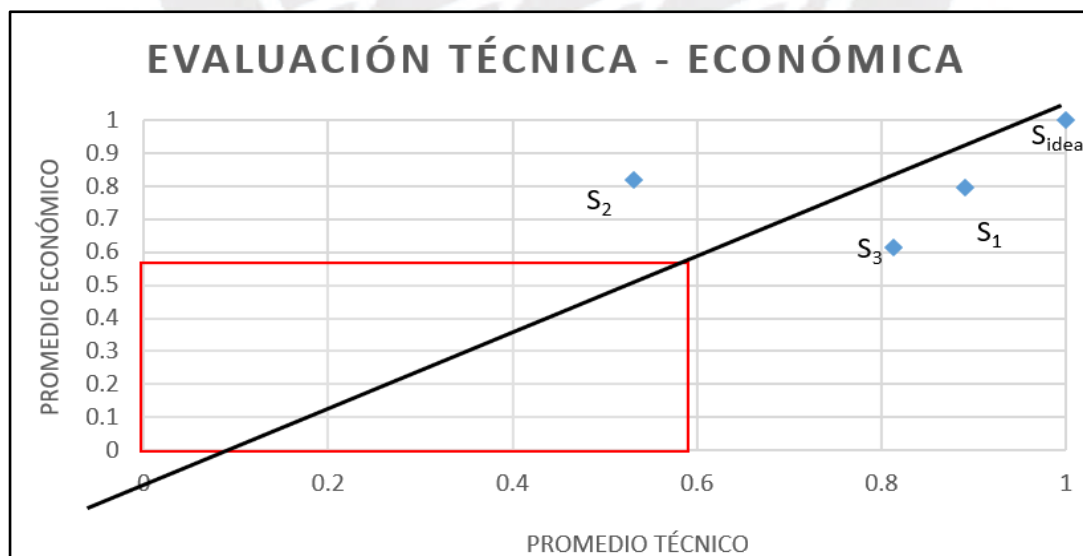


Figura 3.10. Evaluación técnica-económica en gráfico de dispersión

#### 4. CAPÍTULO IV: DISEÑO DEL SISTEMA INTEGRADO

Una vez obtenido el concepto de solución ganador o concepto de solución óptimo (CSO) se analizan las carencias que este presenta para llegar a ser la opción óptima. Ante ello se puede analizar los criterios en los cuales el CS1 no alcanzó el puntaje máximo para así poder subsanarlos y llegar a un concepto mejorado. Por lo tanto; a continuación, se mostrará el CSO por subsistemas y se justificará la solución que convierte al CS1 en el óptimo.

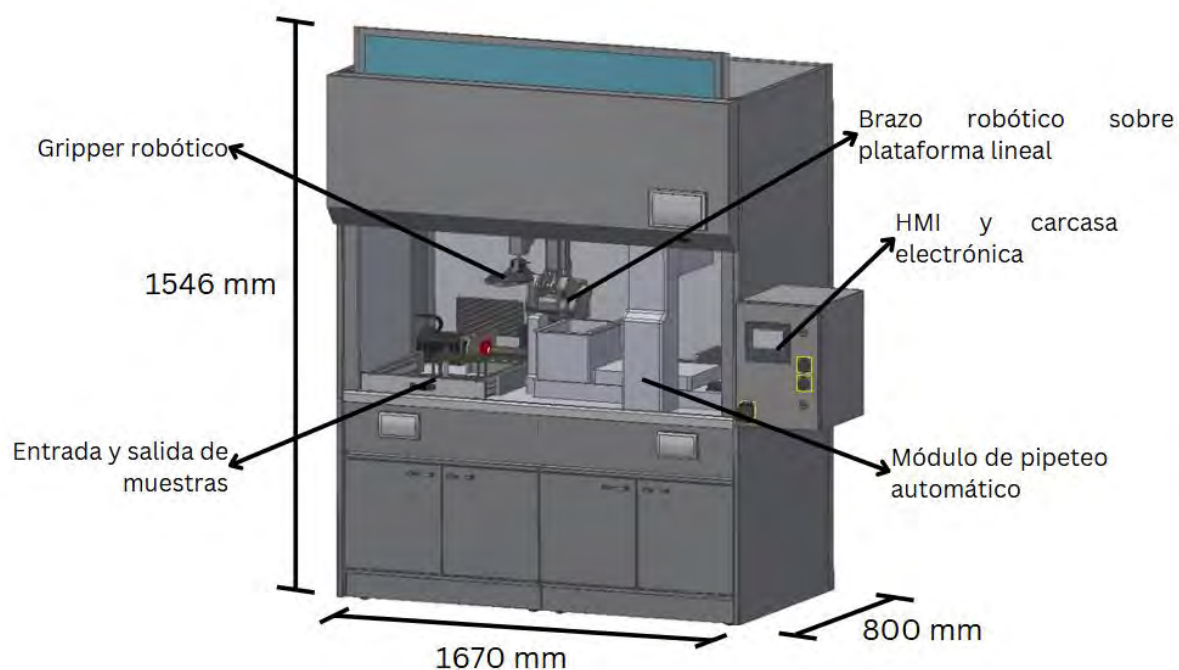


Figura 4.1. Modelo 3D del concepto de solución óptimo. (Fuente: Elaboración Propia)

Las principales oportunidades de mejora del CS1 para poder tratar se observan principalmente en robustez y rapidez. Debido a la naturaleza de las pruebas a efectuar, la precisión es de alto interés como se mencionó anteriormente, por lo que para obtener una precisión deseada la rapidez no puede ser tan elevada. Un aspecto considerado fue cambiar el accionamiento neumático del gripper, el cuál fue cambiado a uno eléctrico, para prescindir de un compresor de aire. También se consideró emplear el gripper del concepto de solución 3, el cuál presenta un diseño adaptado para poder manipular tanto las placas de Petri, como los tubos de muestra.

- Subsistema brazo robótico: En la Figura 4.2. Se muestra el modelo 3D del subsistema de brazo robótico. En él se puede apreciar el brazo montado sobre la base del mismo, la cual se desliza sobre la guía lineal. Esta guía lineal es accionada por un motor de paso a paso.

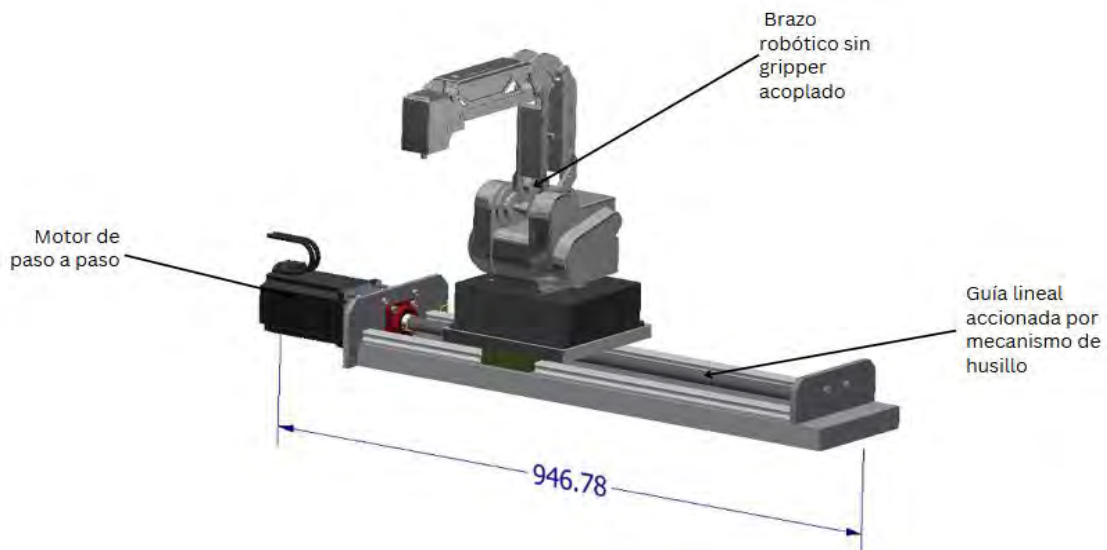


Figura 4.2. Subsistema de brazo robótico - CSO. (Fuente: Elaboración propia)

- Subsistema de manipulación: Como se mencionó anteriormente el gripper elegido finalmente será el del CS3, con accionamiento eléctrico. El diseño del gripper se realizará de tal forma que se pueda adaptar, tanto para manipular las placas de Petri, como para los tubos de muestra y sobre todo las tapas de los tubos. El gripper, además, tiene un grado de libertad adicional el cuál es accionado por un servomotor.
- Subsistema de estación de pipeteo: se emplea una estación de pipeteo para el pipeteo automático de las muestras. Asimismo, se presentan sus principales características. Las cuales serán un posicionador XYZ, una micropipeta, una zona de pipetas y una zona de muestras y placas. Cabe destacar que en esta zona es donde el operario realiza el cambio de pipetas en caso se hayan empleado todas las disponibles.

Una característica que cabe señalar del sistema son las zonas de entrada y salida del sistema. La zona de entrada es el lugar destinado a la recepción de los tubos con las muestras y las placas de Petri para la realización de la prueba. Para el CSO se considera el uso de un cajón que se puede aperturar por medio de rieles telescópicas. En la Figura 4.3 se presenta la zona de ingreso de muestras y placas.

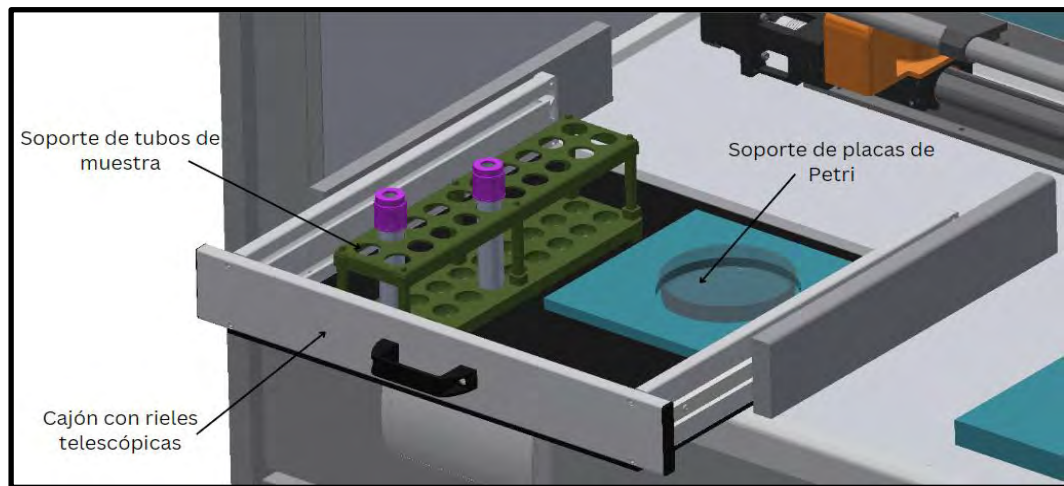


Figura 4.3. Zona de ingreso de muestras y placas - CSO. (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.1. Diseño integrador del proyecto.

##### 4.1.1. Diagrama de operaciones

Para el correcto funcionamiento del sistema diseñado se debe seguir una serie de pasos. Estos pasos deben ser ejecutados por la persona que pretende hacer uso del sistema.

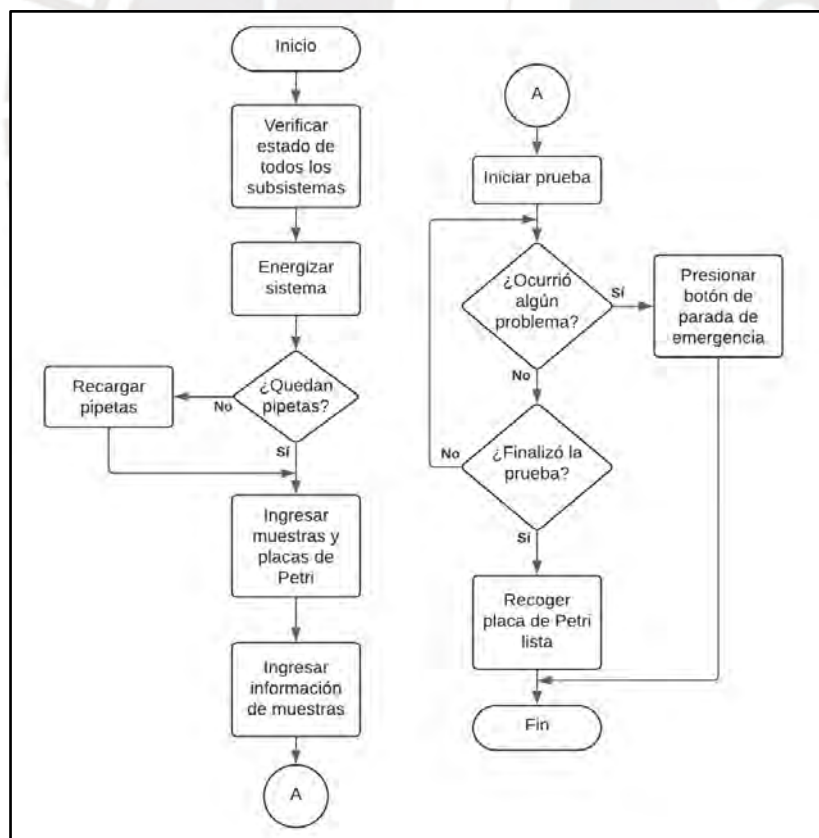


Figura 4.4. Diagrama de operaciones del sistema. (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 4.4 se muestra el diagrama de operaciones del concepto de solución óptimo. Dicho diagrama representa el flujo de acciones que el operario o la operaria debe realizar para el correcto funcionamiento del sistema y por tanto el correcto desarrollo de la prueba. Se contempla revisar y verificar los componentes, la energización del sistema, verificar los elementos descartables y el correcto desarrollo de todos los pasos que el sistema requiere.

#### 4.1.2. Diagrama de bloques

En la Figura 4.5 se puede observar el diagrama de bloques del sistema. En éste se muestran las conexiones electrónicas y eléctricas relevantes del sistema. Empezando por la energía de la red eléctrica de 220 VAC a 60Hz, a partir de ello se conecta una fuente 24 VDC la cuál alimenta diversos componentes del sistema como la HMI y también se alimenta directamente al PLC. El PLC funge de controlador maestro de 4 controladores esclavos, los cuales controlan al brazo robótico, su movimiento sobre la guía, el gripper y la estación de pipeteo. Para un control correcto se emplean también sensores y fines de carrera.

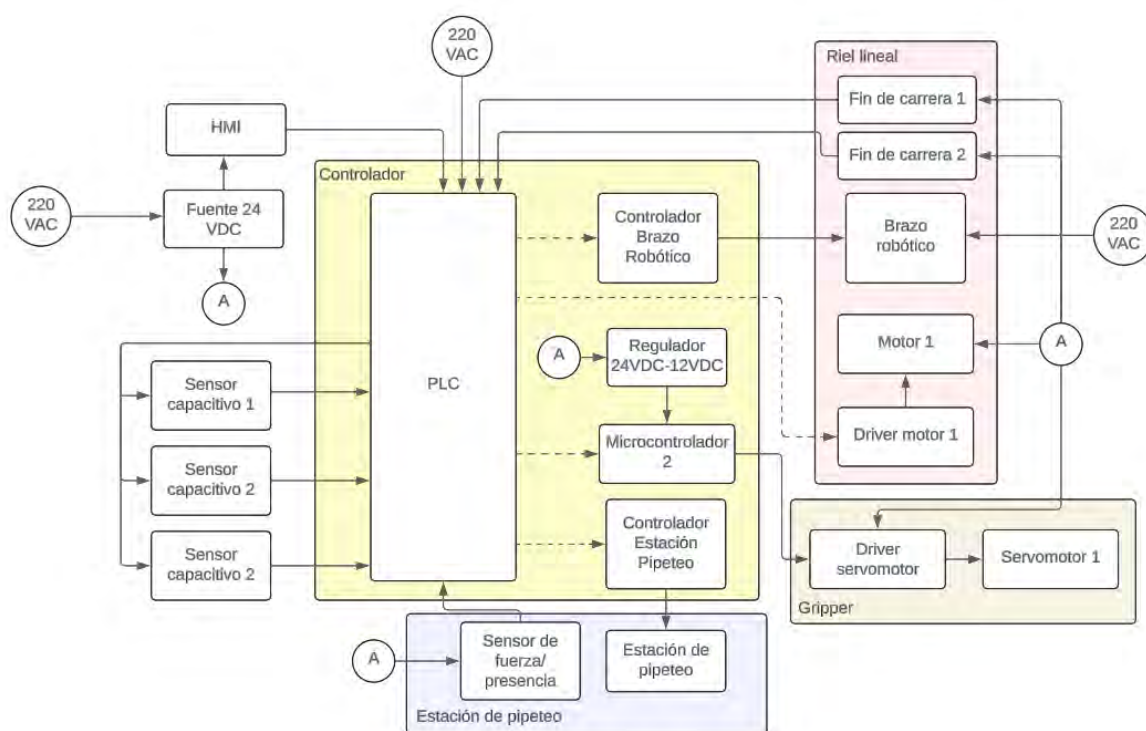


Figura 4.5. Diagrama de bloques del sistema. (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.1.3. Selección de materiales de fabricación

A continuación, se realiza la selección de materiales para la fabricación de diversos componentes mecánicos del sistema. Esta selección es considerada preliminar, pues luego se procederá a realizar cálculos de resistencia para evaluar si la elección fue la correcta.

En primer lugar, se analiza el material a emplear para la carcasa que tendrá el HMI, al igual que los demás componentes de interacción con el usuario. Los botones de encendido, apagado y parada de emergencia se encontrarán en esta carcasa y también albergará el PLC y algunos componentes electrónicos. La Tabla 4.1 muestra las alternativas para la construcción de la carcasa.

Tabla 4.1. Selección de materiales para carcasa de HMI. (Fuente: Elaboración propia)

Material	Fibra de vidrio	Aluminio (AL 6061)	Acero Inoxidable (SS 304)
Característica	Alta resistencia mecánica, térmica, y a la corrosión. Aislante	Ligero, alta resistencia a la corrosión, conductividad térmica	Alta resistencia a la corrosión, durabilidad, resistencia a impactos
Dureza (HB)	-	60	149
Resistencia (MPa)	1000	110-130	640
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2.0	2.7	7.9
Precio (US \$)	1.5-3/kg	2.4-2.6/kg	2.1-2.4/kg

El material elegido es la aleación de aluminio (6061). Esto debido a que el entorno dentro de un laboratorio de investigación de fármacos cumple con estándares de temperatura y humedad regulados. Es por ello que como opción ligera y de buena resistencia mecánica, se tiene el aluminio. Además, tiene facilidad de mecanización y está disponible en diversos mercados tanto a nivel nacional como internacional.

En segundo lugar, se debe escoger un material para la fabricación de la plataforma móvil que sostendrá el brazo robótico. Es importante garantizar que la plataforma móvil sea lo suficientemente rígida y estable para soportar el peso y los movimientos del brazo robótico. La Tabla 4.2. muestra las alternativas de materiales para la construcción de la plataforma móvil.

Tabla 4.2. Selección de materiales para plataforma móvil. (Fuente: Elaboración propia)

Material	Polietileno de alta densidad (HDPE)	Aluminio (AL 6061 o 7075)	Acero Estructural (A36)
Característica	Ligero, resistente a la corrosión y fácil de mecanizar.	Ligero, existente y excelente relación resistencia-peso.	Alta resistencia y durabilidad.
Dureza (HB)	40	150	149
Resistencia a la fluencia (MPa)	20	240	250
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	0.95	2.81	7.85
Precio (US \$)	0.66-1.36/kg	2.4-2.6/kg	2.1-2.4/kg

Se escoge el acero estructural para la plataforma móvil debido a su alta resistencia mecánica y rigidez, lo que garantiza una plataforma robusta y sin flexión bajo el peso del brazo robótico. Adicionalmente, que se encuentra disponible con facilidad y se puede mecanizar a la forma pretendida.

En el proyecto también se requerirán diversos componentes impresos en 3D. Esto debido a la versatilidad de formas y tamaños de piezas que se pueden obtener por medio de este proceso de fabricación. Para ello se debe seleccionar el material adecuado para el filamento utilizado en la impresión 3D. La Tabla 4.3. muestra las opciones de filamentos para la impresión 3D.

Tabla 4.3. Selección de materiales para componentes impresos, (Fuente: Elaboración propia)

Material	PLA	ABS	TPU	PETG
Resistencia a la tracción (MPa)	37	27	150	40
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.2-1.3	1.0-1.4	0.92	1.27
Facilidad de impresión	4/5	3/5	2/5	3/5
Precio por rollo (S/.)	80-120	100-150	80-120	120-180
Metros por rollo	250	200	200	300

En este caso se eligen 2 tipos de materiales. Ello pues se considerará elegir ácido poliláctico (PLA) o TPU dependiendo del requerimiento de resistencia o el uso que se le vaya a dar. Habrá algunas piezas que requieran más o menos resistencia dependiendo de la aplicación y para cada caso se evaluará el material a emplear.

Una consideración especial es el hecho de emplear un recubrimiento para ciertos componentes del sistema. Por ejemplo, para el brazo robótico se plantea el uso de una resina epóxica a la cual se le ha adicionado nanopartículas de cobre, la cual cubrirá diversas partes del brazo robótico. Las nanopartículas de cobre dotan a la resina una característica antimicrobiana, estas nanopartículas funcionan como un método eficaz para eliminar bacterias, siendo incluso más efectivas que las de plata (Navarro Rosales, Neira Velázquez y Ávila Orta, 2012). La resina epóxica, además, le brinda características que ayudan a la no permanencia de cualquier bacteria sobre la superficie del brazo. La resina permite que la superficie sea menos porosa, por lo que hay menos lugares potenciales para el ingreso de las bacterias mencionadas como la *Mycobacterium tuberculosis*.




#### **4.1.4. Selección de componentes principales**

Para poder realizar el proceso completo que se pretende automatizar, se requiere adquirir 3 componentes principales. Estos componentes son una cabina de bioseguridad de tipo II clase A, un brazo robótico de 5 grados de libertad y una pipeteadora automática. Para ello se analizan alternativas comerciales y los requerimientos mínimos que se esperan de cada uno.

- **Estación de pipeteo automático**

Este componente es el encargado de realizar el pipeteo desde el tubo de muestra a la placa de Petri. El acto de pipetear se refiere a trasladar el líquido de un contenedor a otro por medio de una pipeta para asegurar cantidades exactas. La estación de pipeteo se encarga de realizar ello sin la intervención de un operario, de manera automática. En la Tabla 4.4 se observan las opciones comerciales de diferentes estaciones de pipeteo.

Tabla 4.4. Comparación de estaciones de pipeteo. (Fuente: Elaboración propia)

Características	SOLO Automated Liquid Handler	D-One Assist Plus	BRAND Liquid Handling Station
			
Dimensiones (mm)	600 x 750 x 500	750 x 380 x 630	530 x 595 x 485
Volumen ( $\mu\text{L}$ )	1 - 10000	0.5 – 1250	1 - 1000
Peso (kg)	22.7	10	25
Interfaz	RS-232 cable serial	Wireless	1 USB
Precio (US \$)	20 000	10 000	30 000

Para realizar la elección se debe tomar en cuenta el volumen con el que puede trabajar la estación de pipeteo. Como se mencionó anteriormente, se debe depositar 0.1 ml de muestra diluida en cada cuadrante de la placa. En este caso las 3 opciones son de alta precisión y son capaces de trabajar con las cantidades deseadas. Entonces por la facilidad de trabajar con una interfaz wireless y poder programar que se reciban las señales deseadas por el sistema la mejor elección para la estación de pipeteo es D-One Assist Plus. Se escoge el canal D-One, pues para esta aplicación es suficiente poder trabajar con un único canal para una sola pipeta, la cual trabaja en el rango especificado en la Tabla 4.4. A ello se le suman sus dimensiones adecuadas y el precio. Para el correcto funcionamiento del sistema es necesario que la estación de pipeteo se encuentre dentro de la cabina de bioseguridad. Es por ello que sus dimensiones deben ser las menores posibles sin sacrificar un correcto pipeteo y a una velocidad adecuada.






Figura 4.6. Pipeteadora automática D-ONE Assist Plus. (Fuente: INTEGRA Biosciences AG, 2023)

- **Brazo robótico de 4 o 5 grados de libertad**

Para la manipulación de tubos y placas de Petri es necesario emplear un brazo robótico. Este componente los trasladará de un punto a otro y también realizará la apertura de los mismos. Para poder movilizar cada uno el brazo robótico tendrá acoplado una pinza robótica diseñada especialmente para esta aplicación.

Tabla 4.5. Comparación de brazos robóticos. (Fuente: Elaboración propia)

Características	Dobot MG400	Meca500	UFactory xArm 5 Lite
			
Carga (kg)	0.5	0.5	3
Alimentación	100-240 VAC / 50-60Hz	90 - 264 VAC / 50-60Hz	-
Alcance (mm)	440	330	700
Peso (kg)	8	4.6	11.2
Grados de libertad	4	6	5
Precio (US \$)	3000	15000	5300

En este caso se escoge el robot Dobot MG400 debido a su tamaño reducido, por lo que será capaz de operar dentro de la cabina de bioseguridad sin inconvenientes. Adicionalmente, tiene

una alta precisión, lo que es de vital importancia para esta aplicación. A este brazo robótico se le pueden acoplar diferentes pinzas robóticas, como la que se pretende diseñar para esta aplicación.



Figura 4.7. Brazo robótico Dobot MG400. (Fuente: Shenzhen Yuejiang Technology Co, 2023)

Como se observa en la Figura 4.8 se puede apreciar el rango de movimiento del robot, obteniendo así un rango de alcance de 400 mm. De esa manera se asegura un correcto funcionamiento y alcance a todas las zonas requeridas.

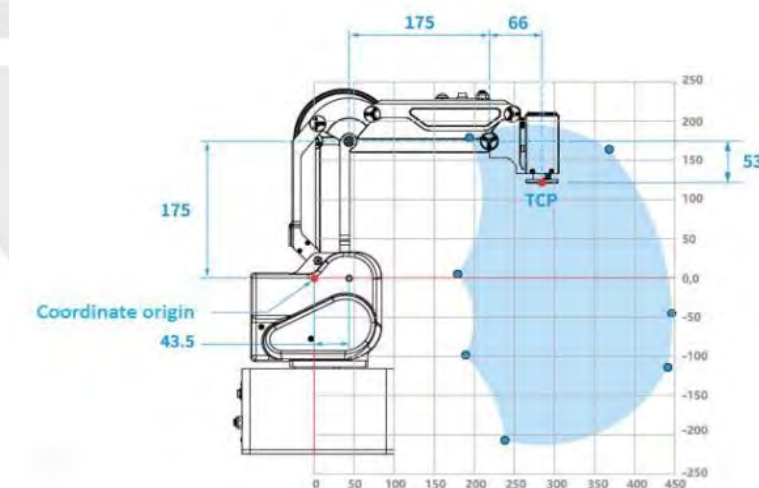





Figura 4.8. Rango de movimiento de Dobot MG400. (Fuente: Shenzhen Yuejiang Technology Co, 2023)

- **Cabina de Bioseguridad clase II - tipo A**

Este componente albergará todos los demás componentes del sistema. Debe tener el tamaño necesario para que todos los componentes quepan en el espacio y debe soportar las cargas a las

que será sometido el mismo. Las características de todas las cabinas son similares. Pues todas siguen un estándar de bioseguridad según la norma NSF Standard 49 (NSF International, 2018). Por lo tanto, la característica más importante la cuál debe cumplir la cabina es que debe ser capaz de albergar todos los componentes del sistema. Para ello se analizan las dimensiones de acuerdo a la Figura 4.9. comparando las cabinas en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Comparación de cabinas de bioseguridad. (Fuente: Elaboración propia)

Características	<b>NU-543-500E (Marca: LabGard)</b> 	<b>AC2-4E2 (Marca: )</b> 	<b>BSC-1300 II A2-X (Marca: BIOBASE)</b> 
Dimensiones internas (alto x largo x ancho)	724 mm x 1483 mm x 654 mm	1270 mm x 546 mm x 670 mm	1100 mm x 600 mm x 660 mm
Dimensiones externas(alto x largo x ancho)	1546 mm x 1669 mm x 799 mm	1340 mm x 732 mm x 1400 mm	1300 mm x 850 mm x 2200 mm
Tipo de filtro - eficiencia	HEPA (High Efficiency Particle Arresting) - 99,995%	ULPA (Ultra Low Penetration Air) - 99,999%	HEPA (High Efficiency Particle Arresting) - 99,995%
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Precio (US \$)	3000	15000	5300

Se escoge la cabina de bioseguridad NU-543-500E, debido a sus características y sobre todo sus dimensiones. El filtro HEPA, tiene un porcentaje de eficiencia suficiente para la aplicación y proteger a los usuarios en una medida superior. En la Figura 4.9 se muestra la distribución de los componentes en el sistema desde una vista superior. Con esta distribución se puede obtener las dimensiones requeridas por la cabina de bioseguridad.

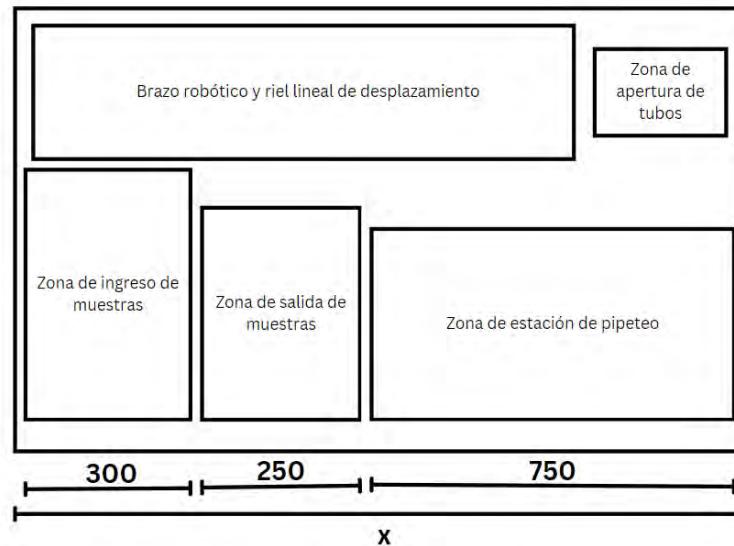


Figura 4.9. Distribución al interior de la cabina. (Fuente: Elaboración propia)

Es por ello que se escoge la Cabina de Seguridad Biológica Clase II Tipo A2 de 150 cm de ancho LabGard. Esta cabina cumple con los estándares deseados, así como el tamaño requerido por la aplicación. Sus dimensiones internas son 724 mm (alto) x 1483 mm (ancho) x 654 mm (largo). En la Figura 4.10 se puede observar la cabina de bioseguridad escogida.



Figura 4.10. Cabina de bioseguridad NU-543-500E. (Fuente: LabGard)

## 4.2. Diseño mecánico.

En esta sección se desarrollará el diseño mecánico de los principales componentes del sistema. Se realizan tanto cálculos mecánicos, como simulaciones por elementos finitos. Finalmente, se desarrollarán los planos mecánicos y de ensamble del sistema.

### 4.2.1. Dimensionamiento del sistema

El sistema se encuentra albergado dentro de una cabina de seguridad biológica clase II tipo A2. Esta cabina tiene dimensiones exteriores: 1546 mm (alto) x 1669 mm (ancho) x 800 mm (largo). Ello implica que el sistema tendrá como dimensiones máximas las mencionadas. Estas medidas cumplen además con los requerimientos geométricos establecidos previamente.

### 4.2.2. Diseño de riel lineal para brazo robótico

El brazo robótico se encuentra montado sobre una guía lineal para poder realizar un desplazamiento horizontal sobre la mesa. Esto le ayuda a tener un mayor alcance y poder movilizarse hacia los distintos puntos de trabajo de la mesa. En la Figura 4.11 se observa este mecanismo.

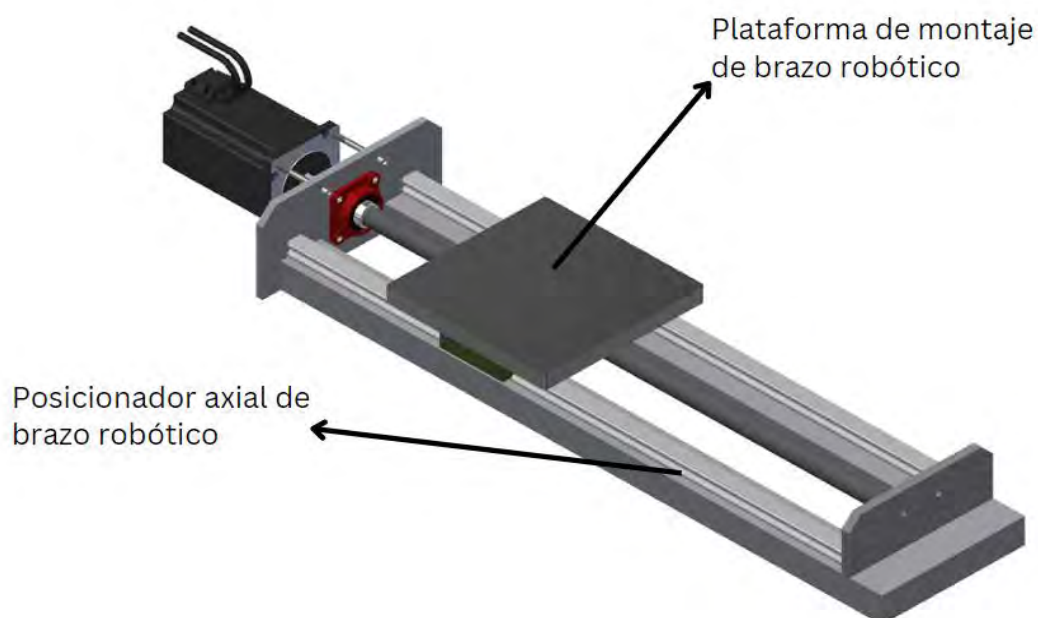


Figura 4.11. Diseño 3D del mecanismo de riel lineal para el brazo robótico. (Fuente: Elaboración propia)

Para poder seleccionar el motor que se emplea para dicha aplicación es necesario calcular la potencia necesaria para poder desplazar el robot, junto a su base y la carga máxima posible. Para realizar dicho cálculo se tomarán los siguientes datos en base a los requerimientos expuestos previamente.

La masa del brazo es de 8 kg y la masa de la base diseñada es de 4.1 kg aproximadamente de acuerdo al software Inventor. En la Figura 4.12 se aprecia la base sobre la cual se montará el brazo y que se desliza debido al mecanismo de husillo de bolas, además de las propiedades de la misma. Las dimensiones de la misma fueron elegidos en una primera instancia de acuerdo a una aproximación. Posterior a realizar el primer análisis, se llegó a la conclusión de que se había sobredimensionado el espesor de la plancha pues se obtuvo un factor de seguridad elevado. En ese sentido, se muestra el diseño final de la base.

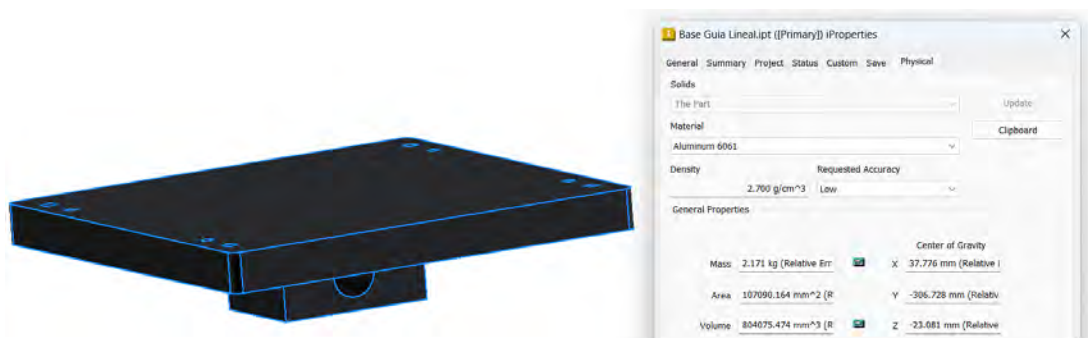


Figura 4.12. Propiedades de la base diseñada. (Fuente: Elaboración propia)

Se calcula la masa total:

$$W = (W_1 + W_2) \quad (1)$$

Donde  $W_1$  es la masa del brazo,  $W_2$  es la masa de la base diseñada. En ese sentido, se obtiene el valor de carga total de  $W = 12.52$  kg aproximados a 12.6 kg. Para el cálculo del torque requerido por el motor se realiza el DCL de la base diseñada.

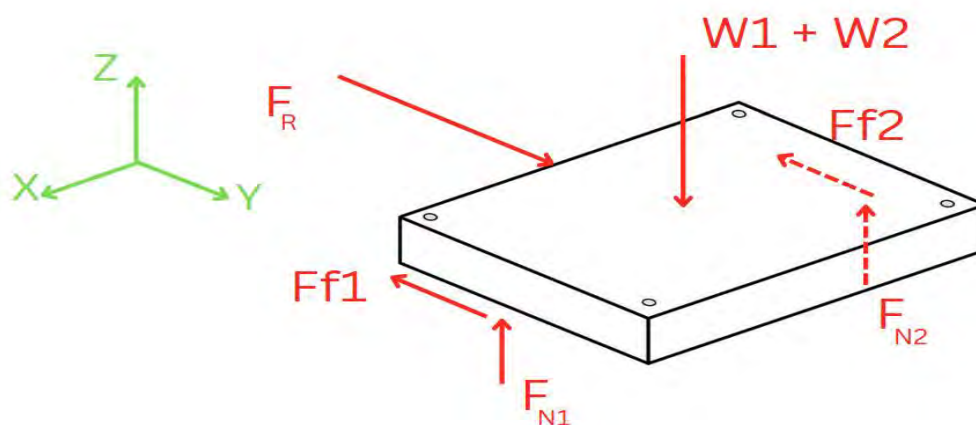


Figura 4.13. DCL de la base diseñada. (Fuente: Elaboración propia)

Donde  $F_R$  es la fuerza requerida para movilizar la base junto al brazo y  $F_{f1}$  es la fuerza de fricción. Aplicando la 2da ley de Newton y con el conocimiento para obtener la fuerza de fricción se obtiene (2).

$$F_R = \mu \times F_N \quad (2)$$

Donde  $\mu$  es el coeficiente de fricción entre la guía lineal y el riel la cual es de 0.05 (Oriental Motor USA Corp, 2024), y  $F_N$  es la fuerza normal. Al analizar las fuerzas en el eje z se obtiene que  $W = F_N$ . Finalmente, se obtiene que la fuerza requerida es de 6.17 N.

Se empleará un husillo de bolas SFU2010 de 20 mm de diámetro (d), longitud (L) de 700 mm y paso (p) de 10 mm/rev. A una eficiencia ( $\eta$ ) de 85% y utiliza acero aleado (GCr15) en su fabricación. También, se usa el valor del torque de arranque  $T_A = 0.5 \text{ Nm}$ , valor recomendado para husillos de bolas. Es necesario obtener el torque de operación de acuerdo a (3).

$$T = \left( \frac{F \times p}{2 \times \pi \times \eta} \right) + T_A \quad (3)$$

El torque será  $T = 0.512 \text{ Nm}$ , al cual le aplicamos un factor de seguridad  $FS = 1.5$ ; obteniendo un valor de torque  $T = 0.768$ . La relación entre la velocidad angular ( $\omega$ ) del husillo y la velocidad lineal ( $v=100 \text{ mm/s}$ ) de la masa está dada por (4).

$$\omega = \frac{2 \times \pi}{p} \times v \quad (4)$$

Despejando  $\omega$  se obtiene el valor de  $62.83 \text{ rad/s} = 600 \text{ RPM}$ . Finalmente, la potencia se obtiene mediante la expresión (5).

$$P = \omega \times T \quad (5)$$

Con esos datos se obtiene el valor de  $32.2 \text{ W}$ . Para corroborar los valores obtenidos de manera referencial se emplea la página web de Oriental Motor (Oriental Motor Usa Corp, 2024). En la Figura 4.14 se aprecian los primeros parámetros a emplear con lo que se puede obtener los valores de torque y revoluciones por minuto.

Debido a que se usarán patines Hiwin y los rieles que vienen junto al producto, se tiene un coeficiente de fricción de 0.05, como se mencionó anteriormente.

**Unit**

Select the unit  Imperial  Metric

**Load and Linear Guide**

Total mass of loads and table  $m = 12.6$  kg

Friction coefficient of the guide  $\mu = 0.05$

Ball / Lead Screw, Load, Table, Linear Guide, Screw, Secondary Pulley, Transmission belt, Motor, Primary Pulley

Figura 4.14. Ingreso de datos de la carga y la guía lineal (Fuente: Oriental Motor USA Corp, 2024)

Se emplean los mismos datos que se mencionaron con anterioridad del diámetro del husillo, del torque de arranque, entre otros. Con ello se procede a ejecutar el programa obteniendo los resultados presentados en la Figura 4.15.

Sizing Results		
Load Inertia	$J_L$	= 1.1878e-4 [kg·m <sup>2</sup> ]
Required Speed	$V_m$	= 600 [r/min]
Required Torque	$T$	= 0.7803 [N·m]
Acceleration Torque	$T_a$	= 7.4627e-3 [N·m]
Load Torque	$T_L$	= 0.5127 [N·m]
Required Stopping Accuracy	$\Delta\theta$	= 36 [deg]




Figura 4.15. Resultados de cálculo (Fuente: Oriental Motor USA Corp, 2024)

De ello resalta el torque de carga  $T_L = 0.512$  Nm, el torque requerido  $T = 0.7803$  Nm (con un factor de seguridad adicional similar al que empleamos) y la velocidad necesaria  $n = 600$  RPM; en concordancia con los cálculos efectuados previamente. Finalmente, para calcular la potencia requerida por el motor para accionar el husillo de bolas se emplea (6).

$$P = T \times w \quad (6)$$

Ello da como resultado 49.03 W o 0.07 HP. En ese sentido se puede seleccionar un motor de la tabla mostrada a continuación. Ello es similar a los datos obtenidos con anterioridad, por lo que se puede confiar en los mismos.

Tabla 4.7. Selección de motores DC para mecanismo de guía lineal. (Fuente: Elaboración propia)

Característica	Mini Motor SPA: DBS-S80 series 	Faulhaber Drive Systems: 2057S024BA 	Estun Automation: TRIO MX 
Tipo	Brushless	Brushless	-
Voltaje entrada (VDC)	24/48	24	24
Corriente entrada (A)	6.3	3	-
Potencia (W)	345	282	400
Torque (Nm)	1.1	13.7	4.45
Velocidad de rotación (RPM)	3000	44300	6000
Peso (kg)	2.24	0.1	-
Adicional	Freno opcional Driver integrado Con encoder	Sensor Hall integrado	Emplea encoder Freno de banda opcional

El diseño de cada uno de los subsistemas en el proyecto considera como requisito fundamental el control a través de un PLC. Este enfoque garantiza una integración y automatización eficiente de los procesos. Dado que el control se efectuará mediante el PLC, el proceso de cálculo de los parámetros operativos se enfocará en tres aspectos clave: velocidad, aceleración y la cantidad de pulsos requeridos para lograr el movimiento deseado. Es importante destacar que se ha decidido optar por un acoplamiento directo entre el motor y el husillo de avance. Esta decisión de diseño simplifica la mecánica del sistema, reduciendo posibles fuentes de error y desgaste, y a la vez asegura una transmisión eficiente y precisa del movimiento. Al eliminar elementos intermedios como correas o engranajes, el acoplamiento directo permite una mejor correspondencia entre los movimientos del motor y los desplazamientos del husillo, lo cual es crucial para mantener la precisión en operaciones automatizadas controladas por PLC. Primero, se comienza realizando el cálculo de la frecuencia de operación del motor:

$$P_{TOTAL} = \frac{d_{TOTAL} \times \theta_{TOTAL}}{d_{avance} \times t} \quad (7)$$

Donde:  $P_{total}$  es la frecuencia de pulsos totales (*pulsos/s*),  $D_{total}$  es la distancia de traslación total (*mm*),  $\theta_{paso}$  es la resolución del driver (*pasos/rev*),  $d_{avance}$  es el avance del husillo (*mm/rev*) y  $t$  es el tiempo de traslación total (s).

El posicionador está diseñado para operar a una velocidad fija de 0.1 m/s. A esta velocidad, para recorrer una distancia de 100 mm, se requerirá un tiempo de 1 segundo. Por lo tanto, la frecuencia de operación necesaria para lograr este movimiento es de 12,500 pulsos por segundo. Esta frecuencia es manejable para la mayoría de los PLCs, ya que típicamente operan a velocidades en el rango de MHz o incluso GHz en algunos casos avanzados, lo que hace esta frecuencia de operación bien dentro de sus capacidades.

Por otro lado, se realiza un análisis de elementos finitos por medio del software Ansys de la base que soportará al brazo robótico. Se puede apreciar en la Figura 4.16 la deformación total de los componentes principales de la guía lineal.

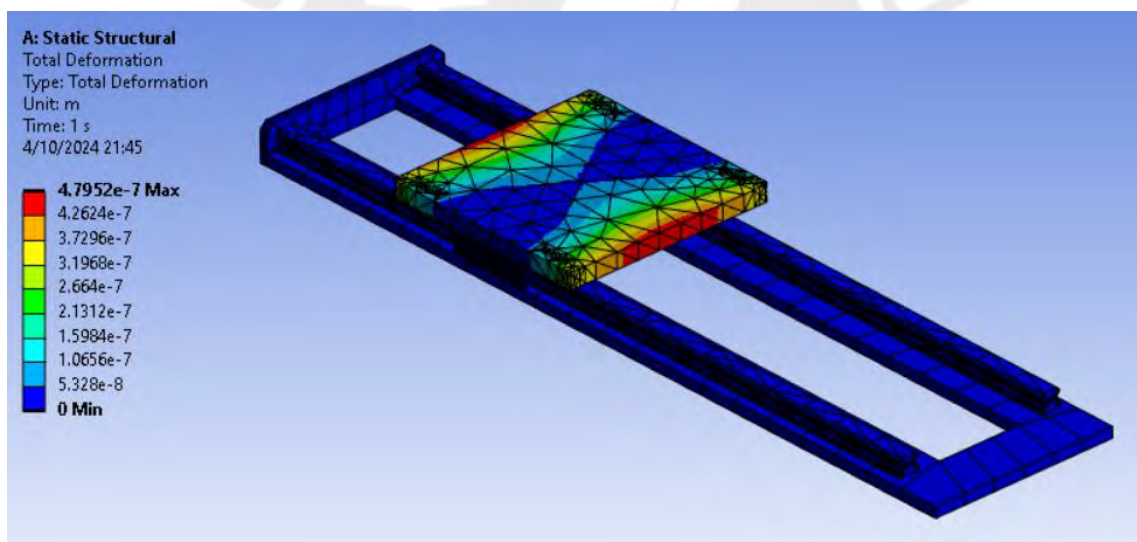


Figura 4.16. Deformación total de los componentes principales de la guía lineal diseñada. (Fuente: Elaboración propia)

Como se aprecia la deformación máxima de la placa de aluminio, la cuál es despreciable, de 0.4  $\mu\text{m}$ . De igual forma se observa el esfuerzo equivalente al cual es sometido la placa base. En esta se puede observar que está muy lejos del esfuerzo a fluencia del aluminio el cuál es 240 MPa. Por ello se puede asumir que el material seleccionado y la pieza diseñada pueden soportar las cargas a las cuáles serán sometidos. Ello gracias a la ecuación (7).

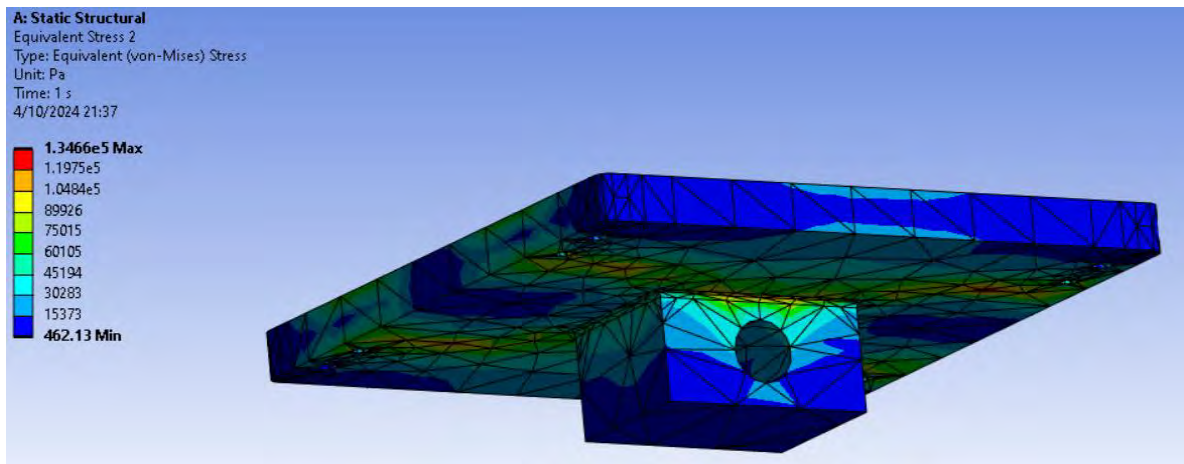


Figura 4.17. Esfuerzo equivalente Von Mises de la base del brazo robótico en el riel lineal. (Fuente: Elaboración propia)

Se calcula el factor de seguridad a partir de (8).

$$\sigma_{eq} = \frac{\sigma_f}{FS} \quad (8)$$

Reemplazando, se obtiene que el factor de seguridad (FS) será de 178 aproximadamente, por lo que el material soporta con un amplio margen, pudiendo incluso sugerirse alguno otro con menor resistencia y un precio menor.

#### 4.2.3. Diseño de pinza robótica

Para la manipulación de los objetos del sistema se diseñará una pinza robótica o gripper. De acuerdo a los requerimientos esta pinza debe ser capaz de manipular placas de Petri de 90 mm de diámetro y tubos de 20 mm x 148 mm con tapa. De igual forma, el gripper debe poder sostener las tapas tanto de las placas como de los tubos de muestra para poder aperturar ambas, respectivamente. El peso máximo previsto es de 100 g o 0.1 kg.

Para ello el gripper diseñado se muestra en la Figura 4.18. Se puede observar el mecanismo a emplear para el accionamiento del gripper por medio de un servomotor.

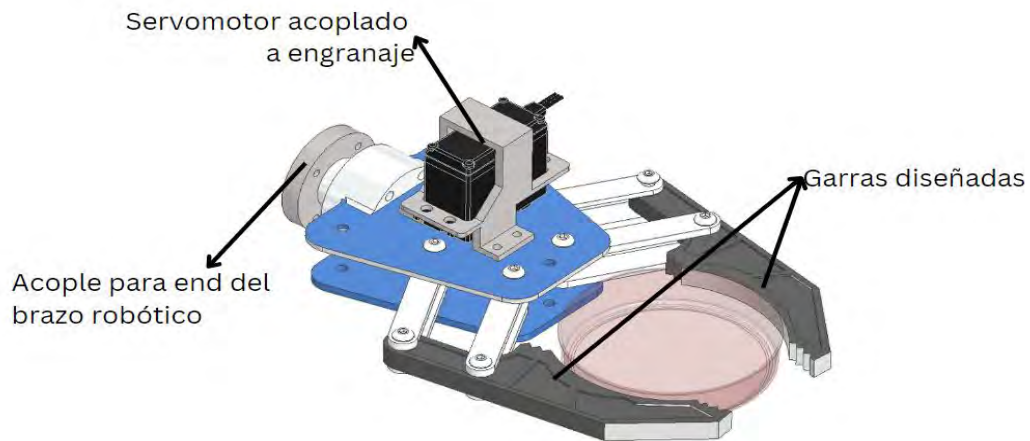


Figura 4.18. Pinza robótica del sistema. (Fuente: Elaboración propia)

Para el correcto diseño del mecanismo es necesario conocer el torque requerido por el motor para una correcta sujeción de las placas y de los tubos. Para ello se observa el DCL de tanto la placa como de las pinzas de sujeción. En la Figura 4.19 y la Figura 4.20. se muestran el DCL de la placa y de las garras diseñadas respectivamente.

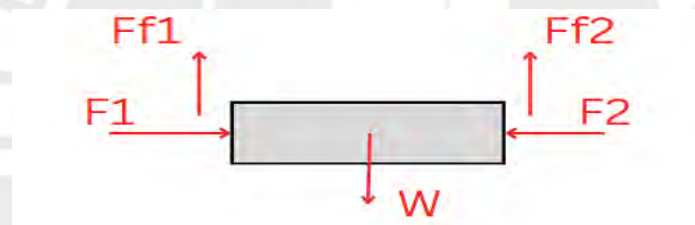


Figura 4.19. DCL de placa de Petri

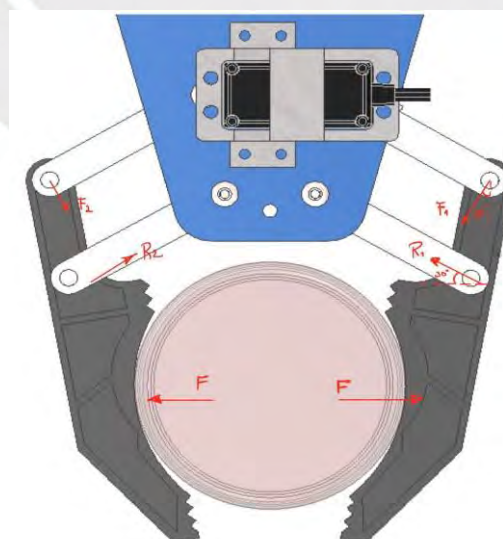


Figura 4.20. DCL de pinza robótica. (Fuente: Elaboración propia)

En el primer DCL se sabe que el peso máximo será de 0.1 kg y considerando un factor de seguridad de 1.5 será  $W = 0.15$  kg. Respecto a la fuerza de fricción esta se calcula de acuerdo a (9).

$$F_{f1} = F \times \mu \quad (9)$$

Donde  $\mu=1.0$ , pues se trata de una placa de vidrio y las garras serán recubiertas con caucho para un mejor agarre y protección. Aplicando la segunda ley de Newton para el equilibrio se obtiene el valor de F. Considerando que por simetría  $F_1 = F_2$  y  $F_{f1} = F_{f2}$ , se obtiene (10).

$$F = \frac{W}{2 \times \mu} \quad (10)$$

Reemplazando se obtiene que la fuerza necesaria F será de 0.736 N.

El torque requerido por el servomotor es la suma de 2 torques necesarios por el mecanismo. Uno es el giro mismo del pin al cual está acoplado junto con el engranaje y la biela. El otro es el torque necesario para hacer girar el otro engranaje necesario para empujar la biela de la otra garra.

El primero cumple con (11)

$$T_1 = d \times F_1 \quad (11)$$

Donde d es la longitud de la biela, la cuál es de 50 mm. Además, los engranajes tienen el mismo diámetro y el mismo módulo la relación de transmisión el cual será de 1:1. En ese sentido, el torque que genera el servomotor será el transmitido al engranaje secundario cuya fuerza será  $F_2$ .

En la Figura 4.20 se puede apreciar la geometría del gripper, la cual se infiere simétrica. Por lo cual, se considera  $F_1 = F_2$  y  $R_1 = R_2$ . Aplicando la segunda ley de Newton al DCL de la pinza robótica se obtiene la relación (12) y analizando únicamente una de las garras del gripper se consigue (13).

$$\Sigma_X: 2F_1 \times \cos(30^\circ) = 2R_1 \times \sin(30^\circ) \quad (12)$$

$$\Sigma_Y: F_1 \times \sin(30^\circ) + R_1 \times \cos(30^\circ) = F \quad (13)$$

Al resolver el sistema de ecuaciones se obtiene el valor de  $F_1 = 0.368$  N. Reemplazando este valor en (11) se obtiene un valor de torque de 0.0184 Nm. El servomotor deberá generar este torque directamente y además por medio de los engranajes de relación de transmisión 1:1 se deberá generar un torque de la misma magnitud. Obteniendo finalmente un torque requerido:

$$T_R = 0.0184 * 2 = 0.0368 \text{ Nm}$$

Otro análisis que se debe realizar para poder seleccionar el motor a emplear, es en el caso de insertar el tubo de muestras en el soporte para apertura. Debido a la interferencia para el diseño se deberá superar

la fuerza axial máxima que se puede transmitir por los materiales. En la Figura 4.21 se muestra el DCL del tubo de muestra cuando debe ingresar en el soporte.

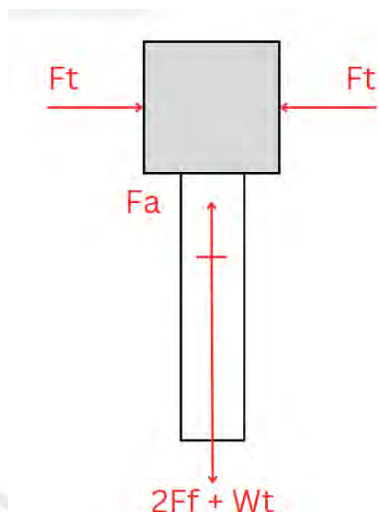


Figura 4.21. DCL del tubo de muestras. (Fuente: Elaboración propia)

La condición es que la fuerza aplicada por la pinza debe ser la suficiente como para mover el tubo sin que resbale. La fuerza máxima que puede transmitir la unión entre el tubo y el soporte de tubo se puede aproximar como si fuese un zunchado (Niemann, 1987). Esta fuerza está dada en (14).

$$F_a = \mu \times p_c \times \pi \times L_c \times d \quad (14)$$

Donde:

$\mu = 0.8$ : Coeficiente de fricción entre los materiales en contacto.

$p_c$ : presión de contacto entre el tubo y el soporte.

$L_c = 2 \text{ mm}$ : longitud de la zona de contacto.

$d = 16.5 \text{ mm}$ : diámetro del tubo en la zona de contacto.

La presión de contacto se halla a partir de (15).

$$p_c = \frac{\delta}{c \left[ \frac{b^2 + c^2}{E_s (b^2 - c^2)} + \frac{1 - \nu_t}{E_t} + \frac{\nu_s}{E_s} \right]} \quad (15)$$

Donde:

$\delta$ : Interferencia radial.

$b = 14.5 \text{ mm}$ : Radio del anillo de caucho.

$c = 8.25 \text{ mm}$ : Radio del tubo de muestra.

$E_s = 20 \text{ MPa}$ : Módulo de Young del caucho.

$E_t = 1100 \text{ MPa}$ : Módulo de Young del polipropileno.

$\nu_s = 0.45$ : Coeficiente de poisson del caucho.

$\nu_t = 0.42$ : Coeficiente de poisson del polipropileno.

La interferencia radial es la mitad de la interferencia diametral. Dado que el tubo tiene un diámetro de 17 mm y el anillo de caucho tiene un diámetro interno de 16.5 mm.

$$\delta = \frac{I}{2} = \frac{17 - 16.75}{2} = 0.125 \text{ mm}$$

Se reemplaza en (15) se obtiene el valor de la presión de contacto  $p_c = 0.1253 \text{ MPa}$ . Con ese valor se puede conocer el valor de la fuerza axial mínima que debe ser aplicada en el tubo de muestra para poder ingresarlo dentro del soporte de tubo reemplazando en (14).

$$F_a = 10.394 \text{ N}$$

Con el valor de  $F_a$  aplicamos la segunda ley de Newton obteniendo la relación (16) y la fuerza de fricción debido al movimiento inminente pues se requiere la fuerza mínima necesaria que debe generar el servomotor obteniendo (17).

$$\Sigma Y: 2F_f + W_t = F_a \quad (16)$$

$$F_f = \mu_2 \times F_t \quad (17)$$

Reemplazando los valores obtenidos previamente, además del valor de coeficiente de fricción igual a 0.2 entre la tapa del tubo (polietileno) y la garra del gripper (poliuretano termoplástico); y el peso del tubo de muestra de 7 g se obtiene el valor de la fuerza requerida.




$$F_t = 25.81 \text{ N}$$

Empleando la relación obtenida previamente en (11), (12) y (13) se obtiene el valor del torque requerido.

$$T_R = 2 \times 0.05 \times 12.907 = 1.291 \text{ Nm}$$

Con este valor se procede a seleccionar el servomotor a emplear. Para ello se analizan las opciones por medio de la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Selección de servomotores para el gripper. (Fuente: Elaboración propia)

Característica	SERVOMOTOR XM430-W210 	SERVOMOTOR RDS3135 	SERVOMOTOR MG996R 
Ángulo de giro	360°	180°	180°
Par máximo (kgf×cm)	27.5	35	11
Voltaje de alimentación (V)	10.0 - 14.8	6 - 8.4V	4.8 - 6
Corriente máxima (A)	-	3.2	2.5
Peso (g)	82	60	55
Precio (S/.)	930	180	40

Considerando el torque o par necesario  $T_R = 2.58996 \text{ Nm} = 13.16 \text{ kgf} \times \text{cm}$ . Se escoge la opción con el mejor precio considerando la calidad del producto, además de asegurar el correcto funcionamiento de la aplicación.

Para complementar el análisis estructural del funcionamiento de la pinza robótica, se realiza una simulación por computadora basada en elementos finitos por medio del software Ansys. Se escogió el material poliuretano termoplástico (TPU) para la fabricación de las garras del gripper robótico. En ese sentido, se emplea un modelo de material hiperrealista llamado modelo de material de 5 parámetros Mooney-Rivlin. En la tabla 4.9 se muestran estos parámetros (San Martín, 2022).

Tabla 4.9. Coeficientes para modelo de material de 5 parámetros Mooney-Rivlin para TPU.

(Fuente: San Martín, 2022)

Constante de material C10 [Pa]	Constante de material C01 [Pa]	Constante de material C20 [Pa]	Constante de material C11 [Pa]	Constante de material C02 [Pa]	Parámetro de incompresibilidad D1 [Pa-1]
-2.7782E+07	3.86665E+07	87766	-7.5145E+05	9.2331E+06	0

Una vez ingresados dichos parámetros en el software Ansys se realiza una simulación estructural para analizar tanto la deformación de la pinza como el esfuerzo al que es sometida. En la Figura 4.22 se observa el esfuerzo equivalente de Von Mises de las garras de la pinza.

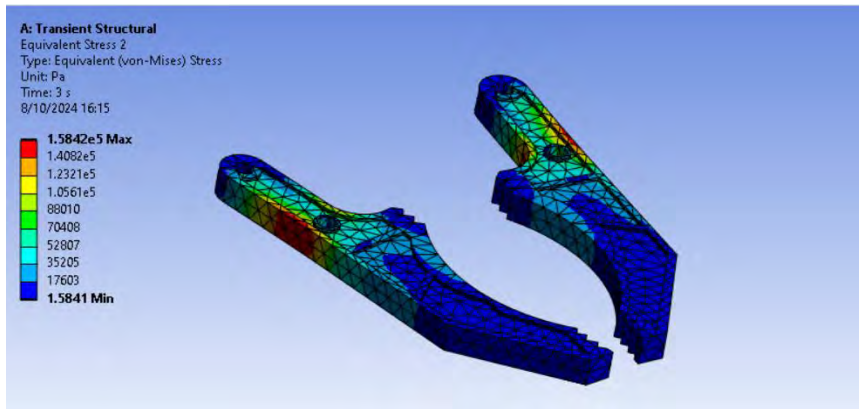


Figura 4.22. Esfuerzo equivalente en las garras de la pinza robótica. (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 4.23 se puede observar la deformación de las garras diseñadas para el gripper, al sostener y trasladar una placa de Petri.

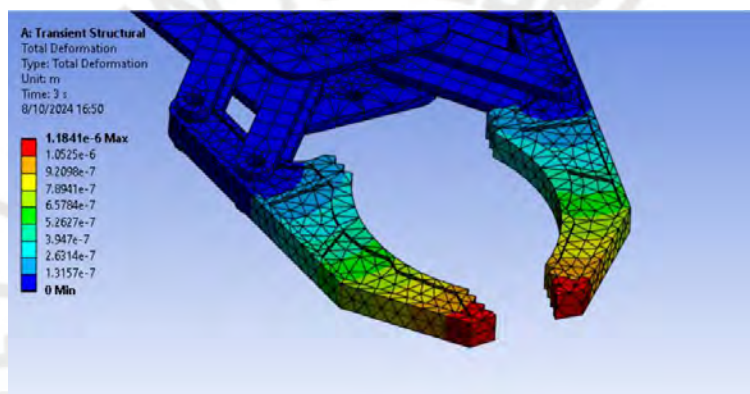


Figura 4.23. Deformación en las garras de la pinza robótica. (Fuente: Elaboración propia)

Otro análisis realizado es el de la pinza robótica al ser sometida a la fuerza requerida para poder insertar el tubo de muestras. En la Figura 4.24 se puede apreciar dicha deformación saltando a la vista una deformación mayor a la pretendida.

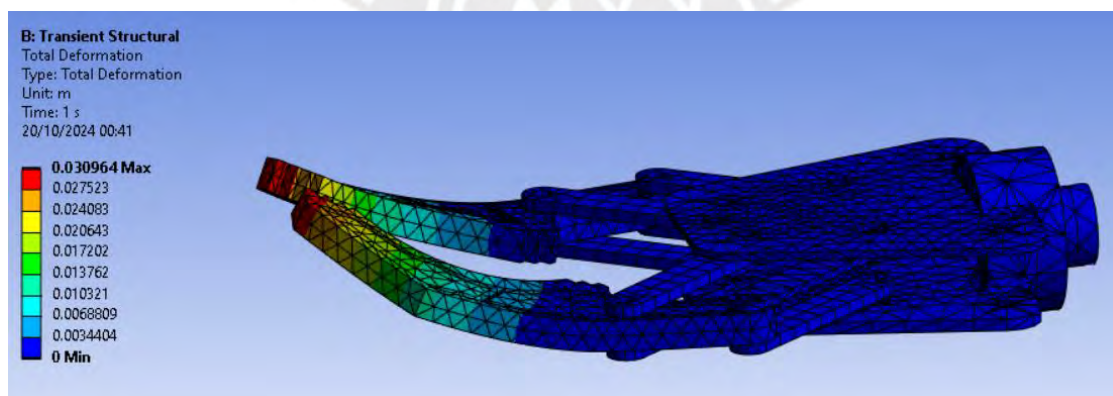


Figura 4.24. Deformación de la pinza robótica para una carga de 10.34 N. (Fuente: Elaboración propia)

De igual manera se analizan los esfuerzos equivalentes de Von Mises en todos los elementos de la pinza. Se resaltan las bielas de unión entre la base principal y las garras de material flexible. Estos elementos son sometidos a un esfuerzo máximo de 17.61 MPa como se muestra en la Figura 4.25.

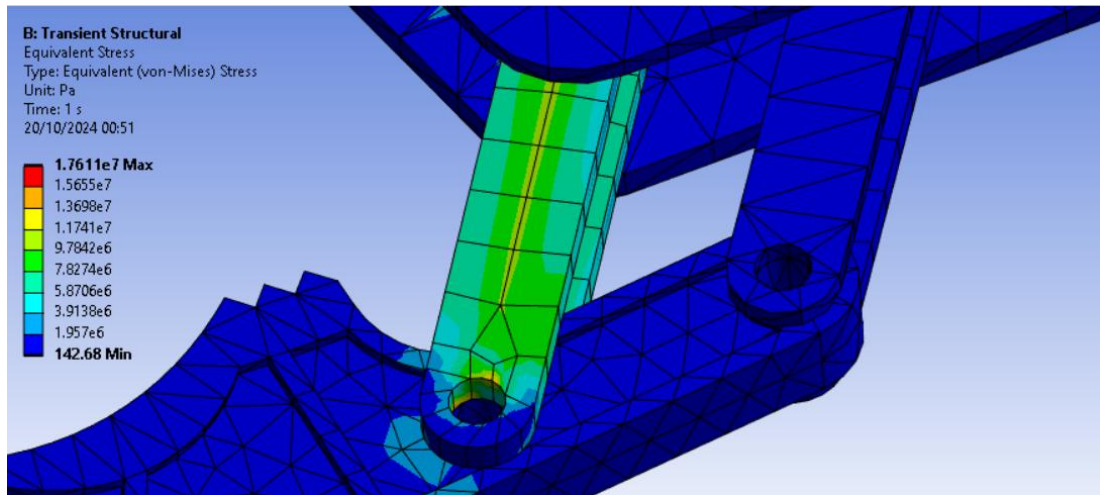


Figura 4.25. Esfuerzo equivalente en biela de pinza robótica. (Fuente: Elaboración propia)

Al ser este el valor del esfuerzo equivalente contando todas las cargas a las cuales es sometido el elemento, se puede hallar el factor de seguridad (FS) para analizar si es que el elemento soporta dicho esfuerzo. Ello se analiza en (18).

$$FS = \frac{\sigma_F}{\sigma_{eq}} \quad (18)$$

Como se observa en la simulación aproximamos el esfuerzo máximo a 17.61 MPa y el material de las bielas es aluminio AL6061 por lo que su esfuerzo a fluencia es 240 MPa. En ese sentido, el factor de seguridad será 13.5; por ello se puede concluir que no habrá problemas en esta aplicación por falla del elemento.

#### 4.2.4. Diseño de soporte de apertura de muestras

Una parte importante del sistema es el soporte para la apertura de los tubos de muestra. Para poder extraer el contenido de los tubos, es decir, la muestra de esputo; se requiere poder colocarlo en un recipiente tal que permita el giro de la tapa del tubo. La pinza robótica se diseñó con una parte capaz de generar el agarre necesario para la geometría del tubo de muestra. En la Figura 4.26 se muestra el soporte planteado para cumplir dicha función.

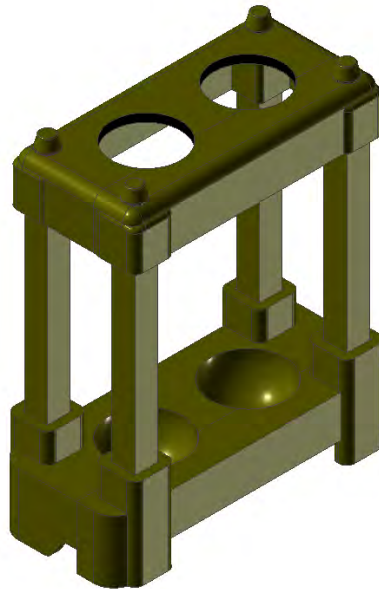


Figura 4.26. Soporte para apertura de muestras. (Fuente: Elaboración propia)

Como se mencionó anteriormente, la forma en la que se realiza la apertura de los tubos es por medio de la fricción generada entre la superficie del tubo de muestras y un anillo de caucho que se encuentra donde ingresa el tubo. En este caso existe una interferencia entre el tubo y el anillo de caucho el cual ingresará a presión. Por lo que se diseña un anillo de caucho de diámetro interno 16.5 mm y diámetro externo 18 mm.

#### **4.2.5. Diseño de carcasa electrónica.**

La Figura 4.6 muestra el diagrama de bloques del sistema. En dicho diagrama se observan los elementos a emplear en el sistema para cada etapa del control por retroalimentación. Pues se emplearán sensores y actuadores para satisfacer todas las funciones del sistema. Todo ello lo controla un PLC que requerirá otros elementos electrónicos como una llave termo-magnética por seguridad, entre otros. Todos estos elementos, incluidos la HMI y los botones de funcionamiento serán albergados por una carcasa diseñada para poder soportar estos elementos y asegurar un correcto funcionamiento. En la Figura 4.27 se aprecia la carcasa diseñada para poder albergar todos los componentes electrónicos y de control del sistema.



Figura 4.27. Carcasa para componentes electrónicos. (Fuente: Elaboración propia)

Como se mencionó en la sección de selección de materiales el material elegido para esta aplicación es aluminio AL6061. Adicionalmente, se unirá a la cabina de bioseguridad por medio de una unión soldada en la parte superior e inferior de la carcasa. Esta unión soldada se evalúa a continuación.

Habrán 2 cordones de soldadura tanto en la parte superior como en la inferior. Para evaluar este tipo de unión se toma el modelo presentado en la Figura 4.28.

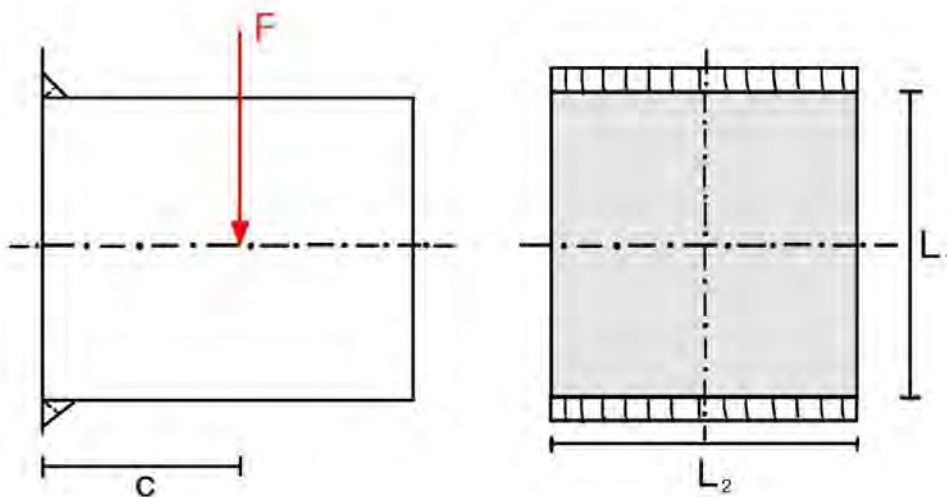


Figura 4.28. Diagrama de cordones de soldadura para carcasa electrónica. (Fuente: Elaboración propia)

Se considera la fuerza ejercida en la carcasa como la suma de los pesos de los componentes en el centro de gravedad de la misma. Para ello se consideran los siguientes pesos aproximados:

- PLC: 0.455 kg
- HMI: 0.458 kg

- Llave termo magnética: 0.265 kg
- Pulsadores: 0.24 kg
- Otros componentes: 1.5 kg
- Peso del material: 5.342 kg

En ese sentido, la fuerza  $F$  será  $9.81 \times 8.26 = 81.03$  N.

Para realizar el cálculo de la resistencia a la carga se calcula el momento de inercia  $I$  del perfil en (19).

$$I = 2 \left( \frac{L_2 \times a^3}{12} + \left( \frac{L_1 + a}{2} \right)^2 \times L_2 \times a \right) \quad (19)$$

Donde  $a$  es el espesor de soldadura de 4 mm;  $L_1 = 364$  mm; y  $L_2 = 304$ . Con ello se tiene un momento de inercia  $I = 82341034.67 \text{ mm}^4$ . También se tiene la distancia a la que se encuentra la fuerza  $F$ ,  $c = 131$  mm. Se debe hallar el esfuerzo normal al cateto  $n_f$  en (20).

$$n_f = \frac{M \times d}{I} \quad (20)$$

Donde  $M$  es el momento flector generado por la fuerza  $F$  a la distancia  $c$ . El momento  $M$  será  $81.03 \times 131 = 10615$  Nmm. La distancia  $d$  es de 186 mm. Por ello el momento normal será igual a 0.02397 MPa. El esfuerzo paralelo al cateto y transversal al cordón  $t_n$  se calcula en (21).

$$t_n = \frac{F}{A} \quad (21)$$

Donde  $A$  es el área que se halla en (22).

$$A = 2 \times L_2 \times a \quad (22)$$

El área es de  $2432 \text{ mm}^2$ ; por lo que se tendrá un esfuerzo  $t_n = 0.0333$  MPa. Estos valores de esfuerzo se emplean para calcular el esfuerzo equivalente en (23)

$$\sigma_{eq} = \sqrt{n_n^2 + 1.8 \times (t_n^2 + t_a^2)} \quad (23)$$

Finalmente, se tiene un esfuerzo equivalente de 0.051 MPa. Este esfuerzo debe ser menor al esfuerzo admisible definido en (24).

$$\sigma_{ADM} = v \times v_2 \times \frac{\sigma_F}{FS} \quad (24)$$

Se tiene el esfuerzo a la fluencia del aluminio A6061  $\sigma_F = 240$  MPa; también los factores de la calidad de la soldadura suponiendo  $v = 1.0$  y  $v_2 = 0.8$  (Neimann, 1987) y un FS de 5. Con ello se tiene el  $\sigma_{ADM} = 38.4$  MPa. Por lo tanto, se verifica la soldadura.

#### 4.2.6. Planos mecánicos y de ensamble




Los planos mecánicos y de ensamble se pueden observar en la sección de Anexos, Anexo E.

### 4.3. Diseño electrónico

#### 4.3.1. Selección de componentes electrónicos

De acuerdo al diagrama de bloques mostrado en la Figura 4.6 se requieren seleccionar diversos componentes electrónicos para el correcto funcionamiento del sistema. Para ello se ha separado la imagen en componentes que se encuentran relacionados directamente. En primer lugar, se evalúan los componentes relacionados con el riel lineal y el brazo robótico. El primer componente necesario para seleccionar es el fin de carrera o en inglés *limit switch*. En la Tabla 4.10. Se observan las alternativas y posterior selección del fin de carrera.




Tabla 4.10. Selección de sensor de fin de carrera para guía lineal. (Fuente: Elaboración propia)

Característica	ABB: LS45M41B11	KOINO: KH-9015-PB-L	SIEMENS: 3SE5112-0CH50
			
Peso (g)	280	10	-
Corriente nominal (A)	1.8 A	15	3
Fuerza de operación (N)	3.75	3.7	2.5
Voltaje de alimentación (V)	24	14	24
Largo de palanca (mm)	40	-	100
Precio (\$)	103.13	10.325	52.64

Entre estas opciones se escoge el modelo de Siemens, debido a su largo de palanca que es ajustable. De esa forma se asegura un correcto funcionamiento del riel lineal y se asegura, en caso hubiese un error en el mecanismo, que no se malogre el fin de carrera. Esto pues por la ubicación de la palanca protege el componente del movimiento. Además, el voltaje de alimentación de 24 VDC y la corriente nominal de 3 A son adecuados para su uso con el PLC. En segundo lugar, un driver para el motor no será

necesario, pues el motor escogido DBS-S80 ya cuenta con un driver incluido, además de un encoder absoluto para un control de posición retroalimentado. Tanto el sensor de límite de carrera, como el driver del motor se conectarán directamente con el PLC. En un inicio se pensó en que hubiese un microcontrolador intermedio; sin embargo, en función de las capacidades de comunicación del *servodrive* DBS-S80 (ProfiNET / Modbus RTU), se define la conexión directa con el PLC usando el protocolo ProfiNET para envío de consignas de posición/velocidad y lectura del encoder absoluto. En ese sentido, el PLC podrá recibir directamente la posición absoluta del encoder y controlar el servomotor en lazo de bucle cerrado, sin necesidad de un microcontrolador intermedio. Finalmente, el sensor 3SE5112-0CH50 tiene contactos de salida NA (normalmente abierto) y NC (normalmente cerrado), lo que los hace compatibles para conectarse directamente a las entradas digitales del PLC. Respecto a los componentes requeridos para el gripper, es necesario elegir el microcontrolador que actúa como esclavo del controlador maestro que es el PLC. Para ello se analiza la Tabla 4.11.

Tabla 4.11. Selección de microcontrolador para el control del gripper. (Fuente: Elaboración propia)

Característica	 Arduino NANO V3	 ESP32	 Arduino UNO R3
Voltaje de alimentación (V)	7-12 (pin VIN)	5 (USB) o 3.3-3.6 (pin)	7-12 (pin VIN)
Corriente de salida I/O (mA)	40	12	40
Memoria RAM (kB)	2	520	2
Memoria Flash (kB)	32	4000	32
Peso (g)	5	10	25
Cantidad pines digitales	14	34 GPIO	14
Pines PWM	6	16	6
Protocolos de comunicación	UART, SPI, I2C, RS-485	UART, I2C, CAN, Wi-Fi, Bluetooth BLE	UART, SPI, I2C, RS-485
Precio (\$)	8	11.8	13.25

Este microcontrolador estará conectado directamente con el servomotor. El modelo del servomotor es el RDS3135. Para ello se necesitan conectar los 3 pines del servomotor. Para energizarlo con 5V, un cable a tierra GND y una señal PWM por medio del tercer conector.

Por todo lo expuesto se selecciona el microcontrolador Arduino NANO debido a su ligereza, ya que se encuentra como parte de la carga del brazo. Asimismo, se puede realizar una comunicación directa con el PLC, se puede usar comunicación serial (RS-232/RS-485) o comunicación Modbus para este propósito. A su vez, es una opción de menor precio y menor complejidad ideal para esta aplicación; y cumple con los requerimientos de pines PWM, pues se requiere 1 pin teniendo disponibles 6. Para poder realizar la comunicación entre el PLC y el arduino NANO se adicionará un Shield Ethernet ENC28J60 para arduino Nano V3. De esta manera se puede conectar el PLC por un cable Ethernet directamente al arduino Nano para recibir las instrucciones de control.

Otro componente por seleccionar será un sensor de presencia, el cuál identificará si la placa de Petri se encuentra en posición, lista para poder realizar el pipeteo. Se escoge un sensor de fuerza o presión MF01. Básicamente, al detectar un cambio de peso en la membrana el sensor cambia su resistencia interna. Cuando no se presiona, su resistencia es de aproximadamente 20 M $\Omega$ . Su rango de presión varía de 30 g a 1 kg, es por ello que basta con ponerlo en un divisor de tensión, para poder medir la salida en voltaje conectándolo con el microcontrolador de la estación de pipeteo. Para el divisor de tensión se alimenta el circuito a partir de 5VDC y empleando una resistencia extra R1. Se escoge una resistencia de 10 k $\Omega$  para este propósito y poder así tener un rango de valores especificados en el código del microcontrolador por elegir. En la Figura 4.29 se puede observar el sensor a emplear.





Figura 4.29. Sensor de fuerza MF01. (Fuente: Alpha)

Este sensor de fuerza se ubicará en la estación de pipeteo automático, en la zona donde se colocan las placas de Petri. Al realizar el registro del peso de la placa encima, cambiará el valor analógico del voltaje y el microcontrolador recibirá la señal para poder empezar el proceso de pipeteo automático.

Con relación al módulo de pipeteo seleccionado, el modelo D-One Assist Plus de la empresa Integra no cuenta con una interfaz de comunicación industrial (Integra Biosciences, 2018). Ésta se limita a un tipo de comunicación Bluetooth para instrucciones de programa o conexión USB para actualización de firmware. Es por ello que se requiere un microcontrolador esclavo que pueda transmitir las instrucciones mandadas por el PLC hacia el módulo de pipeteo, con la característica esencial de contar con comunicación Bluetooth disponible. Además, debe tener una entrada con convertor analógico/digital (ADC) para el sensor de fuerza. En la Tabla 4.12 se muestran 3 opciones de microchips que pueden ser empleados en aplicaciones con bluetooth.

Tabla 4.12. Selección de microchip para el control del módulo de pipeteo. (Fuente: Elaboración propia)


Característica	ATmega328P + CC2540 	ESP32 	STM32WB55 
Voltaje de alimentación (V)	3.7-5	5 (USB) o 5-12 (VIN)	1.8-3.6
Corriente I/O (mA)	15	12	8
Memoria RAM (kB)	256	520	256
Memoria Flash (kB)	1024	4000	1024
Peso (g)	5	10	2
Pines digitales (GPIO)	14	34	34
Pines PWM	12	16	12
Protocolos de comunicación	UART, SPI, I2C, BLE	UART, I2C, CAN, Wi-Fi, BLE	UART, SPI, I2C, BLE, USB
Precio (\$)	30	11.8	52

Se selecciona el microchip ESP32 debido a su bajo precio y versatilidad. Tiene una gran capacidad computacional como se puede inferir por su memoria RAM y su memoria Flash. Su propósito será ser una especie de traductor entre el PLC y el módulo de Assist Plus. Por lo que recibir la comunicación

serial del PLC y enviársela al módulo de pipeteo será posible para este microcontrolador. En adición, el ESP32 cuenta con un convertidor ADC (Analógico-Digital) integrado. Se verificó que la variación de voltaje entre la condición ‘sin placa’ y ‘con placa’ es mayor a 3 V, suficiente para ser distinguida por el ADC de 12 bits del microcontrolador. Por lo que se adicionará un divisor de voltaje por mostrar más adelante.

Finalmente, se emplearán sensores capacitivos para verificar la presencia de los tubos de muestra y las placas de Petri al ingreso del sistema. Para este propósito se planea emplear los sensores capacitivos LJC30A3-H-Z/BX (NPN-NO). Este tipo de sensores permite detectar objetos en un rango de hasta 10mm. Se puede integrar fácilmente con sistemas digitales como Arduino, Pícs o PLCs, por lo que la integración en este sistema será ideal. En la Tabla 4.13 se presentan las características más relevantes del sensor capacitivo escogido.

Tabla 4.13. Características sensor capacitivo LJC30A3-H-Z/BX (NPN-NO). (Fuente: Elaboración propia)

 <p><b>Sensor de proximidad capacitivo LJC30A3-H-Z/BX (NPN-NO)</b></p>	
Voltaje de Operación (VDC)	6 - 36
Corriente de trabajo (mA)	20
Rango de detección (mm)	3 - 10
Tipo de salida	NPN normalmente abierto
Precio (\$)	13.18

#### 4.3.2. Diagramas de conexión

En primer lugar, se muestran los diagramas de conexiones en general del sistema. En la Figura 4.30. Se muestran las conexiones entre componentes principales.

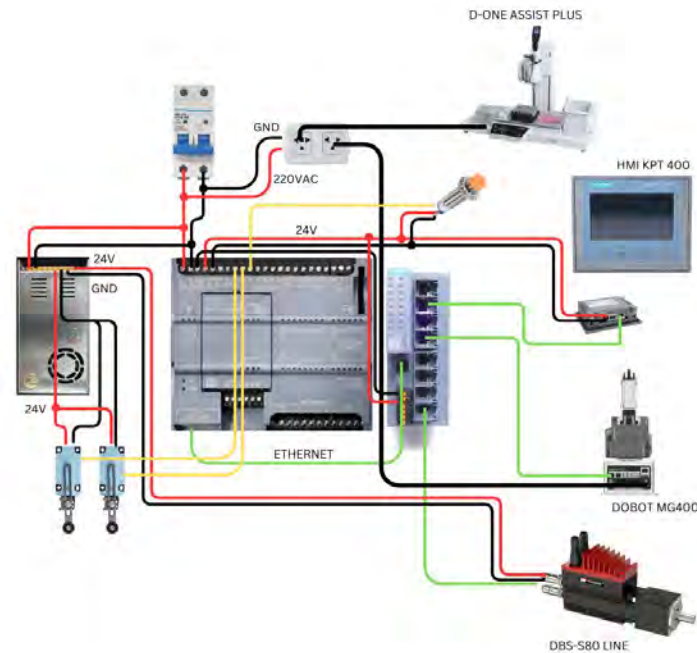


Figura 4.30. Diagrama de conexiones de componentes principales. (Fuente: Elaboración propia)

En el diagrama mencionado se pueden observar las conexiones tanto de control como de potencia en el sistema. Los componentes se energizan de diferentes maneras como se puede apreciar, pues, algunos de ellos requieren 24VDC de alimentación como lo son los fines de carrera o el servomotor. Otros componentes requieren alimentación 220VAC directamente del suministro de energía de las instalaciones en las que el sistema se emplea, como lo son el brazo robótico y el módulo de pipeteo. En adición, se aprecian las conexiones destinadas a la comunicación entre componentes para poder realizar un correcto control del sistema. En esta figura se obviaron los botones de energización y parada, debido a que éstos serán presentados más adelante. A continuación, se muestran las conexiones relacionadas a los microcontroladores esclavos del PLC, y los componentes que dependen de ellos.

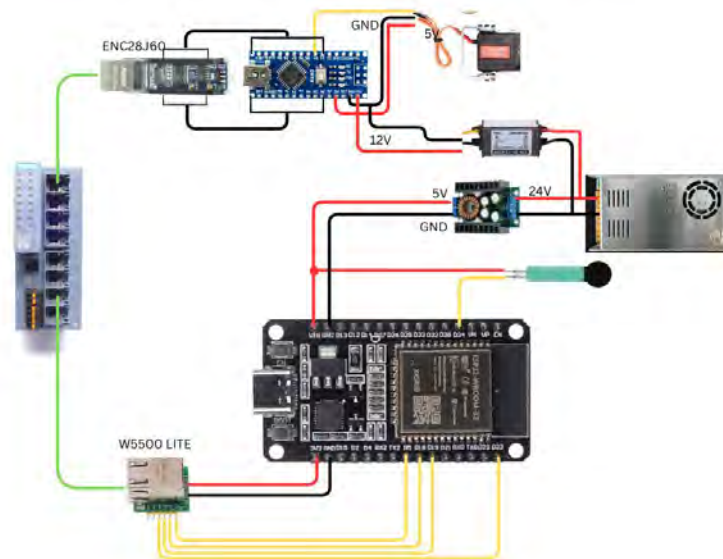


Figura 4.31. Conexiones de los microcontroladores. (Fuente: Elaboración propia)

En la Figura 4.31 se muestra el diagrama de conexiones entre el módulo adicionado al PLC y los microcontroladores dependientes de éste. Tanto las comunicaciones entre componentes, como la energización de los mismos son presentadas en el diagrama. Se observan las conexiones que más adelante se convierten en circuitos diseñados impresos, considerando los módulos adaptadores a Ethernet tanto para el ESP32, como para el Arduino NANO.

#### 4.3.3. Selección de fuente de energía

El sistema se energiza directamente conectándose a la red eléctrica de 220 VAC a 60 Hz. Esta conexión se dirigirá directamente a una llave termomagnética. Esta llave se emplea para la protección de los componentes del sistema, en caso hubiese picos de corriente o cortocircuitos. Se realiza una suma de las potencias del sistema para poder hallar la corriente máxima permitida para el sistema aplicando un factor de seguridad. Para ello se tienen los siguientes valores de potencia de cada elemento del sistema en la Tabla 4.14. Para los valores de alimentación en DC se asume una eficiencia de la fuente de  $\eta=85\%$ , en la ecuación (25).

$$P_{AC} = \frac{P_{DC}}{\eta} \quad (25)$$

Tabla 4.14. Valores de potencia para cada elemento del sistema. (Fuente: Elaboración propia)

Componente	Potencia
Brazo robótico DOBOT MG400	150 W
PLC SIMATIC S7-1200	35 W
Servomotor DBS-S80	226 W
Módulo de pipeteo D-ONE Assist plus	100 W
HMI KTP400 Basic	6 W
Arduino NANO V3	2 W
ESP32	3 W
Fin de carrera 3SE5112-0CH50	2×72 = 144W
Sensor capacitivo LJC30A3-H-Z/BX (NPN-NO)	0.576 W
Servomotor RDS3135	0.4 W
Potencia Total	666.98 W

Con la potencia total obtenida se puede calcular el valor de la corriente total por medio de (26) a un valor de voltaje de 220VAC.

$$I_{TOTAL} = \frac{P}{220} \quad (26)$$

Con ello se obtiene la corriente total de 3.03 A. Se considera un factor de seguridad de 4, que incluye corrientes de arranque del servomotor y márgenes de seguridad. Con ello se obtiene en (27).

$$I_{MAX} = I_{TOTAL} \times 4 \quad (27)$$

Resolviendo esa ecuación se tiene finalmente un valor de 12.12 A. Para este propósito se emplea la llave de 16 A mostrada en la Figura 4.32. Esta llave se coloca directamente proveniente de la alimentación de 220 VAC, con la cual se asegura una protección del sistema adecuada ante sobrepicos.



Figura 4.32. Llave termomagnética 2x16A Btdin.

Como se mencionó anteriormente se emplearán en el sistema 2 pulsadores, uno para la energización del sistema y otro para el apagado del mismo. Las conexiones para estos pulsadores, con la alimentación, la llave termomagnética y un PLC son representadas en el diagrama mostrado en la Figura 4.33.

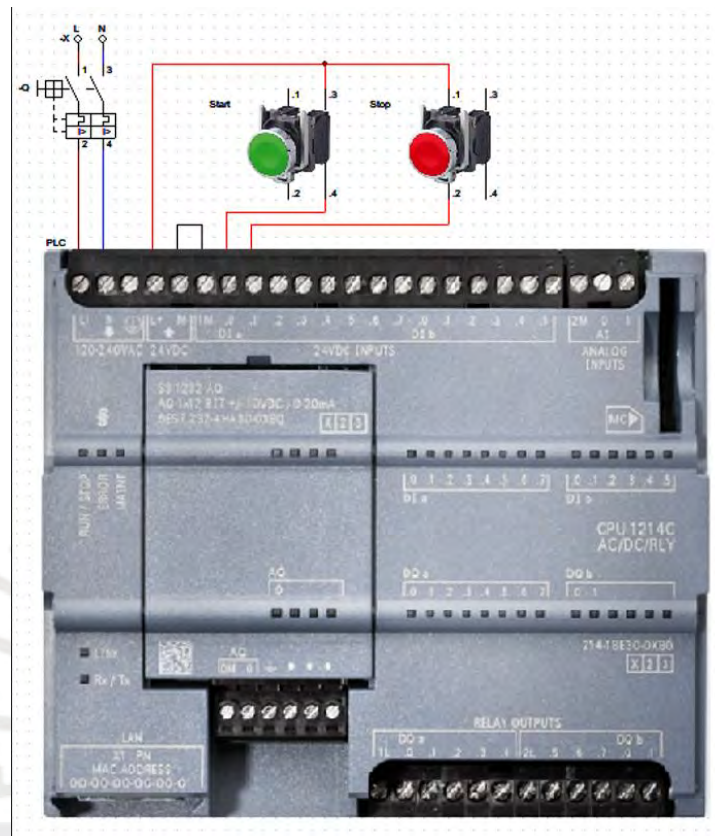


Figura 4.33. Diagrama de fuerza para la energización del PLC. (Fuente: Elaboración propia)

Luego en la alimentación se emplearán fuentes de 24VDC para energizar algunos de los componentes, a partir de la conexión AC de la red local; como lo son el servomotor DBS-S80 series, el sensor fin de carrera y el device input del D-ONE de Assist Plus.






Figura 4.34. Fuente conmutada 24 VDC.

Parte de la regulación de voltaje implica el uso de 1 convertidor de voltaje *step-down*. Se necesita uno para alimentación de 5VDC. Es por ello que se realiza la selección del convertidor de voltaje de 5V.

Para ello se presenta la Tabla 4.15 con las características principales de 3 opciones de reguladores de voltaje DC-DC disponibles.

Tabla 4.15. Selección de regulador de voltaje DC-DC. (Fuente: Elaboración propia)

Característica	Regulador <i>step-down</i> XL40005	Regulador <i>step-down</i> XL4016	Convertidor LM2577S + LM2596S
			
Voltaje de entrada (VDC)	5 - 32	8 - 40	3.5 - 28
Voltaje de salida (VDC)	0.8 - 30	1.25 - 36 ajustable	1.25 - 26
Corriente de salida máxima (A)	5	8	1
Eficiencia de conversión (%)	96	94	94
Precio (\$)	4	10.54	8

#### 4.3.4. Diseño de tarjetas electrónicas

La primera tarjeta electrónica se diseñó con el propósito de energizar el Arduino Nano, además de realizar la conexión con el servomotor del gripper. Para ello se emplea módulo de conexión ethernet para arduino Nano que emplea un ENC28J60 mostrado en la Figura 4.35.



Figura 4.35. Módulo Ethernet para arduino Nano ENC28J60.

El diagrama esquemático del circuito impreso que irá conectado con el módulo ENC28J60 se muestra a continuación. Se emplearán conectores hembra entre el módulo y el circuito, así como borneras para la energización del módulo en general.

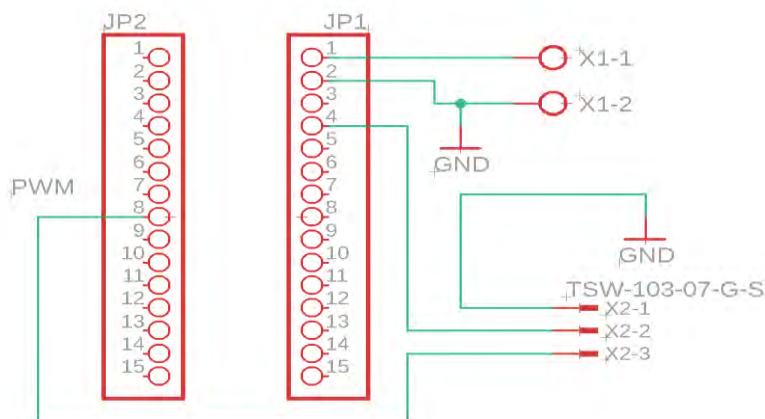


Figura 4.36. Diagrama esquemático de la PCB para el gripper. (Fuente: Elaboración propia)

La disposición de los componentes en el circuito impreso, así como una vista 3D del mismo se observan en la Figura 4.37.

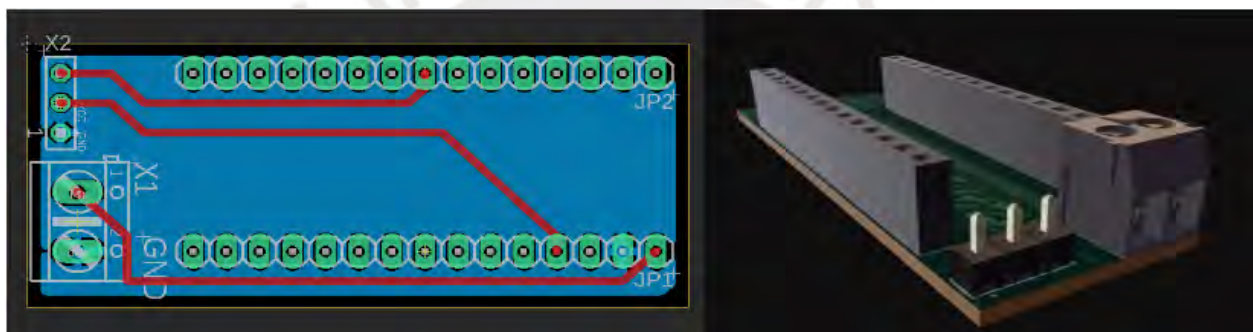


Figura 4.37. Diseño y modelo 3D de la PCB. (Fuente: Elaboración propia)

Respecto a la conexión ethernet del microcontrolador ESP32, se tomó la decisión de diseñar una PCB que integre un chip de ESP32, un chip de W5500 y un regulador de voltaje empleando el c.i MC34063A. Para ello se emplean diversos componentes para un correcto funcionamiento. En primer lugar, a esta placa se le alimenta directamente con 24VDC por medio de un conector. Luego, este voltaje pasa por un regulador de voltaje tipo *step-down* para pasar a los 3.3VDC que requiere el chip ESP32 como alimentación. En ese sentido, se emplea el c.i MC34063A, el cual sugiere algunos componentes para un funcionamiento correcto, tomando en cuenta la función reguladora buscada (*step-down* o regulador hacia abajo). En la hoja de datos se recomienda usar 3 resistencias, 3 capacitores, un diodo rectificador Schottky y 2 inductores (Texas Instruments Incorporated, 2015). Para lograr el voltaje de salida de 3.3 VDC, se definen las resistencias R1 y R2; las cuales deben cumplir con la expresión (28).

$$V_{OUT} = 1.25 \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (28)$$

Donde,  $V_{OUT}$  será el voltaje deseado 3.3VDC. Por ello, se seleccionan valores de resistencias comerciales y disponibles en un paquete de fácil soldado en el circuito impreso. Se escogen los valores de  $R_1=3.32k\Omega$  y  $R_2=5.49k\Omega$ . Por otro lado, se aprovecha dicha tarjeta para realizar las conexiones con la celda de carga para poder medir el valor analógico de la misma. Se realiza también el divisor de tensión mencionado previamente. En la Figura 4.38 se aprecia dicho diagrama esquemático.

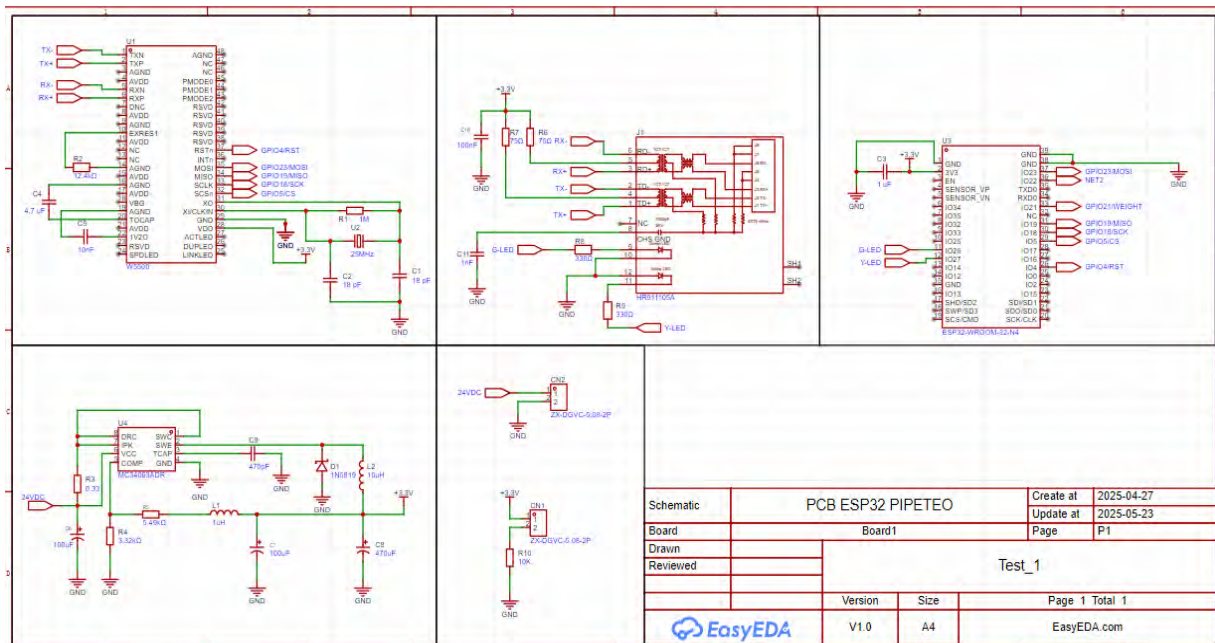


Figura 4.38. Diagrama esquemático de PCB para estación de pipeteo. (Fuente: Elaboración propia)

A su vez se muestran la vista Top de la PCB y el modelo 3D de la misma. En ella se aprecia la distribución de los distintos componentes en la tarjeta, resaltando la ubicación del regulador de voltaje, los 2 chips y el conector ethernet.

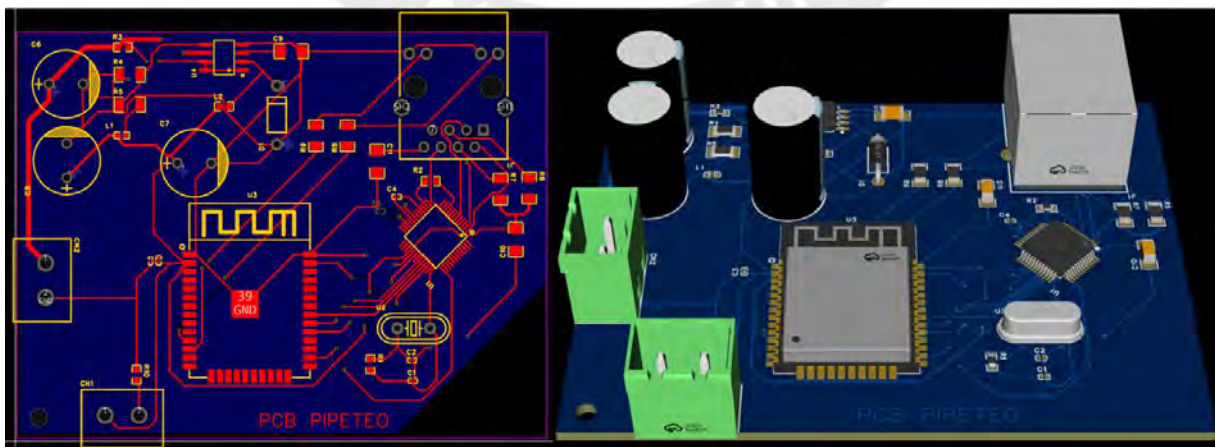


Figura 4.39. Diseño de PCB para estación de pipeteo. (Fuente: Elaboración propia).

#### 4.3.5. Distribución de componentes eléctrico-electrónicos.

Dentro de la carcasa previamente diseñada se albergarán los principales componentes electrónicos del sistema. Los cuales se conectarán al resto de componentes que se encuentran dentro de la cabina de bioseguridad. En esta carcasa se alberga al HMI, los pulsadores del sistema, el PLC, el switch adicional para comunicación ethernet, así como la llave termomagnética. En la Figura 4.40 se presenta el modelo 3D de la carcasa con un corte lateral para la visualización de los componentes.

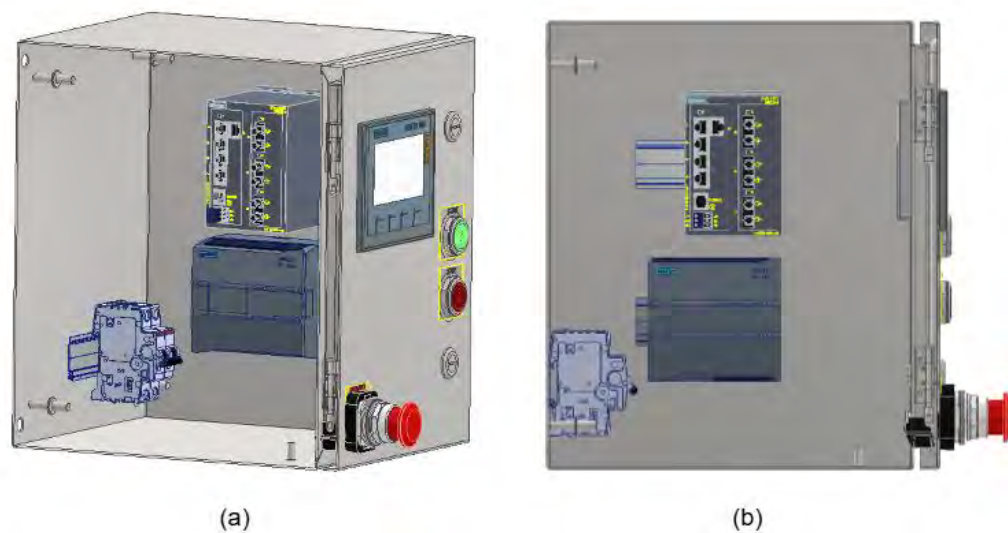


Figura 4.40. Modelo 3D de componentes dentro de la carcasa electrónica. (Fuente: Elaboración propia).

Se resaltan los componentes principales de control y los elementos de interacción con el usuario. El botón de emergencia permite una parada inmediata ante cualquier anomalía, mientras que los pulsadores verde y rojo controlan la energización y el apagado total del sistema. La distribución interna considera la separación entre elementos de potencia y de control para reducir interferencias y mejorar el mantenimiento. La carcasa incorpora puesta a tierra y mantiene distancias de seguridad entre los circuitos de 220 VAC y los de bajo voltaje. Aunque en esta vista no se muestra el cableado ni los tipos de comunicación, el diseño contempla canaletas y rutas diferenciadas para cables de potencia y de señal, asegurando orden y confiabilidad operativa.

#### 4.4. Diseño de sistema de control.

##### 4.4.1. Diagrama de flujo

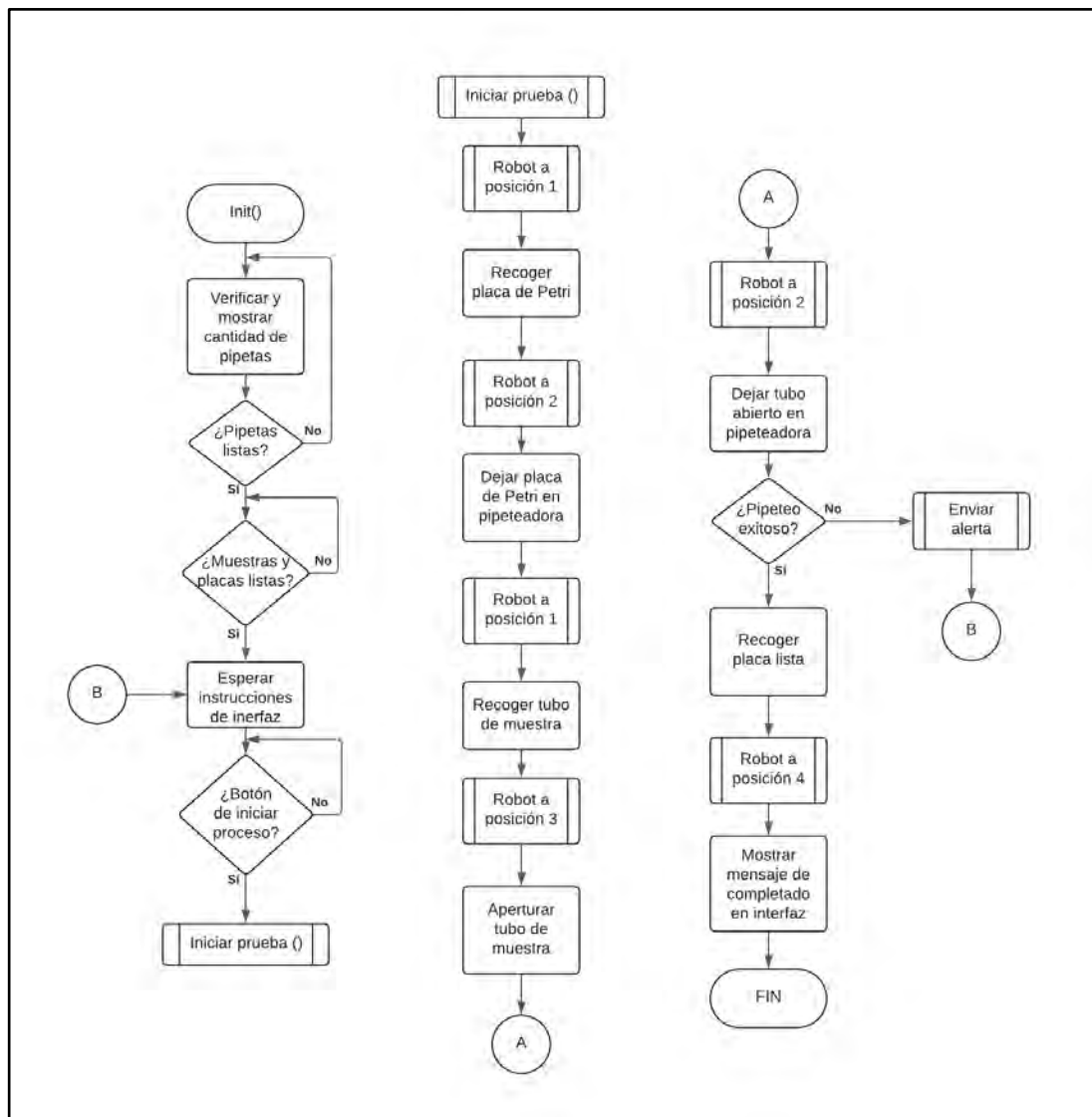


Figura 4.41. Diagrama de flujo del sistema. (Fuente: Elaboración propia).

En la Figura 4.41 se puede apreciar el diagrama de flujo del sistema. En éste se muestra el flujo que sigue el sistema desde el inicio de operaciones mandado por el operario hasta el fin de la realización de la prueba. Todos los pasos que sigue el sistema se mencionan en dicho diagrama.

##### 4.4.2. Variables por monitorear y controlar

En esta subsección, se presentan las variables a monitorear y controlar. En el sistema mecatrónico planteado, se definen las variables por monitorear como aquellas variables que solo serán de lectura y no se actuará directamente sobre ellas. Por otro lado, las variables por controlar serán aquellas en las

cuales, si se intervendrá, es decir, el controlador tendrá un efecto directo sobre ellas. Por lo tanto, se presenta la Tabla 4.16.

Tabla 4.16. Variables por monitorear y controlar. (Fuente: Elaboración propia)

Variable	Monitorear/Controlar
Giro del servomotor del gripper (apertura del gripper)	Controlar
Posición de la plataforma lineal	Controlar
Posición del servomotor DBS-S80 (encoder)	Monitorear
Posición del brazo robótico	Controlar
Velocidad de la plataforma lineal	Controlar
Velocidad de giro del servomotor DBS-S80	Controlar
Estado de los sensores de fin de carrera	Monitorear
Estado de proceso de pipeteo	Monitorear
Posición y secuencia de pipeteo	Controlar
Estado de celda de carga/sensor de fuerza	Monitorear
Estado de sensor inductivo a la entrada	Monitorear
Estado de sensor inductivo a la salida	Monitorear
Cantidad de pipetas restantes	Monitorear

A partir de las variables por monitorear se concluye que son 5 las entradas digitales al PLC.

#### 4.4.3. Estrategia de control

En esta sección se presentarán las distintas estrategias de control para los diferentes componentes principales del sistema. Como se mencionó anteriormente, se deben controlar diversas variables, como lo son la posición de la plataforma lineal, la posición del brazo robótico, la apertura del gripper, entre otros. Para ello se muestran las estrategias de control que se emplearán para poder realizar el control de cada una de estas variables.

En primer lugar, se diseñará el control de la posición de la plataforma en la guía lineal, por medio del giro del servomotor acoplado al husillo. Para ello se escoge un lazo de control cerrado, utilizando las capacidades del encoder absoluto multivuelta del servomotor. Debido a la simpleza y efectividad de un control proporcional, integral y derivativo (PID); este se escoge para el control de la posición de la base del brazo robótico. El PLC puede implementar un control PID utilizando las bibliotecas de funciones

PID disponibles en el S7-1200. El encoder absoluto del servomotor permitirá conocer la posición exacta en tiempo real, lo cual permite cerrar el lazo de control deseado. En este caso se tiene:

- Set Point (SP): Posición del robot sobre la guía lineal dependiendo de la parte del proceso en el que se encuentre.
- Error (E): Dado a partir de la comparación de la señal binaria del endstop en la cual se encuentra la plataforma (posición actual sensada) y la posición en la que debería estar.
- Variable de control o controlada (CV): Es la señal de control enviada al servomotor, desde el PLC que impulsa el movimiento de la plataforma. Genera un cambio en la posición de la plataforma y dicha acción recae directamente en el actuador.
- Variable de proceso (PV): Será la posición actual de la plataforma móvil, medida mediante los endstop, se tendrá un rango de posiciones en la cual puede estar ubicada la plataforma.

En la Figura 4.42 se muestra el diagrama de control para la posición del brazo robótico sobre la guía lineal.

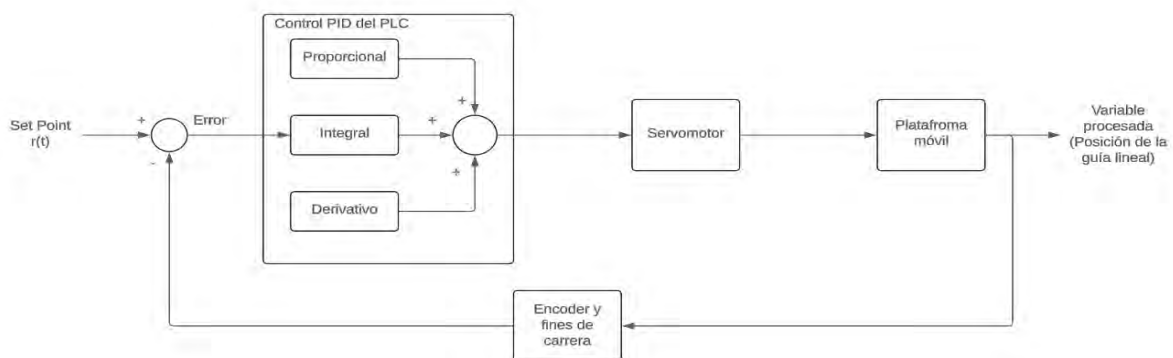


Figura 4.42. Diagrama de control para la plataforma lineal. (Fuente: Elaboración propia)

Para definir las ganancias del controlador PID: ganancia proporcional  $k_p$ , ganancia integral  $k_I$  y ganancia derivativa  $k_D$ ; se trabajará con un modelo dinámico simple del eje lineal como una masa con rozamiento. En ese sentido, como se mencionó en el capítulo 4.2.2 del presente documento, se modela la guía lineal accionada por un mecanismo de husillo de bolas que convierte el giro del motor en traslación del brazo. Se implementó un lazo de posición en la guía lineal (eje Y) con referencia  $y_{ref}(t)$ , prefiltro de primer orden y controlador PID continuo con anti-windup. La planta se modeló en dos niveles: el primero un lineal invariante en el tiempo (fricción viscosa equivalente) para sintonía inicial; y un sistema no lineal para validación final. El prefiltro se define como:

$$C_F = \frac{1}{T_f \times s + 1} \quad (29)$$

La fuerza lineal útil se define como:

$$F_u = \frac{2 \times \pi \times \eta}{p} \quad (30)$$

Donde  $\eta$  es la eficiencia mecánica y  $p$  es el paso del husillo. La masa equivalente lineal (carga más inercia del husillo reflejada) es  $M_{eq}$ . El modelo no lineal empleado en simulación es:

$$M_{eq} \times \ddot{y} = F_u - B \times \dot{y} - F_c \text{sign}(\dot{y}) \quad (31)$$

Donde  $B$  es la fricción viscosa y  $F_c$  es la fricción Coulomb. Para sintonizar el LTI (sin Coulomb explícita) y poder hallar los valores tentativos del controlador se usó:

$$G_F(s) = \frac{Y(s)}{F_u(s)} = \frac{1}{M_{eq} \times s^2 + B \times s} \quad (32)$$

Referente al controlador, se adoptó un PID continuo con filtrado derivativo estándar; el mismo que se puede encontrar en la librería de control de Simulink para Matlab:

$$C(s) = k_p \times E(s) + k_i \times \frac{1}{s} E(s) + k_D \times \frac{Ns}{1 + N \times s} \quad (33)$$

donde  $E(s) = Y_{ref}(s) - Y(s)$  es el coeficiente del filtro de la derivada. Se empleó anti-windup por retrocálculo y saturación de salida (límite de esfuerzo). En base la sintonización inicial y un tuning en el software para obtener un desempeño aceptable; con una respuesta al escalón de ganancia 0.3 se obtuvieron las ganancias:  $k_p=340$ ,  $k_i=120$ ,  $k_D=235$  y  $N=800$ . En la Figura 4.43 se puede observar la respuesta al escalón del sistema en el tiempo con el controlador propuesto en el software Matlab.



Figura 4.43. Respuesta al escalón de ganancia 0.3 del sistema. (Fuente: Elaboración propia)

Se analizó el desempeño del sistema controlado ante este tipo de entrada obteniendo los resultados: el tiempo de establecimiento:  $t_s=5.61s$ ; un máximo sobre impulso:  $M_p = 0\%$ ; y el error en estado estable:  $e_{ss} = 0$ .

Luego, se simuló el seguimiento de una trayectoria deseada. Esta trayectoria comprende el movimiento del riel y su detención en diversos puntos simulando un funcionamiento del proceso completo (7 posiciones en total). El gráfico del comportamiento del sistema con el controlador PID vs la referencia de movimiento deseada se muestra en la Figura 4.44.

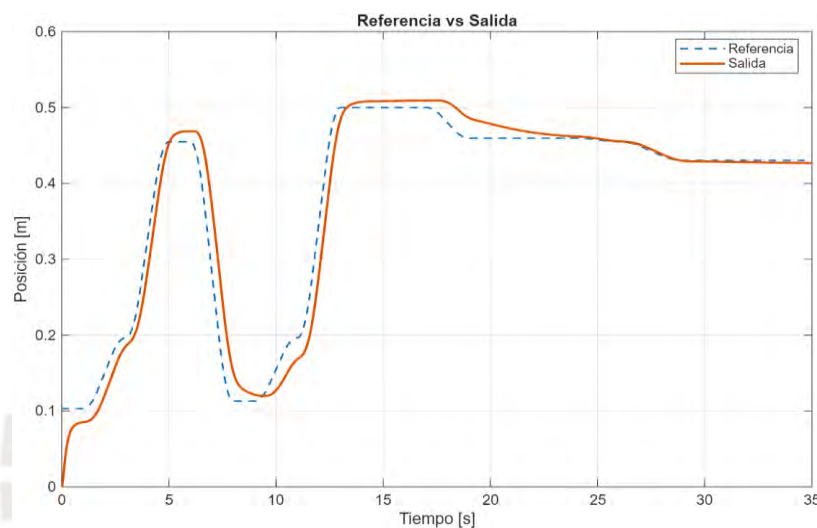


Figura 4.44. Referencia vs salida del sistema controlado. (Fuente: Elaboración propia)

Para analizar su desempeño se evalúan las siguientes métricas: error estacionario  $e_{ss}$  (promedio en el 5 %),  $e_{max}$  y  $e_{RMS}$ . Los valores obtenidos fueron: un error máximo  $e_{max} = 103.1$  mm; un error promedio  $e_{RMS} = 13.9$  mm; y un  $e_{ss} = 3.45$  mm.

Cabe resaltar que, este controlador corresponde a una aproximación obtenida mediante simulación, por lo que su función principal es servir como punto de partida para una implementación real. En un escenario físico, el controlador PID sería configurado dentro de TIA Portal utilizando el bloque PID nativo. Con datos reales de planta, se realizará un *tunning* para optimizar la respuesta dinámica del sistema y reducir los errores observados en la simulación. De este modo, la sintonización presentada constituye un diseño preliminar coherente que permite validar el enfoque de control antes de la etapa experimental.

Respecto al control de posición del brazo robótico, se desea controlar la posición del Tool Center Point (TCP), el cual es el lugar donde se acopla el gripper para esta aplicación. El control en este caso se realizará por medio de comandos específicos del PLC. El cual envía posiciones y recibe los estados.

- Set Point (SP): El Set Point será la posición del TCP, ubicado al extremo del brazo robótico.
- Variable de control o controlada (CV): Es la señal de control enviada desde el PLC al controlador del brazo robótico Dobot MG400, con la información de la posición que debe tomar el brazo robótico.
- Variable de proceso (PV): Posición final del TCP, en el extremo del brazo robótico.

En la Figura 4.45 se puede observar el diagrama de control para la posición espacial del gripper.

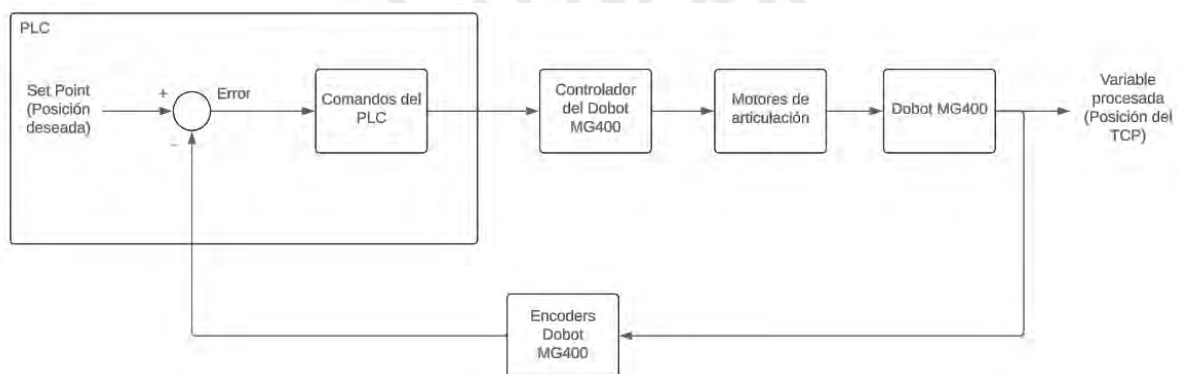





Figura 4.45. Diagrama de control para la posición del TCP. (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.4.4. Selección de controlador

En la siguiente sección se realizará la elección del controlador que se encargará de procesar todas las señales de entrada y salida del sistema. En la Tabla 4.17 se presentan 3 opciones de controladores para esta aplicación.

Tabla 4.17. Selección de PLC para el sistema. (Fuente: Elaboración propia)

Característica	PLC S7-1200 Fabricante: Siemens 	Allen-Bradley MicroLogix 1400 Fabricante: Rockwell Automation 	Modicon M221 Fabricante: Schneider Electric 
Tamaño	Compacto y modular	Modular	Compacto
Protocolos de comunicación	ProfiNET, Modbus TCP/IP, Modbus RTU	EtherNet/IP, Modbus RTU, DF1	Modbus TCP/IP, Modbus RTU, Ethernet
Programación	Programación STEP 7, TIA Portal	RSLogix5000, Studio 5000	EcoStruxure Machine Expert Basic
Procesador	CPU con varias opciones	MicroLogix estándar	Modicon M221/ARM
Cantidad de Entradas/Salidas digitales	14/10 expandibles	10/6 expandibles	16/16 expandibles
Cantidad de Entradas/Salidas analógicos	2/2 expandibles	4/2 expandibles	2/1 expandibles
Puertos de comunicación	Ethernet, RS-485, USB	Ethernet, RS-485	Ethernet, RS-485, USB
Rango de Voltaje de Alimentación	24 VDC o 120/240 V AC	24 V DC o 120/240 V AC	24 VDC
Precio (\$)	~300-500	~400-600	~250-400

Se selecciona el controlador lógico programable Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1214C DC/DC/DC debido a que ofrece una combinación adecuada de rendimiento, número de entradas/salidas y capacidad de comunicación para la arquitectura propuesta. Este modelo cuenta con 14 entradas digitales y 10 salidas digitales a 24 VDC, cantidad suficiente para los sensores de fin de carrera, sensores inductivos y las señales de control requeridas por el sistema. Su formato compacto permite integrarlo sin dificultad en la carcasa de componentes electrónicos previamente diseñada, manteniendo una distribución ordenada y separada de los elementos de potencia.

Respecto a las comunicaciones, el PLC dispone de un puerto Ethernet integrado que permite establecer conexión mediante protocolos industriales compatibles con los dispositivos del sistema, como la HMI, el robot MG400 y los microcontroladores empleados en el subsistema del gripper. Para gestionar la

interconexión simultánea de estos equipos, se incorpora un switch industrial Siemens Scalance XC208 (Figura 4.46), el cual amplía el número de puertos disponibles y asegura un ruteo confiable de las señales de red dentro del entorno de control. De esta forma, el PLC puede supervisar y coordinar las operaciones del sistema mediante una infraestructura de comunicación unificada y robusta. La alimentación del controlador es de 24 VDC, plenamente compatible con la administración de energía definida en la sección anterior.






Figura 4.46. Switch industrial Scalance XC208. (Fuente: Siemens AG)

#### 4.4.5. Interfaz

El sistema se comunicará con los operarios por medio de distintos dispositivos. Se energiza el sistema por medio de pulsadores, tanto de start como para apagar el sistema un pulsador de stop. Además, se controla el proceso y se muestra la información al usuario por medio de una interfaz humano-máquina. En la Tabla 4.18 se muestran las alternativas de HMI.

Tabla 4.18. Selección de HMI para el sistema. (Fuente: Elaboración Propia)

Característica	PanelViewPlus 6400 Fabricante: Rockwell Automation	KTP400 Basic Fabricante: Siemens	Harmony ST6 Fabricante: Schneider Electric
			
Tamaño de pantalla	4''	4''	6.5''
Dimensiones (L x A mm)	193 x 290	95 x 53.9	394 x 250
Resolución (px)	320 x 240	480 x 272	1280 x 800
Voltaje de Alimentación (V)	18 - 32	24	24

Consumo de potencia (W)	14/10 expandibles	10/6 expandibles	16/16 expandibles
Conectividad	Ethernet, USB, RS-232/485	EtherNet/IP, PROFINET, IRT-MODBUS	Ethernet, USB, RS485, RS232C
Características	Teclado	Onscreen keyboard	Touchscreen
Precio (\$)	~300-400	~600-700	~600-1000

Para el sistema se escoge la HMI de Siemens KTP 400 Basic. Debido a que se está trabajando con un PLC de la misma empresa, la interfaz más adecuada y compatible será esta. Asimismo, las conexiones entre el PLC y el HMI están bien documentadas y estandarizadas.

Se diseñó un modelo de cómo se vería la interfaz en su versión final empleando el software Tia Portal.

En la Figura 4.47 se puede observar el diseño mencionado.

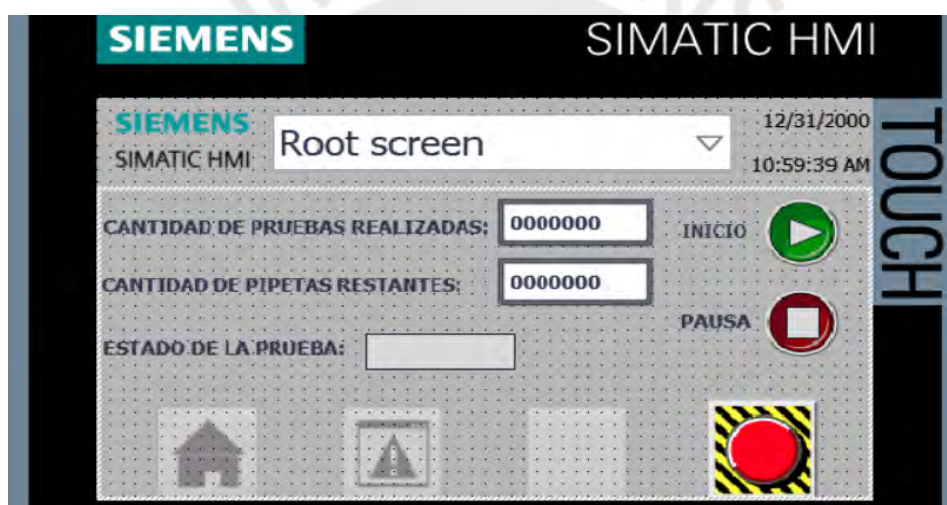


Figura 4.47. Diseño de interfaz gráfica en HMI KTP400 Basic. (Fuente: Elaboración propia).

En esta interfaz resaltan los botones de inicio y pausa del proceso. A través de la interfaz se pretende controlar algunos datos puntuales del proceso automatizado de la prueba de sensibilidad. También se adiciona un botón de parada de emergencia, aparte del botón físico. En adición, se muestra la cantidad de pruebas realizadas durante el ciclo de trabajo, la cantidad de pipetas restantes (información obtenida del módulo de pipeteo automático) y el estado de la prueba siendo los dos estados posibles: 'Correcto' o 'Error'.

## 5. CAPÍTULO V: COSTOS DEL SISTEMA

En este capítulo, se presentarán los costos de los componentes mecánicos, electrónicos-eléctricos y los costos de fabricación. Muchos de los componentes son importados, por lo que se considerará un costo de envío igual al 50% del subtotal. Este valor se elige en base al promedio del coste de envío de la mayoría de productos.

### 5.1. Costos de los componentes mecánicos

En la Tabla 5.1 se muestran los componentes mecánicos que se deben adquirir para poder desarrollar el sistema presentado.

Tabla 5.1. Costo de componentes mecánicos para fabricación del sistema. (Fuente: Elaboración Propia)

Componente	Fabricante	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Tornillo Allen M6x60	Acrimsa	4	S/. 0.60	S/. 2.4
Tornillo Allen M5x15	Acrimsa	8	S/. 0.11	S/. 0.88
Tornillo Allen M5x20	Acrimsa	16	S/. 0.23	S/. 3.68
Tornillo Allen M5x25	Acrimsa	8	S/. 0.3	S/. 2.4
Tornillo Allen M5x30	Acrimsa	4	S/. 0.3	S/. 1.2
Tornillo Allen M3x20	Acrimsa	4	S/. 0.4	S/. 1.6
Tornillo Allen M4x10	Acrimsa	4	S/. 0.2	S/. 0.8
Tornillo Allen M8x30	Acrimsa	4	S/. 0.2	S/. 0.8
Tornillo Stovebolt M2x15	Acrimsa	4	S/. 0.25	S/. 1
Pin M4	Acrimsa	8	S/. 3	S/. 24
Tuercas M3	Acrimsa	4	S/. 0.02	S/. 0.08
Tuercas M4	Acrimsa	4	S/. 0.03	S/. 0.12
Tuercas M5	Acrimsa	36	S/. 0.03	S/. 1.08
Tuercas M6	Acrimsa	4	S/. 0.05	S/. 0.2
Patines lineales HIWIN	HIWIN	2	S/. 282.49	S/. 564.98
Guías lineales HIWIN	HIWIN	2	S/. 180	S/. 360
Subtotal				S/. 965.22

## 5.2. Costos de los componentes eléctricos

En la Tabla 5.2 se muestran los componentes electrónicos, así como los componentes principales, que se deben adquirir para poder desarrollar el sistema presentado.

Tabla 5.2. Costo de componentes electrónicos. (Fuente: Elaboración Propia)

Componente	Fabricante/Vendedor	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
3SE5112-0CH50	Siemens	2	S/. 199.74	S/. 399.48
Arduino NANO V3	Arduino	1	S/. 30.35	S/. 30.35
MF01	-	1	S/.	S/.
ESP32	Naylamp Mechatronics	1	S/. 44.77	S/. 44.77
Llave termomagnética 2x16A Btdin	Promart	1	S/. 45.9	S/. 45.9
Pulsador Verde	Naylamp Mechatronics	1	S/. 14.76	S/. 14.76
Pulsador Rojo	Naylamp Mechatronics	1	S/. 14.76	S/. 14.76
Fuente conmutada 24VDC	Naylamp Mechatronics	1	S/. 70	S/. 70
ENC28J60		1	S/. 34.15	S/. 34.15
W550 Lite		1	S/. 37.90	S/. 37.90
XL4016	Naylamp Mechatronics	1	S/. 40	S/. 40
LJC30A3-H-Z/BX	Naylamp Mechatronics	3	S/. 50	S/. 150
RDS3135	Naylamp Mechatronics	1	S/. 180	S/. 180
PLCS7-1200	Siemens	1	S/. 1138.2	S/. 1138.2
HMI KTP400 Basic	Siemens	1	S/. 2276.40	S/. 2276.40
Scalance XC208	Siemens	1	S/. 1958.68	S/. 1958.68
D-ONE Assist Plus	Integra	1	S/. 1608.73	S/. 1608.73
DBS-S80-Line	Mini Motors	1	S/. 1025	S/. 1025
Dobot MG400	Dobot Robotics	1	S/. 10964.66	S/. 10964.66
Biosafety cabinet NU-543-500E	Labgard ES AIR	1	S/. 22764	S/. 22764
Subtotal				S/. 41189.01

### 5.3. Costos de fabricación

Estos costos abarcan diversas etapas del proceso de fabricación, como el doblado, perforado, corte, soldadura y mecanizado, aplicados a las planchas y los bloques. En la Tabla 5.3 se presentan los costos estimados de fabricación para cada componente, calculados con base en las directrices recomendadas para la estimación de costos (Kremer). El costo de fabricación se determina mediante la siguiente fórmula:

$$C_F = (T_{t/h} \times C_{o/h}) \times (1 + F_g + F_e + F_o) + (C_M \times Q) \quad (34)$$

Donde:

$C_F$ : Costo de fabricación total en soles peruanos (S/.)

$T_{t/h}$ :Tiempo total de operación en horas: tiempo que incluye: la preparación, la fabricación, la inspección, las pruebas para validar las dimensiones y tolerancias, la limpieza y el empaquetamiento.

$C_{o/h}$ : Costo de operación por hora: costo por hora basado en la hora de operación promedio Columbus para diferentes clasificaciones de trabajo (Departamento del Trabajo de los Estados Unidos, 2010), considerando un tipo de cambio mencionado anteriormente.

- S/. 50.82 para inspectores, muestreadores, clasificadores y pesadores.
- S/. 67.30 para ensambladores y fabricantes diversos.
- S/. 76.64 para fabricación considerada especial como maquinaria CNC.

En el caso de impresión 3D se considera un costo aproximado de S/. 50 por hora.

$F_g$ : Factor de gastos generales: se considera un valor de 1 para gastos generales básicos (beneficios del trabajador, edificios, servicios públicos, mantenimiento).

$F_e$ : Factor de equipo: se considera usar el valor 0.5 para las operaciones de ensamblaje y fabricación que requieren equipos o herramientas (cubrir gastos de amortizados, consumibles, servicios).

$F_o$ : Factor especial de operación: se considera un valor de 0.25 para operaciones en casos especiales (soldadura láser, mecanizado CNC) y/o requisitos de tolerancia ajustada.

$C_M$ : Costo de material.

$Q$ : Cantidad.

Esta fórmula se emplea en cada ítem de la Tabla 5.3. que muestra los costos de fabricación de todos los elementos que se consideraron para ser fabricados en el sistema. Además, cabe resaltar que se considera el factor de gastos generales para todos los componentes igual a 1, por lo que no se considera en la tabla.

Tabla 5.3. Costo de fabricación del sistema. (Fuente: Elaboración propia)

Componente	$T_{t/h}$	$Q$	$C_{o/h}$	$F_e$	$F_o$	$C_M$	$C_F$
Base guía lineal	7	1	S/. 67.3	0.5	0.25	S/. 50	S/. 874.43
Plataforma móvil - guía lineal	5	1	S/. 67.3	0.5	0.25	S/. 40	S/. 628.88
Extremos guía lineal	4	2	S/. 67.3	0.5	0	S/. 40	S/. 483.8
Base del gripper	4	1	S/. 67.3	0.5	0	S/. 20	S/. 423.8
Garra del gripper	1.5	2	S/. 50	0	0	S/. 21	S/. 117
Biela del gripper	0.4	8	S/. 50	0	0	S/. 8	S/. 84
Engranaje de gripper	1.25	2	S/. 50	0	0	S/. 10	S/. 82.5
Acople gripper	1	1	S/. 50	0	0	S/. 5	S/. 55
Soporte de apertura	2.5	1	S/. 50	0	0	S/. 12	S/. 137
Soporte para placas	1.5	2	S/. 50	0	0	S/. 15	S/. 105
Carcasa electrónica	8	1	S/. 67.3	0.5	0	S/. 50	S/. 857.6
Soporte electrónico	2	2	S/. 67.3	0.5	0	S/. 30	S/. 261.9
Soporte cajón de ingreso	3	2	S/. 67.3	0.5	0	S/. 20	S/. 342.85
PCB gripper y pipeteo	2	1	S/. 134	0	0.5	S/. 30	S/. 366.5
Subtotal						S/. 40.24	S/. 4820.25

#### 5.4. Costos totales

En la Tabla 5.4, se muestra el costo total del sistema, el cual consiste en la suma del costo de componentes mecánicos, costos de componentes electrónicos y costos de fabricación.

Tabla 5.4. Costo total del sistema. (Fuente: Elaboración Propia)

Concepto	Costo
Costo de componentes mecánicos	S/. 965.22
Costo de componentes electrónicos	S/. 41189.01
Costos de fabricación	S/. 4820.25
Total	S/. 46974.48

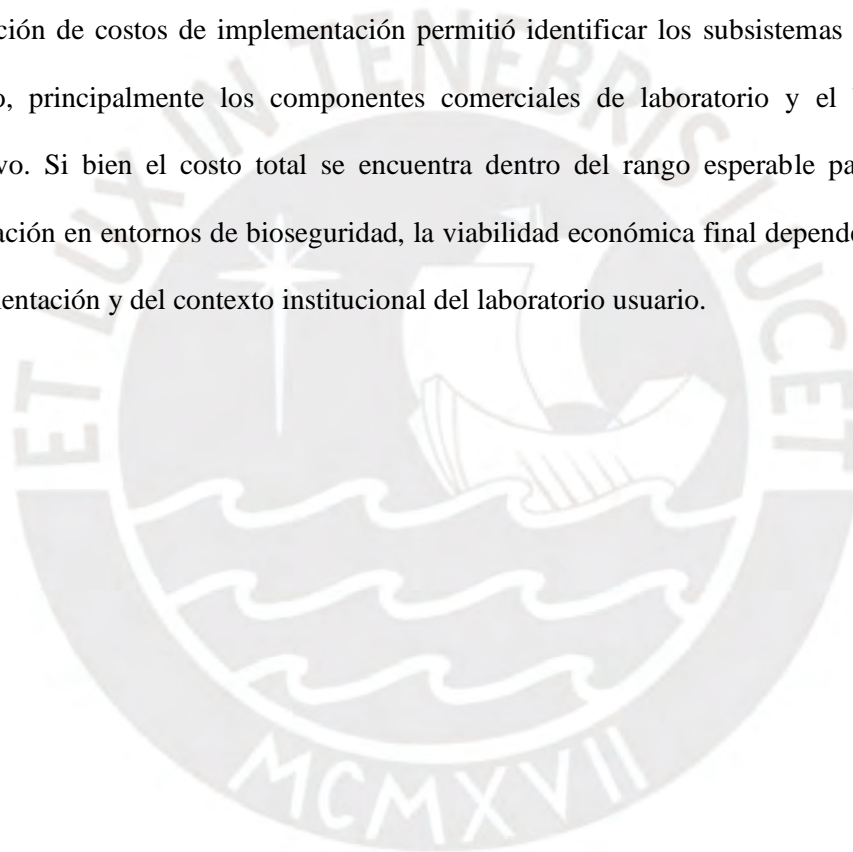
## 6. CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. Conclusiones

- En la presente tesis se desarrolló el diseño conceptual de un sistema mecatrónico que emplea un brazo robótico para la manipulación de muestras de *Mycobacterium tuberculosis* previamente descontaminadas y diluidas, así como el pipeteo automático a placas de Petri en el contexto de pruebas de sensibilidad a fármacos en medio Middlebrook 7H10. El sistema propuesto integra los subsistemas mecánico, electrónico y de control dentro de una cabina de bioseguridad clase II, con el objetivo de mejorar, a nivel de diseño, la seguridad operativa y la repetibilidad del procedimiento.
- El análisis del estado del arte de sistemas robóticos para automatización de ensayos microbiológicos permitió identificar que no se dispone de soluciones comerciales orientadas específicamente a la manipulación de muestras de *Mycobacterium tuberculosis* en pruebas de sensibilidad de naturaleza fenotípica. A partir de esta revisión y de la normativa de bioseguridad aplicable, se definió una lista estructurada de requerimientos funcionales, operativos y de bioseguridad que guió de manera consistente el diseño conceptual del sistema.
- Mediante cálculos analíticos y simulaciones por elementos finitos se verificó a nivel de diseño la resistencia mecánica y el correcto funcionamiento de los principales mecanismos del sistema, incluyendo la guía lineal del brazo robótico y los soportes estructurales. Los resultados obtenidos muestran factores de seguridad adecuados frente a las cargas de operación consideradas, lo que respalda la viabilidad estructural del concepto propuesto.
- Se logró diseñar una pinza robótica o gripper capaz de manipular tanto las placas de Petri de 75 mm de diámetro, como los tubos de muestra de 17 mm; capaz también de aplicar la fuerza y el torque necesario para la apertura de los tubos para la posterior extracción de la muestra de bacteria *Mycobacterium tuberculosis*. De igual forma se seleccionó un material adecuado para tener la suficiente fricción y maleabilidad para la manipulación esperada, este material es el poliuretano termoplástico.
- Se diseñó una arquitectura de control basada en un PLC Siemens S7-1200, microcontroladores dedicados y una interfaz hombre-máquina (HMI), integrados mediante una red Ethernet industrial.

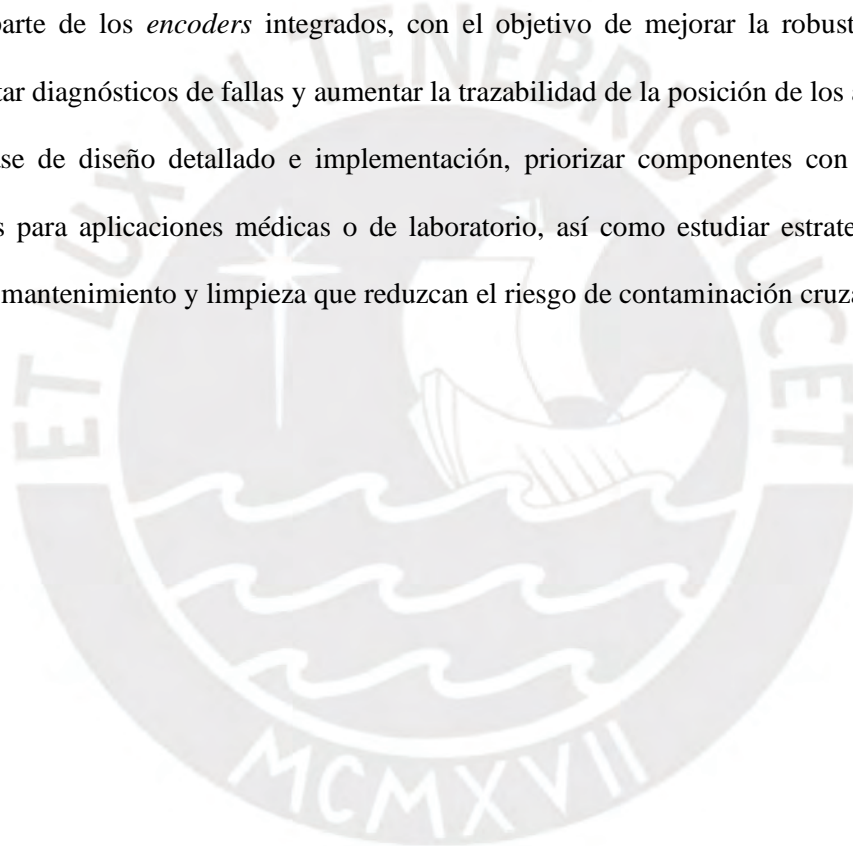
Esta configuración permite coordinar el movimiento del brazo robótico, la guía lineal, el gripper y la estación de pipeteo, así como supervisar las variables críticas del proceso, constituyendo una plataforma flexible para futuras implementaciones físicas y ajustes de estrategia de control.

- Las simulaciones de la plataforma lineal y del lazo de control de posición muestran que, bajo las hipótesis adoptadas, es posible alcanzar un seguimiento adecuado de las trayectorias requeridas para la prueba de sensibilidad. Sin embargo, al tratarse de una validación únicamente numérica, será necesaria la construcción de un prototipo y la realización de ensayos experimentales para confirmar el desempeño dinámico, la repetibilidad y el impacto real sobre la seguridad del personal.
- La estimación de costos de implementación permitió identificar los subsistemas de mayor peso económico, principalmente los componentes comerciales de laboratorio y el brazo robótico colaborativo. Si bien el costo total se encuentra dentro del rango esperable para sistemas de automatización en entornos de bioseguridad, la viabilidad económica final dependerá de la escala de implementación y del contexto institucional del laboratorio usuario.



## 6.2. Recomendaciones

- Construir un prototipo funcional del sistema propuesto e implementar el control en un PLC industrial, con el fin de validar experimentalmente las simulaciones realizadas, medir tiempos de ciclo, precisión de posicionamiento y repetibilidad del pipeteo en condiciones reales de operación.
- Desarrollar módulos adicionales que permitan automatizar las etapas del procedimiento que no han sido abordadas en este diseño, de forma que se complete una línea automatizada de ensayo fenotípico de sensibilidad a fármacos.
- Incorporar sensores de posición y retroalimentación adicionales para el brazo robótico y la guía lineal, a parte de los *encoders* integrados, con el objetivo de mejorar la robustez del control, implementar diagnósticos de fallas y aumentar la trazabilidad de la posición de los actuadores.
- En una fase de diseño detallado e implementación, priorizar componentes con certificaciones específicas para aplicaciones médicas o de laboratorio, así como estudiar estrategias de diseño higiénico, mantenimiento y limpieza que reduzcan el riesgo de contaminación cruzada.



## BIBLIOGRAFÍA

ABB Robotics (12 de noviembre de 2020). ABB's collaborative robot takes the strain out of sampling at Karolinska University Laboratory. <https://new.abb.com/news/detail/70465/abbs-collaborative-robot-at-karolinska-university-laboratory>

Alarcón, V., Alarcón, E., Figueroa, C., Mendoza-Ticona, A. (2017). *Tuberculosis en el Perú: situación epidemiológica, avances y desafíos para su control* <https://rpmesp.ins.gob.pe/index.php/rpmesp/article/view/2384/2777>

Alcaide Fernández de Vega F, Esteban Moreno J, González Martín J, Palacios Gutiérrez J (2016). Métodos de determinación de sensibilidad a los antimicrobianos en micobacterias. En E. Cercenado, R. Cantón (Eds.) *Procedimientos en Microbiología Clínica*. Sociedad Española de Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica (SEIMC). <https://seimc.org/contenidos/documentoscientificos/procedimientosmicrobiologia/seimc-procedimientomicrobiologia56.pdf>

Alifax (s.f). Sidecar. Automated Streaking System Integrated with the Rapid Bacteria Culture. <https://www.alifax.com/products/laser-light-scattering/>

Berkay, S. and Gokalp, T. (2017). Remote controlled robotic arm design for biosafety cabinets. *2017 Electric Electronics, Computer Science, Biomedical Engineerings' Meeting (EBBT)*. 1-5. doi: 10.1109/EBBT.2017.7956780.

Burger, B., Maffettone, P.M., Gusev, V.V. et al. A mobile robotic chemist. *Nature* 583, 237–241 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2442-2>

Boehme, C. C., Nabeta, P., Hillemann, D., Nicol, M. P., Shenai, S., Krapp, F., Allen, J., Tahirli, R., Blakemore, R., Rustomjee, R., Milovic, A., Jones, M., O'Brien, S. M., Persing, D. H., Ruesch-Gerdes, S., Gotuzzo, E., Rodrigues, C., Alland, D., & Perkins, M. D. (2010). Rapid molecular detection of tuberculosis and rifampin resistance. *The New England Journal of Medicine*, 363(11), 1005–1015. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa0907847>

Cáceres-Suazo, M. and Reyes-Duke, A. (2023). Design and Development of Soft Actuator for Handling Chemical Laboratory Instrumentation and IoT Monitoring. *2023 IEEE Central America and Panama Student Conference (CONESCAPAN)*. pp. 139-144. doi: 10.1109/CONESCAPAN60431.2023.10328432

Departamento del Trabajo de los Estados Unidos. (Mayo, 2010). *National Compensation Survey*. Recuperado de <http://stats.bls.gov/ncs/home.htm>

Dirección de Prevención y Control de Tuberculosis (DPCTB - MINSA). (12 de abril, 2024). *Sala situacional de Tuberculosis DR en Perú 2023*. Recuperado de <http://www.tuberculosis.minsa.gob.pe/>

European Society of Clinical Microbiology and Infectious Diseases (Enero, 1998). EUCAST Definitive Document. Methods for the determination of susceptibility of bacteria to antimicrobial agents. Terminology. *Clin. Microbiol. Infect.* <https://doi.org/10.1111/j.1469-0691.1998.tb00061.x>

Gómez-Tangarife, V. J., Gómez-Restrepo, A. J., Robledo-Restrepo, J., y Hernández-Sarmiento, J. M. (febrero, 2018). Resistencia a Medicamentos en *Mycobacterium tuberculosis*: contribución de mecanismos constitutivos y adquiridos. *Salud Pública*, 20 (4). 491-497. <https://www.scielosp.org/pdf/rsap/2018.v20n4/491-497>

González-Martin J. (enero - marzo 2014). Microbiología de la Tuberculosis. *Seminario Fundación Española de Reumatología*, 15 (1). 25–33. <https://www.elsevier.es/es-revista-seminarios-fundacion-espanola-reumatologia-274-articulo-microbiologia-tuberculosis-S1577356614000025>

INTEGRA Biosciences AG. (12 de febrero, 2018). ASSIST PLUS operating instructions (Versión V01). Recuperado de [https://www.integra-biosciences.com/sites/default/files/128950\\_oi\\_assist\\_plus\\_en.pdf](https://www.integra-biosciences.com/sites/default/files/128950_oi_assist_plus_en.pdf)

Jänsch, J. y Birkhofer, H. (2006). The development of the guideline VDI 2221 - The change or direction. Croatia: Design 2006.

Naumann, U., Schoeppe, T., Oehme, H., Moore, T. (2011) Pipetting apparatus with a pipetting head comprising a multiplicity of pipetting channels disposed in an arrangement pattern. (Patente de Estados Unidos: US9084993B2). <https://patents.google.com/patent/US9084993B2/en?assignee=Analytik+Jena&oq=Analytik+Jena>

Navarro Rosales, M., Neira Velázquez, M. G., y Ávila Orta, C. A. (2012, diciembre). *Modificación superficial por plasma de nanopartículas de cobre y preparación de nanocompuestos por fotocurado: Caracterización y evaluación de sus propiedades antibacterianas* (Tesis de maestría). Centro de Investigación en Química Aplicada.

Niemann, G. (1987). *Elementos de máquinas* (Vol. 1, 2a ed. corr.). Barcelona: Labor.

NSF International. (2018). *NSF/ANSI 49: Biosafety cabinet – Design, construction, performance, and field certification* (4th ed.). NSF International.

Organismo Andino de Salud - Convenio Hipólito Unanue. (Abril 2018). Pruebas de sensibilidad en medios sólidos. *Guía Técnica para el diagnóstico bacteriológico de la tuberculosis. Parte 3 Pruebas de Sensibilidad.* (pp. 61-63).

Organización Mundial de la Salud. (2023). Global Tuberculosis Report 2023. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/373828/9789240083851-eng.pdf?sequence=1>

Organización Mundial de la Salud (2012). Manual de Bioseguridad en Laboratorio de Tuberculosis. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK179129/#:~:text=Different%20sizes%20of%20laboratory%20coats,removed%20aseptically%20and%20hands%20washed.>

Oriental Motor USA Corp. (2024). *Ball & lead screw sizing calculator.* <https://www.orientalmotor.com/motor-sizing/ballLeadScrew-sizing.html>

Riff, M. P., Wittchen, J., Darnell, G., & Johnson, S. W. (2021). Multi-Axis Gripper For Lab Automation Robot. (Patente de Estados Unidos: US 2021/0086373 A1). <https://patents.google.com/patent/US20210086373A1/en?q=US2021086373A1>

Robominds (23 de febrero, 2023). Smart robots in the lab – for automated sample handling. *Item Blog.* <https://blog.item24.com/en/automation/smart-robots-in-the-lab-for-automated-sample-handling/>

San Martin Lopez, J. C., Garcia Bravo, J., Newell, B., & Noel, J. (2022). *Flexible TPU pneumatic actuator simulation* (Tesis de licenciatura). Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC).

Sasaki, H., Komeno, N., Hachimine, T., & colleagues. (2025). Robotic system for chemical experiment automation with dual demonstration of end-effector and jig operations. arXiv preprint arXiv:2506.11384. <https://arxiv.org/abs/2506.11384>

Sener Diagnostics (7 de agosto, 2013). AUTOPLAK Eficiencia en laboratorios de microbiología.

<https://www.group.sener/comunicacion/publicaciones/autoplak-eficiencia-laboratorios-microbiologia/>

Shenzhen Yuejiang Technology Co. (2023). *DOBOT MG400 user guide* (Versión 1.5).

<https://simplified-robotics.com/wp-content/uploads/2023/10/Dobot-MG400-Hardware-User-Guide.pdf>

Sub Unidad de Soporte al Diagnóstico - Patología Clínica. (Diciembre, 2021). Guía de Procedimiento para detección de *Mycobacterium tuberculosis* mediante la plataforma Gene-Xpert MTB/RIF. Instituto

Nacional de Salud del Niño San Borja. [https://www.insnsb.gob.pe/docs-](https://www.insnsb.gob.pe/docs-trans/resoluciones/archivopdf.php?pdf=2023/GP%20069%20-%20Guia%20de%20Bioseguridad%20en%20Laboratorio%20para%20Deteccion%20Mycobateriu..%20--.pdf)

[trans/resoluciones/archivopdf.php?pdf=2023/GP%20069%20-](https://www.insnsb.gob.pe/docs-trans/resoluciones/archivopdf.php?pdf=2023/GP%20069%20-%20Guia%20de%20Bioseguridad%20en%20Laboratorio%20para%20Deteccion%20Mycobateriu..%20--.pdf)

[%20Guia%20de%20Bioseguridad%20en%20Laboratorio%20para%20Deteccion%20Mycobateriu..](https://www.insnsb.gob.pe/docs-trans/resoluciones/archivopdf.php?pdf=2023/GP%20069%20-%20Guia%20de%20Bioseguridad%20en%20Laboratorio%20para%20Deteccion%20Mycobateriu..%20--.pdf)

[%20--.pdf](https://www.insnsb.gob.pe/docs-trans/resoluciones/archivopdf.php?pdf=2023/GP%20069%20-%20Guia%20de%20Bioseguridad%20en%20Laboratorio%20para%20Deteccion%20Mycobateriu..%20--.pdf)

Texas Instruments Incorporated. (Enero, 2015). *MC3x063A 1.5-A Peak Boost/Buck/Inverting Switching*

*Regulators* (Revisión C, enero 2015) [Hoja técnica]. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/mc34063a.pdf>

Xie, Y., Feng, S., Deng, L. et al. (2023). Inverse design of chiral functional films by a robotic AI-guided

system. *National Communications* 14, 6177. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41951-x>

Zwirnmann, H. Knobbe, D. Culha, U. and Haddadin, S. (2023). Towards Flexible Biolaboratory

Automation: Container Taxonomy-Based, 3D-Printed Gripper Fingers\*. *2023 IEEE/RSJ International*

*Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 6823-6830, doi:

10.1109/IROS55552.2023.10342218.

## ANEXOS

### FUNDAMENTO TEÓRICO

#### Tuberculosis

Se trata de una enfermedad infecto-contagiosa producida por la bacteria llamada *Mycobacterium tuberculosis*, también conocida como bacilo de Koch. Esta enfermedad afecta a los pulmones de la persona infectada produciendo tos elevada con expulsión de mucosidad, pérdida de peso, fiebre, cansancio, entre otros. La TB se transmite por vía aérea y proviene de pacientes con TB pulmonar. Posterior a la exposición y contagio ocurre una respuesta local de la inmunidad celular, que resulta en la formación de granulomas, en cuyo interior un número limitado de bacterias se mantienen latentes, en más del 90% de casos de forma indefinida. Esta situación se conoce como infección tuberculosa o tuberculosis latente (TBL).

#### *Mycobacterium tuberculosis*

La bacteria que generalmente produce la tuberculosis es un bacilo tipo Gram positivo, ácido-alcohol resistentes, con tamaño entre 0,2-0,7 x 1-10 micras ( $\mu\text{m}$ ), ligeramente curvados, aerobios estrictos, inmóviles, no formadores de esporas ni cápsulas y de crecimiento lento. Las bacterias gram positivas son cada vez más resistentes a los antibióticos, además, tienen una gruesa capa de peptidoglicano (de 20 a 80 nm de espesor) en su pared. La pared celular de la *Mycobacterium tuberculosis* es rica en lípidos, con una capa característica de ácidos micólicos, que le confiere ácido-alcohol resistencia en las tinciones. Las 2 últimas propiedades, junto con la capacidad de entrar en metabolismo latente cuando se ve agredida, le confieren una especificidad que explica la clínica y la respuesta a las pruebas diagnósticas y al tratamiento (González-Martin, 2014).

#### **Mecanismos de resistencia a medicamentos antituberculosos en *Mycobacterium tuberculosis***

La resistencia a fármacos de la bacteria tuberculosis se debe principalmente a mutaciones en genes blanco; sin embargo, una proporción de aislamientos fármaco-resistentes no presentan mutaciones en dichos genes, sugiriendo la participación de otros mecanismos.

- **Permeabilidad reducida de la pared celular micobacteriana:** La resistencia intrínseca en MTB se debe a que posee una pared celular compleja constituida por una gran cantidad de

lípidos, proteínas y polisacáridos que le confieren una característica hidrófoba con permeabilidad celular restringida para un gran número de compuestos antibacterianos.

- **Modificación y degradación enzimática de medicamentos:** La producción de enzimas se trata de un mecanismo de respuesta bacteriana a los antibióticos, ya que estas utilizan una serie de estrategias para superar las propiedades tóxicas de los antibióticos.
- **Fármaco-resistencia adquirida:** En bacterias, la resistencia genética generalmente es mediada a través de la adquisición de genes exógenos. No obstante, para la MTB no se han observado mecanismos de adquisición de genes de resistencia por dichos elementos. Existen diferentes genes que se asocian con la resistencia de tuberculosis con algún tipo de medicamento en especial. Los genes *katG* y *inhA* se asocian con la resistencia a isoniazida, el gen *rpoB* se asocia con la resistencia a rifampicina, el gen *gyrA/gyrB* se asocia con resistencia a fluoroquinolonas.

La resistencia del complejo *M. tuberculosis* a los fármacos es de origen cromosómico (debida a mutaciones cromosómicas permanentes), y además es aceptado que haya la posibilidad que surjan mutaciones espontáneas que causen resistencia sin exposición previa al tratamiento. Desde un punto de vista epidemiológico se distinguen 2 tipos de resistencia: la observada en pacientes que han recibido tratamiento previo, en los que podría haberse generado debido a un uso, indicación y absorción inadecuados de los fármacos; la asociada a pacientes que no han recibido tratamiento antes y que podría ser debida al contagio de un paciente con TB resistente o ser generada en el propio paciente de forma espontánea.

### **Métodos para la detección de resistencia bacteriana a antibióticos**

Desde un punto de vista microbiológico, una cepa es resistente a un antibiótico cuando el 1% o más de la población bacteriana de un cultivo es capaz de crecer y multiplicarse en presencia de una concentración determinada de este fármaco.

Para determinar la susceptibilidad de una bacteria a un grupo de antibióticos se realizan pruebas basadas en estudios de dos naturalezas: estudios fenotípicos y estudios genotípicos. Un tipo de prueba microbiológica fenotípica es conocida como antibiograma. Para detectar la resistencia se establece la proporción de bacterias resistentes comparando el crecimiento de la cepa con antibiótico con una dilución 1/100 de la cepa sin antibiótico que actúa como control. Esta interpretación se conoce como

método de las proporciones y las concentraciones críticas, y fue establecido por Cannetti y Grosset en 1963. Las técnicas rutinarias del antibiograma se basan en un estudio fenotípico y el principio mencionado anteriormente observando el crecimiento microbiano en presencia de diferentes antibióticos (March-Rosselló, 2017). Dentro de las técnicas se conoce como *gold standard* o estándar máximo del antibiograma la cual es la dilución en agar. Esta consiste en una serie de placas con agar y concentraciones crecientes de un determinado antimicrobiano, diluido en el propio medio, a las que se añade el inóculo bacteriano estandarizado. Otras técnicas incluyen macrodilución y microdilución en caldo, tiras con un gradiente de antibiótico, y requieren unas 17 horas para la obtención de resultados. La fiabilidad de estos métodos permite clasificarlos, con respecto al antibiograma obtenido mediante el *gold standard*, como *agreements* (concordancia), *minor errors* (resultado erróneo de una sensibilidad intermedia), *major errors* (falsa resistencia) y *very major errors* (falsa sensibilidad) (González-Martin 2017).

Existen otras pruebas de naturaleza genotípica, es decir, que analizan los genes de la bacteria y analizan si existe o no una mutación del gen secuenciado.

### Proceso de antibiograma

- **MODS (Microscopic Observation Drug Susceptibility):** La prueba MODS es un procedimiento que utiliza placas de cultivo de 24 pocillos, plásticos y estériles. Consiste básicamente en observar por un microscopio invertido el crecimiento de microcolonias con un patrón específico de *Mycobacterium tuberculosis*, por tanto, es útil para el diagnóstico y para determinar resistencia a isoniacida (INH) y rifampicina (RMP).
- **Prueba de sensibilidad en medio Middlebrook 7H<sub>10</sub>:** De acuerdo a la Guía Técnica para el diagnóstico bacteriológico de la tuberculosis, se trabaja directamente con las muestras descontaminadas y diluidas (2018). Las diluciones realizadas a partir de la muestra descontaminada, seleccionadas según haya sido el resultado de la baciloscopia. Como materiales se emplea: placas de Petri preparadas con el agar sin droga y con cada una de las drogas a ensayar; bolsas plásticas permeables al CO<sub>2</sub> de tamaño adecuado para contener una placa de Petri con medio de cultivo; y una incubadora a 37°C con atmósfera de 5–10% de CO<sub>2</sub>.

Procedimiento:

- Ordenar los tubos conteniendo las diluciones de cada muestra en serie en una gradilla.
- Ordenar las placas siguiendo la misma secuencia.
- Al abrirlas cuidar que la parte interior de la tapa no toque ninguna superficie.
- Con pipeta sembrar exactamente 0,1 ml de la dilución  $10^{-2}$  en los cuadrantes control (sin droga) y en cada uno de los cuadrantes conteniendo las drogas a ensayar rotulados con la dilución  $10^{-2}$ . Descartar la pipeta.
- Con pipeta sembrar exactamente 0,1 ml de a dilución  $10^{-4}$  en el cuadrante control (sin droga) y en cada uno de los cuadrantes conteniendo las drogas a ensayar rotulados con la dilución  $10^{-4}$ . Descartar la pipeta.
- Mover suavemente las placas para distribuir la siembra en la superficie del medio.
- Colocar las placas sobre bandejas en posición horizontal. Dejar a temperatura ambiente hasta que se absorba la siembra y no se observe condensación de humedad sobre la tapa.
- Con una cinta adhesiva, asegurar la unión de la tapa y base de cada placa.
- Colocar cada placa dentro de una bolsa plástica y sellarla.
- Acondicionar las placas nuevamente en cajas o bandejas.
- Incubar a  $37^{\circ}\text{C}$  en estufa con atmósfera de 5–10% de  $\text{CO}_2$ .

Donde las diluciones dependen del resultado de la baciloscopia según:

### **PCR - Reacción en cadena de polimerasa**

Se trata de una herramienta esencial en biología molecular y el principio de los métodos más eficientes para detectar resistencia en bacterias. Consiste en calentar el ADN objetivo para desnaturalizarlo, luego se une un cebador (un oligonucleótido) al ADN simple hebra resultante. La ADN polimerasa termoestable extiende el cebador a una temperatura de aproximadamente  $72^{\circ}\text{C}$  (etapa de elongación). Este proceso se repite en ciclos, duplicando la cantidad de ADN en condiciones óptimas. Se ha desarrollado un nuevo tipo de PCR llamado PCR en tiempo real o rtPCR. En una rtPCR el proceso de amplificación es monitoreado en tiempo real, analizando la fluorescencia producto de un tinte fluorescente o un aditivo fluorescente es añadido a la reacción. El tinte se intercala en el ADN recién formado y se vuelve fluorescente. La sonda (probe) interactúa con el producto recién formado durante

el paso de recocido y entonces es capaz de emitir fluorescencia. Se pueden utilizar cuatro tipos de sondas: Sondas de 5' nucleasa (TaqMan), balizas moleculares, sondas de transferencia de energía por resonancia de fluorescencia (FRET) o sondas de unión a surco menor (MGB). Para analizar resistencia después del proceso, se analiza la fluorescencia después de cada ciclo y cada que se supere un valor establecido se considera positiva.

En el caso de la tuberculosis existen los siguientes métodos genotípicos para detectar mutaciones y por ende resistencia:

- **Xpert MTB/RIF:** El ensayo Xpert MTB/RIF, es una plataforma de PCR en tiempo real automatizada, integrada y semicuantitativa, que utiliza la plataforma GeneXpert (Cepheid). Esta prueba identifica el Complejo *Mycobacterium tuberculosis* y detecta mutaciones más frecuentes en el gen *rpoB* asociadas a resistencia a rifampicina (RIF), directo de muestras de pacientes con síntomas de tuberculosis en menos de dos horas. Respecto al funcionamiento dentro del módulo, este se basa en el uso de un filtro para separar los organismos de las muestras, en este caso las bacterias. Por medio de un émbolo se succionan los 2 reactivos y se gira para poder trabajar en diferentes compartimentos. Una vez los organismos se encuentran en contacto con el primer reactivo, conformado por TRIS (trisaminometano), surfactante y EDTA (ácido etilendiaminotetraacético), se inicia la sonicación. A través de una bocina acústica se produce la sonicación separando así los organismos y liberando el material genético. Posteriormente, por medio del émbolo se transporta el material genético y la solución hacia la cámara que contiene las “reaction beads”, compuestas de polimerasa, dNTPs (trifosfatos de desoxinucleótidos) y BSA (albúmina de bovino). Las perlas se disuelven y se realiza el primer termociclado; luego se disuelven unas nuevas perlas compuestas por imprimantes, ‘probes’ y BSA. Finalmente, se realiza otro termociclado. En esta parte unos leds producen hasta 10 colores para que, durante el ciclo térmico de enfriamiento y calentamiento, se pueda observar si la solución brilla y así detectar la presencia del ADN que se estaba buscando.
- **GenoType MTBDRplus:** Este método puede identificar las mutaciones relacionadas a la resistencia a isoniazida y rifampicina. Esta prueba utiliza tiras reactivas de nitrocelulosa (tecnología DNA Strip) que contienen regiones parciales de los genes *rpoB*, *katG* e *inhA* fijadas

sobre ella. La prueba está basada en un PCR multiplex que genera múltiples productos de amplificación (sondas) los cuales, mediante una hibridación reversa, reconocen las mutaciones génicas (en forma de bandas sobre la tira) más frecuentes asociadas con la resistencia a isoniacida y rifampicina.

### **Concentración Inhibitoria Mínima (CMI):**

La CMI es la concentración más baja de un agente antibacteriano expresada en mg/L ( $\mu\text{g/mL}$ ) que, en condiciones in vitro estrictamente controladas, impide por completo el crecimiento visible de la cepa de ensayo de un organismo (Comité Europeo de Evaluación de la Sensibilidad Antimicrobiana, 1998).

### **Identificación de usuario**

La propuesta del sistema de detección de sensibilidad a fármacos puede ser de gran utilidad en laboratorios de investigación de TB-MDR y TB-XDR. Ello debido a que en estos laboratorios deben determinar si la bacteria resistente es sensible al fármaco desarrollado. Tradicionalmente este ensayo fenotípico es realizado por técnicos, los cuales de cierto modo arriesgan su salud, pues de contagiarse de alguna cepa resistente no estudiada ellos requerirían de un tratamiento altamente costoso y con riesgos asociados. Por lo que los mencionados laboratorios necesitan una solución integrada y automatizada, donde el contacto humano-muestra sea mínimo y haya una eficacia en el proceso. Debido a la sensibilidad del experimento, no se pueden contaminar las muestras, por lo que un sistema preciso es prioridad. Finalmente, es necesario que exista una alta reproducibilidad en los ensayos, es decir, que se den todos bajo las mismas condiciones.

## Anexo A

### Estado del Arte

- **AUTOPLAK (Fabricante: Sener Diagnostics):**

Se trata de un dispositivo diseñado para automatizar completamente el proceso de siembra de muestras en placas de Petri. Su objetivo principal es permitir que se desarrolle un cultivo microbiano dentro de estas placas. El sistema está diseñado para mejorar la eficiencia del laboratorio al reducir la intervención manual y acelerar el procesamiento de muestras. Este sistema emplea un brazo robótico de alta precisión el cuál manipula las muestras por medio de un gripper diseñado específicamente para las placas de Petri y los tubos de ensayo. Además, el sistema tiene integrada una estación de incubación donde deposita las muestras. Las ventajas de este sistema son la precisión del ensayo, el ahorro de tiempo y una optimización del espacio.



Figura A.1. Sistema integrado AUTOPLAK. (Fuente: Sener Diagnostics, 2013)

- **Wasp (Fabricante: COPAN):**

Procesador de muestras Walk-Away: plataforma modular y abierta para el procesamiento de muestras (cultivo en placa, esparcimiento, preparación de portaobjetos Gram, inoculación en caldo, descapsulado, agitación). Énfasis en consumibles abiertos y conectividad LIS. Automatiza la apertura y el procesamiento de muestras clínicas y placas de inoculación, y se utiliza a menudo como parte inicial de líneas de microbiología totalmente automatizadas.



Figura A.2. Wasp (Fabricante: COPAN, s.f.)

- **InoquIA (Fabricante: BD Kiestra):**

Procesador automático de muestras diseñado para inocular muestras líquidas y no líquidas en caldos y placas; forma parte del ecosistema BD Kiestra TLA (informática Synapsys, incubación e imagen). Énfasis en la estandarización y la reducción de subcultivos. InoquIA está diseñado específicamente para tomar tubos de muestras, inocular automáticamente caldos/placas y realizar estriados, de forma similar a su flujo de trabajo de pipeteo a placa.



Figura A.3. InoquIA. (Fabricante: BD Kiestra, s.f)

- **A mobile robotic chemist:**

Artículo donde se emplea un robot móvil para buscar fotocatalizadores mejorados para la producción de hidrógeno a partir del agua. La estrategia que se llevó a cabo utiliza un robot que se desplaza libremente, automatizando las labores correspondientes al

investigador en lugar de los instrumentos. El robot que fue empleado fue un robot móvil de la empresa KUKA montado sobre la plataforma móvil de la misma empresa. El flujo de trabajo constaba de seis pasos, cada uno con su propia estación; estación de suministro de sólidos, de líquidos, estación de inertización de muestras, estación de sonicación, estación de fotólisis y estación de medición de cromatografía de gases (Burger et al, 2020).



Figura A.4 Robotic Chemist manipulando muestras. (Fuente: Burger et al, 2020)

- **Inverse design of chiral functional films by a robotic AI-guided system:**

El artículo revisa el proyecto en el que emplearon un “químico robótico”, el cuál consiste en un brazo robótico guiado por inteligencia artificial (IA). Es guiado predecir con precisión las actividades quirópticas a partir de los espectros de absorción experimentales y los parámetros de estructura/proceso, y generar películas quirales con actividades quirópticas específicas en todo el espectro visible. La IA-química robótica lleva a cabo todo el proceso, incluida la construcción, caracterización y ensayo de la película quiral. Se desarrolla un modelo de diseño inverso de aprendizaje automático que utiliza descriptores integrados en el espectro para predecir los parámetros óptimos de estructura/proceso para cualquier propiedad quiróptica deseada (Xie et al, 2023).

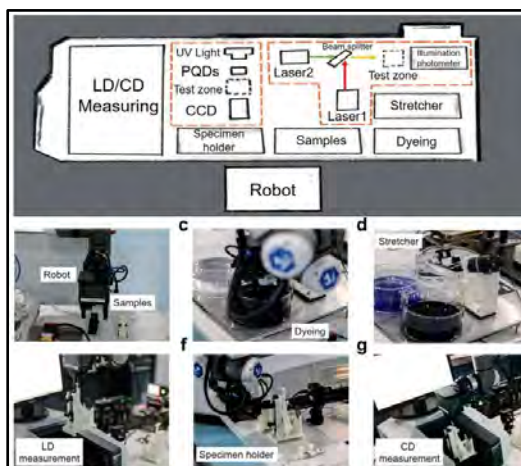


Figura A.5.. Mapa de la zona de trabajo e imágenes del robot químico guiado por IA ejecutando operaciones clave. (Fuente: Xie et al, 2023).

- Robotic System for Chemical Experiment Automation with Dual Demonstration of End-effector and Jig Operations:**

El artículo presenta un sistema robótico para la automatización de experimentos químicos que introduce un enfoque de demostración dual, lo que permite a los químicos demostrar simultáneamente los movimientos del efector final del robot y el control de los dispositivos experimentales (por ejemplo, actuadores de pipetas, soportes). La configuración consta de un manipulador móvil (brazo UR5e sobre una base MiR200), plantillas impresas en 3D compatibles con una pinza de dos dedos y una interfaz de captura de movimiento para registrar las demostraciones humanas. Los movimientos registrados y los comandos de las plantillas se sincronizan a través de ROS y son reproducidos por el robot, lo que permite la ejecución coordinada y repetible de tareas como la manipulación de botellas, el pipeteo, la expulsión de puntas y la dilución sin necesidad de una reprogramación exhaustiva. Los experimentos de validación mostraron una alta fidelidad de la trayectoria y una tasa de éxito del 100 % en las tareas de prueba, lo que demuestra que este enfoque hace que la automatización del laboratorio sea más flexible y fácil de reconfigurar cuando cambian los procedimientos, aunque la escalabilidad y la corrección dinámica de errores siguen siendo áreas de trabajo para el futuro.

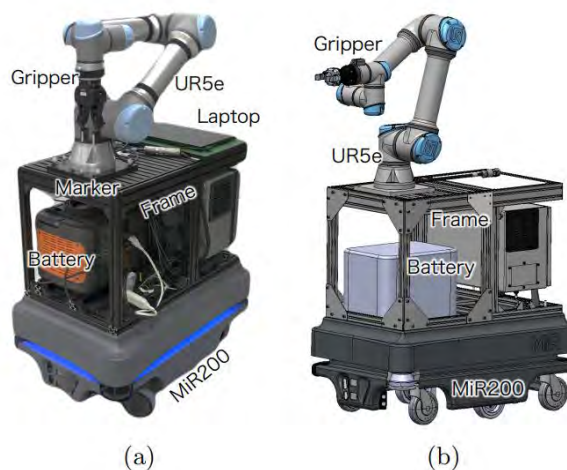


Figura A.6. Manipulador móvil para el sistema de automatización de experimentos químicos. (Fuente: Sasaki et al, 2025)

- UR5e (Fabricante: Universal Robots):** Se trata de un cobot de tamaño reducido con suficiente alcance y carga útil, el UR5e es ideal para realizar tareas precisas y meticulosas. Cuenta con un alcance de 850 mm y soporta una carga de 5 kg. Se ha empleado para clasificar y separar muestras de sangre, orina, heces y tejidos (Robominds, 2023).



Figura A.7. Brazo robótico UR5e (Fuente: Robominds, 2024)

- YuMi Robot (Fabricante: ABB Robotics):** Es un robot que cuenta con dos brazos robóticos que le permiten realizar tareas precisas y versátiles. Cada brazo de YuMi puede soportar una carga útil máxima de aproximadamente 500 gramos.. Ha sido empleado en la manipulación de muestras médicas, así como para manipulación de tubos de ensayo.



Figura A.8. Brazo robótico YuMi (Fuente: ABB Robotics, s.f)

- **KR4 Agilus (Fabricante: KUKA):** El KR4 agilus es un brazo robótico que combina un diseño compacto y sin interferencias con un rendimiento óptimo: con una capacidad de carga útil de 4 kg y un alcance de 600 mm. Este robot compacto ha sido empleado en laboratorios para la manipulación de muestras de sangre y experimentos químicos. Se destaca su fiabilidad y precisión.



Figura A.9. Brazo robótico KR4 Agilus (Fuente: Kuka Robotics, s.f)

- **Pipetmax (Fabricante: Gilson Inc):** Es una solución de pipeteo automatizado que se utiliza para el procesamiento eficiente de ensayos biológicos de alto rendimiento. El Pipetmax se utiliza para mejorar la precisión, reproducibilidad y consistencia de todas las muestras procesadas. El hardware y software de Pipetmax son personalizables para adaptarse a las necesidades específicas del ensayo, permitiendo configurar y personalizar ejecuciones para cualquier reactivo, kit o protocolo. Con un rango de volumen de 1  $\mu\text{L}$  a 1200  $\mu\text{L}$ , Pipetmax es una solución ideal para: qPCR, reacciones NGS, ensayos basados en células.



Figura A.10. Pipetmax (Fuente: Gilson Inc)

- Viaflo Assist (Fabricante: Integra Biosciences):** El Viaflo Assist se utiliza para realizar operaciones de pipeteo automáticamente con una pipeta Viaflo multicanal y una pipeta voyager. El uso de este sistema elimina los riesgos de resultados no reproducibles en comparación con el pipeteo manual y previene lesiones por esfuerzos repetitivos. Su tecnología de pipeteo es de desplazamiento por aire. Se puede emplear para diluciones seriadas, llenado de placas y la adición de reactivos.



Figura A.11. Viaflo Assist (Fuente: Integra Biosciences)

- Design and Development of Soft Actuator for Handling Chemical Laboratory Instrumentation and IoT Monitoring:** El artículo presenta un “soft gripper”, la cual hace referencia a un actuador que se puede adaptar a diversas geometrías. En el trabajo se desarrolló un actuador blando para la manipulación de instrumentos químicos con monitorización IoT, el cual pretende reducir los riesgos asociados a la manipulación de

sustancias químicas peligrosas. El prototipo presentado fue capaz de manipular instrumentos como vasos de precipitados y tubos de ensayo, y también puede monitorizar parámetros críticos durante una reacción química (Cáceres-Suárez, 2013)



Figura A.12. Gripper en prueba de sujeción de tubo químico.

- **Towards Flexible Biolaboratory Automation: Container Taxonomy-Based, 3D-Printed Gripper Fingers:** En este artículo, se propuso una taxonomía de recipientes para líquidos de laboratorio biológico que aclara la necesidad de una solución de agarre flexible. Utilizando la taxonomía como guía, se diseñaron dedos para una gripper paralelo que se obtienen por manufactura aditiva que integra materiales rígidos y blandos para optimizar las propiedades de agarre. Emplea unos dedos afinados que proporcionan un agarre estable de los contenedores en cuestión. La capacidad de resistencia a productos químicos y altas temperaturas y la integración con un sistema de intercambio de herramientas hacen que los dedos puedan utilizarse en el laboratorio a diario y en flujos de trabajo complejos. Se muestran la amplia gama de recipientes que pueden manipularse, así como su tolerancia a los desplazamientos y su estabilidad de agarre (Zwirnmann, H, 2023).

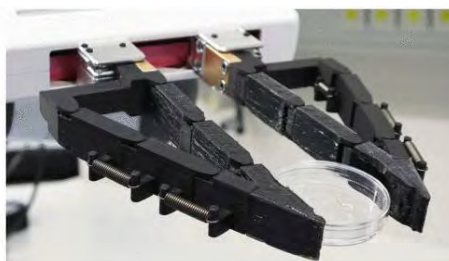


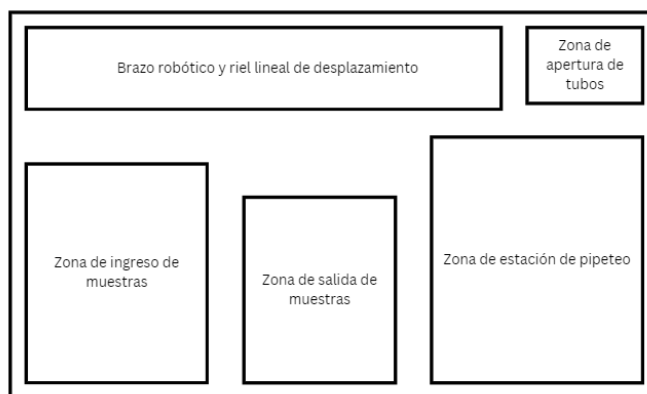
Figura A.13. Gripper de manipulación de instrumentos de laboratorio.

## ANEXO B

## Lista de Exigencias del Sistema

Lista de requerimientos	
Deseo (D) o Exigencia (E)	Descripción
E	<p><b>FUNCIÓN PRINCIPAL:</b></p> <p>El sistema debe llevar a cabo una prueba de sensibilidad a fármacos a partir de una muestra de esputo de la bacteria <i>Mycobacterium tuberculosis</i>, de manera precisa y sin contaminación. Respecto a los pasos que se deben completar considerar los vistos en el diagrama de flujo del antibiograma para tuberculosis. Este proceso consiste en recibir el tubo de muestra y las placas de Petri con agar. Luego se abre el tubo con la dilución. Posteriormente, se procede a realizar el pipeteo de la dilución en la placa de Petri, es decir, se traslada por medio de una pipeta el contenido del tubo a una placa. Se espera 10 minutos para homogeneizar y una vez homogeneizado se cierra la tapa y se entrega como producto.</p>
	<p><b>GEOMETRÍA:</b></p> <p>El sistema se encuentra dentro de una cabina de bioseguridad. Esta cabina alberga todos los componentes del sistema listados a continuación:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Zona de ingreso de muestras.</li> <li>● Brazo robótico, montado en base móvil lineal.</li> <li>● Zona de apertura de muestras.</li> <li>● Zona de estación de pipeteo.</li> <li>● Zona de salida de muestras.</li> </ul>

Todo ello se muestra desde una vista superior:



**Dimensiones máximas totales:**

- Largo: 1400 mm
- Ancho: 800 mm
- Alto: 1500 mm

**Dimensiones Brazo robótico:**

- Alcance máximo: 400 mm.
- Altura extendida: 500 mm.

**Dimensiones estación de pipeteo:**

- Largo: 250 mm
- Ancho: 300 mm
- Alto: 340 mm

E Manipulación de muestras en tubos de 20 mm x 148 mm con tapa.

E Manipulación de placas de Petri de 90 mm de diámetro.

E

E

E

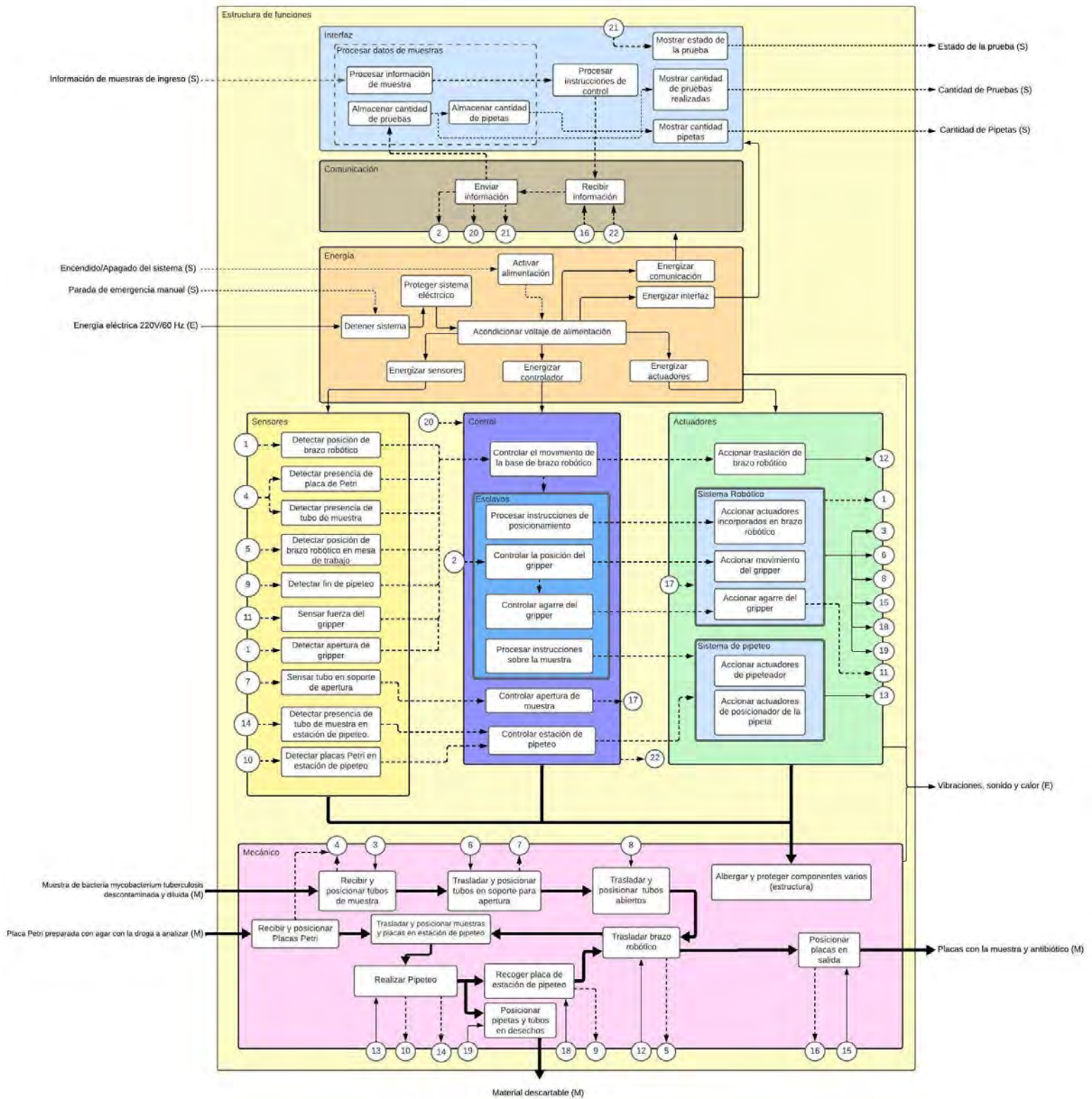
E

E	
E	
E	<p><b>CINEMÁTICA:</b></p> <p>4 grados de libertad del robot sin incluir movimiento del gripper.</p> <p>Gripper de 1 grado de libertad.</p> <p><b>Velocidad de traslado de plataforma móvil de brazo robótico:</b></p> <p>Menor a 100 mm/s sobre el entorno de trabajo.</p>
E	<p><b>FUERZAS:</b></p> <p><b>Carga del brazo robótico y el gripper:</b></p> <p>Deberá ser capaz de transportar las muestras las cuales no deberán sobrepasar los 0.1 kg.</p> <p><b>Peso de los componentes:</b></p> <p>Un brazo robótico, una pipeteadora y celdas para almacenar las muestras. Peso aproximado de 30 kg.</p>
E	<p><b>ENERGÍA:</b></p> <p><b>Fuente de energía principal:</b></p> <p>Energía proveniente de la fuente de la red 220 VAC 60Hz</p>
E	<p><b>MATERIA:</b></p> <p><b>Entradas de materia:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Placas de Petri con agar preparado con antibióticos de 100 mm de diámetro.</li> <li>● Tubos de muestra conteniendo la muestra bacteriana.</li> </ul> <p><b>Salidas de materia:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Muestra en placa de Petri con agar como resultado.</li> <li>● Tubo de muestra y pipetas usadas como desechos.</li> </ul>

E	<p><b>SEÑALES:</b></p> <p><b>Señales de entrada:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 1 señal de encendido del sistema.</li> <li>● 1 señal de parada de emergencia.</li> <li>● 1 señal de apagado del sistema.</li> <li>● 1 señal con la información de la muestra ingresada.</li> </ul> <p><b>Señales de salida:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 1 señal de proceso realizado correctamente o falla en el proceso.</li> <li>● 1 señal de cantidad de pruebas.</li> </ul>
E	<p><b>SEGURIDAD:</b></p> <p><b>Seguridad física:</b></p> <p>Un botón de parada de emergencia en caso de que la seguridad de operación de alguno de los sistemas se vea comprometida.</p> <p>La zona de trabajo del brazo robótico está limitada por una cubierta para evitar interacción directa entre los usuarios y el brazo robótico.</p> <p><b>Bioseguridad:</b></p> <p>Diseñado y operado conforme a los requisitos de BSL-3 (nivel de bioseguridad 3).  Norma de seguridad para cabinas de bioseguridad NSF Standard 49 o EN-12469.  La cabina debe estar equipada con filtros (High Efficiency Particulate Air).</p>
E	<p><b>CONTROL:</b></p> <p>Para el sistema se deberá controlar:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- La posición del brazo robótico para poder realizar el movimiento de las muestras y placas.</li> <li>- Control de velocidad para la plataforma móvil en la cual se desplaza linealmente el brazo robótico.</li> <li>- La estación de pipeteo.</li> </ul>










	- Control de la velocidad de rotación del grado de libertad del gripper.
E	<p><b>ELECTRÓNICA:</b></p> <p>Los requerimientos de electrónica son el controlador, los sensores y los actuadores.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Se emplea un PLC como controlador maestro y microcontroladores como esclavos.</li> <li>● Movimiento de base de brazo robótico: Se emplea un actuador lineal y 2 sensores de fin de carrera.</li> <li>● Subsistema de manipulación o gripper: Se emplean 2 motores, sensores de fuerza y sensores rotativos.</li> </ul> <p>Todos los componentes electrónicos deben cumplir con normativas y estándares industriales, garantizando la seguridad y eficiencia en su operación, para este diseño se consideran como estándares necesarios: ISO 9001, UL 508 e IP 54.</p>
E	<p><b>INTERFAZ:</b></p> <p>Comunicación con el usuario mediante pantalla en interfaz.</p>
E	<p><b>FABRICACIÓN:</b></p> <p>Se emplea el uso de materiales y accesorios disponibles en el mercado nacional o internacional, teniendo como preferencia el mercado nacional para la facilidad en adquisición de repuestos.</p>




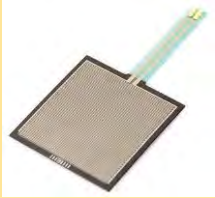


ANEXO C





















## ANEXO D











## Matriz Morfológica




Dominio	Función parcial	Solución 1	Solución 2	Solución 3
Dominio de Interfaz	Almacenar cantidad de pruebas	Memoria SD 	Base de datos 	Disco Duro 
	Almacenar cantidad de pipetas			
	Mostrar estado de la prueba	HMI 	Pantalla táctil capacitiva 	Pantalla LED 
	Mostrar cantidad de pruebas realizadas			
	Detectar posición de brazo robótico	Encoder óptico absoluto 	Sensor Hall 	Encoder magnético absoluto 
	Detectar apertura de gripper			
	Detectar presencia de muestra en tubo	Sensor capacitivo	Sensor inductivo	Sensor ultrasónico








Dominio de Sensores	Detectar presencia de placa de Petri			
	Detectar presencia de tubo de muestra en estación de pipeteo			
	Sensar tubo en soporte de apertura			
	Detectar placas de Petri en estación de pipeteo			Resistencia de detección de fuerza 
	Detectar posición de brazo robótico en mesa de trabajo	Sensor de proximidad inductivo 	Sensor de proximidad magnético 	Sensor de proximidad fotoeléctrico 
	Sensar fuerza del gripper	Sensor de fuerza con contacto	Celdas de carga	Sensor de fuerza-par



				
Dominio de Energía	Acondicionar voltaje de alimentación	Regulador <i>step-down</i>	Regulador switching	Fuente conmutada AC- DC
	Energizar interfaz			
	Energizar actuadores			
	Energizar sensores			
	Energizar controlador			
	Energizar comunicación			
				
	Botón de parada de emergencia	Switch de emergencia	Palanca de emergencia	
	Detener sistema			
	Activar alimentación	Interruptor on/off	Pulsador	Perilla on/off

				
	Proteger sistema eléctrico	Diferencial electromecánico 	Relé de protección 	Caja de fusibles 
Dominio de Comunicación	Recibir información	Profinet	Modbus RS-485	Ethernet
	Enviar Información			
Dominio de Actuadores	Accionar traslación de brazo robótico	Motor de paso a paso	Servomotor industrial 	Motor DC 
	Accionar actuadores incorporados en el brazo robótico		Servomotor 	
	Accionar movimiento del gripper			

	Acciona el agarre del gripper			
	Accionar actuadores de pipeteador	Posicionador XYZ 	Sistema de posicionamiento XY 	
	Accionar actuadores de posicionador de la pipeta	Motor de paso a paso 	Servomotor 	Motor DC 
Dominio de Control (Hardware)	Procesar instrucciones de posicionamiento	Controlador lógico programable (PLC) 	Controladores de automatización programables (PAC) 	Computadora Industrial (IPC) 
	Procesar instrucciones sobre la muestra			
	Controlar cada subsistema (slaves)	Microcontrolador 	Microprocesador 	

Dominio de Control (Software)	Controlar el movimiento del brazo robótico	Controlador PID	Control por cinemática inversa	Control PD con compensación
	Controlar la posición del gripper		Controlador de retroalimentación de estado	
	Controlar el agarre del gripper		Control de impedancia /compliance	Control de fuerza por realimentación de par/torque
	Controlar la estación de pipeteo		Interpolación y planificación de trayectorias	Compensación de retroalimentación (Feedback Compensation)
	Controlar apertura de muestra		Control PD	Control por atraso de fase
Dominio Mecánico	Trasladar brazo robótico	Riel lineal accionada por husillo 	Riel lineal accionada por piñón-cremallera 	Guía lineal accionada por faja 

<p>Trasladar y posicionar diversos componentes</p>	<p>Brazo robótico de 3 grados de libertad</p> 		
<p>Sujeción de placas de Petri</p>	<p>Gripper eléctrico de 2 pinzas</p>	<p>Gripper neumático de 2 pinzas</p>	<p>Soft gripper eléctrico de 2 pinzas</p>
<p>Sujeción de tubos de muestra</p>			
<p>Realizar pipeteo</p>	<p>Micropipeta + Actuador lineal</p>  <p style="text-align: center;">+</p> 		
<p>Soporte para apertura</p>	<p>Soporte adaptado para tubos de muestra</p>	<p>Soporte de tubos de plástico</p> 	<p>Soporte tipo pinza</p>

				
	<p>Albergar y proteger componentes varios</p>	<p>Mesa de trabajo tipo cabina de seguridad</p> 		

## **ANEXO E**

### **Conceptos de solución**

#### **a) Concepto de solución 1**

El concepto de solución 1 resalta por su simpleza de mecanismos y eficiencia. En primer lugar, para recibir las muestras el sistema emplea un cajón con una riel telescópica que se puede aperturar manualmente. En este cajón se pueden colocar los tubos de muestra y las placas de Petri. Una vez han ingresado las muestras, éstas son manipuladas por el brazo robótico de 3 grados de libertad empleando el gripper neumático de 2 pinzas. Para ello el robot se desplaza linealmente sobre la guía accionada por un servomotor industrial y un mecanismo de faja. Luego se lleva el tubo al soporte de muestras de plástico donde se procede a la apertura del tubo. Una vez aperturado, se traslada el tubo a la estación de pipeteo. En ese momento el robot también recoge la placa de Petri y la traslada a la 'pipeteadora'. La estación pipeteadora se detalla más adelante. Una vez realizada la siembra de la muestra, el robot se encarga de tapar la placa de Petri y depositar la placa lista en la zona de salida de muestras donde el usuario recogerá la misma. Los tubos luego se cierran por el mismo robot y se procede a desechar la muestra cerrada. Para controlar el sistema como controlador maestro se considera un controlador lógico programable (PLC), y microcontroladores para cada subsistema. Se emplea además, una interfaz humano-máquina (HMI) y un botón de parada de emergencia. En la Fig 3.10 se aprecia el boceto de este concepto de solución.

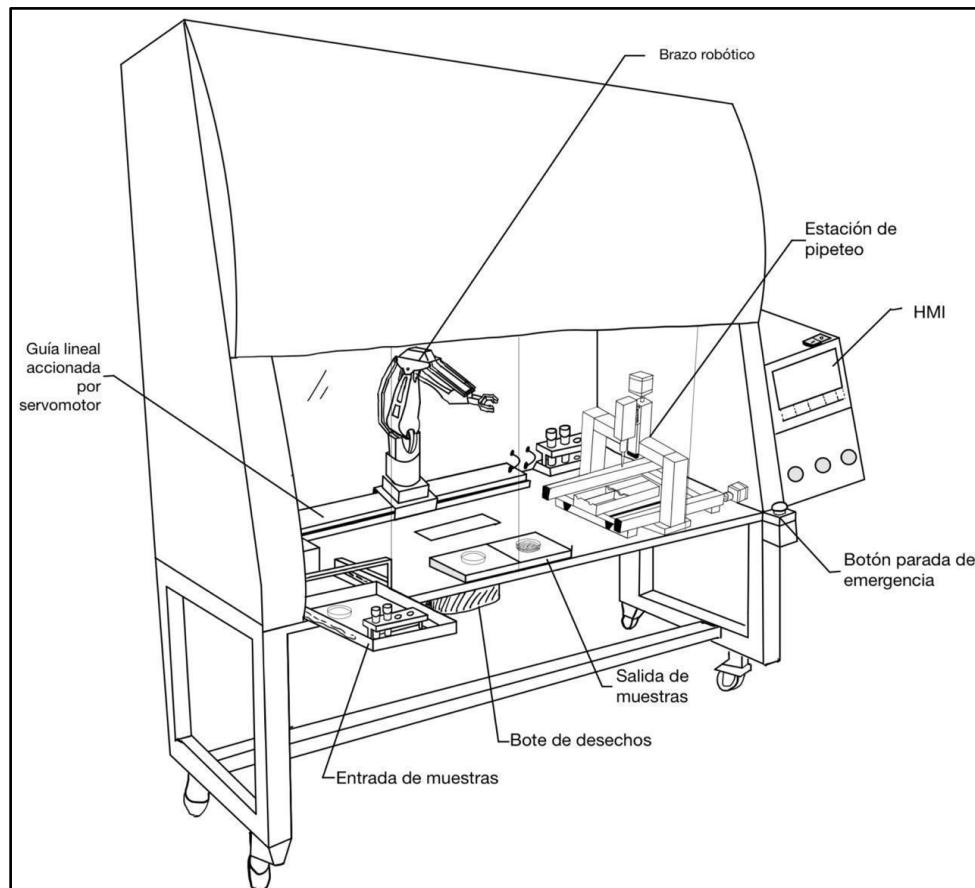


Figura E.1. Boceto de concepto de solución 1

La estación de pipeteo o pipeteadora de este concepto de solución se trata de un mecanismo de posicionamiento XYZ. Este mecanismo es accionado por motores paso a paso, fajas y controlado por un microcontrolador empleando un control de compensación por retroalimentación. El funcionamiento es similar al de una impresora 3D comercial, salvo el uso de una micropipeta. La estación emplea una micropipeta, la cuál es accionada por un actuador lineal para la absorción exacta de la muestra, y posterior traslado a la placa de Petri preparada con agar. En esta estación también se encuentran las puntas descartables a emplear, las cuales se colocan en la micropipeta automáticamente. En la Fig 3.11 se aprecia un boceto de la estación de pipeteo.

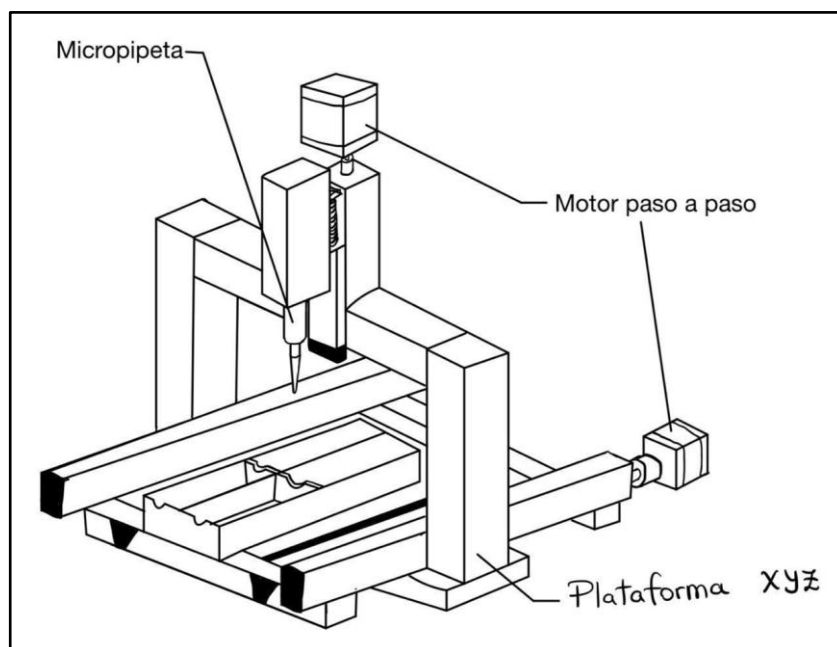


Figura E.2. Boceto de estación de pipeteo del concepto de solución 1

### b) Concepto de solución 2

El proceso realizado por este concepto de solución es igual en todos los casos, tanto la disposición como los elementos varían, como los componentes a emplear. El concepto de solución presentado a continuación está constituido por el conjunto de componentes con menor costo de entre las opciones. Para el ingreso de muestras existe un soporte de muestras estático en el cuál los usuarios pueden depositar los tubos de muestra. El brazo robótico recoge de este punto los tubos de muestra y los lleva al soporte adaptado para tubos de muestra donde se realiza la apertura de los mismos. Respecto al sistema de control estará basado en el uso de un PAC como controlador maestro de los microprocesadores a emplear en cada subsistema. Además, el tipo de control será un PID para cada variable por controlar. En el caso de los sensores que medirán dichas variables, se empleará un encoder óptico absoluto, sensores capacitivos y celdas de carga. Con respecto al sistema de traslación de brazo robótico, se emplea una guía lineal acoplada por un mecanismo piñón-cremallera y accionado motor de paso a paso. Se hace uso de sensores de proximidad fotoeléctricos para determinar su posición y límites. Con relación a la estaciones principales, se tiene por un lado el módulo de pipeteo o pipeteadora que cuenta con un sistema de posicionamiento XYZ para la pipeta y emplea una micropipeta para realizar la succión del líquido. Sobre la interfaz, se contará con una pantalla táctil capacitiva y un switch de

emergencia para la parada del sistema en general. La comunicación entre sistemas se desarrollará por medio del protocolo RS-485. En la Figura 3.12 se puede observar un bosquejo del sistema integrado.

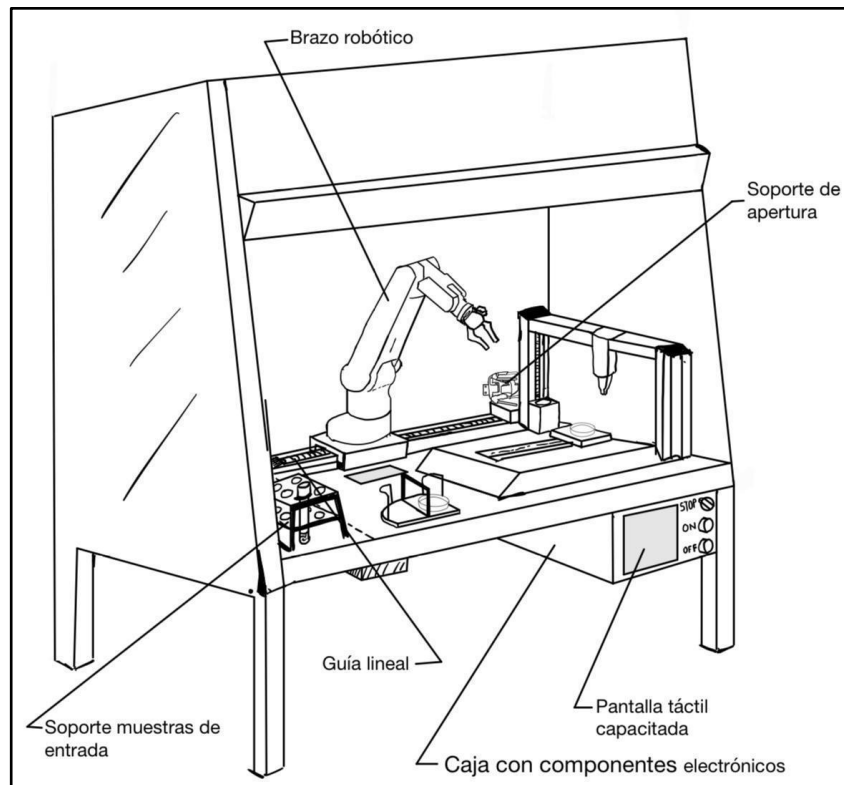


Figura E.3. Boceto de concepto de solución 2

Respecto a la pinza robótica o gripper, se plantea el uso de un soft gripper de dos garras. El material del gripper sería de poliuretano termoplástico pudiéndose adaptar tanto a las placas de Petri, como a los tubos de muestra. Este gripper sería accionado por un actuador neumático lineal y la rotación del mismo por un servomotor. En la Figura 3.11. se puede apreciar el detalle del gripper.

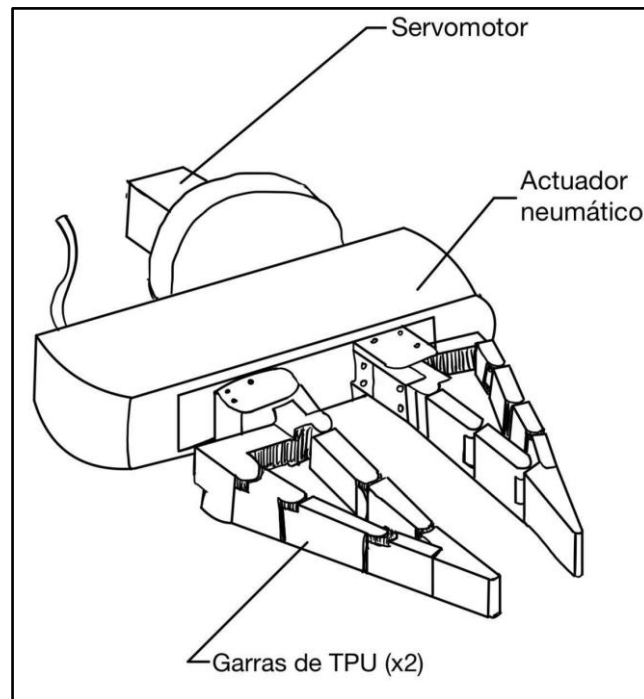


Figura E.4.. Boceto de gripper del concepto de solución 2

### c) Concepto de solución 3

El proceso que realiza este concepto de solución es el mismo. Las diferencias radican en la disposición de las estaciones a lo largo de la cabina de bioseguridad. Las muestras y placas de Petri ingresan por medio de cajones deslizantes en el extremo derecho del sistema. Ambas en soportes destinados específicamente para albergar tanto los tubos de muestra como las placas de Petri preparadas con agar. En este caso el control maestro está a cargo de una computadora industrial (IPC), la cuál controla los microcontroladores esclavos destinados a controlar cada subsistema. Respecto a la interacción entre el usuario y el sistema se emplea una pantalla LED y botones para la manipulación. El sistema se energiza por medio de una perilla on/off y se detiene de emergencia por medio de un switch de emergencia. El traslado del brazo robótico se realiza accionado por un motor DC y un mecanismo de husillo. La estación de pipeteo está compuesta por un posicionador YZ y una mesa móvil para realizar el pipeteo, empleando también una micropipeta. El control de la estación será por interpolación y planificación de trayectorias. Para acondicionar la energía del sistema se emplean reguladores de tipo switching.

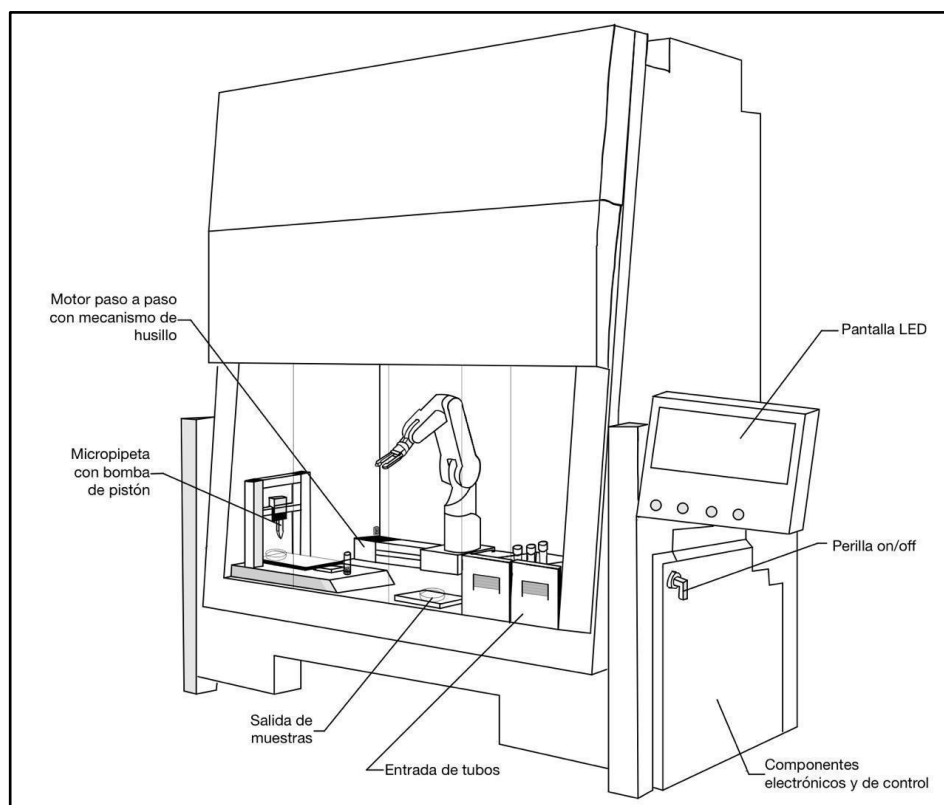


Figura E.5.. Boceto de concepto de solución 3

El gripper empleado en este concepto de solución es un gripper eléctrico de 2 pinzas. El diseño del mismo se realizará para que se pueda adaptar tanto para manipular las placas de Petri como para los tubos de muestra y sobre todo las tapas de los tubos. El grado de libertad extra del gripper será accionado por un servomotor. En la Fig. 15 se aprecia el boceto del gripper.

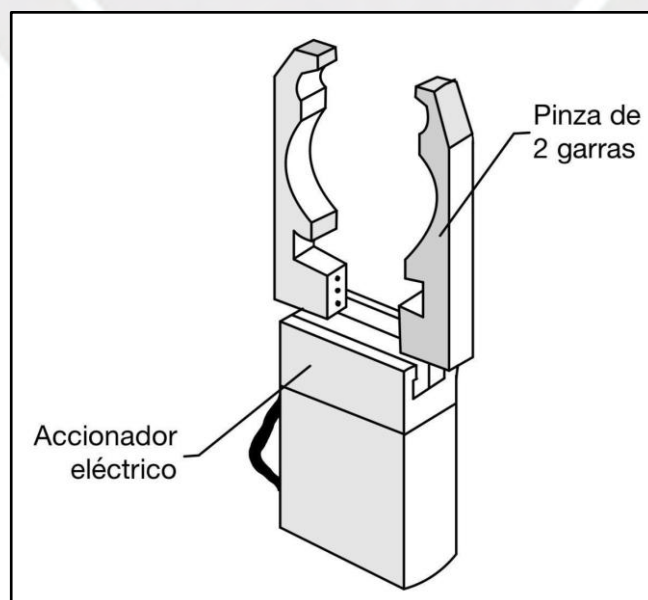
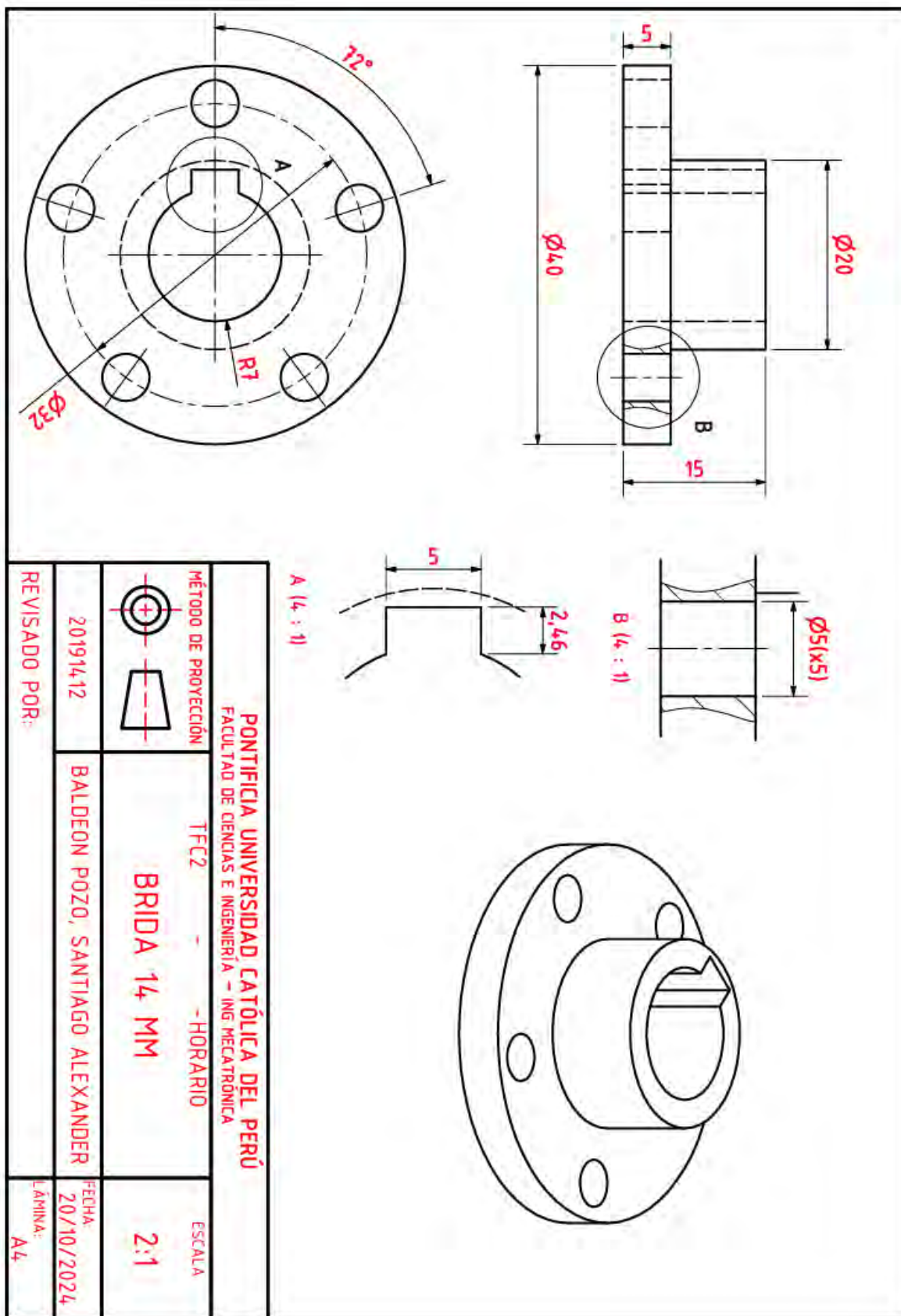
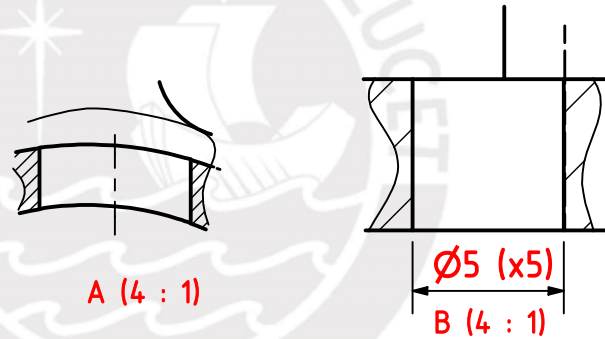
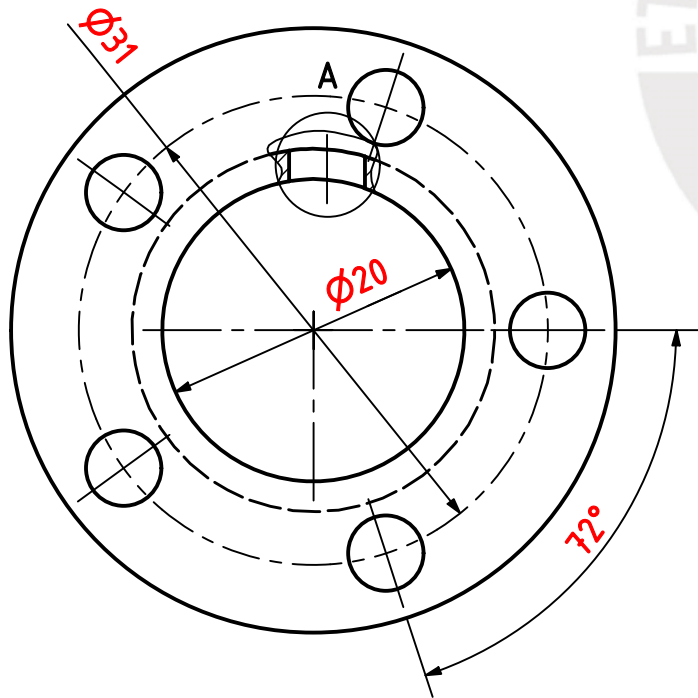
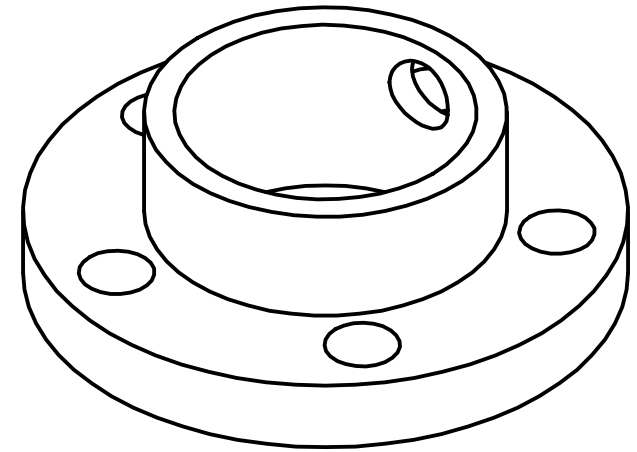
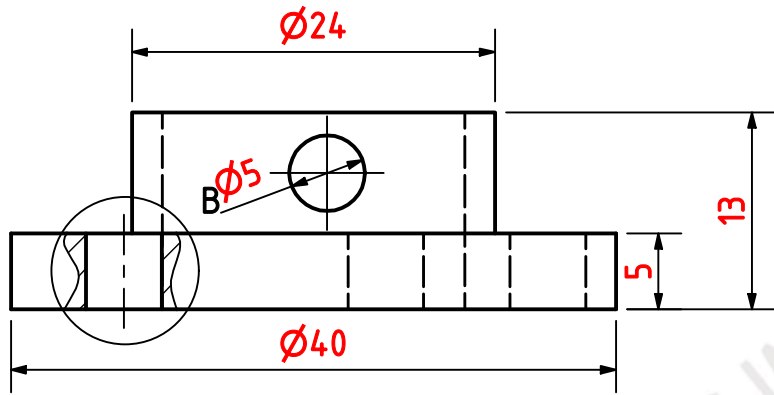


Figura E.6 Boceto de gripper del concepto de solución

ANEXO F

Planos mecánicos y de ensamblaje



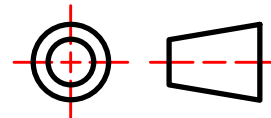


PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
 FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ING MECATRONICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN

TFC2 - -HORARIO

ESCALA



BRIDA 20 MM

2:1

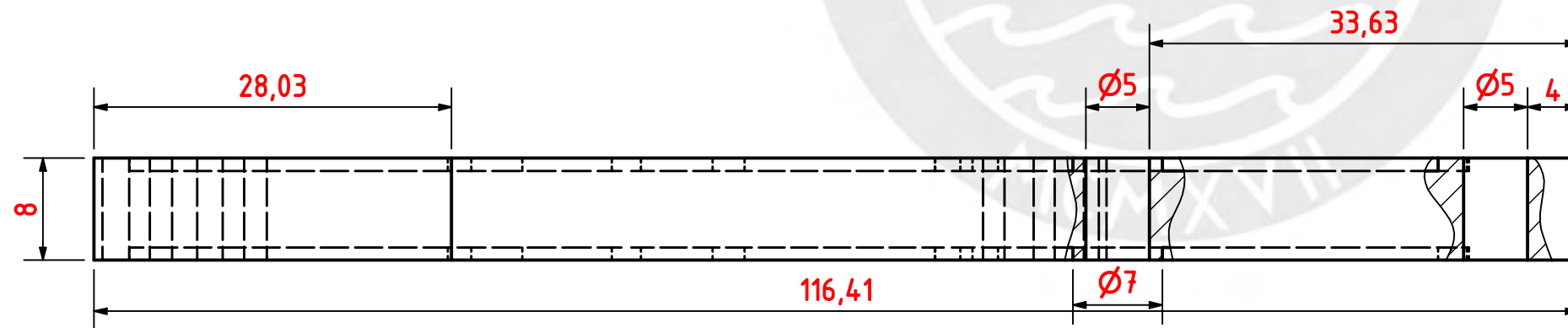
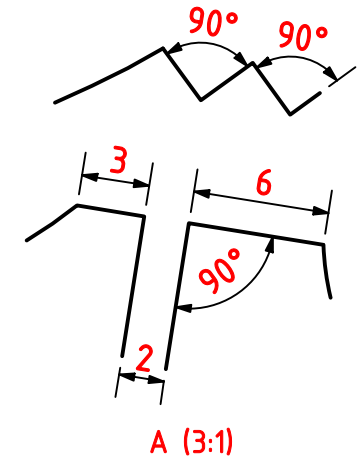
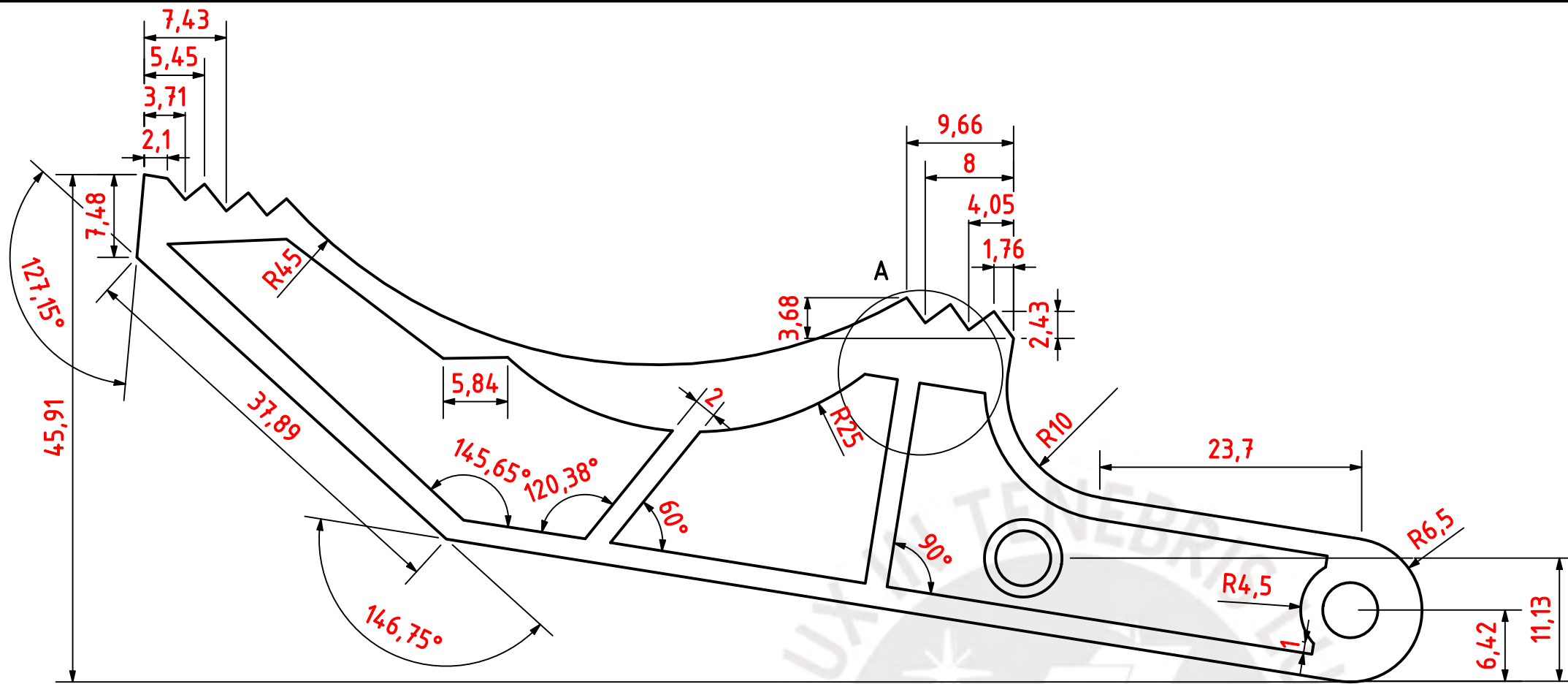
20191412

BALDEON POZO, SANTIAGO ALEXANDER

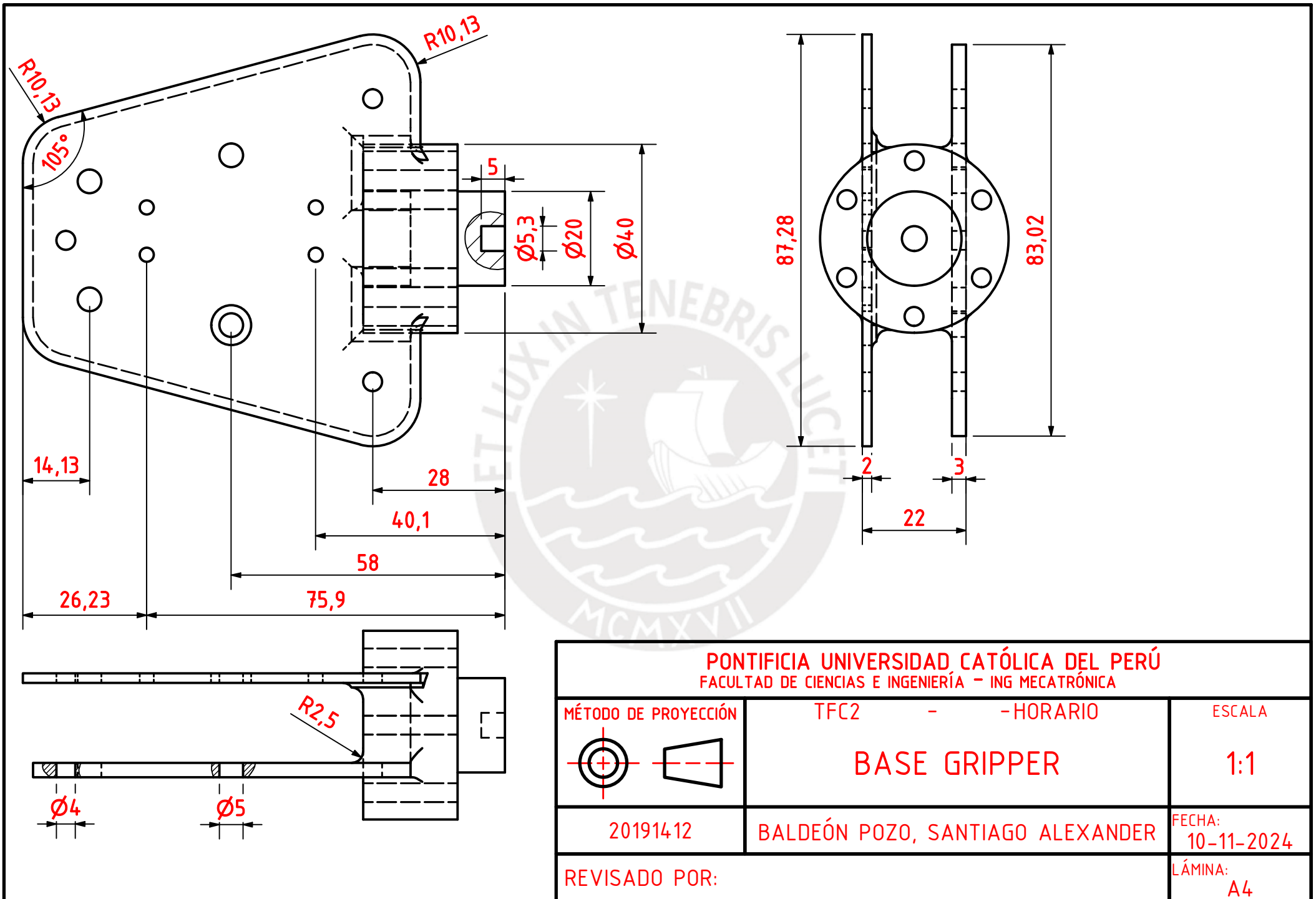
FECHA:  
27-10-2024

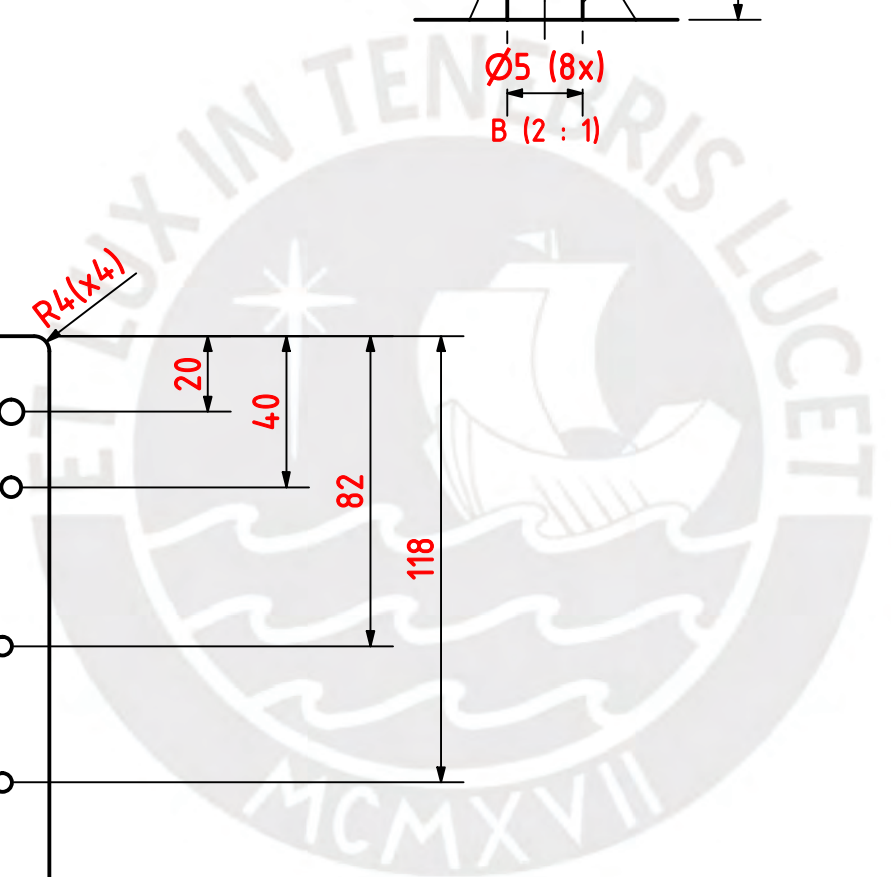
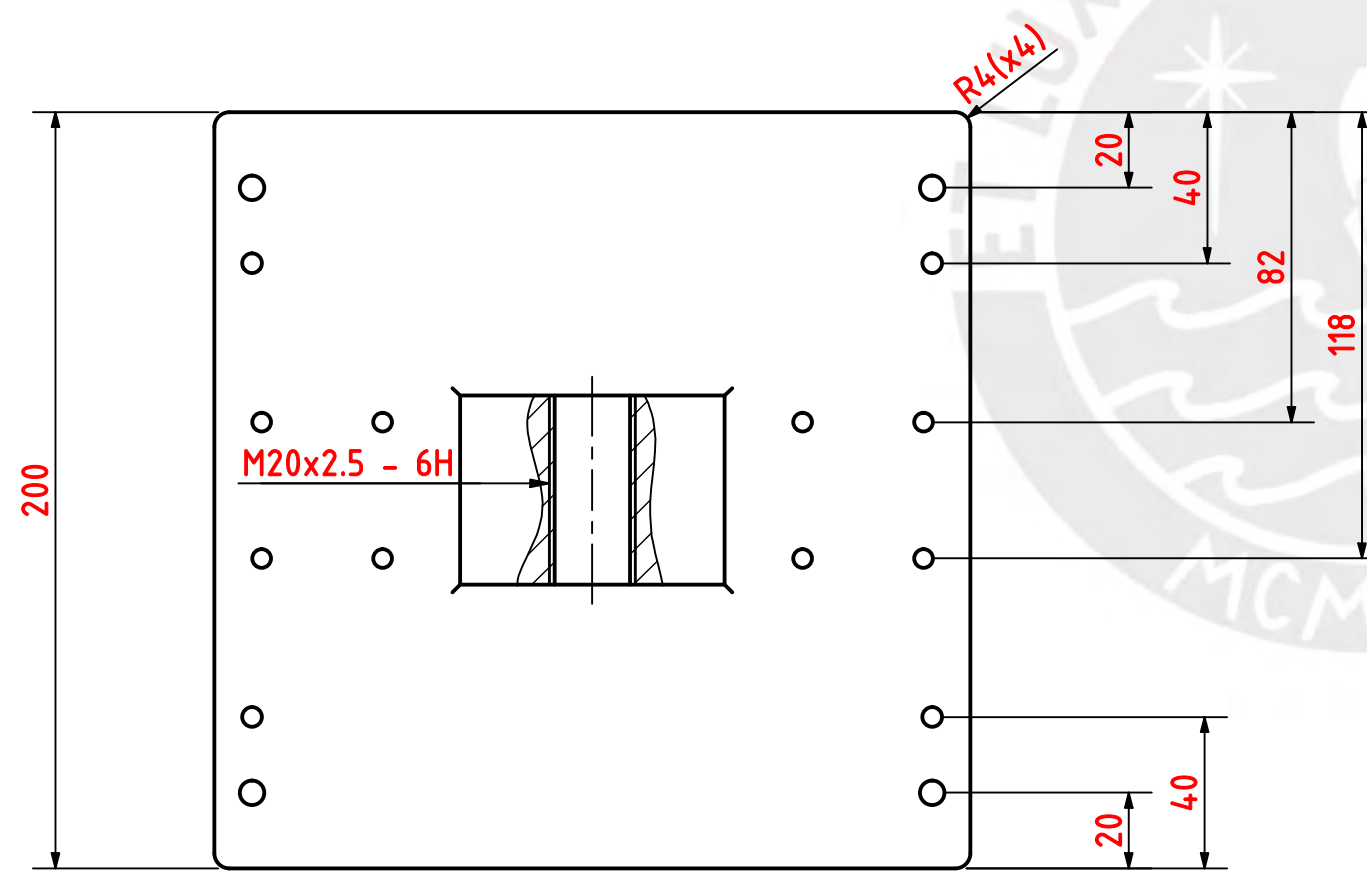
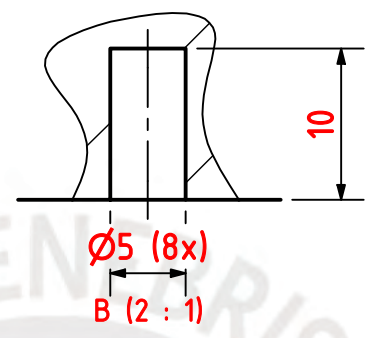
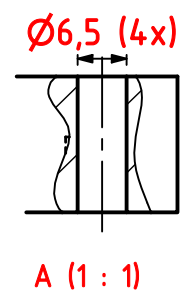
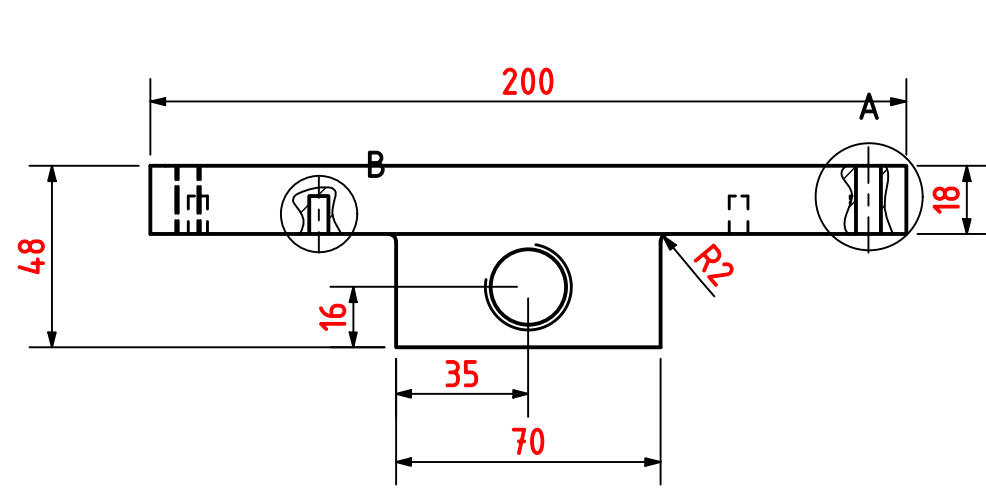
REVISADO POR:

LÁMINA:  
A4

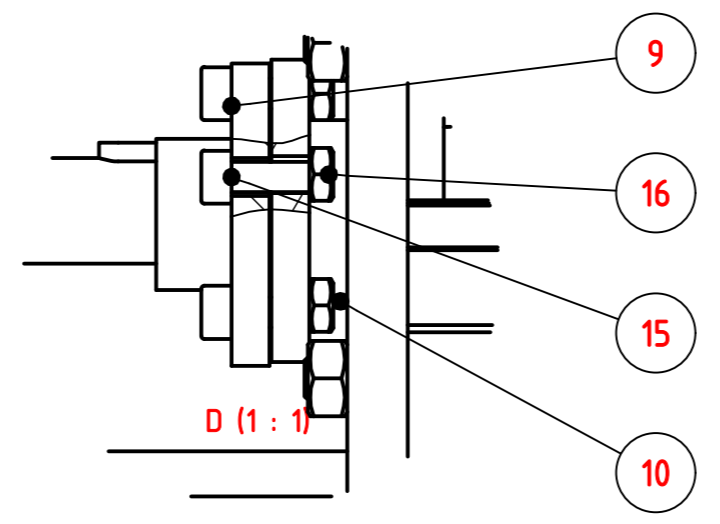
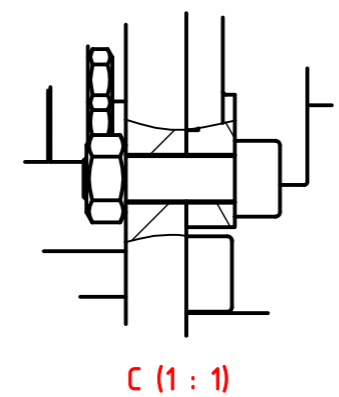
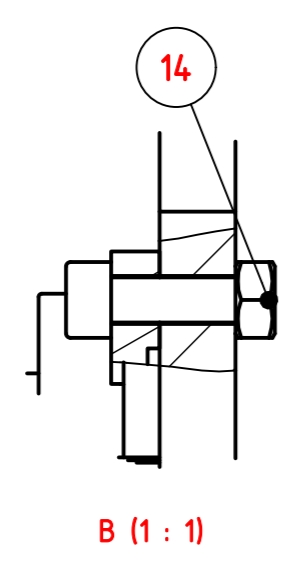
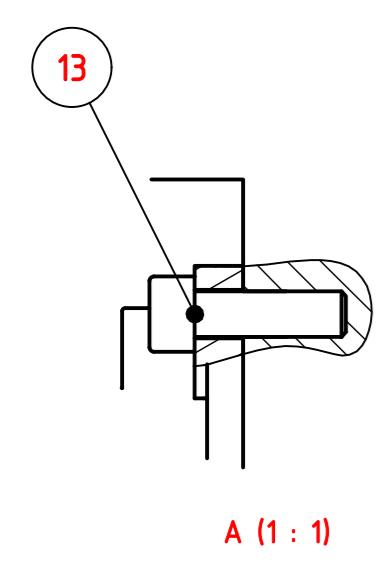
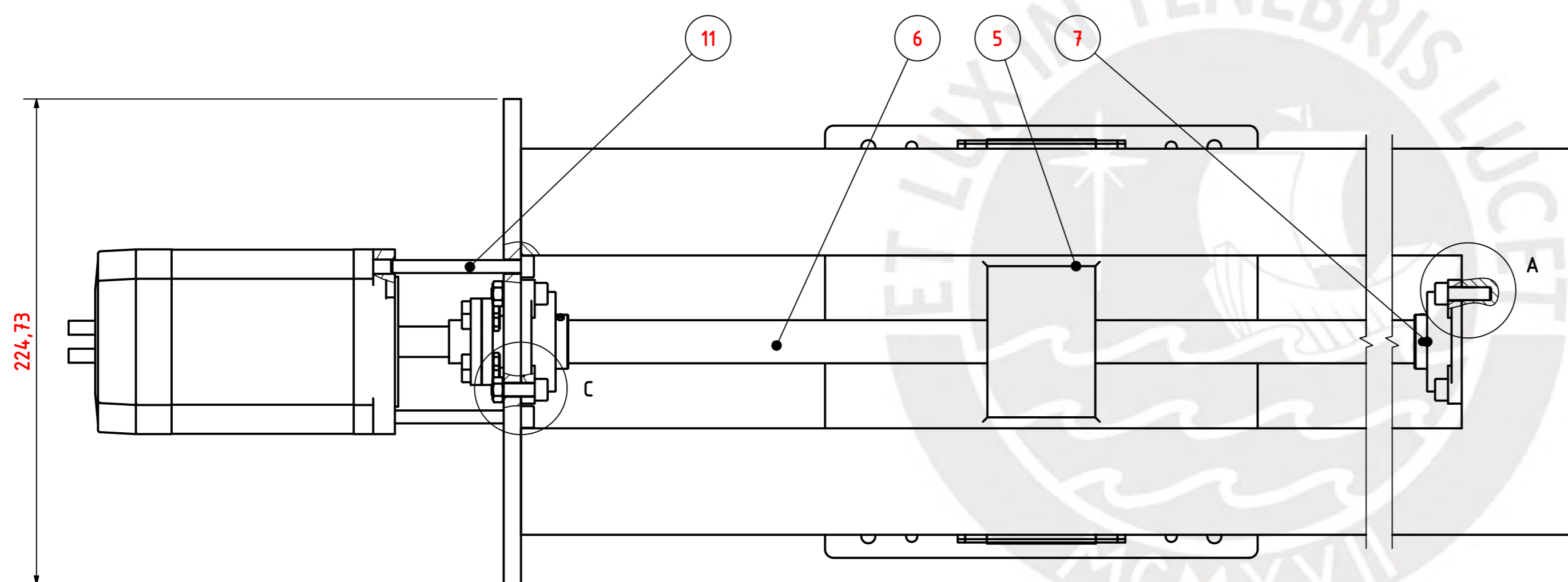
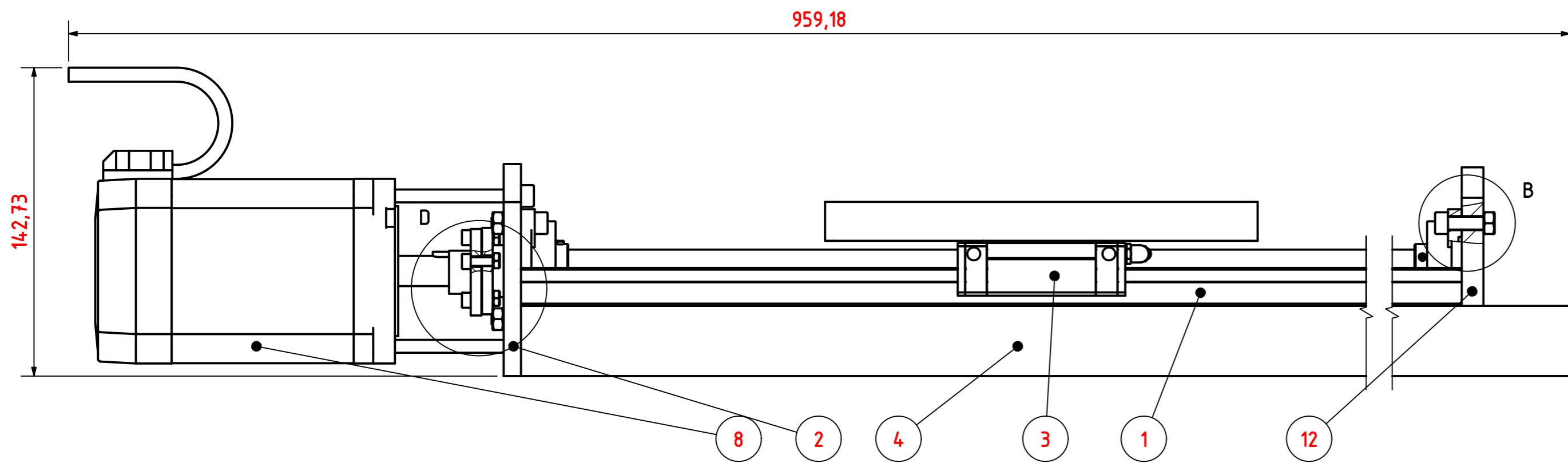


PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ING MECATRONICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC2 - -HORARIO <b>GARRA DE GRIPPER</b>	ESCALA <b>2:1</b>
20191412	BALDEON POZO, SANTIAGO ALEXANDER	FECHA: 01-11-2024
REVISADO POR:		LÁMINA: A3



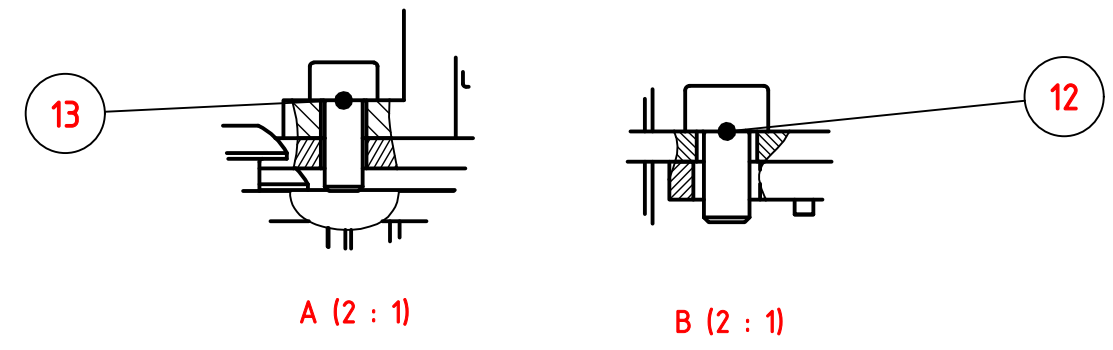
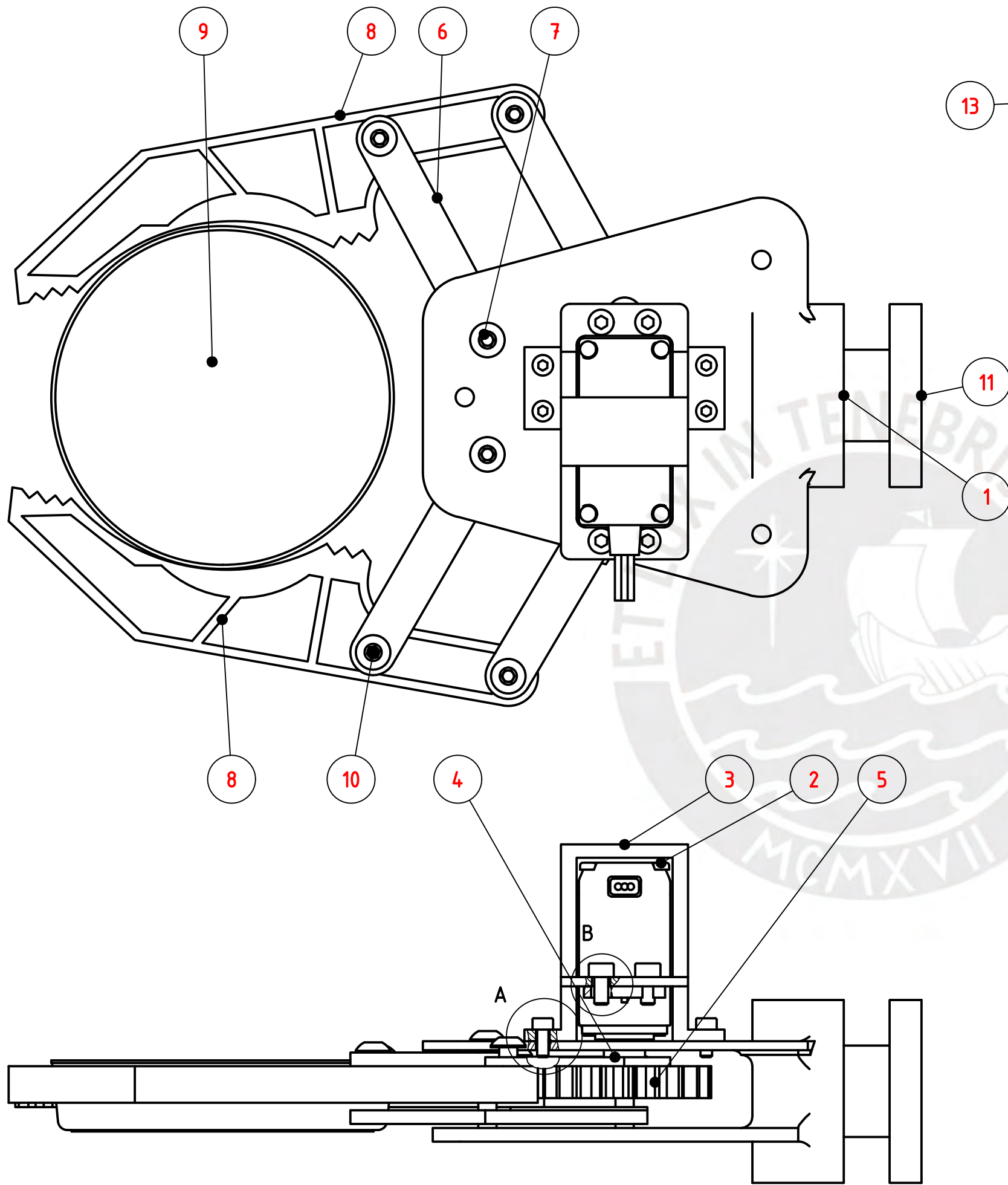


PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ING MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	TFC2 - -HORARIO	ESCALA
BASE GUÍA LINEAL		FECHA: 27/10/2024
20191412	BALDEON POZO, SANTIAGO ALEXANDER	LÁMINA: A3
REVISADO POR:		



16	5	ISO 4032 - M4		ISO 4032	Stainless Steel, 440C
15	5	AS 1420 - 1973 - M4 x 12		AS 1420 - 1973	Steel, Mild
14	6	ISO 4032 - M6		ISO 4032	Stainless Steel, 440C
13	8	AS 1420 - 1973 - M6 x 20		AS 1420 - 1973	Steel, Mild
12	1	SopORTE trasero			Steel, Mild, Welded
11	4	AS 1420 - 1973 - M6 x 60		AS 1420 - 1973	Steel, Mild
10	1	Brida 20mm			Steel, Mild, Welded
9	1	Brida 14mm			Steel, Mild, Welded
8	1	ES-M23480 8_0NM EASY SERVO MOTOR			Dominics Materials Database AS/N ZS 1866 / 6060-T5
7	2	UCF210D1			Generic
6	1	Husillo M20			Steel, Mild, Welded
5	1	Base Guia Lineal			Steel, Mild
4	1	Plato base			Generic
3	2	HGH20CA			Generic
2	1	SopORTE_motor_riel			Generic
1	2	HGR20-T			Generic
IT	CANT	NOMBRE	DESCR.	NORMA	MATERIAL

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ING MECATRONICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TFC2 - -HORARIO	ESCALA
	<b>GUIA LINEAL</b>	
20191412	BALDEON POZO, SANTIAGO ALEXANDER	FECHA: 10-11-2024
REVISADO POR:		LÁMINA:

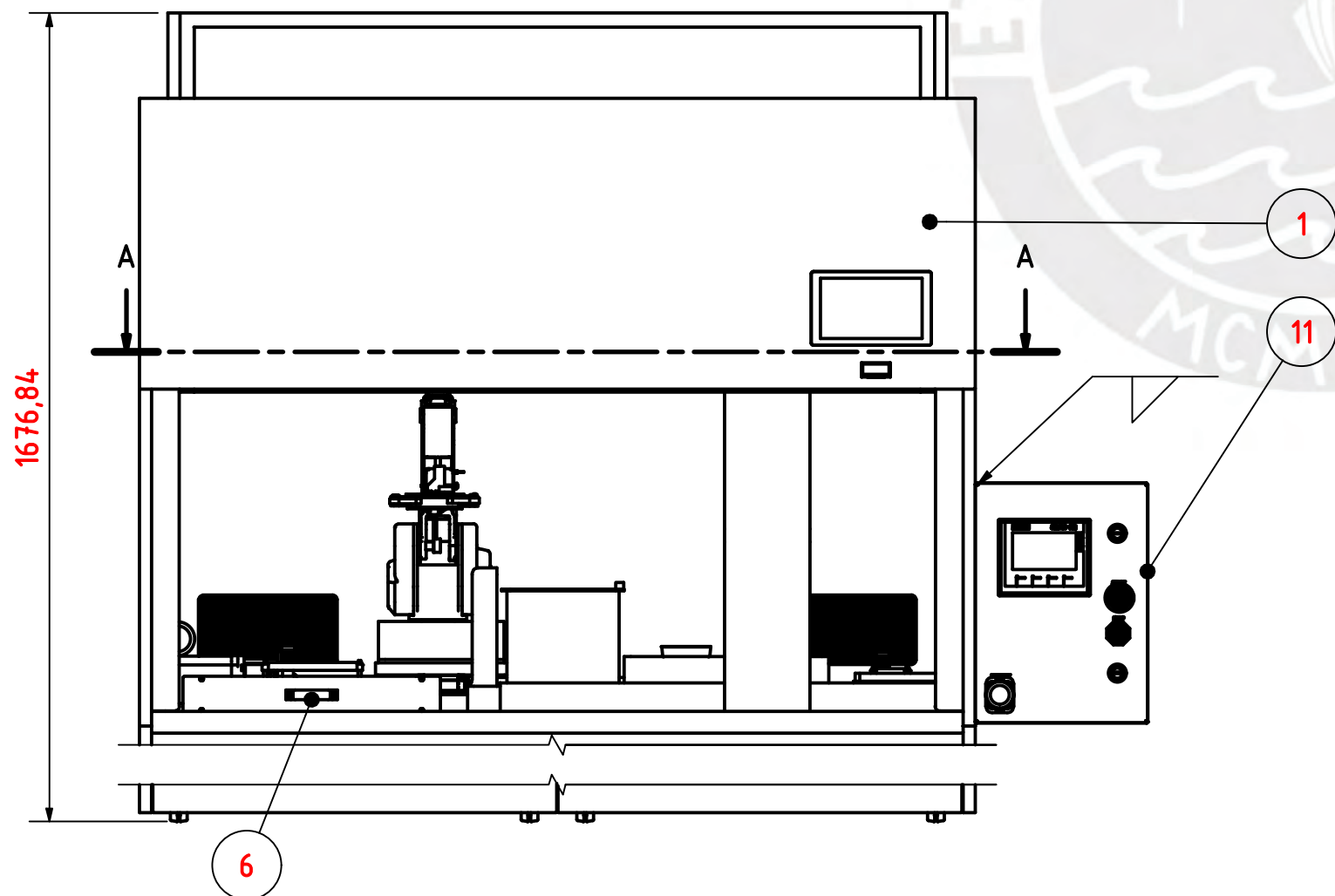
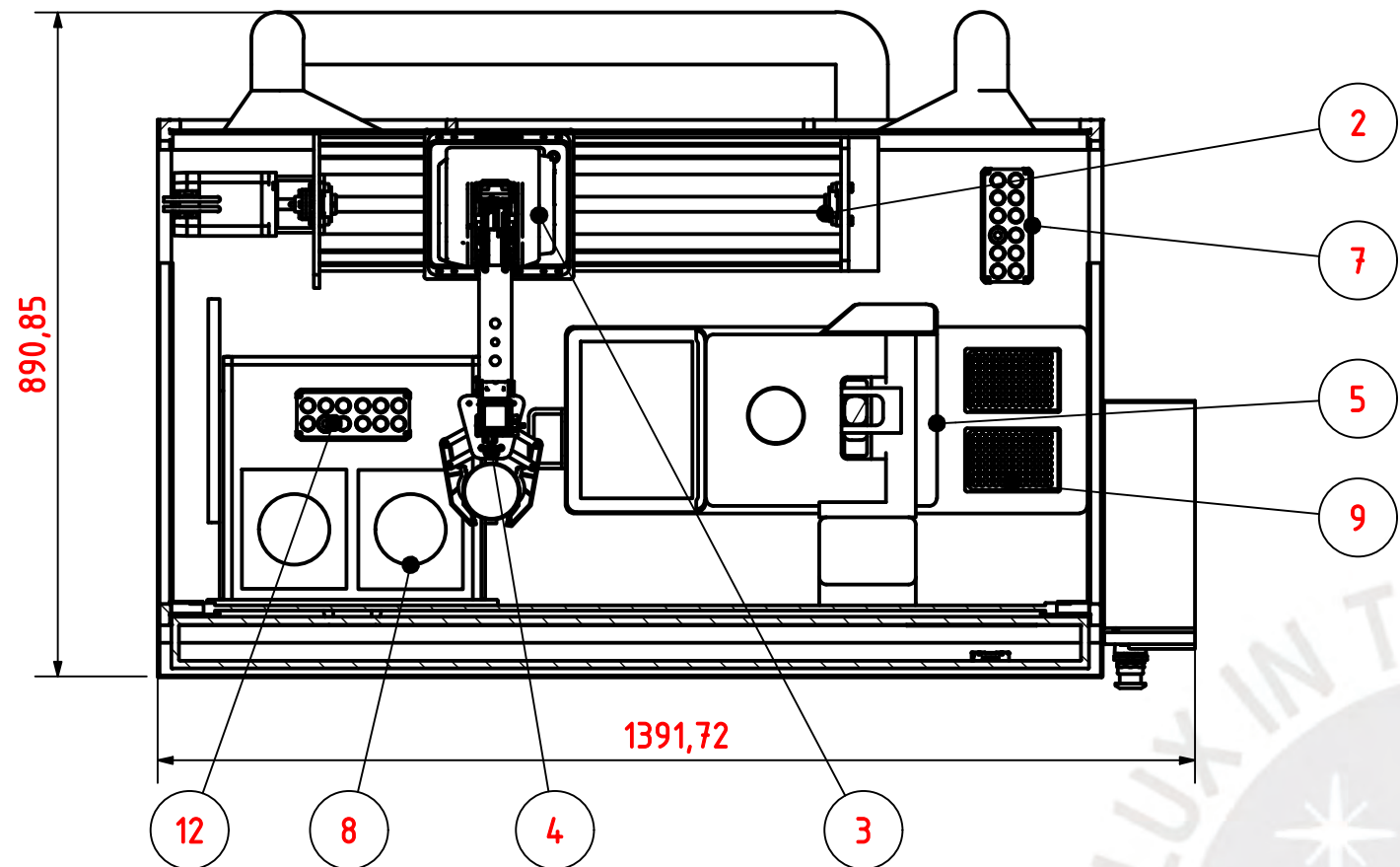


13	4	ANSI B18.3.1M - M2.5x0.45 x 6, BSHCSM		ANSI B18.3.1M	Steel, Mild
12	4	AS 1420 - 1973 - M3 x 6		AS 1420 - 1973	Steel, Mild
11	1	Cola de milano			Steel, Mild, Welded
10	4	Pin_gripper2			Generic
9	1	Petri Dish 90mm Dia			solidworks materials Acrylique (impact moyen-haut)
8	2	Garra_MIR			Generic
7	3	Pin_gripper_1			Generic
6	7	Biela			Generic
5	1	Engranaje_gripper			Generic
4	1	Servo disc			Generic
3	1	Soporte_servo			Steel, Mild, Welded
2	1	SERVO-TowerPro_MG946R			Genérico
1	1	Base			Generic
IT	CANT	NOMBRE	DESCR.	NORMA	MATERIAL

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ING MECATRONICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN	TFC2 - -HORARIO	ESCALA
	<b>GRIPPER</b>	
20191412	BALDEON POZO, SANTIAGO ALEXANDER	FECHA: 10-11-2024
REVISADO POR:		LÁMINA: A3

A-A



12	2	Tubos de muestra			Generic
11	1	Caja Electrónica			Generic
10	1	Placa de Petri			solidworks materials Acryli que (impact moyen-haut)
9	2	Porta-pipetas			Generic
8	2	Soporte de salida de placas			Steel, Mild, Welded
7	2	Soporte de apertura			
6	1	Cajón para ingreso de muestras			Generic
5	1	Estación de pipeteo	D-ONE ASSIST PLUS		Steel, Mild, Welded
4	1	GRIPPER			
3	1	DOBOT MG400			
2	1	Riel lineal			
1	1	Cabina de Bioseguridad	NU-543-500E		
IT	CANT	NOMBRE	DESCR.	NORMA	MATERIAL

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA - ING MECATRONICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN	TFC2 - -HORARIO	ESCALA
	<b>SISTEMA COMPLETO</b>	
20191412	BALDEON POZO, SANTIAGO ALEXANDER	FECHA: 10-11-2024
REVISADO POR:		LÁMINA: A3