

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO PARA EL CULTIVO  
VERTICAL DE HORTALIZAS E INSPECCIÓN POR VISIÓN  
ARTIFICIAL**

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

**AUTOR:**

David Moisés Aguilar Paredes

**ASESOR:**

Pedro Moisés Crisóstomo Romero


Lima, agosto, 2024

### Informe de Similitud

Yo, Pedro Moisés Crisóstomo Romero, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada "DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO PARA EL CULTIVO VERTICAL DE HORTALIZAS E INSPECCIÓN POR VISIÓN ARTIFICIAL", del autor David Moisés Aguilar Paredes, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 6%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 23/08/2024.
- 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: San Miguel, 25 de agosto de 2024

Apellidos y nombres del asesor: Crisóstomo Romero, Pedro Moisés	
DNI: 1013102	Firma 
ORCID: 0000-0002-8810-9005	

## RESUMEN

La incertidumbre en la producción de alimentos se intensifica debido a la contaminación del suelo, el cambio climático y el inminente aumento de la población a 9.8 mil millones de personas. La agricultura convencional, con su uso intensivo de químicos, ha contribuido a perder el 30% de las tierras arables a nivel mundial en las últimas cuatro décadas. Esta situación destaca la urgencia de replantear los métodos de producción para abordar la creciente demanda, preservar los recursos y garantizar la sostenibilidad a largo plazo.

En respuesta a este desafío, la agricultura vertical ha surgido como una solución tecnológica que ofrece protección contra insectos y enfermedades, además de posibilitar la producción independientemente de los factores climáticos. Este estudio de investigación se propone analizar el estado actual de la agricultura vertical, diseñar un sistema que permita el cultivo e inspección a través de visión artificial, y seleccionar dicho sistema mediante criterios técnico-económicos y un análisis de costos.

En el primer capítulo, se presenta la problemática abordada, los objetivos, la metodología, y el alcance del trabajo. Se realiza un análisis exhaustivo del estado del arte sobre las tecnologías en cultivos verticales y proyectos anteriores.

En el segundo capítulo, se aborda el proyecto conceptual, destacando la elección de una solución basada en un análisis técnico-económico. Esta solución implica la propuesta de una estructura metálica para alojar niveles de cultivos, integrando sensores para monitorear los parámetros de las plantas y actuadores para la distribución de la solución nutritiva.

En el tercer capítulo, se diseña y simula la estructura metálica para garantizar el cumplimiento de los requerimientos establecidos. Además, se eligen los sensores, actuadores, fuentes de energía y una cámara para el subsistema propuesto.

Finalmente, se simula el algoritmo de procesamiento de imágenes, se realizan pruebas del subsistema de transporte de la cámara, se estima el costo y se presentan las conclusiones del proyecto. En resumen, esta investigación propone una solución innovadora que integra la agricultura vertical y visión artificial para abordar los desafíos de la agricultura tradicional, siendo clave para asegurar la futura seguridad alimentaria.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES.....	1
1.1	Problemática.....	1
1.2	Objetivos de la tesis.....	3
1.2.1	Objetivo general.....	3
1.2.2	Objetivos específicos .....	3
1.3	Metodología .....	3
1.4	Estado del arte .....	4
1.4.1	Sistemas integrales.....	5
1.4.2	Subsistema de análisis de crecimiento vegetal .....	11
1.4.3	Subsistema de visión artificial para inspección de productos agrícolas .....	14
1.4.4	Importancia y efectos del uso de luces LEDs en los cultivos verticales.....	17
1.4.5	Elementos esenciales de los sistemas hidropónicos.....	20
2.	CAPÍTULO 2: DESARROLLO DEL PROYECTO CONCEPTUAL .....	23
1.1	Lista de exigencias .....	23
2.1	Estructura de funciones .....	23
2.1.1	Método de caja negra .....	24
2.1.2	Lista de funciones .....	25
2.1.3	Diagrama de funciones .....	29
2.2	Matriz morfológica.....	31
2.3	Evaluación técnica-económica.....	31
2.4	Solución óptima.....	33
3.	CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL SISTEMA .....	35
3.1	Diseño integrado del proyecto.....	35
3.1.1	Diagrama de operaciones .....	35
3.1.2	Arquitectura de hardware.....	37

3.1.3	Selección de materiales y procesos de fabricación .....	38
3.2	Diseño del subsistema de control .....	39
3.2.1	Diagrama de flujo del proceso .....	39
3.2.2	Variables por monitorear y controlar .....	41
3.2.3	Estrategia de control .....	41
3.2.4	Selección del controlador .....	42
3.2.5	Software .....	44
3.3	Selección de componentes eléctricos y electrónicos .....	45
3.3.1	Acondicionamiento energético .....	45
3.3.2	Computadora industrial y terminales de E/Ss .....	49
3.3.3	Eje lineal, servodrives y servomotor .....	51
3.3.4	Selección de sensores .....	58
3.3.5	Selección de indicadores luminosos .....	69
3.3.6	Cables y accesorios de cableado requeridos .....	70
3.4	Diseño de la interfaz de usuario .....	72
3.5	Diseño de circuitos electrónicos y eléctricos .....	74
3.5.1	Circuitos electrónicos .....	77
3.5.2	Circuitos eléctricos .....	78
3.6	Diseño mecánico .....	79
3.6.1	Análisis mecánico para la evaluación de la rigidez y resistencia .....	82
3.6.2	Imágenes renderizadas .....	84
3.7	Subsistema de procesamiento de imágenes .....	86
3.7.1	Diseño e implementación del algoritmo de visión artificial .....	86
3.7.2	Diseño del algoritmo de control del servomotor .....	93
3.7.3	Sobre los programas en el microprocesador .....	94
3.8	Planos mecánicos y electrónicos .....	95

3.8.1	Planos mecánicos.....	95
3.8.2	Planos eléctricos.....	96
3.8.3	Planos electrónicos.....	97
4.	CAPÍTULO 4: SIMULACIONES Y PRUEBAS .....	98
4.1	Algoritmo de visión artificial .....	98
4.1.1	Simulaciones del Algoritmo de Estimación de Relación Píxel-Milímetro.....	99
4.1.2	Simulaciones del Algoritmo de Estimación de Área Foliar.....	100
4.1.3	Análisis de Resultados .....	102
4.2	Algoritmo de control del eje lineal con servomotor.....	102
5.	CAPÍTULO 5: ESTIMACIÓN DE COSTOS .....	106
5.1	Equipos eléctricos y electrónicos .....	106
5.2	Fabricación y diseño mecánico .....	108
5.3	Programación e implementación.....	109
5.4	Costo total del proyecto.....	109
	CONCLUSIONES .....	110
	RECOMENDACIONES.....	112
	BIBLIOGRAFÍA .....	113
	ANEXOS .....	116

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Sensibilidad y especificidad media para un espacio de color diferente. Fuente: Loresco y col. (2020). .....	15
Tabla 1.2: Precisión al determinar el número de días de la lechuga. Fuente: Loresco y col. (2020). .....	15
Tabla 2.1: Funciones parciales del subsistema de sensores. Fuente: elaboración propia. ....	26
Tabla 2.2: Funciones parciales del subsistema de control. Fuente: elaboración propia. ....	26
Tabla 2.3: Funciones parciales del subsistema de comunicación. Fuente: elaboración propia. ....	27
Tabla 2.4: Funciones parciales del subsistema de actuadores. Fuente: elaboración propia. ...	27
Tabla 2.5: Funciones parciales del subsistema de energía. Fuente: elaboración propia. ....	28
Tabla 2.6: Funciones parciales del subsistema de materia. Fuente: elaboración propia. ....	28
Tabla 2.7: Funciones parciales del subsistema de interfaz. Fuente: elaboración propia. ....	29
Tabla 2.8: Evaluación técnica. Fuente: elaboración propia. ....	32
Tabla 2.9: Evaluación económica. Fuente: elaboración propia. ....	32
Tabla 3.1: Análisis de materiales. Fuente: elaboración propia. ....	38
Tabla 3.2: Lista de variables del proyecto. Fuente: elaboración propia. Fuente: elaboración propia. ....	41
Tabla 3.3: Análisis del subsistema de control de posicionamiento de la cámara. Fuente: elaboración propia. ....	42
Tabla 3.4: Análisis de controladores. Fuente: elaboración propia. ....	42
Tabla 3.5: Análisis de microprocesadores. Fuente: elaboración propia. ....	44
Tabla 3.6: Programación del microprocesador. Fuente: elaboración propia. ....	45
Tabla 3.7: Fuentes de alimentación. Fuente: elaboración propia. ....	46
Tabla 3.8: Características del protector de carga. Fuente: elaboración propia. ....	46
Tabla 3.9: Interruptores termomagnéticos. Fuente: elaboración propia. ....	47

Tabla 3.10: Llave seccionadora. Fuente: elaboración propia. ....	48
Tabla 3.11: Relés. Fuente: elaboración propia.....	48
Tabla 3.12: Características fuente de alimentación 5 VDC. Fuente: elaboración propia. ....	49
Tabla 3.13: Panel PC – BECKHOFF. Fuente: elaboración propia.....	49
Tabla 3.14: Terminales de entradas BECKHOFF. Fuente: elaboración propia. ....	50
Tabla 3.15: Terminales de salidas BECKHOFF. Fuente: elaboración propia. ....	51
Tabla 3.16: Alternativas de ejes lineales. Fuente: elaboración propia.....	52
Tabla 3.17: Servomotores EtherCAT BECKHOFF. Fuente: elaboración propia.....	57
Tabla 3.18: Servodrives EtherCAT. Fuente: elaboración propia.....	57
Tabla 3.19: Sensores de nivel ultrasónicos. Fuente: elaboración propia. ....	58
Tabla 3.20: Pulsadores de emergencia. Fuente: elaboración propia.....	59
Tabla 3.21: Pulsadores tipo reset. Fuente: elaboración propia. ....	59
Tabla 3.22: Sensores de humedad y temperatura. Fuente: elaboración propia.....	60
Tabla 3.23: Sensores de pH. Fuente: elaboración propia.....	61
Tabla 3.24: Características técnicas probeta pH. Fuente: elaboración propia. ....	62
Tabla 3.25: Sensores de conductividad. Fuente: elaboración propia.....	62
Tabla 3.26: Características técnicas del sensor de CE seleccionado. Fuente: elaboración propia. .....	63
Tabla 3.27: Sensores de CO2. Fuente: elaboración propia.....	64
Tabla 3.28: Sensores de temperatura RTD. Fuente: elaboración propia. ....	64
Tabla 3.29: Probeta RTD seleccionada. Fuente: elaboración propia.....	65
Tabla 3.30: Sensores de luminosidad. Fuente: elaboración propia.....	66
Tabla 3.31. Bombas peristálticas. Fuente: elaboración propia. ....	66
Tabla 3.32. Tabla de bomba de suministro. Fuente: elaboración propia. ....	67
Tabla 3.33: Alternativas de balizas industriales. Fuente: elaboración propia.....	69
Tabla 3.34: Características del box multipin. Fuente: elaboración propia. ....	70

Tabla 3.35: Características de los conectores M12. Fuente: elaboración propia.....	70
Tabla 3.36: Características de los cables armados. Fuente: elaboración propia.....	71
Tabla 3.37: Característica del PCB Atlas Scientific. Fuente: elaboración propia. ....	71
Tabla 3.38: Lista de planos mecánicos. Fuente: elaboración propia. ....	96
Tabla 3.39: Lista de planos eléctricos. Fuente: elaboración propia. ....	96
Tabla 3.40: Lista de planos electrónicos. Fuente: elaboración propia.....	97
Tabla 4.1: Resumen de simulaciones. Fuente: elaboración propia.....	101
Tabla 5.1: Costos de equipos de control en dólares. Fuente: elaboración propia.....	106
Tabla 5.2: Costos de fabricación mecánica en dólares. Fuente: elaboración propia. ....	108
Tabla 5.3: Costos de diseño mecánico en dólares. Fuente: elaboración propia.....	108
Tabla 5.4: Costos de programación e implementación en dólares. Fuente: elaboración propia. .....	109
Tabla 5.5: Costo total del proyecto. Fuente: elaboración propia. ....	109
Tabla G.1: Listas de exigencias del proyecto – parte 1. Fuente: elaboración propia. ....	174
Tabla A1: Subsistema de sensores. Fuente: elaboración propia.....	116
Tabla A2: Subsistema de control. Fuente: elaboración propia. ....	117
Tabla A3: Subsistema de comunicación. Fuente: elaboración propia. ....	118
Tabla A4: Subsistema de actuadores. Fuente: elaboración propia. ....	119
Tabla A5: Subsistema de energía. Fuente: elaboración propia.....	120
Tabla A6: Subsistema de materia. Fuente: elaboración propia.....	121
Tabla A7: Subsistema de interfaz. Fuente: elaboración propia. ....	122

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Porcentaje de extracción de agua dulce por sector (%) en 2014. Fuente: FAO. ....	1
Figura 1.2: Cadena de suministro de la agricultura. Fuente: Bowery Farming. ....	2
Figura 1.3: Norma de diseño VDI 2221. Fuente: PUCP (2020). ....	4
Figura 1.4: (a) Render del GRObot con todas sus puertas abiertas (b) Render del GRObot con su cubierta exterior acrílico. Fuente: Camille Richman (2015). ....	6
Figura 1.5: CityFarm. Fuente: Ferrer y col. (2019). ....	7
Figura 1.6: PFC. Fuente: Ferrer y col. (2019). ....	7
Figura 1.7: Software desarrollado para el PFC. Fuente: Ferrer y col. (2019). ....	9
Figura 1.8: módulo maestro. Fuente: Belista et al. (2018). ....	9
Figura 1.9: Descripción general del proyecto. Fuente: Okamoto y Sakane (2020). ....	10
Figura 1.10: Análisis del crecimiento de la lechuga usando flujo óptico. Fuente: Okamoto y Sakane (2020). ....	11
Figura 1.11: Biomasa total de la lechuga. Fuente: Llanos et al. (2020). ....	12
Figura 1.12: TRC de la lechuga. Fuente: Llanos et al. (2020). ....	12
Figura 1.13: TAN de la lechuga. Fuente: Llanos et al. (2020). ....	13
Figura 1.14: Resultados de segmentación de imagen en diferentes espacios de color. (a) imagen original (b) verdad del terreno (c) CIE Lab (d) YCbCr (e) RGB (f) HSV, píxeles de lechuga segmentados en verde; píxeles de fondo segmentados en rojo. Fuente: Loresco y col. (2020). ....	15
Figura 1.15: Recuento de píxeles vs grafico de área de dosel. Fuente: Calangian et al. (2018). ....	16
Figura 1.16: Diagrama de bloques de procesamiento de imágenes. Fuente: Calangian et al. (2018). ....	17
Figura 1.17: Espectros de luz utilizados en los experimentos. Fuente: Pennisi et al. (2019). .	18
Figura 1.18: Configuración de los LEDs. Fuente: Yusof et al. (2016). ....	19

Figura 2.1: Blackbox. Fuente: elaboración propia.....	24
Figura 2.2: Diagrama de funciones. Fuente: elaboración propia. ....	30
Figura 2.3: Evaluación técnica-económica. Fuente: elaboración propia. ....	33
Figura 2.4: Concepto solución óptimo. Fuente: elaboración propia.....	34
Figura 3.1: Diagrama de operaciones. Fuente: Elaboración propia.....	36
Figura 3.2: Distribución energética - Arquitectura de hardware. Fuente: elaboración propia.	37
Figura 3.3: Alimentación energética - Arquitectura de hardware. Fuente: elaboración propia. .....	37
Figura 3.4: Diagrama de los subprocesos. Fuente: elaboración propia. ....	39
Figura 3.5: Diagrama principal del proceso. Fuente: elaboración propia.....	40
Figura 3.6: Hoja de datos del eje lineal. Fuente: Bahr Modultechnik. ....	53
Figura 3.7: Característica de la bomba. Fuente: elaboración propia.....	68
Figura 3.8: Performance de la bomba. Fuente: Zipgrow. ....	69
Figura 3.9: Pantalla principal – HMI. Fuente: elaboración propia. ....	72
Figura 3.10: Pantalla control manual – HMI. Fuente: elaboración propia. ....	73
Figura 3.11: Pantalla información de sensores – HMI. Fuente: elaboración propia.....	73
Figura 3.12: Vista isométrica del tablero eléctrico, diseño realizado en Inventor. Fuente: Elaboración propia.....	74
Figura 3.13: Circuitos eléctricos 1. Fuente: elaboración propia. ....	74
Figura 3.14: Circuitos eléctricos 2. Fuente: elaboración propia. ....	75
Figura 3.15: Circuitos eléctricos 3. Fuente: elaboración propia. ....	75
Figura 3.16: Circuitos eléctricos 4. Fuente: elaboración propia. ....	76
Figura 3.17: Circuitos eléctricos 5. Fuente: elaboración propia. ....	76
Figura 3.18: Boxes multipines. Fuente: Murrelektronik.....	76
Figura 3.19: Vista frontal del tablero eléctrico, diseño realizado en Inventor. Fuente: Elaboración propia.....	77

Figura 3.20: PCB diseñada. Fuente: elaboración propia.....	77
Figura 3.21: Vista 3D del PCB diseñado. Fuente: elaboración propia. ....	78
Figura 3.22: Diagrama de conexiones. Fuente: elaboración propia.....	78
Figura 3.23: Estructura principal. Fuente: Elaboración propia.....	79
Figura 3.24: (a) y (b) soportes de fijación para eje lineal. Fuente: Elaboración propia.....	80
Figura 3.25: (a) y (b) vistas del soporte para tablero eléctrico. Fuente: Elaboración propia...	80
Figura 3.26: (a) Portasensores, (b) Box multipin. Fuente: Elaboración propia. ....	81
Figura 3.27: (a) Vista isométrica de los soportes de la estructura, (b) Vista sección de los soportes. Fuente: Elaboración propia.....	81
Figura 3.3.28: Simulación en Inventor - Factor de seguridad. Fuente: elaboración propia.....	83
Figura 3.3.29: Simulación en Inventor - desplazamiento máx. Fuente: elaboración propia. ..	83
Figura 3.3.30: Simulación en Inventor - Von Mises Stress. Fuente: elaboración propia. ....	84
Figura 3.31: Vista isométrica - diseño final A. Fuente: elaboración propia. ....	85
Figura 3.32: Vista isométrica - diseño final B. Fuente: elaboración propia. ....	85
Figura 3.33: Diagrama de bloques de algoritmo 1. Fuente: elaboración propia. ....	86
Figura 3.34: Conversión a cielab. Fuente: elaboración propia. ....	87
Figura 3.35: Clústeres generados. Fuente: elaboración propia. ....	87
Figura 3.36: Número óptimo de clústeres 1. Fuente: elaboración propia.....	88
Figura 3.37: Filtros morfológicos 1. Fuente: elaboración propia. ....	88
Figura 3.38: Filtros aplicados 1. Fuente: elaboración propia.....	89
Figura 3.39: Relación pixel-mm. Fuente: elaboración propia. ....	89
Figura 3.40: Diagrama de bloques de algoritmo 2. Fuente: elaboración propia.....	90
Figura 3.41: Conversión a espacio de color cielab. Fuente: elaboración propia. ....	90
Figura 3.42: Número óptimo de clústeres. Fuente: elaboración propia. ....	91
Figura 3.43: Clústeres generados 2. Fuente: elaboración propia. ....	91
Figura 3.44: Filtros morfológicos aplicados 2. Fuente: elaboración propia. ....	92

Figura 3.45: Estimación de área foliar - planta 06. Fuente: Elaboración propia. ....	92
Figura 3.46: Trayectoria de la cámara. Fuente: elaboración propia. ....	93
Figura 3.47: Algoritmo propuesto. Fuente: elaboración propia.....	94
Figura 3.48: Ejemplo de comunicación EtherCAT de Codesys – Raspberry. Fuente: Kurt Braun (2015).....	95
Figura 4.1: Plántulas analizadas. Fuente: elaboración propia.....	98
Figura 4.2: Simulación del algoritmo pixel-mm. Fuente: elaboración propia.....	99
Figura 4.3: Aplicación de filtros seleccionados. Fuente: elaboración propia.....	100
Figura 4.4: Área foliar de las plántulas. Fuente: elaboración propia.....	101
Figura 4.5: Pruebas del algoritmo de control – servomotor. Fuente: elaboración propia.....	102
Figura 4.6: HMI desarrollado para pruebas. Fuente: elaboración propia. ....	103
Figura 4.7: Dinámica del servomotor configurado en TwinCAT. Fuente: Elaboración propia. ....	104
Figura 4.8: Parámetros PID del servodrives en TwinCAT. Fuente: elaboración propia.....	105
Figura B1: Propuesta de módulo de cultivo A. Fuente: elaboración propia.....	124
Figura B2: Vista superior de la propuesta A. Fuente: elaboración propia.....	125
Figura B3: Vista isométrica de la propuesta A. Fuente: elaboración propia. ....	125
Figura B4: Estructura soporte para cámara. Fuente: elaboración propia.....	126
Figura B5: Vista frontal del módulo de nutrientes. Fuente: elaboración propia.....	126
Figura B6: Vista horizontal de la caja de interfaz. Fuente: elaboración propia.....	126
Figura B7: Módulo de la interfaz A. Fuente: elaboración propia. ....	126
Figura B8: Vista isométrica de la solución B. Fuente: elaboración propia. ....	127
Figura B9: Vista exterior del tablero de control (solución B). Fuente: elaboración propia...	128
Figura B10: Interior del tablero de control de la solución B. Fuente: elaboración propia. ...	128
Figura B11: Suministro de nutrientes de la solución B. Fuente: elaboración propia. ....	128

Figura B12: Vista isométrica del módulo de cultivo C. Fuente: elaboración propia.....	129
Figura B13: Vista frontal del módulo de nutrientes C. Fuente: elaboración propia.....	130
Figura B14: Módulo de interfaz C. Fuente: elaboración propia.....	130
Figura B15: Vista horizontal de la caja de interfaz C. Fuente: elaboración propia.....	130
Figura E1: Cotización de estructura mecánica. Fuente: Moldes Peruanos E.I.R.L.....	158
Figura E2: Cotización de equipos de control. Fuente: elaboración propia.....	160
Figura F1: Librería para motion control. Fuente: TwinCAT3 – elaboración propia.....	168



## CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES

### 1.1 Problemática

Según las Naciones Unidas, alimentar a una población mundial estimada de 9.8 mil millones de personas para el 2050, con el 68% viviendo en áreas urbanas, requerirá aumentar la producción de alimentos en un 70%. Esto implica cultivar más en las próximas cuatro décadas que en los últimos 10,000 años, considerando que el 80% de las tierras disponibles ya están en uso (United Nations, 2017; Stuart Oda, 2020).

Share of freshwater withdrawals by sector (%) in 2014

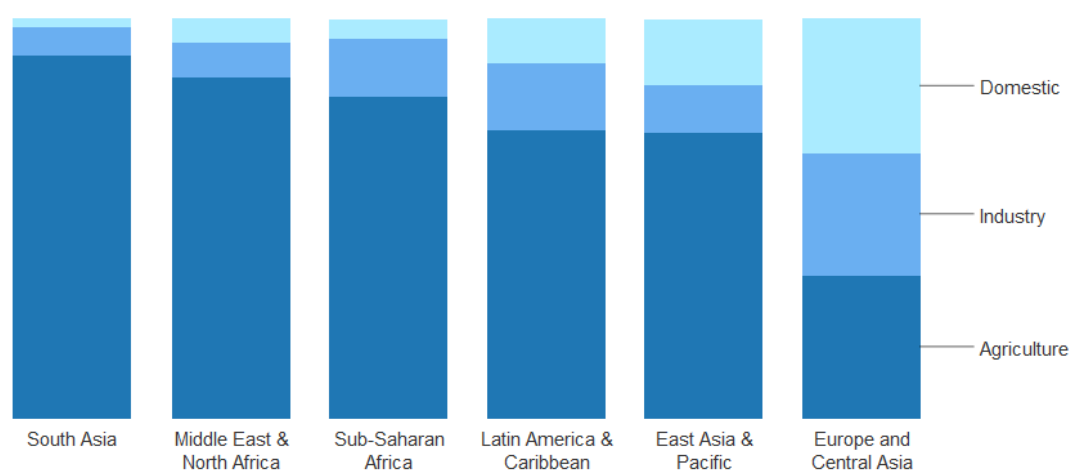


Figura 1.1: Porcentaje de extracción de agua dulce por sector (%) en 2014. Fuente: FAO.

La agricultura, que representa el 70% del consumo global de agua dulce, enfrenta desafíos significativos (ver Figura 1.1). Anualmente, se utilizan aproximadamente 5 mil millones de libras de pesticidas, contribuyendo a la pérdida del 30% de las tierras arables en las últimas cuatro décadas. Estos productos químicos afectan las cadenas de suministro de agua, contaminando ríos, lagos y océanos (World Bank, 2020; Stuart Oda, 2020; The Guardian, 2015).

A nivel mundial, el 33.3% de la producción alimentaria se desperdicia debido a demoras en la cadena de suministro (FAO, 2020), lo que resulta en pérdida de hasta el 50% de los nutrientes y contribuye al aumento de enfermedades transmitidas por alimentos (Fain, 2019; CNN, 2018). En respuesta a estos desafíos, la Agricultura en Ambientes Controlados (CEA), o agricultura vertical, ha surgido como una innovación global, buscando ser sostenible y escalable al ofrecer producción global, protección contra plagas y enfermedades, y eliminar la dependencia de factores climáticos impredecibles (MIT, 2019). En lugares como EE. UU., Bowery Farming

utiliza tecnología avanzada, como luces LED y control preciso de variables, para lograr una producción de hortalizas durante todo el año (Irvin Fain, 2019).

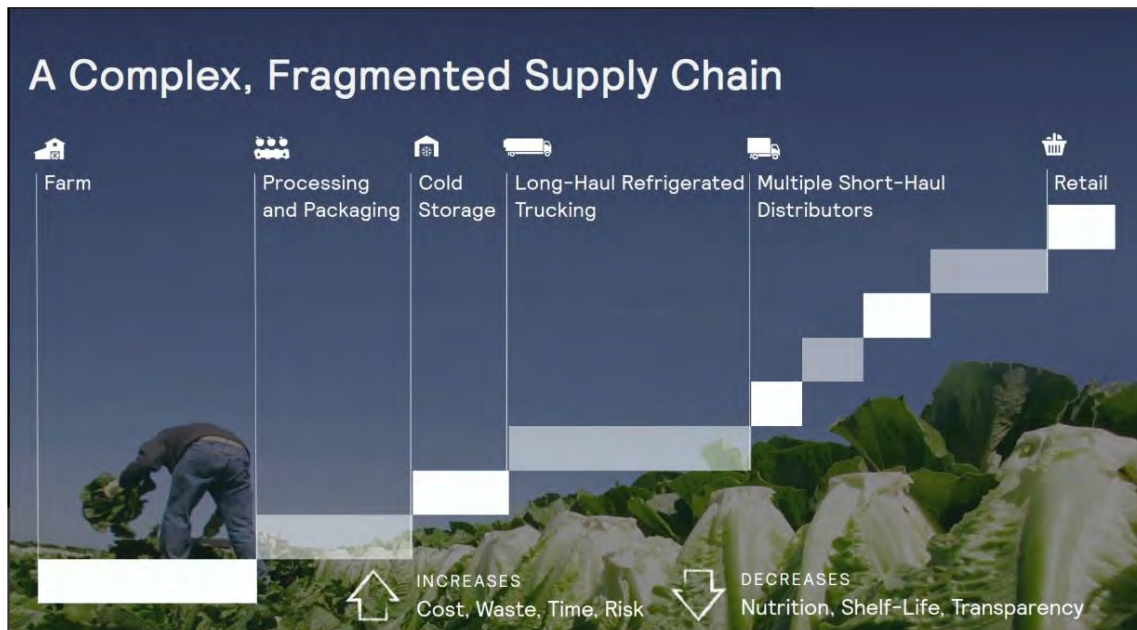


Figura 1.2: Cadena de suministro de la agricultura. Fuente: Bowery Farming.

La agricultura vertical ofrece un mayor control y eficiencia en la producción, optimiza el uso del suelo, es independiente del clima y permite cosechas sin pesticidas, ahorrando hasta un 95% de agua en comparación con métodos tradicionales. Su adopción a gran escala se ha acelerado en los últimos 8 años, gracias a la reducción del costo de las luces LED en más del 85% y un aumento en su eficiencia en más del doble, iniciando un desarrollo a gran escala. La disminución continua de costos facilitará que más empresas ofrezcan cultivos verticales a nivel mundial (Irvin Fain, 2019).

En América Latina, empresas como Agroubana adoptan la agricultura vertical para la producción de hortalizas, desafiando las limitaciones de la agricultura convencional. A pesar de abastecer a cadenas de retail como Jumbo de Cencosud en Chile, enfrentan desafíos para optimizar la producción a gran escala y adaptarse a las condiciones climáticas. Este tipo de empresas podrían resolver sus limitaciones con tecnologías avanzadas como "digital twins" o telemetría, pero les resultan no rentables debido a nuestro entorno empresarial. Esto destaca la necesidad de soluciones económicas y accesibles para la agricultura vertical en América Latina, asegurando la seguridad alimentaria sin realizar inversiones enormes en tecnologías avanzadas.

## **1.2 Objetivos de la tesis**

A continuación, se presenta el objetivo general y específicos de la presente tesis.

### **1.2.1 Objetivo general**

Diseñar un sistema automático que permita el cultivo hidropónico vertical de hortalizas y la inspección de los cultivos mediante visión artificial.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- A. Investigar la problemática actual sobre el cultivo de hortalizas y el estado del arte de los sistemas de cultivos hidropónicos verticales.
- B. Diseñar la estructura mecánica que permita alojar una cámara entre los niveles de cultivo, así como contar con la disposición adecuada de bandejas de cultivo y subsistemas de suministro de agua y nutrientes.
- C. Diseñar un subsistema de control para la dosificación de nutrientes, iluminación y suministro de agua del sistema hidropónico vertical.
- D. Diseñar un subsistema electrónico que controle la dosificación de nutrientes, iluminación y riego en función de las necesidades de los cultivos.
- E. Diseñar un algoritmo de procesamiento de imágenes que permita el monitoreo del crecimiento de los cultivos.

## **1.3 Metodología**

El desarrollo de la tesis se realizará bajo la norma de diseño VDI 2221 (ver Figura 1.3), la cual consiste en precisar el problema a resolver mediante una lista de exigencias; determinar las funciones y su estructura diseñando una estructura de funciones; encontrar varios conceptos solución teniendo en consideración las diversas tecnologías que se requieren según los subsistemas del proyecto; elaborar un proyecto preliminar en base a un análisis técnico-económico; desarrollar el diseño detallado de los conceptos seleccionados, especificando todos los componentes y ensamblajes necesarios, y realizando los cálculos y simulaciones requeridos para asegurar la viabilidad técnica del diseño; identificar y aplicar posibles mejoras y optimizaciones al diseño basándose en los resultados de las simulaciones; y finalmente, elaborar la documentación, incluyendo planos detallados, y toda la información técnica

relevante. Con esta metodología, se cubrirán todas las fases necesarias para el desarrollo completo del proyecto, desde la definición del problema hasta la entrega del diseño final y su documentación.

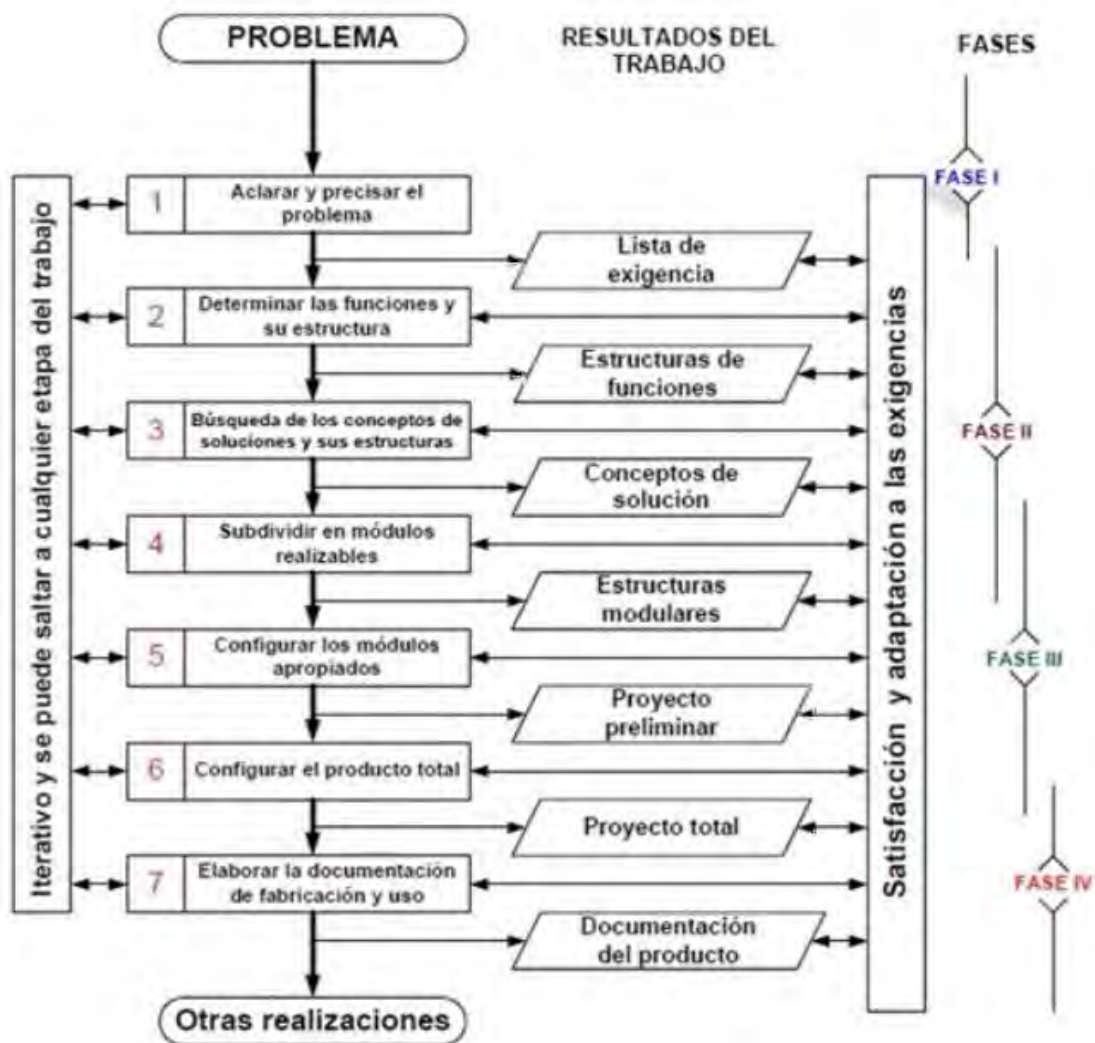


Figura 1.3: Norma de diseño VDI 2221. Fuente: PUCP (2020).

## 1.4 Estado del arte

Para empezar a desarrollar la tesis, es necesario realizar una investigación documental que tenga como objetivo recuperar el conocimiento sobre los avances tecnológicos en agricultura vertical. El análisis del estado del arte será fundamental para una comprensión crítica y la generación de nuevos conocimientos sobre el tema. A continuación, se detallarán sistemas integrales, subsistemas y tecnologías para comprender el desarrollo tecnológico actual.

### 1.4.1 Sistemas integrales

A continuación, se describirán tres sistemas integrales que ayudarán a comprender cómo se relacionan los subsistemas internos de estos para poder realizar agricultura en un ambiente controlado.

#### 1.4.1.1 Plataforma de agricultura de medio ambiente controlado: Exploración de los efectos de temperatura de la zona raíz.

La agricultura vertical se basa en hidroponía o aeroponía, sustituyendo los nutrientes del suelo por soluciones nutritivas. En hidroponía, se sugiere mantener la temperatura de la zona de raíz varios grados más baja que la temperatura aérea para garantizar suficiente oxígeno disuelto y favorecer la respiración de las raíces. Esta técnica se ha utilizado para inducir el crecimiento continuo de plantas tropicales y subtropicales al enfriar sus raíces, mientras las partes aéreas experimentan fluctuaciones térmicas.

Esta técnica es muy importante para aquellas personas que desean cultivar plantas climáticas más frías como la lechuga, brócoli, rábano o espinacas en invernaderos fuera de temporada o en climas tropicales sin gastar energía innecesariamente en el control de la temperatura del aire del invernadero. Esto último se analizó en el proyecto CityFARM del MIT Media Lab, el cual desarrolló estudios sobre los efectos de enfriar el agua en un sistema hidropónico para el crecimiento de la albahaca dentro de una plataforma open-source llamada GRObot (Camille Richman, 2015).

En este experimento, se evaluaron dos condiciones de temperatura de la zona de raíz (RZT) que afectan el crecimiento de la albahaca en clima cálido. En el primer caso, la RZT fluctuó entre 30 °C durante el día y 25 °C por la noche, resultando en una temperatura promedio del agua de 22.7 °C durante las dos semanas del período de prueba. En el segundo caso, la RZT se mantuvo constante a 20 °C, con un promedio de temperatura del agua de 20.5 °C durante las dos semanas bajo las mismas condiciones de temperatura del aire.

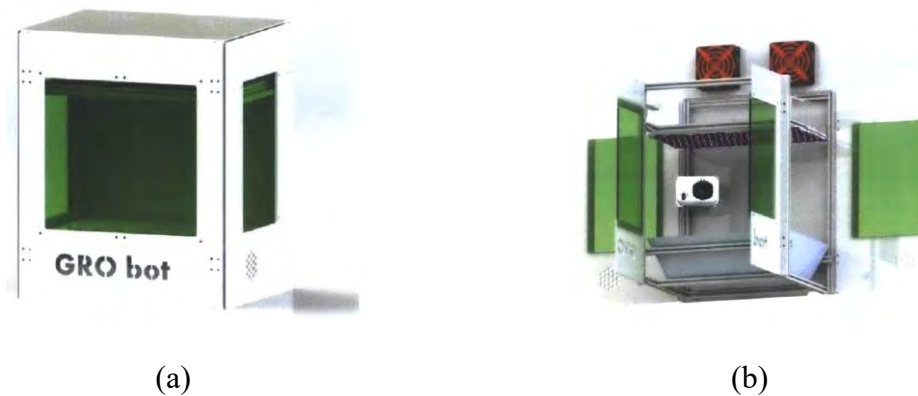


Figura 1.4: (a) Render del GRObot con todas sus puertas abiertas (b) Render del GRObot con su cubierta exterior acrílica. Fuente: Camille Richman (2015).

Estos dos experimentos revelaron notables disparidades en el crecimiento de la albahaca. Bajo condiciones fluctuantes de la temperatura de la zona radicular (RZT), se observó un crecimiento exponencial saludable. En contraste, cuando la RZT se redujo a 20.5 °C, la albahaca mostró un rendimiento deficiente, sin crecimiento durante dos semanas, disfunción en la absorción de agua y nutrientes. La albahaca con RZT más cálida finalizó con 0.8 g de peso fresco y un tallo de 4.0 cm, en comparación con los 0.03 g y 0.18 cm de la albahaca con RZT más fría. Se destacó el monitoreo del nivel de oxígeno disuelto (OD) debido a su impacto en la absorción de agua y nutrientes, susceptibilidad a patógenos y marchitez. Se recomienda introducir OD en el riego hidropónico para complementar los niveles y considerar la relación inversa entre la saturación de OD y la temperatura del agua.

#### 1.4.1.2 Computadora personal de alimentos: un nuevo dispositivo para la agricultura de ambiente controlado

Esta investigación presenta el OpenAg™ Personal Food Computer (PFC), una plataforma de bajo costo dirigida a investigadores, aficionados, creadores y profesores de primaria a secundaria. El PFC, completamente de código abierto, se diseñó para facilitar el intercambio de datos y análisis de crecimiento de plantas, siendo versátil gracias a su diseño modular.



Figura 1.5: CityFarm. Fuente: Ferrer y col. (2019).

En esta investigación, se introdujo el OpenAg™ Personal Food Computer (PFC), una plataforma económica diseñada para investigadores, aficionados, creadores y profesores de primaria a secundaria. Totalmente de código abierto, el PFC pretende ser una herramienta para el intercambio colectivo de datos y el análisis del crecimiento de las plantas. (Ferrer y col., 2019).

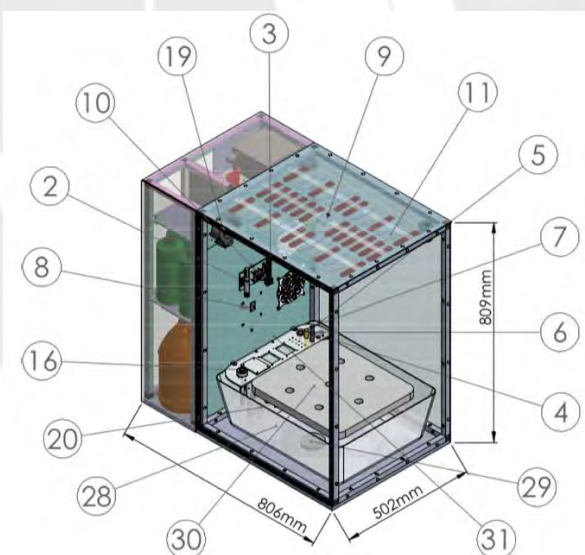


Figura 1.6: PFC. Fuente: Ferrer y col. (2019).

## Computadora

La estructura electrónica del PFC se basa en Raspberry Pi 3, un SBC con puertos multipropósito, USB y GPIO para integrar circuitos complejos. La CPU es un quad-core de 1.2 GHz y 64 bits con arquitectura ARMv8, compatible con diversas distribuciones de Linux y herramientas de programación, robótica, etc.

### **Sensores y cámaras**

- Sensor AM2315: mide temperatura y humedad del aire.
- Sensor MHZ16: sensor de CO2 con rango de 0-2000 ppm.
- Sensor de pH Atlas: mide pH en la cuba de reserva 28.
- Sensor Atlas EC: mide conductividad eléctrica.
- Sensor DS18B29: sensa el agua con precisión de +- 0.5 °C.
- Sensor de nivel de agua LLE102000: detecta cuando el reservorio necesita ser rellenado.
- Sensor de intensidad de luz TSL2561: mide la luz hasta 0.1-40000+ Lux.
- Dos cámaras USB ELP de 3.6 mm con lente de 5 megapíxeles.

### **Actuadores**

- Grow Lights: módulos GE Light (11) con canales rojo, azul y blanco (controlables individualmente / PWM).
- Enfriador de aire: unidad de enfriamiento KippKitts (12) de 200 W.
- Calentador de aire: elemento de calentamiento PTC termostático de cerámica eléctrica de 12V 150W (13).
- Válvula de aire fresco: válvula de bola motorizada DC12V de 1/2 pulgada (14).
- Prensaestopas: cuatro prensaestopas de cable de rosca NPT de 3/4 de pulgada (15).
- Soluciones de pH y nutrientes: dos botellas de líquido (pH arriba y pH abajo) (17) de General Hydroponics y dos fertilizantes FloraDuo (A & B) (18).
- Ventilador de circulación de aire: ventilador de CC (19) con corriente de 1 amperio y voltaje de 12V.
- Bomba de circulación de agua: bomba sumergible de 12V (20).
- Bombas de líquido peristálticas: cinco bombas de 12 V CC de homecube

### **Extras**

- Arduino Mega 2560 (23).
- SainSmart Sensor Shield v2 (24).
- Placa de alimentación: placa PCB (25) personalizada con MOSFETS y relés.
- Fuente de alimentación: unidad de fuente de alimentación de 500 W (26).

## Interfaz de usuario

- A. Interfaz web basada en JavaScript que permite la visualización de puntos de datos ambientales y el progreso del crecimiento de las plantas.

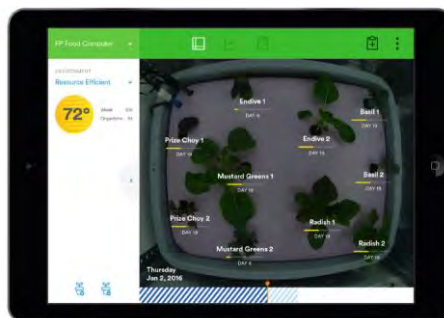


Figura 1.7: Software desarrollado para el PFC. Fuente: Ferrer y col. (2019).

### 1.4.1.3 Un sistema aeropónico con cámaras ambientales modulares conectadas a la red.

En esta investigación se realizó el diseño de un sistema de agricultura modular que utiliza la tecnología IoT para poder abordar la necesidad de que las personas cuiden el crecimiento de sus cultivos. Para ello, se controlan diferentes componentes y se recopilan datos continuamente mientras se interactúa con los usuarios. El sistema controla aspectos como la temperatura, la luminosidad, la humedad relativa y la concentración de nutrientes en el agua para que los cultivos crezcan en condiciones ideales. Para ello, el sistema utilizó múltiples sensores para monitorear los parámetros ambientales y físicos del sistema agrícola vertical como la temperatura y la humedad relativa.

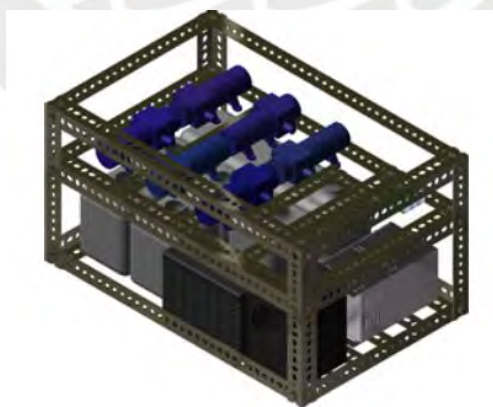


Figura 1.8: módulo maestro. Fuente: Belista et al. (2018).

Un aspecto importante de este proyecto es que se busca desarrollar "módulos" que permitan escalar en cuanto a niveles de cultivo; es por esta razón por la que se diseñó un módulo máster,

el cual se encarga de almacenar los nutrientes; cuenta con un enfriador para el agua, un ventilador evaporador y, además, se encarga de transportar mediante bombas los nutrientes hasta el módulo esclavo. Este último se encarga de alojar las plantas, combinar los nutrientes y recibirlos (Belista et al., 2018).

#### 1.4.1.4 Desarrollo de un modelo microfluidico para el análisis de crecimiento de hojas y raíces de lechuga en un sistema hidropónico

En este estudio, se diseñaron y desarrollaron dispositivos clave para el monitoreo del crecimiento de plantas en sistemas hidropónicos: un analizador de nutrientes compacto, un monitor 3D pequeño y un sensor ambiental ultraligero. Estos dispositivos se instalaron cerca de las plantas para obtener datos precisos en tiempo real. El enfoque principal fue desarrollar un modelo de circuito microfluídico que simule el sistema vascular de la planta, utilizando datos continuamente actualizados de sensores.

Se propuso un método no destructivo para analizar el desarrollo de hojas y raíces de lechuga en cultivo hidropónico, utilizando imágenes térmicas y visibles capturadas en tiempo real por diversas cámaras. Este proyecto destaca por su capacidad de realizar análisis en tiempo real del crecimiento de las plantas, marcando un avance significativo en comparación con los algoritmos existentes de visión artificial.

Además, se encontró que existe una correlación entre el área de la hoja de la lechuga cosechada y la longitud del área de la raíz (Okamoto y Sakane, 2020).

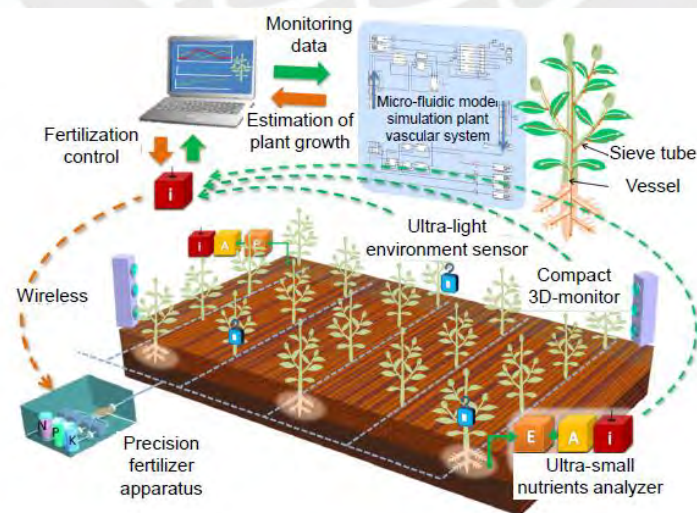


Figura 1.9: Descripción general del proyecto. Fuente: Okamoto y Sakane (2020).

En síntesis, se creó un sistema de monitoreo en tiempo real para el cultivo hidropónico de lechuga, empleando un analizador de nutrientes, un monitor 3D compacto y un sensor ambiental ultraligero. Se implementó un método de análisis de crecimiento no destructivo de hojas y raíces basado en imágenes térmicas visibles y termográficas. Este enfoque permite el control inmediato del crecimiento, mejorando la producción y calidad de los cultivos. Además, se identificó una correlación entre el área de la hoja cosechada y la longitud del área de la raíz, proporcionando perspectivas valiosas para investigaciones futuras sobre el crecimiento de plantas.

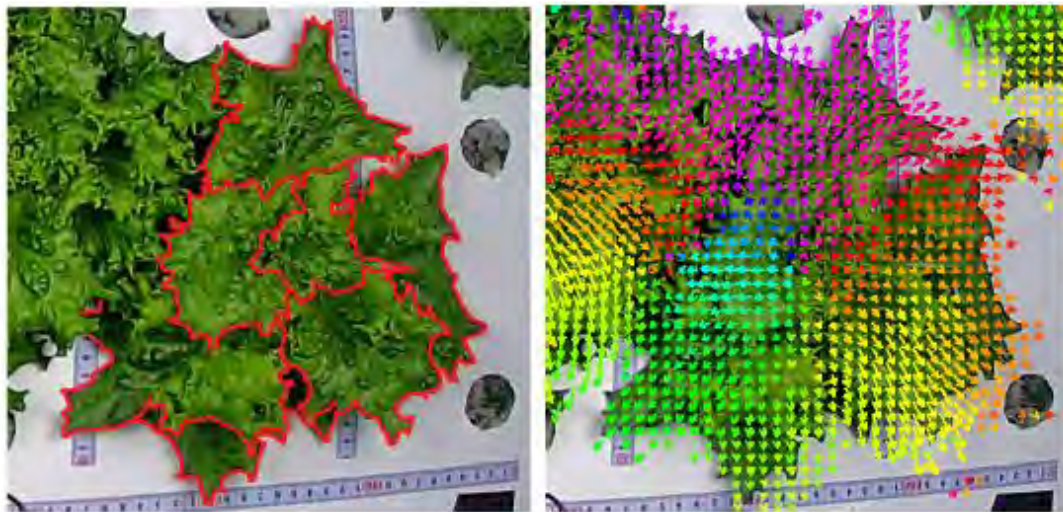


Figura 1.10: Análisis del crecimiento de la lechuga usando flujo óptico. Fuente: Okamoto y Sakane (2020).

## 1.4.2 Subsistema de análisis de crecimiento vegetal

### 1.4.2.1 Análisis de crecimiento funcional, acumulación de biomasa y translocación de materia seca de ocho hortalizas cultivadas en invernadero.

En un invernadero en Pampahasi, La Paz, se realizó un estudio de seis meses (enero a junio de 2014) a 3838 metros sobre el nivel del mar, evaluando el crecimiento de ocho hortalizas en un sistema de producción orgánica. Las hortalizas (acelga, betarraga, cebolla, espinaca, lechuga, pepino, tomate y zanahoria) se cultivaron en un sustrato de turba, suelo negro, arena fina y suelo negro con guano ovino, abonado con humus de lombriz. Los resultados muestran variaciones en el crecimiento de cada hortaliza debido a la asimilación diferenciada de nutrientes. (Llanos et al., 2020).

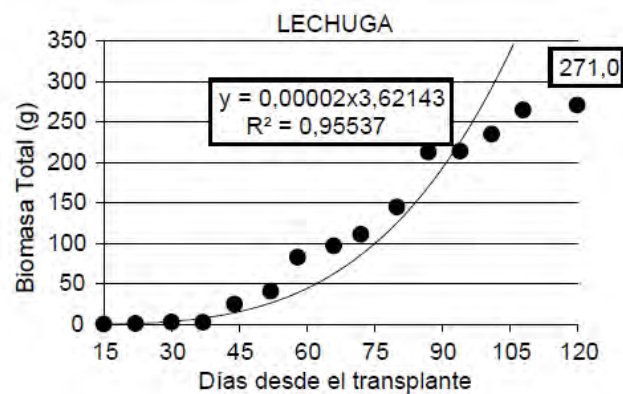


Figura 1.11: Biomasa total de la lechuga. Fuente: Llanos et al. (2020).

Se evaluó la eficiencia fotosintética a través de la superficie foliar, biomasa total y biomasa seca acumulada a los 120 días. Las tasas más importantes obtenidas incluyen la Tasa de Asimilación Neta (TAN), que indica la asimilación de materia seca, y la eficiencia fotosintética promedio por unidad de superficie foliar efectiva. Los valores máximos de TAN son: acelga con 0,112 g/cm<sup>2</sup>/día, betarraga con 0,179 g/cm<sup>2</sup>/día, cebolla con 0,012 g/cm<sup>2</sup>/día, espinaca con 0,159 g/cm<sup>2</sup>/día, lechuga con 0,254 g/cm<sup>2</sup>/día (ver Figura 1.10), pepino con 0,198 g/cm<sup>2</sup>/día, tomate con 0,171 g/cm<sup>2</sup>/día y zanahoria con 0,094 g/cm<sup>2</sup>/día.

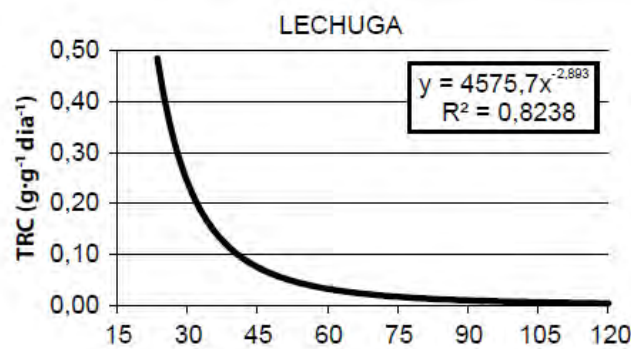


Figura 1.12: TRC de la lechuga. Fuente: Llanos et al. (2020).

Además, se estableció la Tasa Relativa de Crecimiento (TRC), que es un índice que expresa el crecimiento de un cultivo en términos de eficiencia como productor de nuevo material afectado por la fotosíntesis total y la respiración. Los valores obtenidos para esta tasa son: acelga con 0,293 g/g/día, betarraga con 0,272 g/g/día, cebolla con 0,253 g/g/día, espinaca con 0,448 g/g/día, lechuga con 0,313 g/g/día, pepino con 0,102 g/g/día, tomate con 0,152 g/g/día y zanahoria con 0,256 g/g/día. (Llanos et al., 2020).

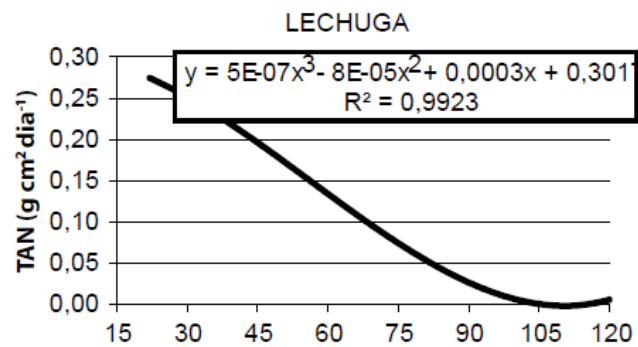


Figura 1.13: TAN de la lechuga. Fuente: Llanos et al. (2020).

#### 1.4.2.2 Análisis del crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) 'Batavia' cultivada en un suelo salino de la Sabana de Bogotá

Esta investigación abordó la influencia de la salinidad en los cultivos hortícolas a nivel mundial, examinando sus efectos en el crecimiento, absorción de nutrientes y calidad de las lechugas. El estudio se realizó en tres parcelas de 300 m<sup>2</sup> cada una, con 8,3 plantas/m<sup>2</sup>, regadas con aguas del distrito La Ramada del Centro Agropecuario Marengo de la Universidad Nacional de Colombia. Se aplicó un enfoque funcional para analizar índices de crecimiento como la tasa relativa de crecimiento, índice de área foliar, tasa de asimilación neta, tasa de crecimiento del cultivo, área foliar específica y relación de área foliar. Los resultados indicaron reducciones significativas en los parámetros de crecimiento de la lechuga debido a la salinidad presente en los suelos del Centro Agropecuario Marengo (Carranza y col., 2020).

#### 1.4.2.3 Análisis del crecimiento de la lechuga bajo los efectos de diversos tipos de sustratos

La investigación evaluó el crecimiento de la lechuga en invernaderos con diferentes sustratos. Se usó un diseño de bloques al azar con seis tratamientos y tres repeticiones. Los sustratos fueron: T1 = 100% orgánico, T2 = 75% orgánico + 25% Plantmax®, T3 = 50% orgánico + 50% Plantmax®, T4 = 25% orgánico + 75% Plantmax®, T5 = 100% Plantmax® y T6 = vermiculita. Se evaluaron aspectos como el número de hojas, masa seca, índice de área foliar, tasa de crecimiento del cultivo, tasa de crecimiento relativa, tasa de asimilación neta, área foliar específica, relación de área foliar y relación de peso foliar. Se concluyó que el mayor crecimiento de la lechuga se produjo con la mezcla de compuesto orgánico y sustrato Plantmax®. La vermiculita no dio buenos resultados por sí sola, pero es una alternativa para mezclar con otros sustratos. (Schneider et al., 2018).

#### **1.4.2.4 Variación del contenido de minerales entre las diversas etapas de la col rizada**

La col rizada es considerada una fuente rica en minerales importantes para la salud humana. Se ha supuesto que la col rizada temprana contiene niveles más altos de minerales que la madura, pero la literatura que respalda esta afirmación es escasa. Esta investigación evaluó las concentraciones de macronutrientes y micronutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, así como para la salud humana en tres cultivos de col rizada en cinco etapas diferentes de desarrollo de la hoja. Los resultados mostraron que la col rizada microgreen contenía concentraciones más altas de minerales que la col rizada adulta en todos los cultivares, mientras que la hoja baby contenía más minerales en base al peso fresco (FW). El contenido de agua y la acumulación de minerales durante el desarrollo de la hoja pueden contribuir a las discrepancias observadas. Además, la hoja roja fresca 'Scarlet' contenía el nivel más bajo de sodio, pero generalmente era más alta en otros minerales que los cultivares de hoja verde en todas las etapas de desarrollo. Por lo tanto, el consumo de ensaladas de hojas de col rizada es beneficioso para la salud debido a su alto contenido de minerales, y la elección del cultivar puede influir en la ingesta de minerales.

### **1.4.3 Subsistema de visión artificial para inspección de productos agrícolas**

#### **1.4.3.1 Análisis del espacio de color utilizando KNN para la identificación de las etapas de cultivo de lechuga**

La agricultura inteligente emplea avances tecnológicos globales para optimizar la producción, incluyendo un sistema de visión que utiliza algoritmos de machine learning, como K-Nearest-Neighbor, para segmentar imágenes en diferentes espacios de color (RGB, HSV, CIELab, YCbCr). En un estudio reciente, se encontró que el espacio de color CIELab ofreció el mejor rendimiento en la segmentación de imágenes de lechuga, proporcionando una alta precisión en la determinación del crecimiento en la configuración de la granja inteligente (Loresco y col., 2020).

En el futuro, se espera aplicar algoritmos como las operaciones morfológicas para mejorar la sensibilidad de la segmentación y también se pueden aplicar transformaciones para abordar el ruido y los reflejos de luz y así mejorar aún más el rendimiento. Además, la investigación puede continuar para la detección de enfermedades de la lechuga utilizando el espacio de color CIELab.

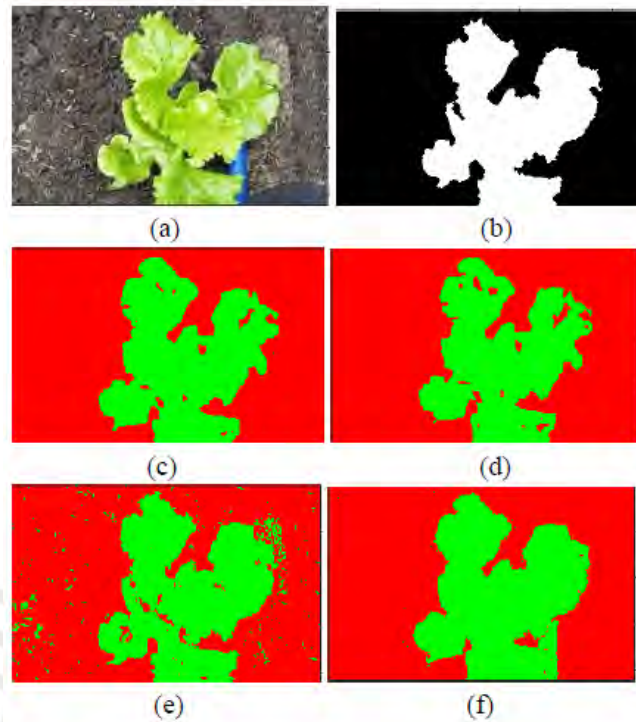


Figura 1.14: Resultados de segmentación de imagen en diferentes espacios de color. (a) imagen original (b) verdad del terreno (c) CIELab (d) YCbCr (e) RGB (f) HSV, píxeles de lechuga segmentados en verde; píxeles de fondo segmentados en rojo. Fuente: Loresco y col. (2020).

Tabla 1.1: Sensibilidad y especificidad media para un espacio de color diferente. Fuente: Loresco y col. (2020).

	Sensitivity %	Specificity %
<b>CIELAB</b>	92.25	99.54
<b>YCBCR</b>	91.83	99.64
<b>RGB</b>	35.16	97.56
<b>HSV</b>	49.15	97.58

Tabla 1.2: Precisión al determinar el número de días de la lechuga. Fuente: Loresco y col. (2020).

	<b>YCbCr</b>	<b>CIELab</b>
<b>Sowing</b>	80%	80%
<b>Vegetative</b>	80%	90%
<b>Harvest</b>	100%	100%
<b>Ave. Accuracy</b>	87%	90%

### 1.4.3.2 Medición del área del dosel basado en un sistema de visión artificial

En este estudio se propuso un sistema basado en visión artificial para calcular automáticamente el área del dosel del cultivo. Este sistema captura la imagen del cultivo y la procesa mediante un algoritmo de procesamiento de imágenes para extraer la característica de recuento de píxeles, la cual determina el área del dosel del cultivo. Se desarrolló un modelo matemático para la aproximación del área del dosel (Calangian et al., 2018). La medición adecuada del área del dosel de un cultivo es importante para identificar su estructura y tasa de crecimiento. Por lo tanto, en este proyecto se estimó un modelo matemático para aproximar el área del dosel del cultivo de lechuga (ver Figura 1.15).

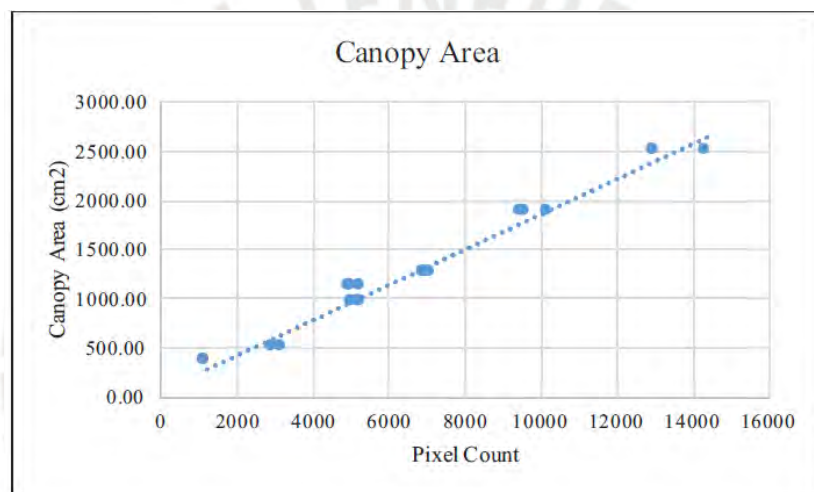


Figura 1.15: Recuento de píxeles vs gráfico de área de dosel. Fuente: Calangian et al. (2018).

El proyecto consta de cuatro sistemas: iluminación, control de temperatura, visión e irrigación. En el sistema de visión, se adquieren imágenes mediante una cámara Logitech, se convierten al espacio de color CIELab\* y después de varias etapas de procesamiento, se puede obtener una relación entre la cantidad de píxeles de la imagen y el área del dosel.

El procesamiento de imágenes sigue varias etapas clave (ver Figura 1.16):

- **Adquisición de Imagen:** Se captura la imagen del cultivo utilizando una cámara Logitech C922, situada directamente sobre el lecho de cultivo.
- **Conversión de Espacio de Color:** La imagen capturada se convierte al espacio de color CIELab\*, utilizando específicamente el canal a\* para resaltar la vegetación.
- **Umbralización:** Se aplica un umbral al canal a\* para segmentar las áreas verdes del dosel del cultivo. Un umbral fijo de valor 128 se utilizó para esta segmentación.

- **Filtrado:** Se emplean filtros morfológicos para eliminar el ruido y mejorar la segmentación de la imagen.
- **Filtro de Mediana:** Se utilizó un filtro de mediana con un tamaño de ventana de 5x5 píxeles para suavizar la imagen y eliminar el ruido sal y pimienta.
- **Erosión y Dilatación:** Se aplicaron operaciones morfológicas de erosión y dilatación con un elemento estructurante de 3x3 píxeles para refinar los bordes de las áreas segmentadas. La erosión se realizó con un kernel de forma rectangular, seguida de una dilatación con el mismo kernel.
- **Enmascaramiento:** Se crea una máscara binaria a partir de la imagen filtrada que representa las áreas del dosel del cultivo. Se utilizó una máscara binaria donde los píxeles de interés se asignan a un valor de 255 (blanco) y los píxeles de fondo a 0.
- **Extracción de Características:** Se cuentan los píxeles dentro de la máscara para determinar el área del dosel del cultivo.

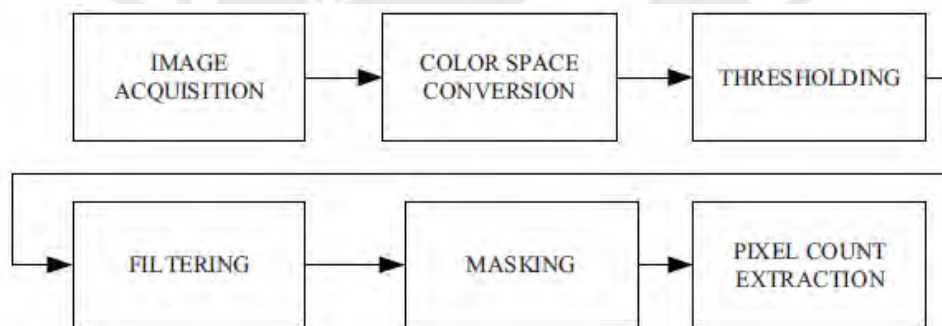


Figura 1.16: Diagrama de bloques de procesamiento de imágenes. Fuente: Calangian et al. (2018).

#### 1.4.4 Importancia y efectos del uso de luces LEDs en los cultivos verticales

La agricultura vertical es un sistema de producción agrícola que emplea fuentes de luz artificial para estimular el crecimiento de las plantas a través del espectro electromagnético, con el objetivo de proveer la cantidad necesaria de fotosíntesis y clorofila requerida. Estos dos procesos son críticos en la agricultura vertical, ya que la fotosíntesis es responsable de la captación de la energía solar para convertirla en energía química. En este sentido, resulta importante conocer los efectos de las luces LED sobre los cultivos utilizados en la agricultura vertical.

#### 1.4.4.1 Análisis de la relación óptima de luces LEDs rojas y azules para el cultivo vertical en interiores

La iluminación LED se utiliza en la agricultura en interiores para adaptar el espectro lumínico a las necesidades de la planta. En particular, las luces rojas (R) y azules (B) son muy activas para la fotosíntesis. Se llevó a cabo un estudio para analizar el efecto de los componentes espectrales R y B sobre la fisiología y bioquímica de la lechuga, y la eficiencia en el uso de los recursos. Para ello, se probaron cinco relaciones rojo: azul (RB) (0.5-1-2-3-4) suministradas por LED y un control fluorescente (RB = 1) en seis experimentos bajo condiciones controladas. Los resultados indican que la iluminación LED aumenta el rendimiento (1,6 veces) y la eficiencia en el uso de la energía (2,8 veces) en comparación con las lámparas fluorescentes. La adopción de RB = 3 maximiza el rendimiento (2 veces más que con RB = 0.5), y aumenta las concentraciones de clorofila y flavonoides en las hojas, así como la absorción de nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio.

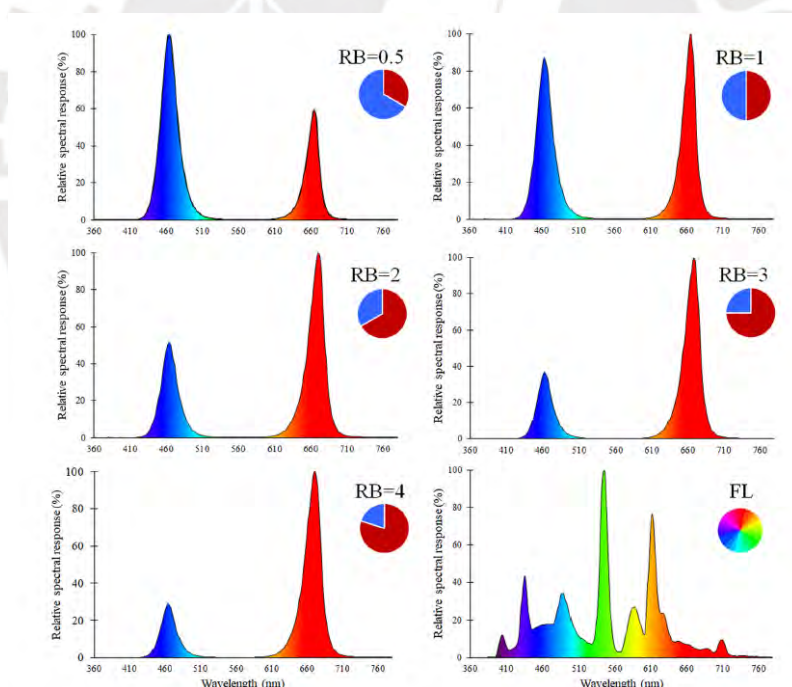


Figura 1.17: Espectros de luz utilizados en los experimentos. Fuente: Pennisi et al. (2019).

A medida que aumenta la porción roja del espectro, la eficiencia cuántica del fotosistema II disminuye, pero la transpiración disminuye más rápidamente, lo que resulta en una mayor eficiencia del uso del agua hasta RB = 3. La disminución de la transpiración se relaciona con

una conductancia estomática más baja, que a su vez se asoció a una densidad estomática más baja, a pesar de un aumento en el tamaño estomático.

Tanto la energía como la eficiencia del uso de la superficie terrestre fueron mayores en RB > 3. Por lo tanto, se sugiere una relación RB de 3 para el cultivo sostenible de lechuga en interiores (Pennisi et al., 2019).

#### 1.4.4.2 Efecto de la iluminación artificial en *Typhonium flagelliforme* para cultivo vertical en interiores

En este proyecto, se evaluaron los efectos de diferentes tipos de iluminación artificial en el crecimiento de *Typhonium flagelliforme*. Se utilizaron luces fluorescentes compactas (CFL), LEDs azules (475 nm) y LEDs rojos (650 nm). Los experimentos se realizaron en un ambiente controlado con una configuración de iluminación específica: una combinación de 70% LEDs azules y 30% LEDs rojos demostró ser la más efectiva.

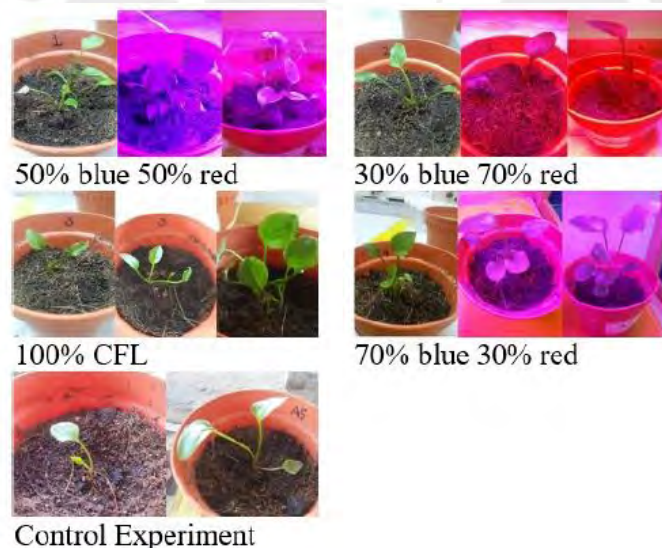


Figura 1.18: Configuración de los LEDs. Fuente: Yusof et al. (2016).

#### Resultados:

- **Altura de la planta:** La iluminación con un 70% de luz azul y un 30% de luz roja resultó en la mayor altura promedio de las plantas, alcanzando 8.75 cm en cuatro semanas. La luz azul fue particularmente efectiva para el crecimiento vegetativo.
- **Contenido de clorofila:** La luz roja promovió la producción de clorofila en las hojas, mejorando el proceso fotosintético.

- **Retención de agua en las hojas:** Las hojas bajo iluminación azul mostraron una mayor retención de agua, lo que indica un crecimiento más saludable y robusto.
- **Emisión de CO<sub>2</sub>:** Se observó que la luz roja aumentó la emisión de CO<sub>2</sub>, lo que sugiere un incremento en la respiración de la planta.

En resumen, la combinación óptima de iluminación para el cultivo de *Typhonium flagelliforme* en interiores es de 70% LEDs azules y 30% LEDs rojos. Esta configuración no solo maximiza el crecimiento en altura y la retención de agua, sino que también promueve la producción de clorofila, esencial para un desarrollo saludable de la planta. (Yusof et al., 2016)

#### 1.4.4.3 Comparación entre los estudios de lechuga y *Typhonium flagelliforme*

Ambos estudios resaltan la importancia de ajustar la relación de luz roja y azul para optimizar el crecimiento de las plantas en sistemas de cultivo vertical. Sin embargo, presentan diferencias significativas en las proporciones óptimas y los efectos observados:

- **Relación de luz óptima:** Mientras que para la lechuga, la relación óptima de luz roja a azul fue de 3:1, para *Typhonium flagelliforme* fue de 0.43:1 (70% azul y 30% rojo).
- **Efectos fisiológicos:** En lechuga, una mayor proporción de luz roja mejoró la absorción de nutrientes y la eficiencia en el uso del agua, mientras que en *Typhonium flagelliforme*, la luz azul favoreció el crecimiento en altura y la retención de agua.
- **Contenido de clorofila:** En ambos casos, la luz roja incrementó la producción de clorofila, aunque el impacto fue más pronunciado en lechuga.
- **Transpiración y conductancia estomática:** Estos parámetros no fueron evaluados en *Typhonium flagelliforme*, lo que limita una comparación directa con la lechuga.

Esta comparación subraya la necesidad de adaptar las condiciones de iluminación a las características específicas de cada tipo de planta para maximizar el rendimiento y la salud del cultivo en sistemas verticales.

### 1.4.5 Elementos esenciales de los sistemas hidropónicos

#### 1.4.5.1 Variedad de cultivos para hidroponía

La hidroponía permite cultivar diversas plantas con necesidades de raíces específicas, asegurando un suministro adecuado de oxígeno. Ejemplos de cultivos hidropónicos incluyen hierbas como albahaca, cebollino, apio, romero, salvia, orégano, menta y lavanda; vegetales

como repollo, pepino, berenjena, lechuga, guisantes, papas, coliflor, repollo y espárragos; y frutas como tomates, sandías, bayas azules, bayas de paja, bayas negras y uvas.

#### 1.4.5.2 Guía práctica de sistemas hidropónicos NFT

La técnica más común en hidroponía es la película de nutrientes (NFT), que utiliza una solución nutritiva en forma de película delgada recirculante para cultivar plantas, siendo ideal para cultivos a corto plazo como lechuga, así como adaptable para cultivos a más largo plazo como pepinos y tomates. Esto hace que la hidroponía sea económicamente atractiva y eficiente en la gestión de recursos naturales. (Mohammed, 1981).

Configuración de un sistema hidropónico de invernadero (NFT) a pequeña escala:

- A. Preparar el área hidropónica, limpiando la tierra si es necesario.
- B. Garantizar drenaje seguro y prevenir inundaciones o corrosión.
- C. Diseñar un invernadero hidropónico con marco A, considerando ubicación y presupuesto.
- D. Cubrir el invernadero con plástico UV para transportar luz visible esencial para fotosíntesis.
- E. Instalar red para controlar plagas.
- F. Colocar grava en el suelo para regular la temperatura interna.
- G. Implementar bastidores con ángulo de 1:40 para el sistema hidropónico NFT.
- H. Utilizar canales de PVC plano para distribuir equitativamente la solución nutritiva.
- I. Configurar depósito con bomba para mantener la solución nutritiva.

#### 1.4.5.3 Mejores condiciones para el crecimiento de hortalizas

El éxito del crecimiento de hortalizas se basa en la combinación adecuada de parámetros climáticos. Algunas verduras prosperan en la temporada de lluvias, mientras que otras prefieren condiciones secas. Mantener condiciones óptimas es crucial para un crecimiento saludable:

- A. Temperatura del aire: entre 19°C y 24°C durante el día (65F-75F).
- B. Temperatura del agua: no debe superar los 25°C. Si es necesario, se puede enfriar a 26°C o calentar a 24°C.
- C. Humedad relativa: se recomienda mantenerla entre el 50% y el 70%.
- D. Concentración de CO<sub>2</sub>: 1500 ppm, si hay disponibilidad de luz.

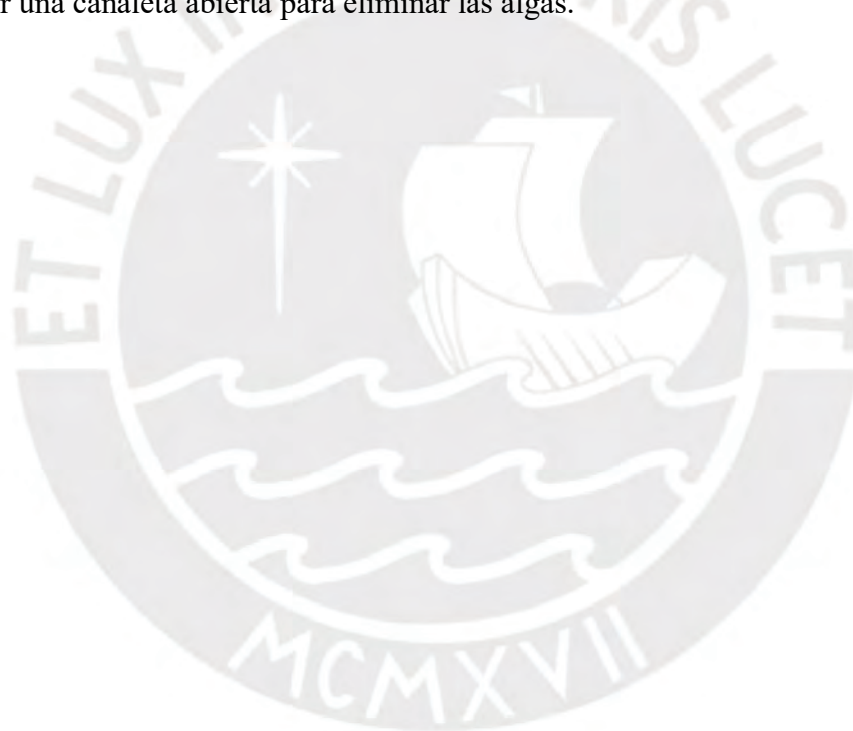
E. Velocidad de flujo: 1 litro por minuto de solución nutritiva.

F. pH: mantenerlo entre 5.5 y 6.5.

#### 1.4.5.4 Recomendaciones para problemas encontrados en el cultivo de hortalizas hidropónicas

Las medidas preventivas recomendadas para el sistema de película de nutrientes, según ensayo y error:

- A. Cortar la solución nutritiva todos los días para aumentar el flujo de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>.
- B. Limpiar el depósito a fondo mensualmente y agregar nuevos nutrientes.
- C. Rociar las verduras con fungicida una vez por semana, solo por las tardes.
- D. Rociar una canaleta abierta para eliminar las algas.



## **CAPÍTULO 2: DESARROLLO DEL PROYECTO CONCEPTUAL**

El desarrollo del proyecto implica seguir pasos clave para garantizar el éxito, como establecer exigencias y especificaciones para definir objetivos y requisitos del producto. Se utiliza la técnica de "caja negra" para estructurar las funciones del producto, identificando entradas y salidas sin conocer su funcionamiento interno. La matriz morfológica facilita la comparación de soluciones, seleccionando la más adecuada técnica y económicamente. La evaluación técnico-económica determina el costo y eficacia de cada solución, identificando la solución óptima para el proyecto. La lista de exigencias y la solución óptima se presentan a continuación, mientras que los análisis adicionales se detallan en los anexos.

### **1.1 Lista de exigencias**

Esta tesis busca diseñar un sistema automatizado para el cultivo vertical de hortalizas, incorporando la inspección mediante visión artificial. El enfoque se centra en la agricultura vertical utilizando luces LED para el crecimiento de las hortalizas. La captura de imágenes se realizará con una cámara de alta resolución y costo accesible, como una GoPro o un teléfono móvil. Para estimar el costo, se basará en proyectos similares de la literatura (Urban vertical farm project, 2020) y se considerarán los costos de sistemas análogos en empresas de automatización industrial en Perú, como TECHPRO, DSC Automation, Control y Tecnología, entre otras. Adicionalmente, se tuvo en cuenta la opinión de Carlos Moreno, gerente general de TECHPRO y antiguo gerente de Festo, con amplia experiencia en fabricación de máquinas industriales, quien mencionó que implementar un sistema de procesamiento de imágenes con cámaras industriales y la máquina en acero inoxidable podría costar entre \$30,000 y \$40,000 en el mercado peruano (Moreno, 2023).

Para mayor detalle, consulte la tabla en el anexo G.

### **2.1 Estructura de funciones**

A continuación, se explicará las señales obtenidas después de aplicar el método de identificación de entradas y salidas Black-box. Para definir claramente los procesos necesarios para el desarrollo del sistema propuesto, se identificaron los principios tecnológicos. Esto

permitió definir las funciones parciales para el subsistema de los sensores (ver tabla 2.4), control (ver tabla 2.5), comunicación (ver tabla 2.6), actuadores (ver tabla 2.7), energía (ver tabla 2.8), materia (ver tabla A.13) e interfaz (ver tabla 2.10)

### 2.1.1 Método de caja negra

El método black-box permite graficar señales de entrada y salida con líneas entrecortadas, señales de energía que alimentan el sistema con líneas continuas y la energía emitida por diversos factores. Además, se pueden representar las materias que ingresan y salen del sistema con líneas gruesas (ver Figura 2.1). Es una técnica útil para visualizar el comportamiento de un sistema complejo de manera simplificada.

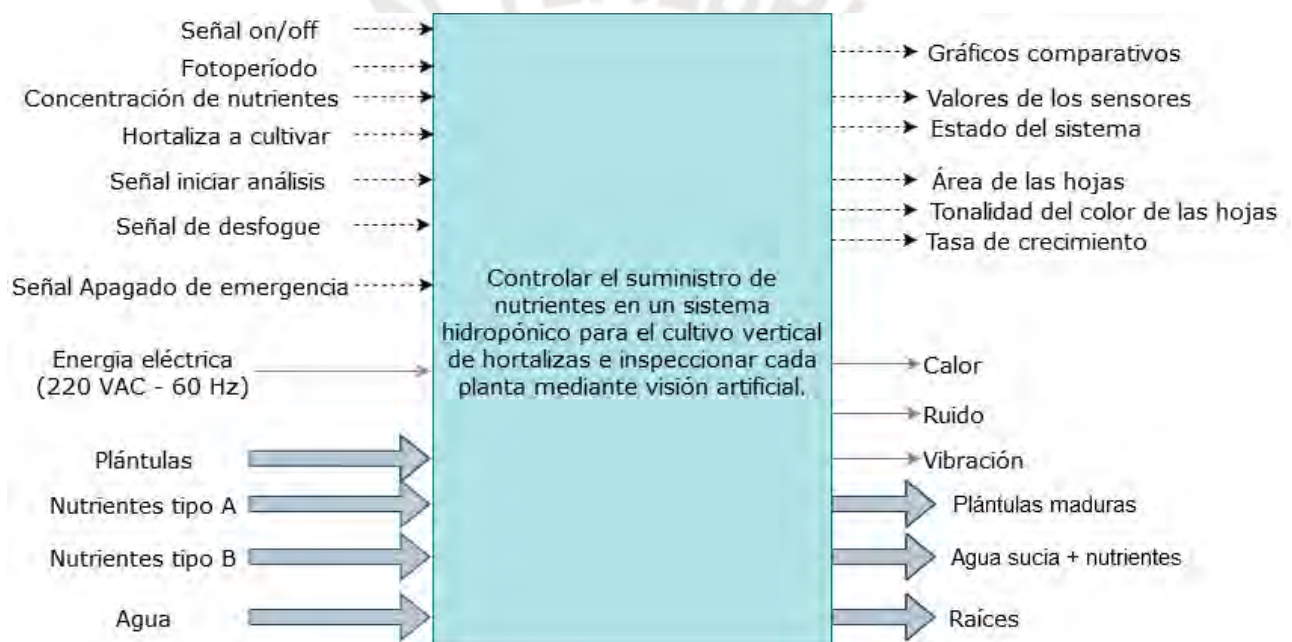


Figura 2.1: Blackbox. Fuente: elaboración propia.

Entradas del sistema:

- A. Señal ON/OFF: Enciende y apaga el sistema.
- B. Fotoperíodo: Horas de encendido y apagado de las luces LED.
- C. Concentración de nutrientes: Niveles de nutrientes A y B en la solución nutritiva.
- D. Hortaliza a cultivar: Condiciones ambientales requeridas por la hortaliza a cultivar.
- E. Señal iniciar análisis: Inicia el análisis de crecimiento mediante procesamiento de señales.
- F. Señal de desfogue: Activa el sistema de desfogue de la solución nutritiva.
- G. Señal de apagado de emergencia: Activa el apagado de emergencia.
- H. Energía eléctrica: Fuente de alimentación del sistema.

- I. Nutrientes tipo A y tipo B: Soluciones nutritivas concentradas.
- J. Agua: Agua necesaria para el sistema.
- K. Plántulas: Plantas listas para la fase de maduración.

Salidas del sistema:

- A. Gráficos comparativos: Temperatura, humedad, nivel de CO<sub>2</sub> y conductividad eléctrica a lo largo del tiempo de cultivo.
- B. Valores de los sensores: Valores en tiempo real de los sensores.
- C. Estado del sistema: Encendido o apagado.
- D. Área de las hojas: Superficie de las hojas.
- E. Tonalidad de color de las hojas: Color de las hojas en las plantas.
- F. Tasa de crecimiento: Aproximación de la tasa de crecimiento.
- G. Calor: Calor emitido por los actuadores del sistema.
- H. Ruido: Ruido producido por los actuadores del sistema.
- I. Vibración: Vibraciones producidas por los actuadores y el flujo de nutrientes en el sistema.
- J. Agua sucia y nutriente: Solución eliminada luego del ciclo de trabajo.
- K. Raíces: Raíces desprendidas debido al flujo de nutrientes.
- L. Plántulas maduras: Plantas maduras.

### 2.1.2 Lista de funciones

Es importante identificar tanto la función global del sistema como las funciones específicas de cada subsistema para poder seleccionar las tecnologías más adecuadas y comprender cómo se relacionan entre sí. Esta información será crucial para realizar un análisis detallado del sistema y tomar decisiones informadas. (Ver la sección 2.2.2.2).

#### 2.1.2.1 Función principal:

Controlar el suministro de nutrientes en un sistema hidropónico para el cultivo vertical de hortalizas e inspeccionar cada planta mediante visión artificial.

### 2.1.2.2 Funciones parciales

A continuación, se presentan las funciones parciales de cada subsistema:

#### 2.1.2.2.1 Subsistema de sensores

Tabla 2.1: Funciones parciales del subsistema de sensores. Fuente: elaboración propia.

<b>Función parcial</b>	<b>Descripción</b>
Sensar nivel del reservorio de nutrientes tipo A	Detecta el nivel del reservorio de nutrientes tipo A
Sensar nivel del reservorio de nutrientes tipo B	Detecta el nivel del reservorio de nutrientes tipo B
Sensar el nivel del reservorio solución	Detecta el nivel del reservorio de la solución nutritiva
Sensar conductividad eléctrica en la solución nutritiva	Mide la conductividad eléctrica en la solución nutritiva
Sensar temperatura en la solución nutritiva	Mide la temperatura de la solución nutritiva.
Sensar humedad en el ambiente	Mide la humedad relativa del ambiente.
Sensar temperatura del ambiente	Mide la temperatura del ambiente.
Sensar CO2 en el ambiente	Mide el CO2 en el área de cultivo.
Sensar pH en la solución nutritiva	Mide el pH de la solución nutritiva.
Sensar luminosidad en el ambiente	Mide la luminosidad en el ambiente.
Capturar fotografía	Toma fotografía de los cultivos.

#### 2.1.2.2.2 Subsistema de control

Tabla 2.2: Funciones parciales del subsistema de control. Fuente: elaboración propia.

<b>Función parcial</b>	<b>Descripción</b>
Controlar fotoperiodo	Se encarga de transmitir la señal para poder controlar el encendido de las luces LEDs.
Controlar irrigación	Se encarga de transmitir la señal para poder controlar la irrigación del sistema.
Monitorear condiciones del ambiente	Se encarga de monitorear la temperatura, humedad, nivel de CO2 y conductividad eléctrica se encuentren dentro de las condiciones óptimas.

Almacenar imágenes	Se encarga de almacenar las imágenes tomadas de los cultivos para luego ser utilizadas.
Procesar imágenes	Se encarga de realizar el análisis de procesamiento de señales para realizar comparaciones entre cultivos y obtener las áreas de las hojas, la tonalidad del color de las hojas y una tasa de crecimiento aproximada.
Procesar datos	Esta función se encarga de manejar la información recibida de los periféricos y enviarla al subsistema de interfaz.
Enviar señales de estatus del sistema	Se encarga de transmitir la señal que activa los indicadores luminosos.

### 2.1.2.3 Subsistema de comunicación

Tabla 2.3: Funciones parciales del subsistema de comunicación. Fuente: elaboración propia.

Función	Descripción
Recibir información	Transmitir señales y datos procesados desde el subsistema de control al módulo de interfaz.
Enviar información	Recoger señales y datos procesados desde el módulo de interfaz hacia el dispositivo.

### 2.1.2.4 Subsistema de actuadores

Tabla 2.4: Funciones parciales del subsistema de actuadores. Fuente: elaboración propia.

Función parcial	Descripción
Activar luces LEDs	Activa las luces LEDs para el crecimiento de los cultivos.
Activar suministro nutrientes tipo A	Activa el mecanismo que suministra el nutriente tipo A al sistema.
Activar suministros nutrientes tipo B	Activa el mecanismo que suministra el nutriente tipo B al sistema.
Activar sistema de toma de imágenes	Activa el mecanismo para la toma de imágenes.
Encender indicadores luminosos	Activa los indicadores luminosos
Accionar alarma	Activa la alarma del dispositivo si no se cumplen las condiciones ideales para el cultivo.
Activar suministro de solución nutritiva	Activa el mecanismo que transporta la solución nutritiva a los cultivos.

### 2.1.2.5 Subsistema de energía

Tabla 2.5: Funciones parciales del subsistema de energía. Fuente: elaboración propia.

<b>Función parcial</b>	<b>Descripción</b>
Habilitar suministro energético	Habilita el paso de la energía hacia el tablero de control
Habilitar energía equipos de potencia	Habilita el paso de la energía hacia los equipos de potencia
Habilitar energía equipos de control	Habilita el paso de la energía hacia los equipos de control.
Acondicionar energía	Acondiciona la energía del suministro público para ser usada por los subsistemas
Energizar módulo de actuadores	Proporciona energía a los actuadores que interactúan con los mecanismos del dispositivo.
Energizar módulo de control	Proporciona energía al controlador del sistema para procesar datos e interactuar con los demás módulos.
Energizar módulo de interfaz	Proporciona energía a la interfaz del sistema, la cual permite iniciar, configurar y apagar el proceso.
Energizar módulo de sensores	Proporciona energía a los sensores del dispositivo, lo cual permite controlar las variables del proceso.
Energizar módulo de comunicación	Proporciona energía a los sistemas de comunicación entre el dispositivo y la interfaz del usuario.

### 2.1.2.6 Subsistema de materia

Tabla 2.6: Funciones parciales del subsistema de materia. Fuente: elaboración propia.

<b>Función parcial</b>	<b>Descripción</b>
Almacenar nutriente A	Esta función se encarga de almacenar los nutrientes tipo A.
Almacenar nutriente B	Esta función se encarga de almacenar los nutrientes tipo B.
Filtrar nutriente A	Esta función se encarga de filtrar los nutrientes tipo A para evitar que ingresen impurezas al sistema.
Filtrar nutriente B	Esta función se encarga de filtrar los nutrientes tipo B para evitar que ingresen impurezas al sistema.
Filtrar agua	Esta función se encarga de filtrar el agua para evitar que ingresen impurezas al sistema.
Almacenar solución nutritiva	Esta función se encarga de almacenar la solución nutritiva.
Mezclar solución nutritiva	Esta función se encarga de mezclar la solución nutritiva.

Filtrar solución nutritiva	Esta función se encarga de filtrar la solución nutritiva para evitar que ingresen impurezas al sistema.
Alimentar plantas	Esta función se encarga de alimentar las plantas suministrando la solución nutritiva.

### 2.1.2.7 Subsistema de interfaz

Tabla 2.7: Funciones parciales del subsistema de interfaz. Fuente: elaboración propia.

<b>Función parcial</b>	<b>Descripción</b>
Iniciar/apagar sistema	Esta función permite iniciar y apagar el sistema.
Configurar parámetros de riego	Esta función permite configurar el fotoperiodo, la concentración de nutrientes y las condiciones ambientales necesarias para el cultivo.
Iniciar análisis de crecimiento	Esta función permite iniciar el análisis de crecimiento mediante imágenes.
Desfogue de emergencia	Esta función permite eliminar la solución nutritiva en caso de ser necesario.
Apagar sistema de emergencia	Esta función permite apagar el sistema en caso de emergencia.
Enviar información	Esta función permite transmitir las señales y datos procesados desde el módulo de interfaz al dispositivo.
Recibir información	Esta función permite recibir las señales y datos procesados desde el dispositivo hacia la interfaz.
Mostrar gráficos	Esta función permite mostrar gráficos comparativos de temperatura, humedad, nivel de CO <sub>2</sub> y conductividad eléctrica durante el cultivo.
Mostrar estado de sensores	Esta función permite mostrar los valores en tiempo real de los sensores.
Encender indicadores luminosos	Esta función permite encender los indicadores luminosos para mostrar el estado del sistema y las alarmas necesarias.
Mostrar análisis de crecimiento	Esta función permite mostrar la tasa de crecimiento, el área de las plantas y la tonalidad de las hojas después del análisis de imágenes durante el cultivo.

### 2.1.3 Diagrama de funciones

A continuación, se presenta el diagrama de funciones de la tesis desarrollado teniendo en cuenta las funciones parciales anteriormente descritas:

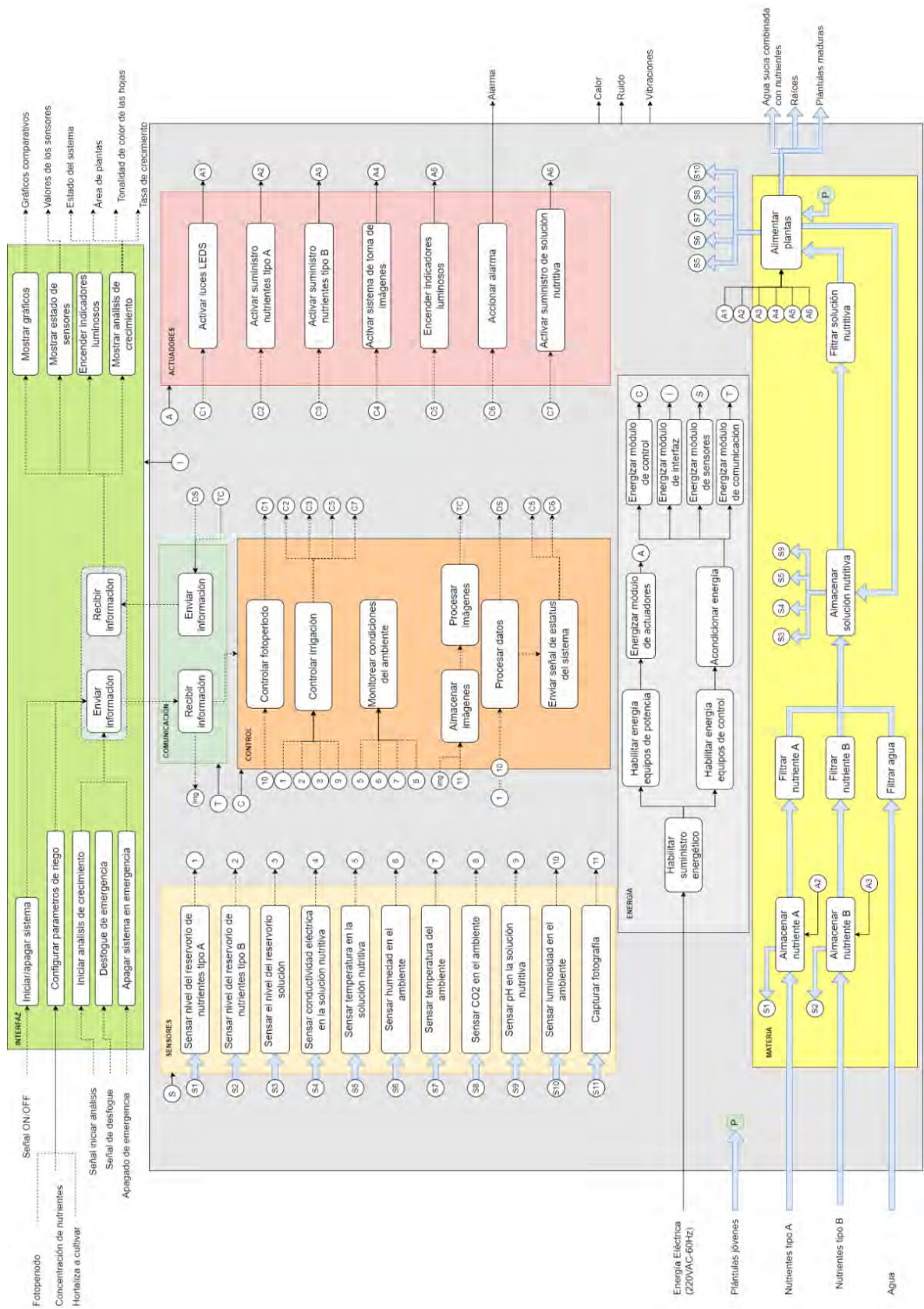


Figura 2.2: Diagrama de funciones. Fuente: elaboración propia.

## 2.2 Matriz morfológica

La matriz morfológica, una herramienta analítica sistemática, descompone un problema complejo en partes manejables. En la investigación actual, las tecnologías para abordar las funciones del sistema propuesto se detallan en un anexo. Se combinaron distintas tecnologías usando la matriz para crear tres conceptos de solución, evaluados técnica y económicamente en el siguiente subcapítulo. El análisis completo se encuentra en los anexos de la tesis.

## 2.3 Evaluación técnica-económica

Se evalúan soluciones mediante un análisis técnico y económico, siguiendo la escala de valores de la norma VDI 2225 (1 a 4, indicando poco importante a bastante importante). La justificación de los pesos relativos se detalla en la Tabla 2.27.

A. **Estabilidad** (CRT1): peso relativo de 3, ya que es uno de los factores principales a considerarse en el diseño de la estructura, buscando que sea modular.

B. **Montaje** (CRT2): peso relativo de 4, ya que el tiempo máximo de montaje no debe superar las dos horas.

C. **Mantenimiento** (CRT3): peso relativo de 3, debido a que se trabajará con fluidos y luego de cada ciclo de trabajo se debe reacondicionar y hacer limpieza al sistema, por lo que es muy importante el mantenimiento del sistema.

D. **Seguridad** (CRT4): peso relativo de 3, para garantizar un buen control de los peligros en el sistema y prever cualquier escenario.

E. **Diseño** (CRT5): peso relativo de 2, ya que el sistema debe ser simple de manipular y modular.

F. **Ergonomía** (CRT6): peso relativo de 4, debido a que se deben realizar constantemente mediciones mediante la toma de fotografías.

G. **Costos de material** (CRT7): peso relativo de 3, debido a que se realizará un gran gasto para el diseño de la estructura del sistema.

H. **Costos de componentes** (CRT8): peso relativo de 4, porque se requiere una buena inversión para tener precisión con respecto a la toma de datos y al control del sistema.

I. **Costos de ensamblaje** (CRT9): peso relativo de 2, ya que es importante que el sistema sea modular para minimizar gastos de ensamblaje.

J. **Costos de operación (CRT10)**: peso relativo de 4, debido a que es necesario minimizar estos costos, ya que el sistema en sí posee un gran consumo energético.

K. **Costos de mantenimiento (CRT11)**: peso relativo de 3, debido a que luego de cada ciclo de trabajo se debe verificar las condiciones de los sensores y actuadores para garantizar su correcto funcionamiento, y realizar la limpieza de los módulos de cultivo.

Tabla 2.8: Evaluación técnica. Fuente: elaboración propia.

VALOR TÉCNICO Xi										
Variantes de conceptos			Solución A		Solución B		Solución C		Solución ideal	
Código	Criterios de evaluación	Peso relativo (g)	p	g*p	p	g*p	p	g*p	p	g*p
CRT1	Estabilidad	3	2	6	3	9	3	9	4	12
CRT2	Montaje	4	3	12	3	12	3	12	4	16
CRT3	Mantenimiento	3	2	6	3	9	3	9	4	12
CRT4	Seguridad	3	2	6	2	6	3	9	4	12
CRT5	Diseño	2	2	4	3	6	3	6	4	8
CRT6	Ergonomía	4	1	4	3	12	2	8	4	16
Puntaje máximo			12	38	17	54	17	53	24	76
Subtotal criterio técnico estandarizado Xi			0.50	0.50	0.71	0.71	0.71	0.70	1	1

Tabla 2.9: Evaluación económica. Fuente: elaboración propia.

VALOR ECONÓMICO Yi										
Variantes de conceptos			Solución A		Solución B		Solución C		Solución ideal	
Código	Criterios de evaluación	Peso relativo (g)	p	g*p	p	g*p	p	g*p	p	g*p
CRT7	Costos de material	3	3	9	2	6	2	6	4	12
CRT8	Costos de componentes	4	1	4	3	12	2	8	4	16
CRT9	Costos de ensamblaje	2	3	6	3	6	2	4	4	8
CRT10	Costos de operación	4	1	4	2	8	2	8	4	16
CRT11	Costos de mantenimiento	3	2	6	3	9	3	9	4	12
Puntaje máximo			10	29	13	41	11	35	20	64
Subtotal criterio económico estandarizado Yi			0.5	0.45	0.65	0.64	0.55	0.55	1	1

Los tres conceptos de solución han sido evaluados según los criterios establecidos en la escala de valores de VDI 2225, que clasifica los niveles de satisfacción en una escala de 0 a 4, donde "0" significa que no se cumplen los requisitos, "1" es aceptable, "2" es suficiente, "3" es bueno y "4" es muy bueno (ideal).

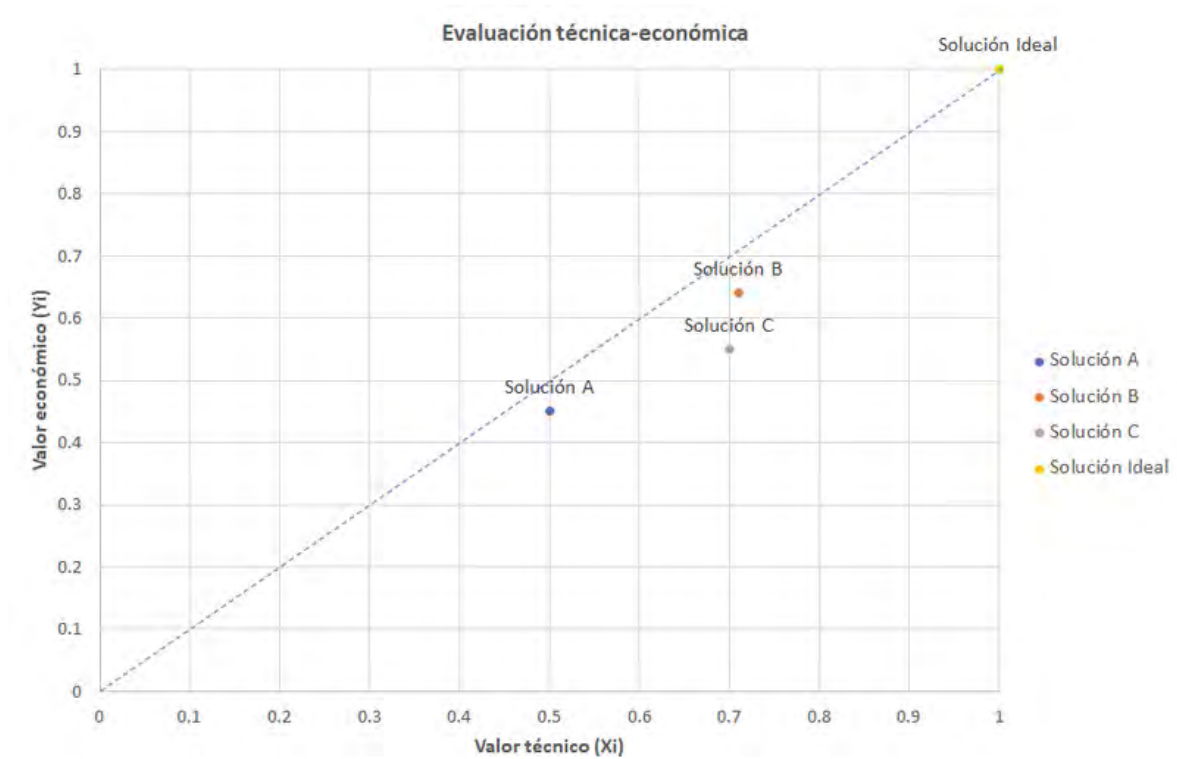


Figura 2.3: Evaluación técnica-económica. Fuente: elaboración propia.

Tras evaluar técnica y económicamente las opciones, la solución A es descartada debido a su valor inferior a 0.6, como se muestra en la gráfica 2.3. Entre las soluciones restantes, la B es la más apropiada al ser la más cercana a la solución ideal (1,1). En consecuencia, se elige la solución B.

## 2.4 Solución óptima

La "solución óptima" se deriva de la selección de las mejores componentes de las soluciones a, b y c, detalladas en los anexos. La solución b, elegida por su superioridad técnica y económica, consiste en una estructura metálica para dos bandejas de cultivo destinadas al almacenamiento y desarrollo de plántulas de hortalizas. Para garantizar la entrega de nutrientes, se emplean dos bombas peristálticas que transportan nutrientes desde un reservorio secundario al principal. La solución nutritiva, mezclada en el reservorio principal, se distribuye a través de

una bomba sumergible a diferentes niveles de cultivo. El control del proceso se realiza mediante una computadora industrial o PLC, facilitando la interacción del usuario a través de una pantalla HMI, botones físicos y una baliza, permitiendo la programación y monitoreo integral del cultivo.

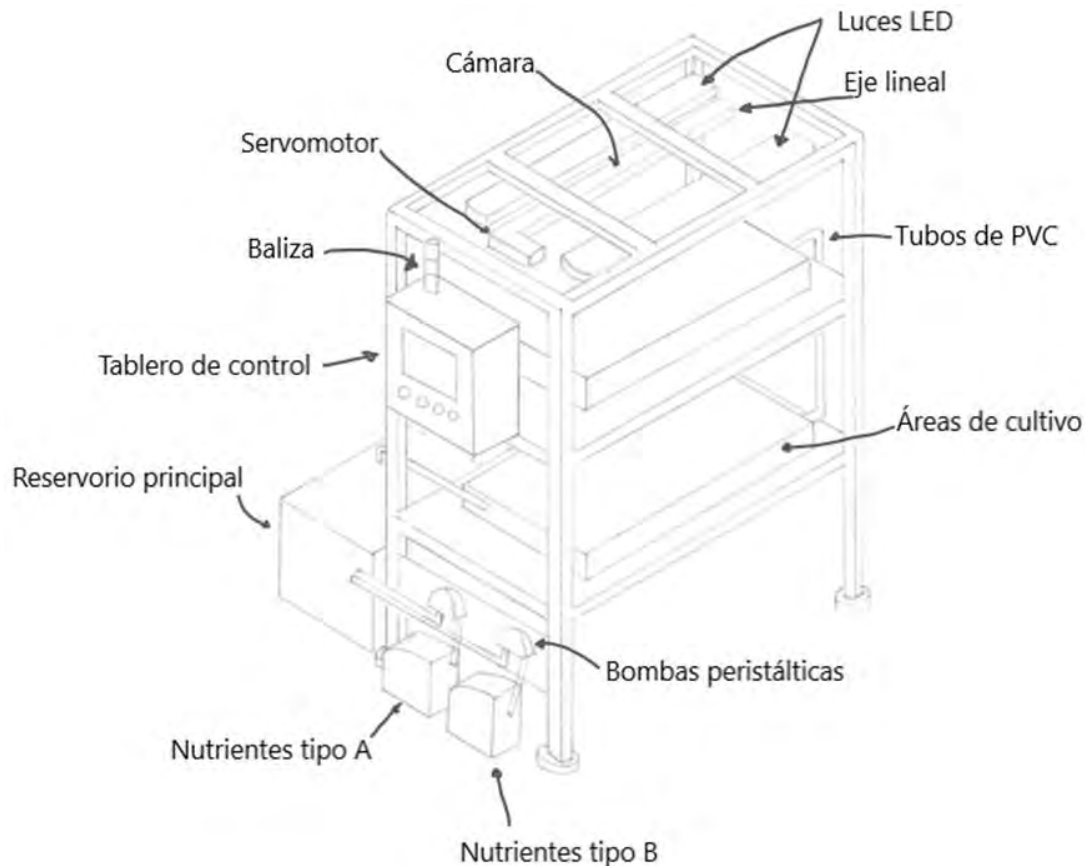


Figura 2.4: Concepto solución óptimo. Fuente: elaboración propia.

El sistema de cultivo se compone de niveles con bandejas y luces LED para el crecimiento de hortalizas. En el nivel superior, un eje lineal impulsado por un servomotor permite la inspección de plantas. El control incluye interruptores termomagnéticos y una fuente de alimentación ajustable a 24 voltios. Sensores en áreas de cultivo miden humedad del suelo, temperatura, CO<sub>2</sub> y luminosidad. En el reservorio principal se mide pH, temperatura con termómetro RTD y conductividad. Sensores ultrasónicos monitorean los niveles de nutrientes, garantizando un suministro adecuado y un ambiente óptimo para el crecimiento de las plantas.

## **CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL SISTEMA**

El desarrollo del sistema implica la integración de componentes y sistemas para lograr un objetivo específico, abarcando el diseño integrado del proyecto, el subsistema de control, la selección de componentes eléctricos y electrónicos, el diseño mecánico y el subsistema de procesamiento de imágenes. En el diseño del proyecto se establecen operaciones, se eligen materiales y procesos de fabricación. En el subsistema de control se definen variables, estrategias y controladores, junto con la selección de software. La elección de componentes eléctricos involucra sensores, actuadores, servodrives y circuitos eléctricos. En el diseño mecánico se selecciona el eje lineal y se realiza un análisis de rigidez y resistencia. El subsistema de procesamiento de imágenes implica la implementación de algoritmos de visión artificial y control del servomotor.

### **3.1 Diseño integrado del proyecto**

El diseño integrado del proyecto coordina aspectos clave mediante herramientas como el diagrama de operaciones, la arquitectura de hardware y la selección de materiales y procesos de fabricación para garantizar la calidad y durabilidad del producto final.

#### **3.1.1 Diagrama de operaciones**

Para iniciar el sistema, conecte a 220 VAC y presione el botón de encendido en el panel de control. Seleccione un ciclo de riego y ajuste los parámetros. Elija la hortaliza, modifique los parámetros si es necesario y comience el ciclo de cultivo. La pantalla HMI mostrará información sobre el cultivo, sensores en tiempo real, y días estimados para la cosecha. Realice un control manual de actuadores si es necesario y revise el resumen del análisis de crecimiento en una ventana.

Al finalizar el ciclo, desconecte las mangueras de suministro y retorno, mueva las tinas manualmente, vacíe el reservorio activando la bomba, y limpie tinas, mangueras y filtros. Para apagar el sistema, gire la llave seccionadora y desenergice.

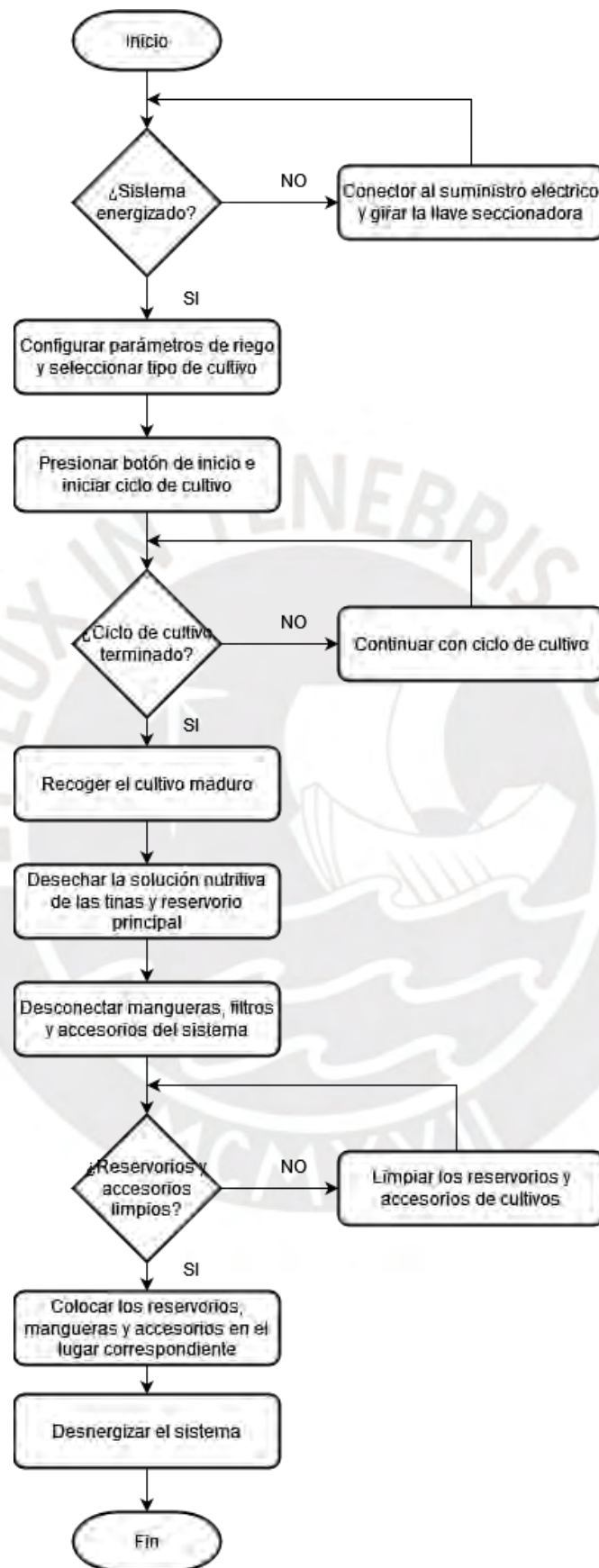


Figura 3.1: Diagrama de operaciones. Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.2 Arquitectura de hardware

A continuación, se presenta la arquitectura de hardware del proyecto:

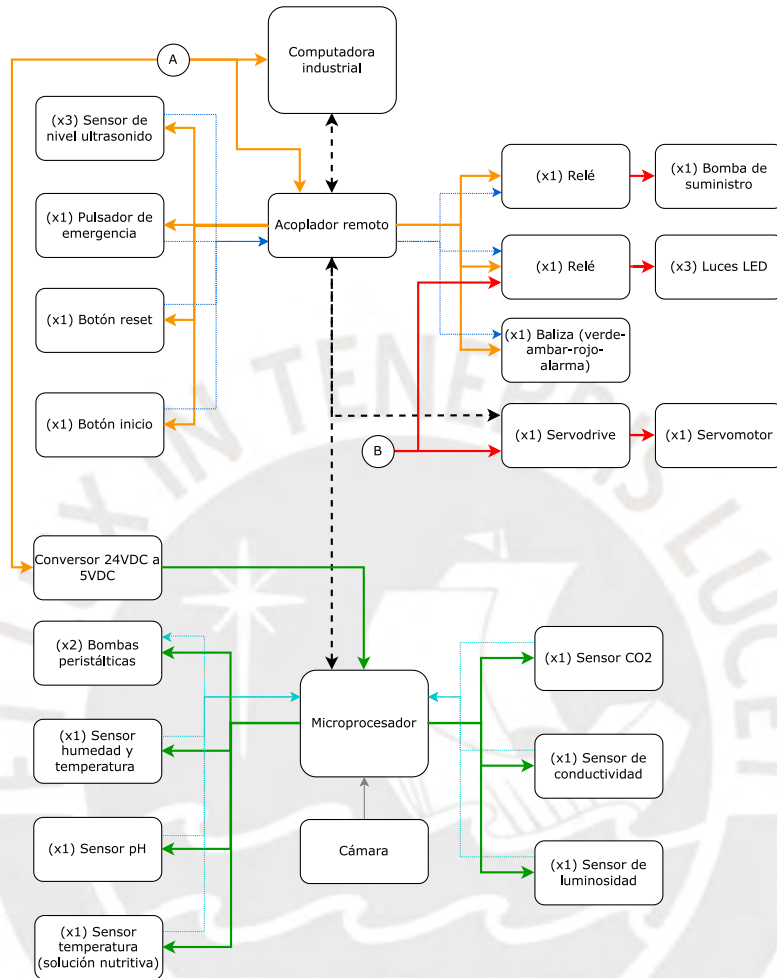


Figura 3.2: Distribución energética - Arquitectura de hardware. Fuente: elaboración propia.

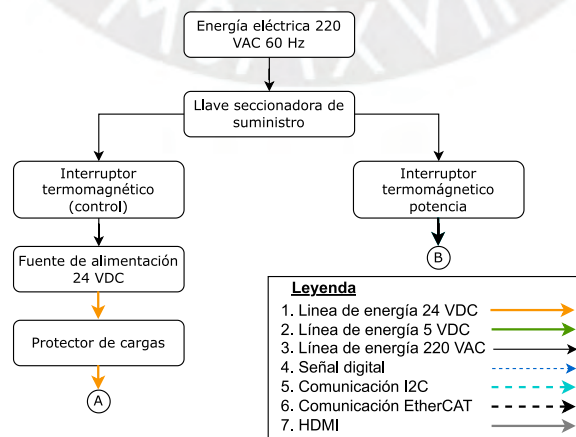


Figura 3.3: Alimentación energética - Arquitectura de hardware. Fuente: elaboración propia.

### 3.1.3 Selección de materiales y procesos de fabricación

La estructura del sistema debe soportar tanto el peso de los cultivos como de los equipos electrónicos (sensores y actuadores), considerando mantenimiento preventivo, ergonomía y automatización. En la industria alimentaria, evitar la oxidación es crucial debido a los estándares de calidad. Se presenta una tabla con ventajas y desventajas de tres alternativas de material para la estructura:

Tabla 3.1: Análisis de materiales. Fuente: elaboración propia.

	<b>Alternativa 1</b>	<b>Alternativa 2</b>	<b>Alternativa 3</b>
Material	Acero inoxidable AISI 304.	Aluminio.	Acero al carbono
Descripción	Tubos cuadrados.	Perfiles V-slot.	Tubos cuadrados.
Ventajas	Material estándar para el sector de la industria alimentaria. Permite una fácil limpieza ya que puede estar en contacto con el agua. Fácil mantenimiento.	Fácil instalación y mantenimiento. Sistema modular. Perfiles estándar y con gran variedad de accesorios para acoples de soportes.	Material más común para fabricación de estructuras. Fácil de soldar.
Desventajas	Requiere soldadura. Estructura fija.	Uso de conectores, accesorios y ajustes mecánicos necesarios. Mantenimiento y ajustes mecánicos constantes. Necesidad de evitar el contacto con el agua.	Soldadura necesaria. Estructura fija con necesidad de pintura protectora, se debe evitar el contacto con el agua. Mantenimiento constante imprescindible.
Análisis económico	Solución más costosa de implementar.	Segunda solución más costosa de implementar.	Solución económica.

En plantas industriales como Alicorp o Gloria en Lima, se emplea comúnmente el acero inoxidable AISI 304 en áreas de llenado y envasado debido a su facilidad de limpieza con agua, alta resistencia a la corrosión y adecuación a entornos exigentes y de alta higiene. Aunque los

perfiles v-slot de aluminio son modulares y fáciles de ensamblar, su mantenimiento y limpieza pueden volverse tediosos por la acumulación de suciedad. Por otro lado, los tubos de acero al carbono son económicos, pero requieren mantenimiento constante y pinturas anticorrosión. Considerando estas variables, se ha elegido el acero inoxidable AISI 304 como material estándar en la industria alimentaria debido a sus beneficios en el mantenimiento.

### 3.2 Diseño del subsistema de control

El diseño del subsistema de control es esencial para asegurar el funcionamiento adecuado del proceso. Esto implica la creación de un diagrama de flujo, la identificación de variables clave, la formulación de una estrategia de control, la elección del controlador y la selección del software para la integración y visualización de datos. A continuación, se presenta el análisis correspondiente:

#### 3.2.1 Diagrama de flujo del proceso

El procedimiento inicia con la verificación de las condiciones iniciales. Si se cumplen, se prepara una solución nutritiva y se encienden las luces LED en el área de cultivo. Se suministra la solución a las plantas y se monitorea su crecimiento. Cuando la cosecha está lista, se notifica al usuario para su recolección, marcando así el fin del proceso.

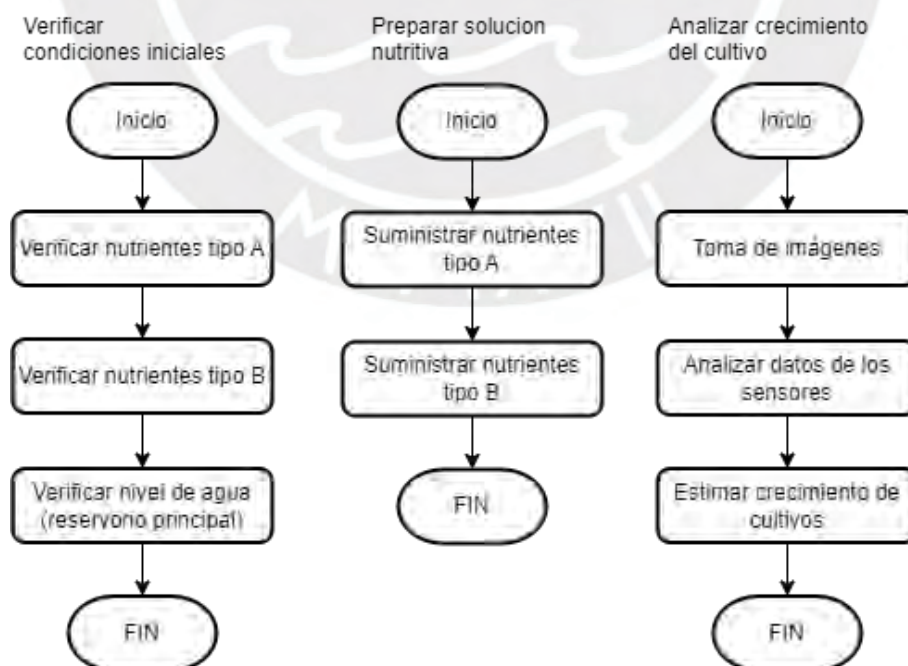


Figura 3.4: Diagrama de los subprocesos. Fuente: elaboración propia.

El subproceso "verificar condiciones iniciales" asegura niveles adecuados de nutrientes A y B, así como de agua en el reservorio principal para el crecimiento de los cultivos. En cuanto al subproceso "preparar solución nutritiva", implica suministrar los nutrientes A y B al reservorio principal. Finalmente, el proceso "analizar crecimiento del cultivo" utiliza imágenes y datos de sensores para estimar el crecimiento de los cultivos, garantizando el suministro adecuado de nutrientes y un entorno óptimo para su desarrollo.

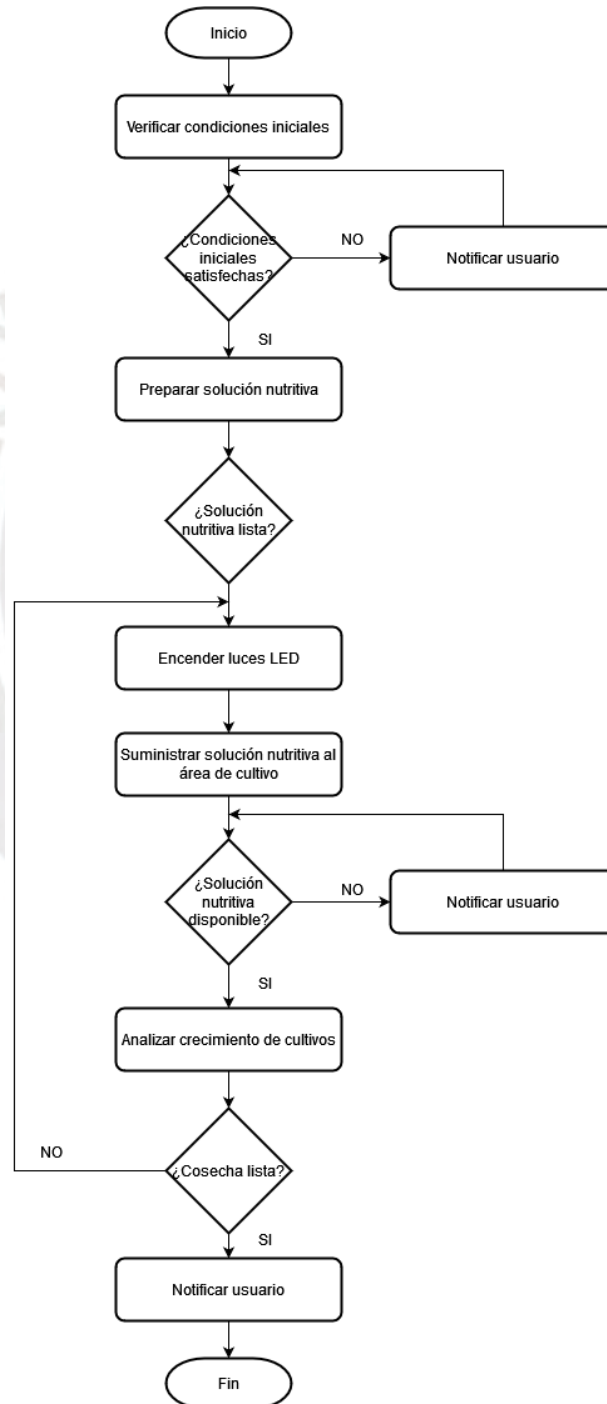


Figura 3.5: Diagrama principal del proceso. Fuente: elaboración propia.

### 3.2.2 Variables por monitorear y controlar

El subsistema de control supervisa niveles de nutrientes, humedad y controla el suministro de líquidos. A continuación, se presenta la tabla resumen con todas las variables a monitorear y/o controlar.

Tabla 3.2: Lista de variables del proyecto. Fuente: elaboración propia. Fuente: elaboración propia.

IT	DESCRIPCIÓN	ACCIÓN
1	Nivel del reservorio de nutrientes A	Monitoreo
2	Nivel del reservorio de nutrientes B	Monitoreo
3	Nivel del reservorio de solución nutritiva	Monitoreo
4	Suministro de nutrientes A al reservorio principal	Control
5	Suministro de nutrientes B al reservorio principal	Control
6	Suministro de solución nutritiva	Control
7	Activación de luces LED	Control
8	Posición de cámara	Control
9	Humedad en el ambiente	Monitoreo
10	Nivel de pH en la solución nutritiva	Monitoreo
11	Temperatura ambiental	Monitoreo
12	Temperatura en el reservorio principal	Monitoreo
13	Nivel de CO2 en el ambiente	Monitoreo
14	Conductividad eléctrica en la solución nutritiva	Monitoreo
15	Luminosidad en el ambiente	Monitoreo

### 3.2.3 Estrategia de control

Según la tabla, se deben controlar cinco variables: suministro de nutrientes A y B, solución nutritiva, encendido de luces LEDs y posición de la cámara. A continuación, se describen las estrategias de control para el proyecto:

#### 3.2.3.1 Suministro de nutrientes (A y B) y de la solución nutritiva

Las plántulas se alimentarán con una solución nutritiva compuesta por nutrientes tipo A y tipo B, suministrados desde un reservorio principal. Se utilizarán bombas peristálticas de alta precisión, comunes en el sector farmacéutico y alimentario, controladas por un sistema ON/OFF temporizado ya que no se requiere una gran precisión, sino solo un suministro adecuado. El microprocesador activará las bombas para transportar el flujo requerido durante cinco minutos, garantizando que la solución nutritiva se distribuya por todos los niveles de

cultivo. Asimismo, las luces LEDs se encenderán mediante un control ON/OFF, ajustándose a un ciclo de luz programado para optimizar el crecimiento de las plántulas.

### 3.2.3.2 Posicionamiento de la cámara

Se utilizará un servomotor para controlar el posicionamiento de la cámara en la toma de imágenes, empleando una estrategia de control PID. Esta técnica, comúnmente utilizada y intuitivamente implementada en servodrives industriales, facilita la programación de posiciones fijas y secuencias predefinidas por parte del usuario.

Tabla 3.3: Análisis del subsistema de control de posicionamiento de la cámara. Fuente: elaboración propia.

SEÑAL	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
$r(t)$	Referencia	Posición deseada u objetivo.
$e(t)$	Error	Diferencia entre la posición deseada y la posición actual.
$c(t)$	Control	Señal que recibe el actuador
$u(t)$	Accionamiento	Acción generada por el actuador.
$y(t)$	Salida	Posición actual.

### 3.2.4 Selección del controlador

#### 3.2.4.1 Computadora industrial o PLC

De acuerdo con la arquitectura de hardware, la IPC/PLC se debe de encargar del procesamiento de los datos obtenidos por los sensores, del encendido de las luces y del control del servomotor.

A continuación, se presentan las alternativas de controladores para satisfacer estas necesidades:

Tabla 3.4: Análisis de controladores. Fuente: elaboración propia.

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Clasificación	PLC	PLC	IPC
Marca	Siemens	Allen Bradley	Beckhoff
Protocolo de comunicación	PROFINET	EtherNet/IP	EtherCAT
Entorno de programación	TIA Portal + otros	RSLogix5000 +otros	TwinCAT3
Equipos de control requeridos	PLC + I/Os + panel HMI + servodrive	PLC + I/Os + panel HMI + servodrive	Panel PC + I/Os + servodrive
Análisis económico	Más económica*	Más costosa	Alternativa intermedia

Ventajas	<p><b>Tecnología confiable:</b> Equipos industriales bien establecidos para realizar tareas simples o complejas con facilidad. La programación es sencilla gracias a la amplia disponibilidad de software popular, y el soporte técnico está asegurado debido a la abundancia de programadores en la industria peruana.</p>	<p><b>Tecnología confiable:</b> Ampliamente empleada en la industria peruana para aplicaciones complejas, los equipos industriales son de confianza.</p> <p><b>Soporte técnico:</b> Garantizado por la presencia de programadores en la industria peruana, aunque en menor medida que la alternativa 1.</p>	<p><b>Tecnología avanzada:</b> Las computadoras industriales (IPC) posibilitan el control de servomotores y garantizan una seguridad superior.</p> <p><b>Mantenimiento sencillo:</b> El protocolo EtherCAT permite la configuración automática de equipos, eliminando la necesidad de asignar IPs al cambiar repuestos. Esto facilita el trabajo de los OEM con sus equipos.</p> <p><b>Entorno de desarrollo eficiente:</b> TwinCAT 3 desarrollado en base a Codesys, asegura una experiencia intuitiva para los programadores.</p>
Desventajas	<p><b>Mantenimiento:</b> Es necesario asignar IPs, configurar servodrives y emplear múltiples softwares según las versiones.</p> <p><b>Seguridad:</b> Dada la popularidad de los equipos y software, hay riesgos de vulnerabilidades y modificaciones no autorizadas en los programas.</p>	<p>El mantenimiento complejo incluye asignación de IPs, configuración de servodrives y uso de diversos softwares. Los equipos de Allen Bradley, pese a ser costosos, son ampliamente preferidos en la industria minera.</p>	<p><b>Soporte técnico:</b> Está garantizado dado que cuenta con representantes en LATAM; sin embargo, existen menos programadores capacitados en la industria peruana en el software.</p>

Se optará por la alternativa 3 por tres razones clave: la tecnología EtherCAT simplifica el mantenimiento al eliminar la necesidad de configuración adicional, solo se requiere reemplazar equipos; las computadoras industriales son más avanzadas que los PLC y se dispone de paneles HMI con controladores integrados, reduciendo la necesidad de equipos; además, el software basado en Codesys y Visual Studio garantiza la programación y el soporte técnico.

### 3.2.4.2 Microprocesador

De acuerdo con la arquitectura de hardware, el microprocesador se encargará de recibir los datos de todos los sensores y procesará las imágenes obtenidas por la cámara.

A continuación, se presentan las alternativas de microprocesadores para satisfacer estas necesidades:

Tabla 3.5: Análisis de microprocesadores. Fuente: elaboración propia.

	<b>Alternativa 1</b>	<b>Alternativa 2</b>	<b>Alternativa 3</b>
Nombre	Raspberry pi 4	Beaglebone 4	Jetson Nano
Alimentación	5V / 2A	5V / 2A	5V / 2A
I/Os	40	92	40
Procesador	Broadcom BCM2711, quad-core Cortex-A72	AM3358 ARM Cortex-A8	Quad-core ARM® A57 CPU
Conectividad	2 x Micro HDMI, USB y Ethernet	HDMI, USB y Ethernet	HDMI, USB y Ethernet
Análisis económico	Alternativa económica	Alternativa precio intermedio	Alternativa más costosa

En síntesis, las tres opciones cumplen con los requisitos para procesar la información de los sensores del proyecto, así como para analizar imágenes, obtener datos y conectarse mediante diferentes puertos de comunicación. Se optó por el microprocesador Raspberry Pi 4 debido a su amplia popularidad y la facilidad de programación y configuración gracias a la variedad de librerías disponibles.

### 3.2.5 Software

#### 3.2.5.1 Programación del IPC

Se optó por la computadora industrial de Beckhoff para la tesis, utilizando el software TwinCAT3 de Beckhoff, que emplea Codesys como compilador y Visual Studio como entorno de desarrollo para la programación de la lógica de control y la interfaz HMI.

#### 3.2.5.2 Programación del microprocesador

Se pueden utilizar varios lenguajes de programación para el microprocesador Raspberry Pi en el análisis de imágenes y la transmisión de datos al IPC, como se indica en la tabla siguiente.

Tabla 3.6: Programación del microprocesador. Fuente: elaboración propia.

	<b>Alternativa 1</b>	<b>Alternativa 2</b>
Lenguaje de programación	Scratch 2.0	Python
Tipo de programación	Programación por bloques / visual	Lenguaje de alto nivel
Ventajas	Programación sencilla e intuitiva. Diseñada inicialmente para enseñar a niños. Software libre.	Gran variedad de librerías y ejemplos. Programación estructurada. Soporta programación orientada a objetos. Fácil de usar.
Desventajas	La velocidad de la ejecución de algunos algoritmos está limitada.	Considerable consumo de memoria.

La elección de la segunda alternativa se justifica tres razones importantes para la tesis. En primer lugar, la implementación del protocolo EtherCAT en el IPC Beckhoff es más simple debido a la amplia variedad de librerías disponibles. En segundo lugar, Python ayuda a desarrollar algoritmos, como los de procesamiento de imágenes, más rápidamente gracias a su sencilla sintaxis y gran comunidad de soporte. Finalmente, Python es un lenguaje de alto nivel, lo que hace que el programa sea más fácil de escribir. Es importante mencionar que el tiempo de procesamiento no solo depende de usar Python, sino también de qué tan bien esté optimizado el código, las librerías utilizadas y, sobre todo, la capacidad de procesamiento del dispositivo.

### **3.3 Selección de componentes eléctricos y electrónicos**

Es crucial elegir cuidadosamente los componentes eléctricos y electrónicos para la tesis. Esto incluye la selección de equipos como el acondicionamiento energético, la computadora industrial, el servodrives y servomotor, los sensores y actuadores, los indicadores luminosos y los cables.

#### **3.3.1 Acondicionamiento energético**

##### **3.3.1.1 Selección de la fuente de alimentación**

Para energizar el subsistema se requiere una fuente de alimentación que convierta la energía del suministro público (220 VAC) a 24 VDC (estándar a nivel industrial). A continuación, se presenta la tabla en la que se comparan las diversas alternativas con las que se cuentan:

Tabla 3.7: Fuentes de alimentación. Fuente: elaboración propia.


Descripción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Marca	Siemens 	Murrelektronik 	Schneider E. 
Alimentación	Monofásica	Monofásica	Monofásica
Entrada	AC 120 / 230 V	173 ... 264 VAC	100-240 V CA
Salida	24V/5ADC	24V/5ADC	24V/5ADC
Eficiencia	90%	89%	88%
Código	6EP1333-2AA01	85133	ABLS1A24050
Distribuidor local	Control y tecnología	TECHPRO	CEYESA
Precio (soles)	680	406.6	660

Se optó por la segunda alternativa principalmente por su costo significativamente menor. Aunque todas las alternativas cumplen con los requisitos técnicos necesarios, la segunda opción ofrece una relación costo-eficiencia más favorable, siendo una fuente industrial que también cumple con los estándares necesarios, suministra cinco amperios suficientes para alimentar el subsistema de control, y tiene una eficiencia aceptable para esta aplicación (superior al 85%).

### 3.3.1.2 Selección del protector de carga

Se empleará un protector de carga electrónico para resguardar la computadora industrial y los equipos de control. Este dispositivo detecta errores en las líneas del sistema, como cortocircuitos o cables cortados, proporcionando una respuesta más eficiente en comparación con los interruptores termomagnéticos.

Tabla 3.8: Características del protector de carga. Fuente: elaboración propia.




Descripción	Alternativa
Marca	Murrelektronik 

Entrada	24 V DC
Salida	24 V DC / 1-2-4-6 A
Codigo	9000-41084-0100600
Distribuidor local	TECHPRO
Precio (soles)	808

### 3.3.1.3 Selección de interruptor termomagnético

Se requieren interruptores magnéticos para energizar tanto los equipos de control como los equipos de potencia; a continuación, se compara las diversas alternativas con la que se cuentan:

Tabla 3.9: Interruptores termomagnéticos. Fuente: elaboración propia.


Descripción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Marca	Siemens 	ABB 	Schneider Electric 
Alimentación	Monofásica	Monofásica	Monofásica
Carga max.	40 A, 30 mA	16 A	16 A
Codigo	5SV3314-3	A1N125-TMF16-400	A9D47216
Distribuidor local	Control y tecnología	Pymatek	CEYESA
Precio (soles)	500	480	450

En esta oportunidad, se seleccionó la tercera alternativa ya que el amperaje de corte es suficiente para la aplicación. Además, los interruptores de Schneider Electric son fácilmente accesibles a través de distribuidores locales, lo que garantiza una mayor disponibilidad y soporte técnico en caso de ser necesario. Finalmente, esta opción resulta ser la más económica en comparación a las otras alternativas.

### 3.3.1.4 Selección de llave seccionadora

Se utilizará una llave seccionadora general, la cual estará ubicada en la parte externa del tablero de control. A continuación, se presenta la tabla comparativa de las diversas alternativas:

Tabla 3.10: Llave seccionadora. Fuente: elaboración propia.


Descripción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Marca	Kraus & Naimer 	Allen Bradley 	Siemens 
Carga max.	32A	100 A	63A
Codigo	KG32A.K300	194E-A100-1753	3LD5210-0TK13
Distribuidor local	CEYESA	Precision Perú	Control y tecnología
Precio (soles)	340	890	450

En esta oportunidad, se seleccionó la primera alternativa ya que el amperaje de corte es suficiente para esta aplicación; asimismo, K&N es una marca reconocida en el medio local y, finalmente, es la solución más económica en comparación a las otras opciones.

### 3.3.1.5 Selección de relés

Se requiere el uso de relés para la protección de los equipos; a continuación, se presenta la tabla comparativa de las alternativas:

Tabla 3.11: Relés. Fuente: elaboración propia.

Descripción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Marca	Phoenix Contact 	ABB 	Murrelektronik 
Entrada	230 V AC / 220 V	230 V AC / 220 V	230 V AC / 220 V
Señal de control	24VDC	24VDC	24VDC
Codigo	2982757	1SVR740850R0300	6652000
Distribuidor local	CEYESA	Pymatek	TECHPRO
Precio (soles)	460	400	138

Se seleccionó la segunda alternativa debido a tres razones principales: en primer lugar, cuenta con disponibilidad en el mercado local; en segundo lugar, satisface los requerimientos; finalmente, es la solución más económica.

### 3.3.1.6 Fuente de alimentación 5V

Se requiere de una fuente de alimentación para energizar al microprocesador; a continuación, se presenta la tabla con las principales características del cargador original de Raspberry:

Tabla 3.12: Características fuente de alimentación 5 VDC. Fuente: elaboración propia.




Descripción	Alternativa
Marca	Raspberry Pi
Entrada	220 VAC
Salida	5 VDC / 3 A
Precio (soles)	90

### 3.3.2 Computadora industrial y terminales de E/Ss

#### 3.3.2.1 Selección del Panel PC

Debido a que anteriormente se seleccionó la computadora industrial BECKHOFF y cuyos equipos de control utilizan el protocolo de comunicación EtherCAT; a continuación, se presenta la tabla comparativa de los modelos disponibles:

Tabla 3.13: Panel PC – BECKHOFF. Fuente: elaboración propia.

Descripción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Marca	Beckhoff 	Beckhoff 	Beckhoff 
Código	CP6606	CP6600	CP2607
Tamaño	7 pulgadas	10 pulgadas	7 pulgadas
Procesador	ARM Cortex™-A8, 1 GHz	ARM Cortex™-A8, 1 GHz	ARM Cortex™-A8, 1 GHz
Distribuidor local	TECHPRO	TECHPRO	TECHPRO




Precio (soles)	2850	4000	9000
----------------	------	------	------

Se seleccionó la primera alternativa debido a tres razones principales: en primer lugar, la pantalla de siete pulgadas es suficiente para el HMI; en segundo lugar, el procesador del equipo permite controlar servomotores y cuenta con certificaciones IP54; finalmente, es la solución más económica de las tres alternativas.

### 3.3.2.2 Selección de tarjetas de entradas digitales

Se requieren tarjetas de entradas digitales para las señales de los pulsadores, sensores, entre otros; a continuación, se presenta la tabla comparativa de los modelos disponibles:

Tabla 3.14: Terminales de entradas BECKHOFF. Fuente: elaboración propia.




	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Marca	Beckhoff 	Beckhoff 	Beckhoff 
Descripción	Tarjeta compacta (requiere coupler)	Tarjeta compacta (requiere coupler)	Box de comunicación EtherCAT compacto
Código	EL1004	EL1008	EP1008
Tipos de señal	Entrada digital	Entrada digital	Entrada digital
N° de canales	4	8	8
Distribuidor local	TECHPRO	TECHPRO	TECHPRO
Precio (soles)	140	169	500

Se seleccionó la segunda alternativa debido a tres razones principales: en primer lugar, el diseño modular de la tarjeta facilita las conexiones de los sensores; en segundo lugar, es un modelo de alta rotación y cuenta con las entradas necesarias; finalmente, es la alternativa más económica.

### 3.3.2.3 Selección de tarjetas de salidas digitales

Se requieren tarjetas de salidas digitales para las señales de la baliza, actuadores, entre otros; a continuación, se presenta la tabla comparativa de los modelos disponibles:

Tabla 3.15: Terminales de salidas BECKHOFF. Fuente: elaboración propia.

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Marca	Beckhoff 	Beckhoff 	Beckhoff 
Descripción	Tarjeta compacta (requiere de coupler)	Tarjeta compacta (requiere de coupler)	Box de comunicación EtherCAT compacto
Código	EL2004	EL2008	EP2008
Tipos de señal	Salida digital	Salida digital	Salida digital
N° de canales	4	8	16
Distribuidor local	TECHPRO	TECHPRO	TECHPRO
Precio (soles)	145	186	550

Se seleccionó la segunda alternativa debido a tres razones principales: en primer lugar, el diseño modular de la tarjeta facilita las conexiones de los cables; en segundo lugar, es un modelo de alta rotación y cuenta con las salidas necesarias; finalmente, es la alternativa más económica.

### 3.3.3 Eje lineal, servodrive y servomotor

#### 3.3.3.1 Selección de eje lineal

Se ha evaluado y comparado diversos modelos de ejes lineales disponibles en el mercado para seleccionar el más adecuado en el proyecto de desplazamiento del subsistema de la cámara. La tabla a continuación resume aspectos clave como diseño, fabricante, facilidad de montaje y precio:

Tabla 3.16: Alternativas de ejes lineales. Fuente: elaboración propia.

Descripción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Marca	Bahr Modultechnik 	Festo 	Desarrollo propio 
Código	ELT40	EGC-50- -TB-KF	-
Ventajas	Estándar industrial, instalación sencilla, acople con servomotor hecho a medida	Estándar industrial, instalación sencilla, marca reconocida.	Diseño adaptable y personalizada a la estructura.
Desventajas	Requiere importación.	Requiere importación y diseñar acople de servomotor.	Requiere diseñar todas las piezas, analizar materiales y hacer pruebas de funcionamiento.
Distribuidor	Distribuidor local.	Festo Perú.	NA
Precio	Solución económica intermedia.	Solución costosa.	Solución más económica.

Se optó por seleccionar el primer modelo de la tabla comparativa debido a sus ventajas clave: diseñado específicamente para la industria, fabricado por un especialista con acople de servomotor fácil de montar, y una elección práctica y equilibrada en términos de costo-beneficio, ahorrando tiempo en implementación, pruebas y diseño del acople.

Para garantizar la correcta selección del servomotor a utilizar en el eje lineal seleccionado, es necesario corroborar que este cumpla con todos los requisitos necesarios. Específicamente, se debe calcular el torque y la potencia requeridos para su funcionamiento.

Para calcular el torque necesario, se puede utilizar la siguiente ecuación, proporcionada por el fabricante y descrita en la hoja de datos (Figura 3.6) del eje lineal:

$$M_a = \frac{F * P * S_i}{2000 * \pi * \mu} + M_n$$

Donde:

- F es la fuerza en Newtons (N).

- P es el paso del tornillo en milímetros (mm).
- Si es el factor de seguridad, típicamente entre 1.2 y 2.
- $\mu$  es la eficiencia del tornillo.
- Mn es el par sin carga (Nm).

15

Linear system **ELT/ELK 30, 40, 60, 60S, 80, 80S, 100, 125**

SPINDLE DRIVEN

LIFTING SYSTEM  
 PRECISION

**Function:**

This linear unit consists of an aluminium hollow section with integral, parallel ground and hardened steel guide rods. The carriage has play-adjustable ball-bearing rollers which engage with the guide rods. The rotating trapezoidal/ballscrew causes linear motion of the ballnut, which is connected to the carriage. The slot necessary for this is covered by a stainless steel strip, making the unit dust- and splash-proof. Lateral adjustment of movement for parallel units, or when two carriages are mounted on one unit, is provided by the ballnut mounting.

**Fitting position:** As required, max. length 3.000 mm  
 (EL 30 / max. 1500 mm, EL 40 / max. 2000 mm)

**Carriage mounting:** By T-slots and tapped holes

**Unit mounting:** By T-slots and tapped holes in the mounting surfaces.

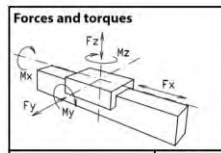


Figura 3.6: Hoja de datos del eje lineal. Fuente: Bahr Modultechnik.

Asumiendo que el peso del eje lineal transportará no superará los 10 Kg y basándonos en la hoja de datos del modelo ELT40:

- Fuerza (F):  $F = m \cdot g = 10 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 = 98.1 \text{ N}$ .
- Paso del tornillo trapezoidal para el ELT40: Tr18x4, lo que significa que el paso P es 4 mm.
- Eficiencia del tornillo trapezoidal Tr18x4:  $\mu = 0.399$ .
- Par sin carga (Mn) para el tornillo trapezoidal Tr18x4: 0.4 Nm.

Se selecciona un factor de seguridad de  $S_i=1.5$ .

De esta forma, se puede expresar el torque requerido como:

$$M_a = \frac{98,1\text{N} \cdot 4\text{mm} \cdot 1.5}{2000 \cdot \pi \cdot 0,399} + 0,4 \text{ N} \cdot \text{m} \approx 0,635 \text{ N} \cdot \text{m}$$

A continuación, se presenta la fórmula para calcular la potencia requerida del servomotor, considerando el torque necesario.

$$P_a = \frac{M_a * n}{9550}$$

Donde:

$P_a$  = Potencia del actuador (KW)

$M_a$  = Torque requerido (Nm)

$n$  = rpm (min-1)

El servomotor seleccionado tiene una velocidad máxima de 5000 rpm con alimentación trifásica de 380 VAC, pero en el proyecto se usará una alimentación monofásica de 220 VAC, limitando la velocidad máxima a 3000 rpm. Aunque la velocidad máxima no es esencial para la toma de imágenes, se sugiere tenerla en cuenta durante el análisis del sistema para garantizar un rendimiento óptimo.

Teniendo en cuenta lo anterior:

$$P_a = \frac{0.635 \text{ Nm} * 3000}{9550} = 0.19 \text{ KW}$$

Según el fabricante, se requiere un servomotor con un torque mínimo de 0,635 *N.m* y una potencia de 0.19 *KW*.

### **Verificación del cálculo del torque para girar un tornillo**

A continuación, se presentan los cálculos de las fuerzas que actúan en el eje lineal de un tornillo para comparar el torque necesario para hacerlo girar con la hoja de datos proporcionada por el fabricante del eje lineal. Consideraremos el caso crítico en el que el tornillo se encuentra en posición vertical y está levantando una carga. Este enfoque es más conservador y garantiza que el diseño sea adecuado para la situación más exigente, ya que, en el caso horizontal, solo actuaría la componente de la fricción producida por el peso de la carga.

### Fuerzas actuantes

Las fuerzas que actúan sobre el tornillo son:

- W: Fuerza axial contra la cual se gira el tornillo.
- P: Fuerza tangencial en el radio medio de la rosca necesaria para girar la tuerca.

Siendo  $p$  el paso y  $d$  el diámetro del tornillo. A continuación, se muestra el diagrama correspondiente:

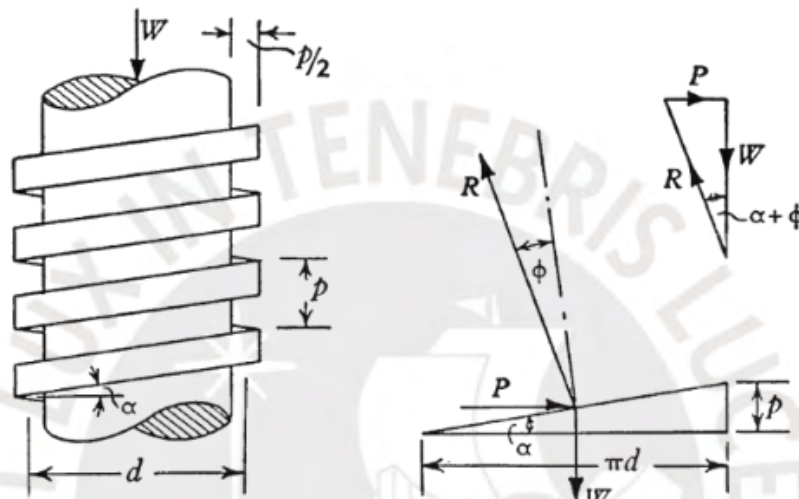


Figura 3.3: DCL de un tornillo (extraído de Greenwood, 1988, Figura 9.4, p. 161, "Mechanics of Machines: Elementary Theory and Examples").

Del Diagrama de Cuerpo Libre (DCL) se puede obtener que:

$$P = W * \tan(\alpha + \varphi)$$

Reescribiendo esta igualdad, se tiene que:

$$\tan(\alpha + \varphi) = \frac{\tan \alpha + \tan \varphi}{1 - \tan \alpha * \tan \varphi}$$

Donde  $\mu = \tan \varphi$ . Entonces:

$$P = W * \frac{\tan \alpha + \mu}{1 - \mu * \tan \alpha}$$

### Parámetros geométricos y físicos

- Diámetro del tornillo ( $D$ ): 18 mm.
- Paso del tornillo ( $p$ ): 4 mm.

- Carga ( $F$ ): 98.1 N (10 kg).
- Coeficiente de fricción ( $\mu$ ): 0.15 (usualmente entre 0.1 y 0.2, se asume un valor promedio)

### Cálculo del ángulo de hélice

Si  $d$  es el diámetro medio de la rosca y  $p$  el paso, entonces:

$$\tan(\alpha) = \frac{p}{\pi * d_m} = \frac{4 \text{ mm}}{\pi * 18 \text{ mm}} \approx 0.070$$

### Cálculo del Torque

El torque ( $T$ ) está definido por:

$$T = \frac{W * d_m}{2} * \frac{\tan \alpha + \mu}{1 - \mu * \tan \alpha}$$

Reemplazando los valores:

$$T = \frac{98.1 \text{ N} * 18 \text{ mm}}{2} * \frac{0.070 + 0.15}{1 - 0.15 * 0.070} \approx 0.1963 \text{ Nm}$$

Considerando un factor de seguridad de 2:




$$T_{necesario} \approx 0.4 \text{ Nm}$$

Comparando el torque del servomotor recomendado por el fabricante del eje lineal (0.6 Nm) con el torque calculado en el análisis previo (0.4 Nm), se puede concluir que la recomendación es adecuada. El análisis previo es una simplificación del comportamiento real del eje lineal, por lo que se considera prudente seguir la recomendación del fabricante. En conclusión, se requiere un servomotor con un torque mínimo de 0.635 Nm y una potencia de 0.19 kW.

#### 3.3.3.2 Selección del servomotor

Se requiere seleccionar un servomotor para el posicionamiento de la cámara y la toma de imágenes; a continuación, se presenta la tabla comparativa de los modelos disponibles:

Tabla 3.17: Servomotores EtherCAT BECKHOFF. Fuente: elaboración propia.



Descripción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Marca	Beckhoff 	Beckhoff 	Beckhoff 
Código	AM8121-1F10	AM8131-1J10	AM8141-1J10
Descripción	Servomotor, 24...48 V DC, I <sub>o</sub> = 4 A	Servomotor, 24...48 V DC, I <sub>o</sub> = 8.0 A.	Servomotor, 24...48 V DC, I <sub>o</sub> = 8.0 A.
Torque nominal	M <sub>o</sub> = 0.5 Nm	,M <sub>o</sub> = 1.35 Nm,	M <sub>o</sub> = 2.4 Nm
Rev/ minuto	nn = 3000 min <sup>-1</sup>	nn = 1800 min <sup>-1</sup>	nn = 1000 min <sup>-1</sup>
Distribuidor local	TECHPRO	TECHPRO	TECHPRO
Precio (soles)	1560	2000	2500

Se seleccionó la segunda alternativa debido a tres razones principales: en primer lugar, el torque generado por el servomotor es suficiente para desplazar la cámara (ver sección 3.3.3.1); en segundo lugar, es un modelo de alta rotación y está disponible localmente; finalmente, es una alternativa económica.

### 3.3.3.3 Selección del servodrives

Se requiere seleccionar un servodrives adecuado para el servomotor seleccionado anteriormente; a continuación, se presenta la tabla comparativa de los modelos disponibles:

Tabla 3.18: Servodrives EtherCAT. Fuente: elaboración propia.

Descripción	Alternativa 1	Alternativa 2
Marca	Beckhoff 	Beckhoff 
Código	AX5106-0000-0200	AX5112-0000-0200
Descripción	Servodrives EtherCAT	Servodrives EtherCAT

N° de canales	1	1
Corriente nominal de salida	6 A	12 A
Distribuidor local	TECHPRO	TECHPRO
Precio (soles)	4080	8700




Se seleccionó la primera alternativa debido a tres razones principales: en primer lugar, la corriente nominal de salida tanto como la corriente pico del drive satisface las necesidades del servomotor, es un modelo estándar y está disponible localmente; finalmente, es la alternativa más económica.

### 3.3.4 Selección de sensores

#### 3.3.4.1 Sensor de nivel ultrasónico

Se requiere seleccionar un sensor de nivel ultrasónico para la medición de nivel de los nutrientes; a continuación, se presenta la tabla comparativa de los modelos disponibles:

Tabla 3.19: Sensores de nivel ultrasónicos. Fuente: elaboración propia.




Descripción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Marca	Schneider Electric 	Telemecanique 	Schneider Electric 
Código	XX230A12NA00M12	VM18PNO	XX518A3PAM12
Tamaño	M18	M30	M18
Rango de detección	0,051 ... 900 mm	0,051 ... 508 mm	0,051 ... 508 mm
Alimentación	12 a 24 VDC	12 a 24 VDC	12 a 24 VDC
Protección IP	67	67	67
Tipo de conector	M12	M12	M12
Precio (soles)	800	820	850

Se eligió la primera opción por tres razones clave: tiene un rango de detección adecuado para el proyecto, es un modelo estándar con conector M12, y además, es la opción más económica.

### 3.3.4.2 Pulsador de emergencia

Se requiere seleccionar un pulsador de emergencia para la seguridad del sistema; a continuación, se presenta la tabla comparativa de los modelos disponibles:

Tabla 3.20: Pulsadores de emergencia. Fuente: elaboración propia.

Descripción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Marca	Murrelektronik 	Schneider Electric 	Siemens 
Código	69100	XB5AS8445	3SU1150-1HB20-1CG0
Descripción	E-Stop 30 2NC M12 Emergency-Stop	Emergency stop switching off	Pulsador de seta de parada de emergencia
Alimentación	12 a 24 VDC	12 a 24 VDC	12 a 24 VDC
Tipo de conector	M12	Bornera	Bornera
Distribuidor local	TECHPRO	CEYESA	Control y Tecnología
Precio (soles)	293	200	150

Se optó por la primera alternativa por tres razones clave: está disponible localmente, tiene un conector plug & play M12 y es la solución más práctica.

### 3.3.4.3 Pulsador de inicio, reset y stop.

Se requiere seleccionar un pulsador de reset para la seguridad del sistema; a continuación, se presenta la tabla comparativa de los modelos disponibles:

Tabla 3.21: Pulsadores tipo reset. Fuente: elaboración propia.

Descripción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Marca	Murrelektronik 	Schneider Electric 	ABB 

Código	69110	XB4BW31B5	2CLA220470A1101
Descripción	R-Button 30 1NO L M12 reset button	Harmony XB4, push button	Pulsador sin grabar - Blanco Alpino
Tipo de conector	M12	Bornera	Bornera
Distribuidor local	TECHPRO	CEYESA	Pymatek
Precio (soles)	220	150	200

Se optó por la primera alternativa por tres razones clave: está disponible localmente, tiene un conector plug & play M12 y es la solución más práctica.

### 3.3.4.4 Sensor de humedad y temperatura ambiental

Se requiere seleccionar un sensor de humedad y temperatura para el área de cultivo; a continuación, se presenta la tabla comparativa de los modelos disponibles:

Tabla 3.22: Sensores de humedad y temperatura. Fuente: elaboración propia.




Descripción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Marca	Atlas Scientific 	Adafruit 	Adafruit 
Código	EZO™ Embedded Humidity Probe	SHT31	AM2315
Rango	0 – 100%	0 – 100%	0 – 100%
Precisión	+/- 2%	+/- 2%	+/- 1%
Protocolo de datos	UART & I2C	I2C	I2C
Alimentación	3.3V – 5V	2.4V – 5.5V	3.5V– 5V
Tipo de conector	Requiere una tarjeta adicional o PCB.	Requiere diseñar un PCB	Requiere diseñar un PCB
Distribuidor local	Importación.	Importación	Mouser Electronics
Precio	46 USD	25 USD	40 USD

Se eligió la primera opción por tres razones clave: cumple con todos los requisitos de medición, el fabricante es especializado en sensores de laboratorio, y resulta la solución más práctica al ser compatible con un shield de la misma marca que facilita las conexiones.

### 3.3.4.5 Sensor de pH

Se requiere seleccionar un sensor de pH para el área de cultivo; a continuación, se presenta la tabla comparativa de los modelos disponibles:


Tabla 3.23: Sensores de pH. Fuente: elaboración propia.

Descripción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Marca	Atlas Scientific 	Homelab.link 	Gaohou 
Código	EZO™ pH Circuit		-
Descripción	Sensor de pH	Medidor de pH	Sensor analógico de PH + Electrodo
Rango	.001 – 14.000	.001 – 14.000	.001 – 14.000
Precisión	+/- 0.002	+/- 0.05	Sin información
Protocolo de datos	UART & I2C	Sin información	Sin información
Alimentación	3.3V – 5V	3.3V – 5V	3.3V – 5V
Tipo de conector	Requiere una tarjeta adicional o PCB.	Requiere diseñar un PCB	Requiere diseñar un PCB
Distribuidor local	Importación.	Importación	Electrotec.pe
Precio	46 USD	50 USD	68 USD

Se eligió la primera opción por tres razones clave: cumple con todos los requisitos de medición, el fabricante es especializado en sensores de laboratorio, y resulta la solución más práctica al ser compatible con un shield de la misma marca que facilita las conexiones.

Debido a la selección de este sensor, se usará la siguiente probeta:

Tabla 3.24: Características técnicas probeta pH. Fuente: elaboración propia.

Descripción	Alternativa
Marca	Atlas Scientific 
Variable leída	pH
Rango	0 – 14
Calibración	Calibración de fábrica
Precisión	+/- 0.002
Distribuidor local	Importación
Precio	230 USD

### 3.3.4.6 Sensor de conductividad

Se requiere seleccionar un sensor de conductividad eléctrica para el área de cultivo; a continuación, se presenta la tabla comparativa de los modelos disponibles:

Tabla 3.25: Sensores de conductividad. Fuente: elaboración propia.


Descripción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Marca	Atlas Scientific 	DFROBOT 	Grove 
Código	EZO™ Conductivity Circuit	Sensor de C.E. analógico	EC sensor kit
Rango	0.07 – 500,000+ $\mu$ S/cm	0 - 20 ms/cm	0- 2000 us/cm
Precisión	+/- 2%	Sin información	Sin información
Protocolo de datos	UART & I2C	UART & I2C	I2C
Alimentación	3.3V – 5V	3.3V – 5V	3.3V – 5V
Tipo de conector	Requiere una tarjeta adicional o PCB.	Requiere diseñar una PCB	Requiere diseñar una PCB

Distribuidor local	Importación.	Importación	Importación
Precio	68 USD	80 USD	30 USD

Se eligió la primera opción por tres razones clave: cumple con todos los requisitos de medición, el fabricante es especializado en sensores de laboratorio, y resulta la solución más práctica al ser compatible con un shield de la misma marca que facilita las conexiones.

Debido a la selección de este sensor, se usará la siguiente probeta:




Tabla 3.26: Características técnicas del sensor de CE seleccionado. Fuente: elaboración propia.

Descripción	Alternativa
Marca	Atlas Scientific 
Variable leída	Conductividad eléctrica
Rango	10 $\mu$ S/cm – 1 S/cm
Calibración	Calibración de fábrica
Precisión	+/- 2%
Distribuidor local	Importación
Precio	180 USD

### 3.3.4.7 Sensor de CO<sub>2</sub>

Se requiere seleccionar un sensor de CO<sub>2</sub> para el área de cultivo; a continuación, se presenta la tabla comparativa de los modelos disponibles:

Tabla 3.27: Sensores de CO2. Fuente: elaboración propia.




Descripción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Marca	Atlas Scientific 	DF Robot 	Winsen 
Código	EZO™ CO2 Carbon Dioxide Sensor	MG 811	MH Z19
Rango	0 – 10,000 ppm	350 - 10 000 ppm	0 - 5000 ppm
Precisión	(+/- 5%) + (+/- 50 ppm)	Sin información	5%
Protocolo de datos	UART & I2C	Analógico	UART
Alimentación	3.3V – 5V	3.3V – 5V	3.3V – 5V
Tipo de conector	Requiere una tarjeta adicional o PCB.	Requiere diseñar una PCB.	Requiere diseñar una PCB.
Distribuidor local	Importación.	Mouser Electronics	Naylamp mechatronics
Precio	167 USD	60 USD	100 USD

Se eligió la primera opción por tres razones clave: cumple con todos los requisitos de medición, el fabricante es especializado en sensores de laboratorio, y resulta la solución más práctica al ser compatible con un shield de la misma marca que facilita las conexiones.

### 3.3.4.8 Sensor de temperatura de solución nutritiva

Se requiere seleccionar un sensor de temperatura para el área de cultivo; a continuación, se presenta la tabla comparativa de los modelos disponibles:

Tabla 3.28: Sensores de temperatura RTD. Fuente: elaboración propia.

Descripción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Marca	Atlas Scientific 	Genérico 	Genérico 
Código	EZO RTD Circuit	RTD PT100	RTD PT100

Rango	-126.000 - 1254 °C	-100 hasta 400°C	-200 hasta 200 °C
Precisión	+/- (0.1 + 0.0017 x °C)	Sin información	Sin información
Protocolo de datos	UART & I2C	Analógico	Analógico
Alimentación	3.3V – 5V	3.3V – 5V	3.3V – 5V
Tipo de conector	Requiere una tarjeta adicional o PCB.	Requiere diseñar una PCB.	Requiere diseñar una PCB.
Distribuidor local	Importación.	Importación	Importación
Precio	33 USD	20 USD	80 USD

Se eligió la primera opción por tres razones clave: cumple con todos los requisitos de medición, el fabricante es especializado en sensores de laboratorio, y resulta la solución más práctica al ser compatible con un shield de la misma marca que facilita las conexiones.

Debido a la selección de este sensor, se usará la siguiente probeta:




Tabla 3.29: Probeta RTD seleccionada. Fuente: elaboración propia.

Descripción	Alternativa
Marca	Atlas Scientific
Descripción	Industrial PT-1000
Variable leída	Temperatura RTD
Rango	-55 °C to 220 °C
Calibración	Calibración de fábrica
Precisión	+/- (0.15 + (0.002*t))
Distribuidor local	Importación
Precio	70 USD

### 3.3.4.9 Sensor de luminosidad

Se requiere seleccionar un sensor de luminosidad para el área de cultivo; a continuación, se presenta la tabla comparativa de los modelos disponibles:

Tabla 3.30: Sensores de luminosidad. Fuente: elaboración propia.




Descripción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Marca	Seed Studio 	Adafruit 	Adafruit 
Código	Seed Studio Industrial Light Intensity Sensor	TSL2591	VEML7700
Rango	Hasta 200000 lux	188 - 88 000 Lux	0 – 12000 Lux
Protocolo de datos	I2C	I2C	I2C
Alimentación	3.9V – 30V	3 – 5 V	3 – 5 V
Tipo de conector	M12	Requiere diseñar una PCB.	Requiere diseñar una PCB.
Distribuidor local	Importación.	Mouser Electronics	Importación
Precio	70 USD	20 USD	35 USD

Se optó por la primera alternativa debido a tres razones clave: cumple con todos los requisitos de medición, el fabricante es especializado en sensores de laboratorio y es la opción más práctica al contar con conector M12.

#### 3.3.4.10 Selección de bombas peristálticas

Se requiere seleccionar las bombas peristálticas para el dosificado de nutrientes; a continuación, se presenta la tabla comparativa de los modelos disponibles:

Tabla 3.31. Bombas peristálticas. Fuente: elaboración propia.

Descripción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Marca	Atlas Scientific 	Yanmis 	Intllab 
Código	EZO-PMP™ Embedded Dosing Pump	-	-

Flujo	0.5ml to 105ml/min	0 - 150 ml/min	19 - 100 ml/min
Precisión	+/- 1%	Sin información	Sin información
Protocolo de datos	UART & I2C	Analógico	Analógico
Alimentación	3.3V – 5V	3.3V – 5V	3.3V – 5V
Tipo de conector	Requiere una tarjeta adicional o un PCB.	Requiere diseñar un PCB.	Requiere diseñar un PCB.
Distribuidor local	Importación.	Importación	Importación
Precio	95 USD	50 USD	75 USD

Se seleccionó la primera alternativa debido a tres razones principales: en primer lugar, satisface todos los requerimientos de medición; en segundo lugar, el fabricante es especialista en sensores para laboratorios; finalmente, es la solución más práctica ya que se puede acoplar a una placa de la misma marca que facilita las conexiones.

#### 3.3.4.11 Selección de bomba de suministro

El correcto suministro de la solución nutritiva es necesario en los cultivos hidropónicos; esto se realiza mediante una bomba. La siguiente tabla compara las alternativas de bombas de suministro.

Tabla 3.32. Tabla de bomba de suministro. Fuente: elaboración propia.

Descripción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Marca	Seaflo 	Sobo 	EcoPlus 
Voltaje de operación	12 VDC	12 VDC	12 VDC
Corriente consumida	13 A	12 A	15 A
Galones x hora	250 gal. a 3 metros	260 gal. a 3 metros	280 gal. a 3 metros
Distribuidor local	Hidroponika.pe	Hidroponika.pe	Hidroponika.pe
Precio (soles)	250	300	280

Según Zipgrow, la elección adecuada de la bomba sumergible depende de la cantidad total de solución nutritiva a desplazar, que es la suma de los galones en cada nivel de cultivo. En nuestro caso, con 45 litros de agua por nivel, se recomienda desplazar al menos 135 litros cada dos horas.

- Solución nutritiva por desplazar = 3 niveles \* 45 Litros/nivel
- Solución nutritiva por desplazar = 135 L = 35.66 galones

Se recomienda seleccionar una bomba sumergible de 36 GPH, diseñada para elevar el líquido a una altura determinada utilizando la fórmula proporcionada por Zipgrow.

- Altura por transportar = 2 pies + HH

HH es la diferencia entre la altura del cultivo más alto y la posición de la bomba sumergible, que, en este caso, se encuentra a nivel del suelo. El tercer nivel se sitúa a una distancia máxima de dos metros (6.56 pies).

- Por lo tanto: Altura a transportar = 2 pies + 6.56 pies = 8.56 pies.

Se escogió la primera alternativa de bomba de suministro debido a que cumple con los requisitos tanto de flujo y de la altura a transportar. En el siguiente grafica se puede apreciar lo anteriormente mencionado.

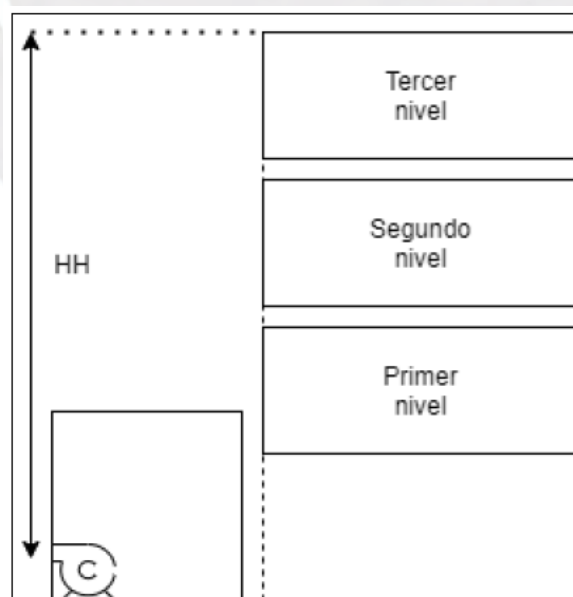


Figura 3.7: Característica de la bomba. Fuente: elaboración propia.

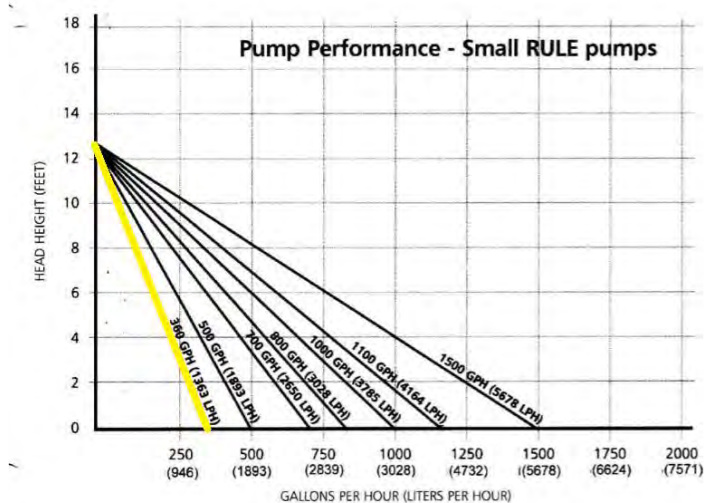





Figura 3.8: Performance de la bomba. Fuente: Zipgrow.

### 3.3.5 Selección de indicadores luminosos

#### 3.3.5.1 Selección de baliza

Se requiere seleccionar una baliza para mostrar el estado en el que se encuentra el sistema; a continuación, se presenta la tabla comparativa de los modelos disponibles:

Tabla 3.33: Alternativas de balizas industriales. Fuente: elaboración propia.

Descripción	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Marca	Murrelektronik 	Siemens 	Schneider Electric 
Código	4000-76705-5310000	8WD4423-5AK05-0AE0	Tower Light Module Flashing
Colores	Verde, ambar y rojo	Verde, ambar y azul.	Verde, ambar y rojo
Tipo de conector	M12	Borneras simples	M12
Distribuidor local	TECHPRO	Control y tecnología	CEYESA
Precio (soles)	1000	1500	2000

Se seleccionó la primera alternativa debido a tres razones principales: en primer lugar, está disponible localmente; en segundo lugar, cuenta con conector plug & play M12; finalmente, es la solución más práctica.

### 3.3.6 Cables y accesorios de cableado requeridos

#### 3.3.6.1 Box multipin

Se usarán boxes multipines para mostrar organizar el cableado de los sensores y salidas del sistema; a continuación, se presenta las principales características:

Tabla 3.34: Características del box multipin. Fuente: elaboración propia.

Descripción	Alternativa
Marca	Murrelektronik 
Material	PUR
# Entradas	8
Tipo de conector	M12
Distribuidor local	TECHPRO
Precio (soles)	200

#### 3.3.6.2 Conectores M12

Se usarán conectores M12 para que los cables de los sensores y actuadores se puedan conectar a los boxes multipines; a continuación, se presenta las principales características:

Tabla 3.35: Características de los conectores M12. Fuente: elaboración propia.

Descripción	Alternativa
Marca	MURRELEKTRONIK
# Polos	3
Tipo de conector	M12
Distribuidor local	TECHPRO
Precio (soles)	50

### 3.3.6.3 Cables armados

Se usarán cables armados con conectores M12 para que los cables de los sensores y actuadores se puedan conectar a los boxes multipines; a continuación, se presenta las principales características:


Tabla 3.36: Características de los cables armados. Fuente: elaboración propia.

Descripción	Alternativa
Marca	MURRELEKTRONIK
Material	PUR
# Polos	3
Longitud	5 metros
Tipo de conector	M12
Distribuidor local	TECHPRO
Precio (soles)	120

### 3.3.6.4 Tarjeta de lectura de sensores

Se empleará una tarjeta PCB de la marca Atlas Scientific para facilitar la lectura e integración de sensores con la Raspberry Pi. A continuación, se detallan sus principales características:

Tabla 3.37: Característica del PCB Atlas Scientific. Fuente: elaboración propia.

Descripción	Alternativa
Marca	Atlas Scientific 
Nombre	Whitebox T3
Ventajas	No requiere cableado, no requiere soldar (modular) y se conecta hasta 5 dispositivos EZO™.
Comunicación	I2C
Precio (dolares)	100

### 3.4 Diseño de la interfaz de usuario

El usuario utilizará el sistema a través del HMI desarrollado en TwinCAT3, que consta de tres pantallas: principal, control manual e información de sensores. A continuación, se detallará el proceso para iniciar un nuevo ciclo de cultivo:

En la pantalla principal, al hacer clic en el rectángulo "Cultivando arúgula", se despliega una lista de hortalizas. Selecciona la hortaliza deseada y presiona el botón "Iniciar nuevo ciclo de cultivo". Automáticamente se suministran los nutrientes en las cantidades establecidas, formando la solución nutritiva, y luego se inicia el ciclo de irrigación.

Se mostrará en la pantalla principal la fecha, hora, día de cultivo actual y fecha estimada. Las alarmas y emergencias se visualizarán según se muestra en la figura siguiente:



Figura 3.9: Pantalla principal – HMI. Fuente: elaboración propia.

En caso de sea necesario forzar el encendido o el apagado tanto de los leds, la bomba de suministro, la activación de la cámara y la del servomotor se podrá hacer mediante la pantalla de control manual.

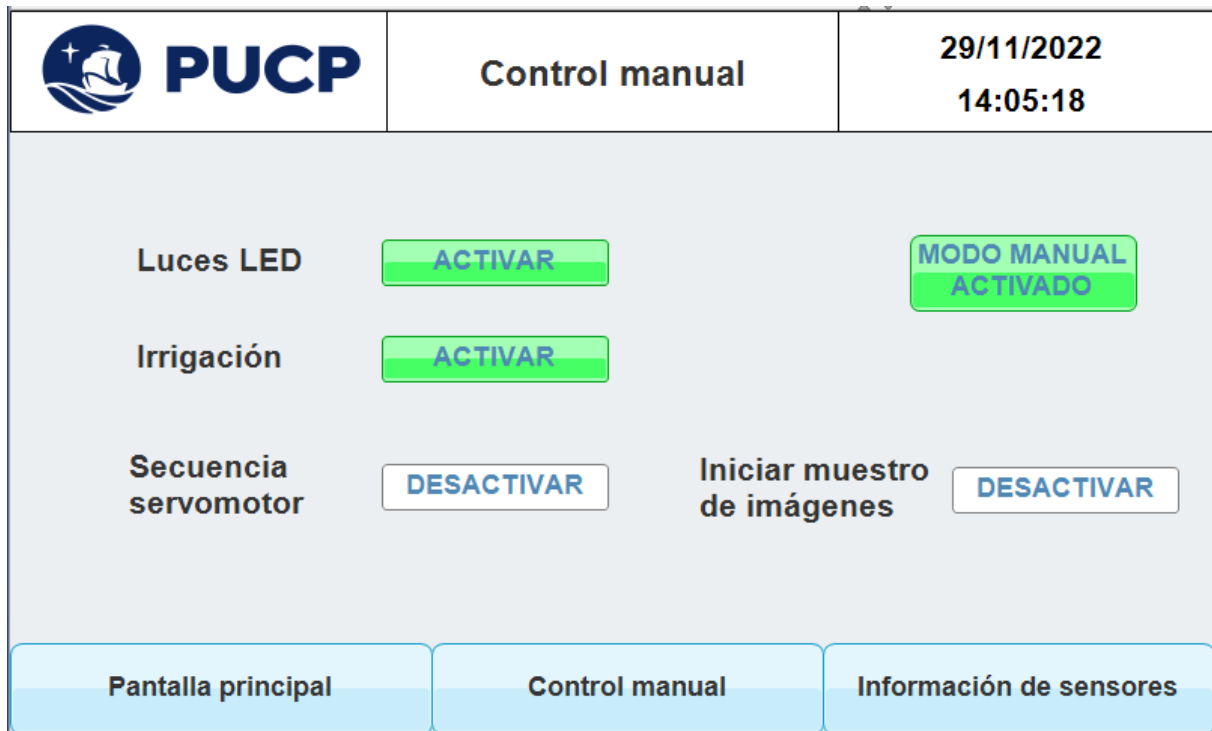


Figura 3.10: Pantalla control manual – HMI. Fuente: elaboración propia.

La última pantalla llamada “información de sensores” es netamente informativa y mostrará la data obtenida por los sensores del sistema.



Figura 3.11: Pantalla información de sensores – HMI. Fuente: elaboración propia.

### 3.5 Diseño de circuitos electrónicos y eléctricos

El subsistema eléctrico y electrónico se divide en dos componentes esenciales: el subsistema de control y el subsistema de potencia, cada uno con funciones específicas para asegurar eficiencia y seguridad.

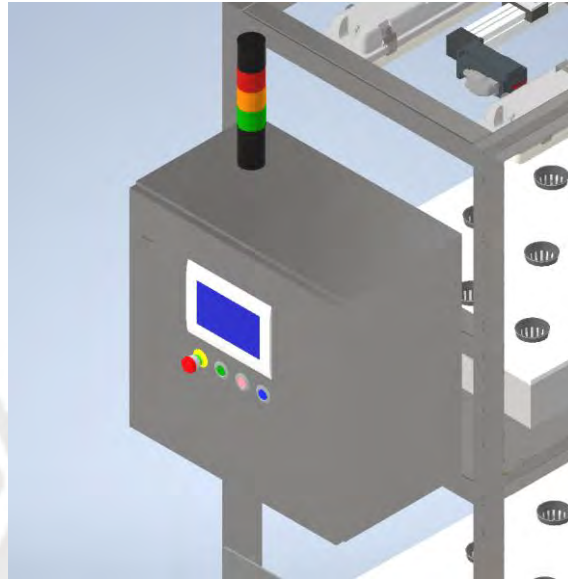


Figura 3.12: Vista isométrica del tablero eléctrico, diseño realizado en Inventor. Fuente: Elaboración propia.

La gestión energética es crucial para la tesis, ya que se parte de un suministro inicial de 220 VAC a 60 Hz. Para alimentar la computadora industrial (IPC), se utiliza una llave seccionadora general que dirige la energía hacia dos interruptores termomagnéticos: uno de control y otro de potencia.

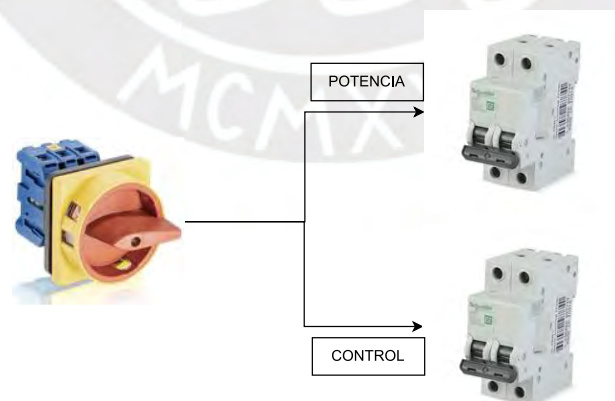


Figura 3.13: Circuitos eléctricos 1. Fuente: elaboración propia.

El interruptor de control activa la fuente de alimentación que convierte la energía a 24 VDC. Esta fuente alimenta el protector de cargas electrónico, esencial para proteger equipos

sensibles, como los de control, contra fluctuaciones y ruido eléctrico en la red. Además de prevenir daños, el protector facilita la detección de problemas como cortocircuitos o conexiones defectuosas.

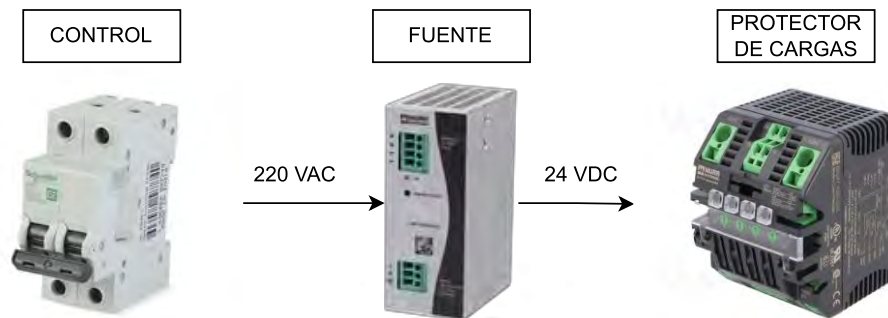


Figura 3.14: Circuitos eléctricos 2. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, el interruptor de potencia dirige la energía hacia actuadores y equipos que requieren alimentación directa a 220 VAC, como la bomba de suministro, luces LED y servomotores.

La computadora industrial se conecta al acoplador remoto a través de un cable EtherCAT RJ45 tras recibir energía. Este acoplador, alimentado por el protector de cargas electrónico, recibe señales de sensores ultrasónicos, botones y pulsadores, y energiza las salidas digitales del sistema.

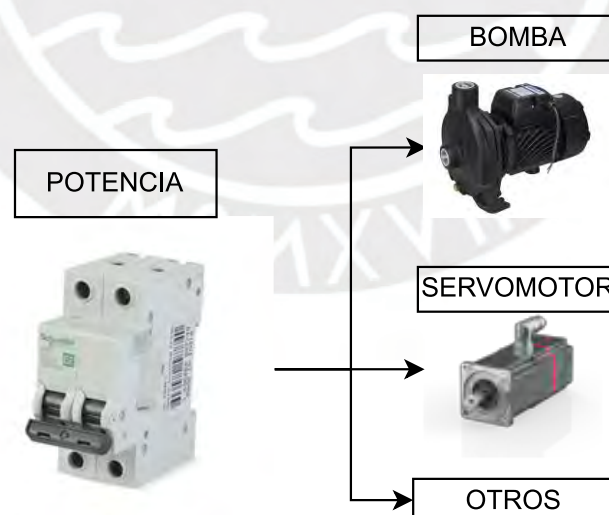


Figura 3.15: Circuitos eléctricos 3. Fuente: elaboración propia.

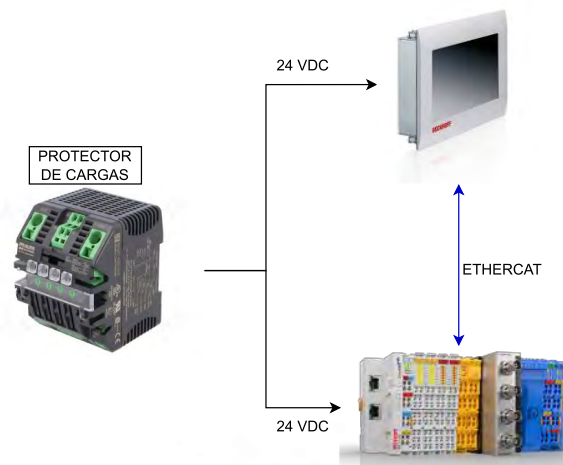


Figura 3.16: Circuitos eléctricos 4. Fuente: elaboración propia.

El microprocesador recibe su alimentación a través de un convertidor de 24 VDC a 5VDC, alimentado previamente por el protector de cargas electrónico.

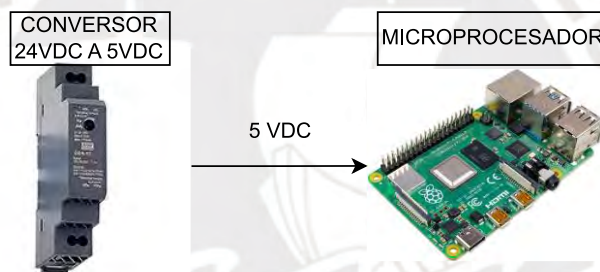


Figura 3.17: Circuitos eléctricos 5. Fuente: elaboración propia.

Las conexiones entre el acoplador remoto, las entradas/salidas (E/S) y la PCB se realizan a través de conectores M8 para sensores y periféricos. Estos conectores se enchufan en boxes multipines con slots M8, transmitiendo señales al tablero eléctrico. Esta estrategia, estándar en la industria, promueve un enfoque "plug & play" que simplifica las operaciones.



Figura 3.18: Boxes multipines. Fuente: Murrelektronik.

La implementación de estos elementos garantiza un suministro eléctrico eficiente y adaptado a las necesidades específicas de cada componente, asegurando la integridad de los equipos y simplificando la operatividad del sistema.

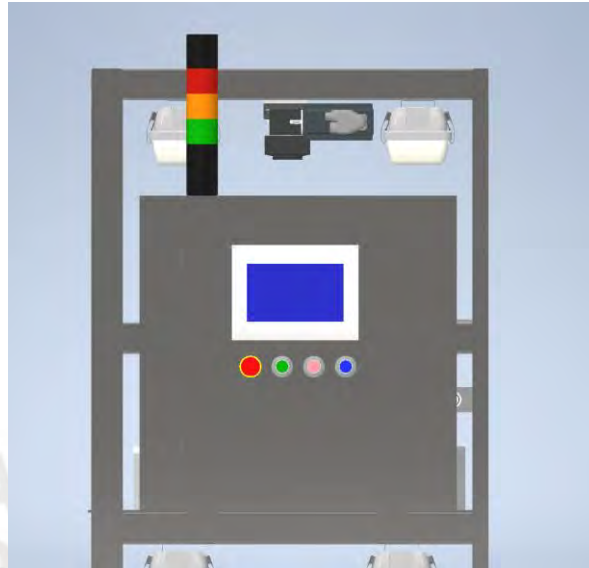


Figura 3.19: Vista frontal del tablero eléctrico, diseño realizado en Inventor. Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.1 Circuitos electrónicos

Se incorporaron shields de la marca Atlas Scientific a la arquitectura de hardware existente para simplificar las conexiones con los sensores. Sin embargo, surgió un desafío con el sensor de luz, que requería un diseño de PCB específico para facilitar la comunicación, ya que el shield estaba limitado a sensores de la misma marca. Para resolver este problema, se desarrolló una PCB personalizada que permitió la conexión de los cables del sensor a los pines del Raspberry Pi, estableciendo así la comunicación a través del protocolo I2C.

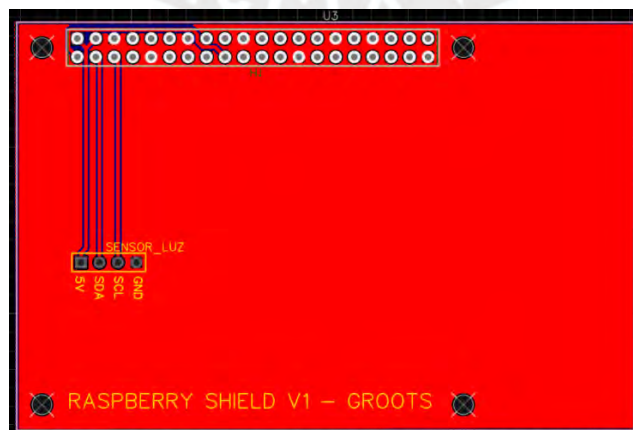


Figura 3.20: PCB diseñada. Fuente: elaboración propia.



Figura 3.21: Vista 3D del PCB diseñado. Fuente: elaboración propia.

Esta adición estratégica no solo enriquece la funcionalidad del sistema al incorporar un sensor adicional, sino que demuestra la capacidad de adaptación y personalización del diseño para satisfacer las necesidades específicas del proyecto.

### 3.5.2 Circuitos eléctricos

A continuación, se presenta un bosquejo del subsistema eléctrico propuesto según la arquitectura diseñada que nos permite comprender las conexiones propuestas:

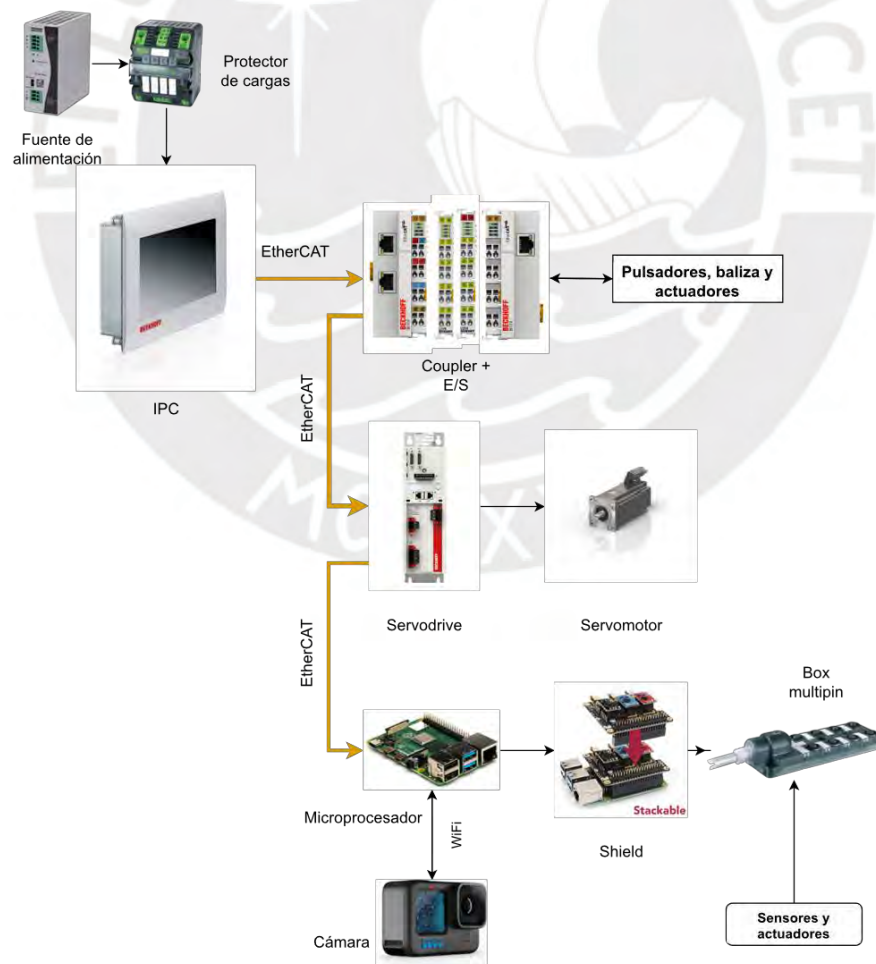


Figura 3.22: Diagrama de conexiones. Fuente: elaboración propia.

### 3.6 Diseño mecánico

La propuesta óptima implica un diseño con una estructura principal que aloja niveles de cultivos, soportes del eje lineal, un tablero eléctrico y accesorios adicionales.

- **Estructura principal:** El diseño de la estructura se llevó a cabo utilizando el software Inventor, empleando tubos cuadrados de acero inoxidable de 50 mm x 50 mm x 2 mm. Se eligió este material conforme a estándares industriales y su disponibilidad en el mercado peruano. Se presenta una representación visual digitalizada del esqueleto con énfasis en las especificaciones de la estructura (ver figura 3.23).



Figura 3.23: Estructura principal. Fuente: Elaboración propia.

- **Soporte del eje lineal:** Se utilizó un perfil estructural DIN 59370 de 50 mm de lado, 5 mm de espesor y 72 mm de largo para asegurar el eje lineal. Este perfil en forma de "L" fue soldado a la estructura mecánica para asegurar su estabilidad. Además, se sujetó mediante pernos Allen al accesorio proporcionado por el fabricante del eje lineal, garantizando un montaje firme (ver figura 3.24).

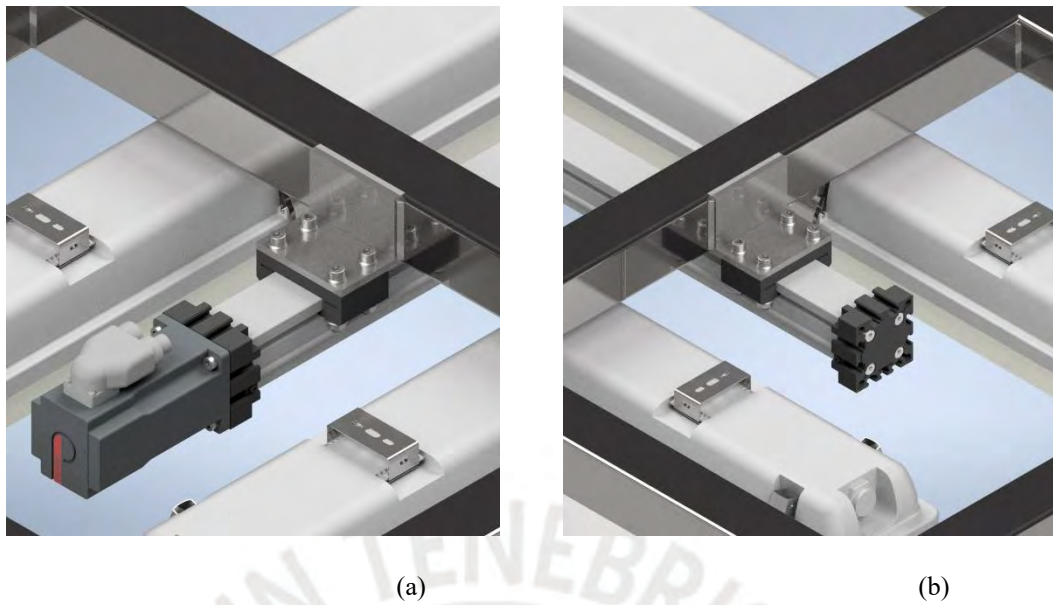


Figura 3.24: (a) y (b) soportes de fijación para eje lineal. Fuente: Elaboración propia.

- **Soporte para el tablero eléctrico:** El tablero eléctrico contiene equipos de control, como la computadora industrial, el acoplador y la fuente de energía. Se fija a la estructura principal con pernos roscados en la parte trasera, garantizando un anclaje firme y estable. Además, se apoya en la estructura principal (ver figura 3.25).

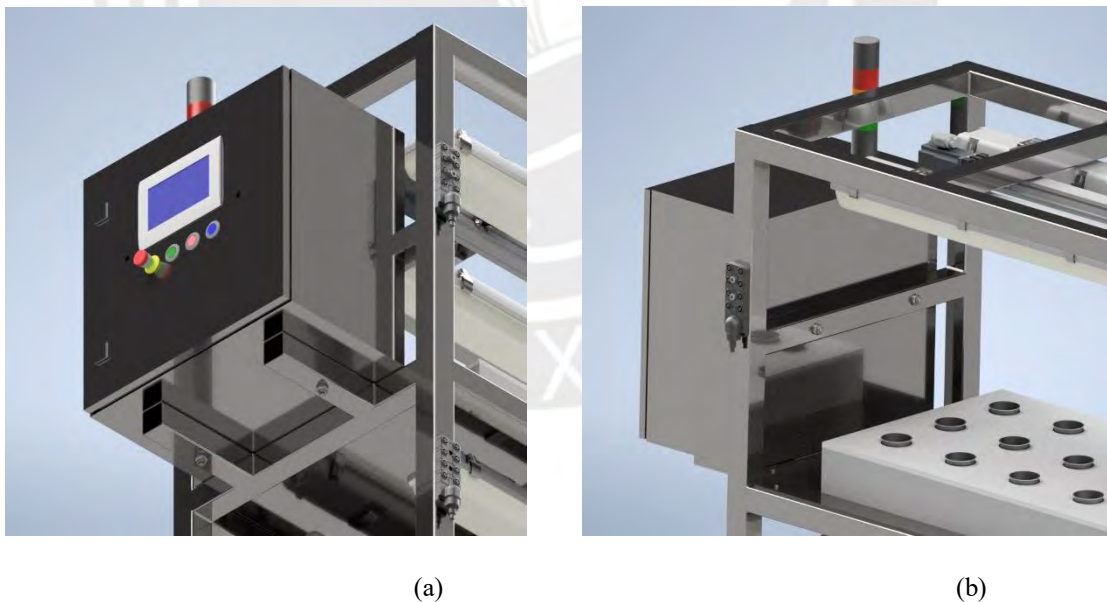


Figura 3.25: (a) y (b) vistas del soporte para tablero eléctrico. Fuente: Elaboración propia.

- **Accesorios para los sensores:** La integración eficiente de sensores en la estructura se logra mediante portasensores ajustables que posibilitan una calibración precisa y adaptación de la distancia a ubicaciones específicas. Estos portasensores, compuestos

por placas metálicas con agujeros para los sensores, aseguran una sujeción óptima. Asimismo, se han fijado boxes multipines a la estructura principal mediante pernos Allen para recibir las señales de los sensores (ver figura 3.26).

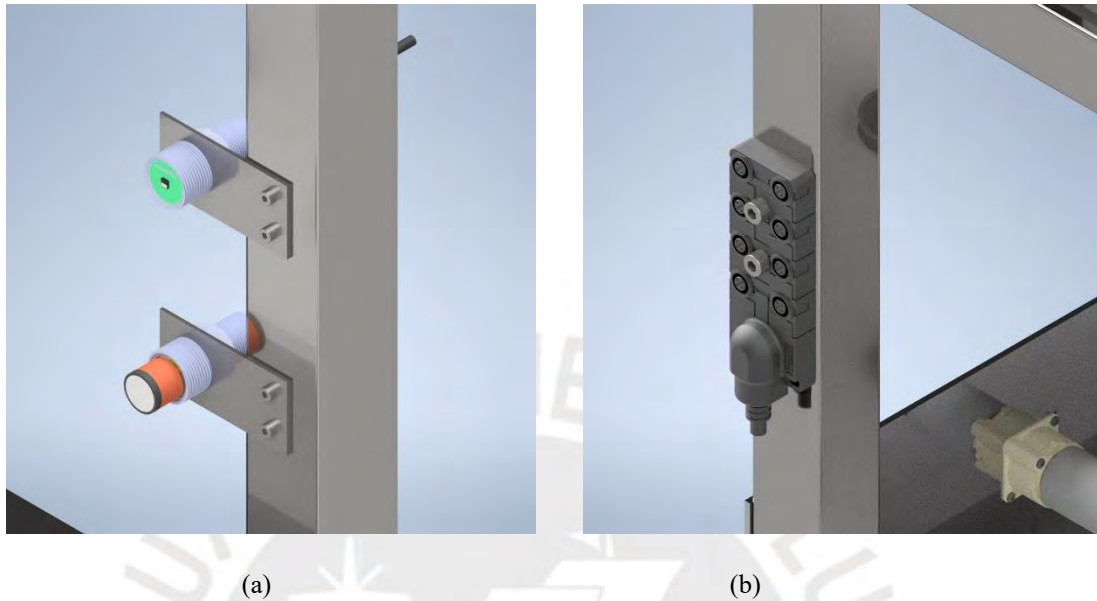


Figura 3.26: (a) Portasensores, (b) Box multipin. Fuente: Elaboración propia.

- **Consideraciones sobre las patas:** Se han elegido patas de acero inoxidable según el estándar industrial, fijadas a la estructura mediante placas roscadas en la parte inferior. Este diseño permite ajustar la altura según necesidades específicas y facilita el montaje (ver figura 3.27).

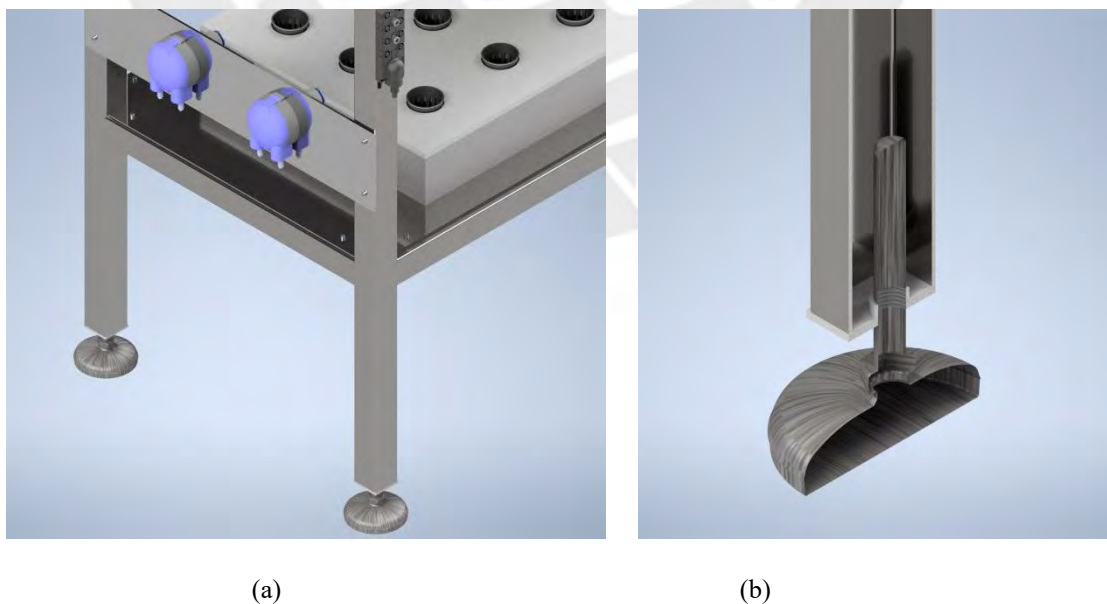


Figura 3.27: (a) Vista isométrica de los soportes de la estructura, (b) Vista sección de los soportes. Fuente: Elaboración propia.

### 3.6.1 Análisis mecánico para la evaluación de la rigidez y resistencia

Para asegurar la resistencia y rigidez de la estructura que sostiene los reservorios de cultivos, las luces LEDs, el eje lineal con el servomotor y el tablero de control, se llevó a cabo un análisis detallado del factor de seguridad y desplazamiento mediante el software Inventor. Estos procesos son fundamentales en el diseño estructural para evaluar la seguridad y confiabilidad, proponiendo soluciones eficientes que optimicen la seguridad y economía de fabricación.

En el diseño estructural, se consideraron las fuerzas en newtons ejercidas sobre la estructura, teniendo en cuenta una capacidad de 50 litros por reservorio. Cada nivel debe soportar una carga estática de aproximadamente 490 newtons ( $50 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2$ ), que representa el peso del agua y el contenedor.

En relación con el tablero de control, se estima un peso total no superior a 50 kg, generando una fuerza neta de aproximadamente 490 newtons. Esto incluye el peso del eje lineal (aproximadamente 24 newtons) y del servomotor (aproximadamente 10 newtons).

Se establece un límite de 100 newtons (equivalentes a 10 kg) para el peso máximo del sistema de toma de imágenes, garantizando así que la estructura pueda resistir las fuerzas de todos sus componentes sin deformaciones ni daños.

Los resultados del análisis de factor de seguridad y desplazamiento con la teoría de Von Mises en el software Inventor indican que la estructura posee un factor de seguridad de 12 a 15, demostrando su resistencia adecuada para las cargas previstas y cumpliendo con las especificaciones de diseño. En la zona crítica, el desplazamiento máximo es de 0.1 mm (ver figura 3.29), dentro de los límites aceptables de deformación para garantizar el correcto funcionamiento.

Aunque los resultados indican que la estructura está sobredimensionada (ver figura 3.28), se ha conservado el uso del tubo cuadrangular estándar en la industria para garantizar la compatibilidad con otros componentes y equipos, a pesar de la posibilidad de realizar ajustes para reducir el factor de seguridad.

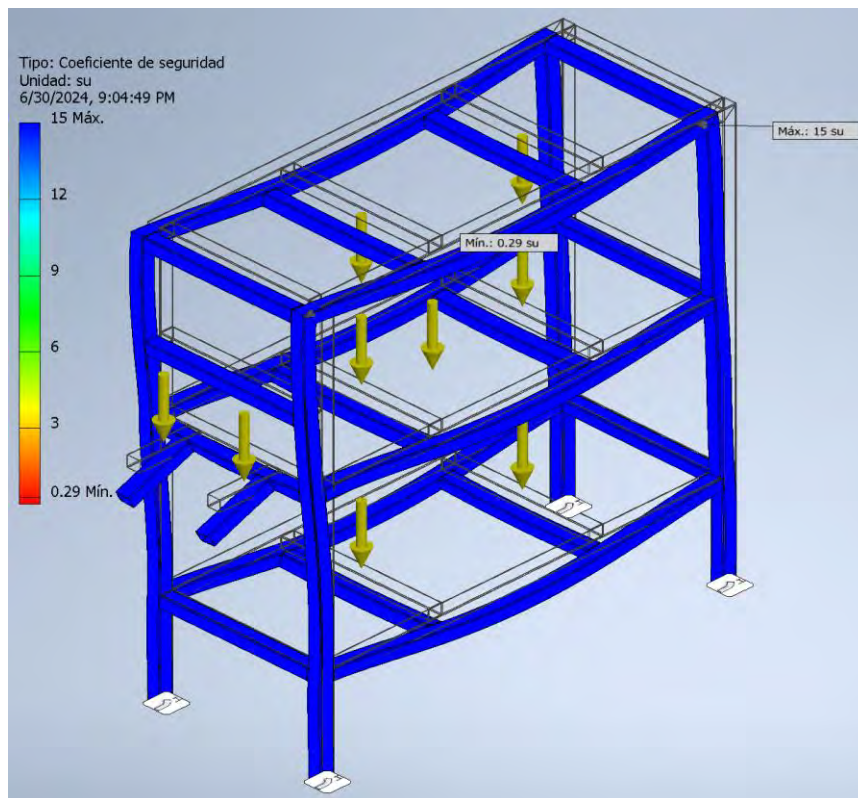


Figura 3.28: Simulación en Inventor - Factor de seguridad. Fuente: elaboración propia.

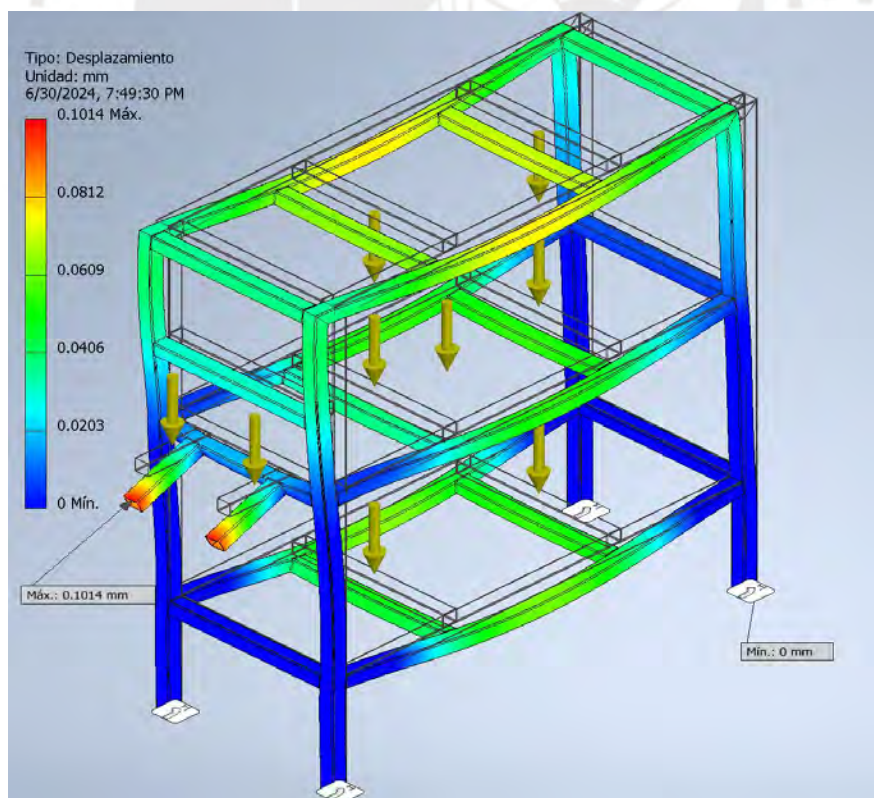


Figura 3.29: Simulación en Inventor - desplazamiento máx. Fuente: elaboración propia.

En resumen, los resultados indican que la estructura diseñada es segura y cumple con los requisitos de diseño para soportar las cargas previstas, garantizando así su confiabilidad.

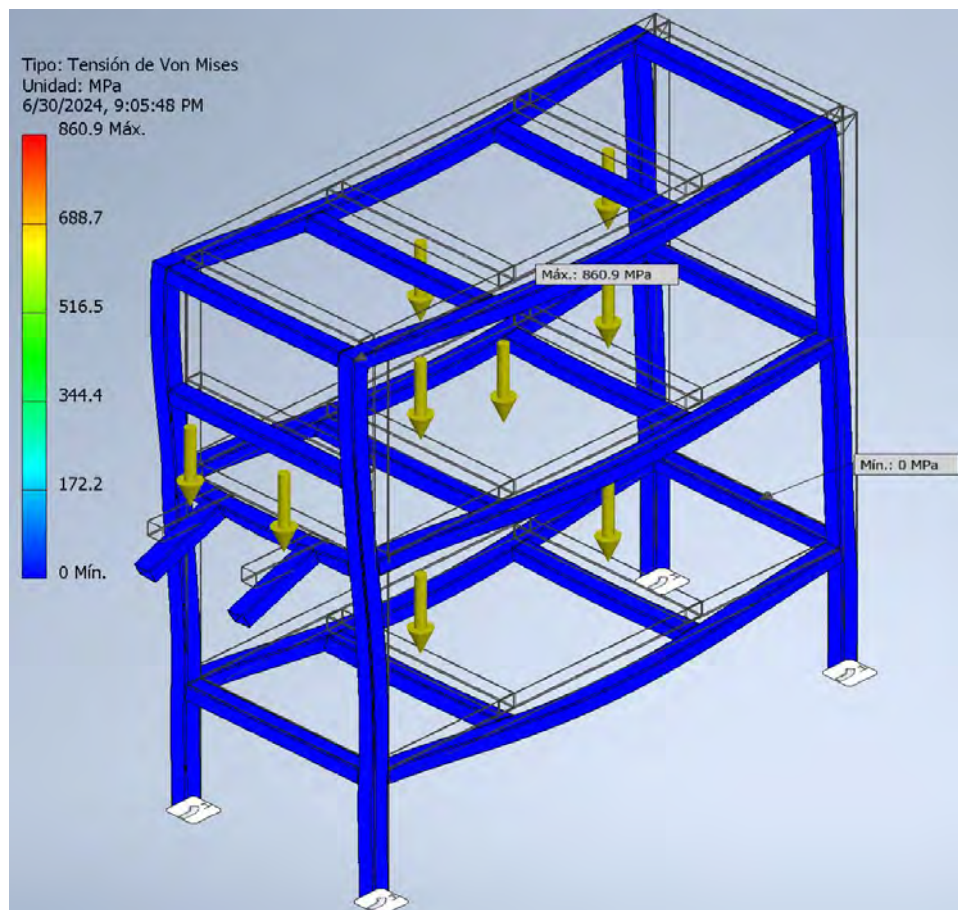


Figura 3.30: Simulación en Inventor - Von Mises Stress. Fuente: elaboración propia.

### 3.6.2 Imágenes renderizadas

A continuación, se presentan los renderizados del diseño final:



Figura 3.31: Vista isométrica - diseño final A. Fuente: elaboración propia.



Figura 3.32: Vista isométrica - diseño final B. Fuente: elaboración propia.

### 3.7 Subsistema de procesamiento de imágenes

A continuación, se describe el diseño del algoritmo de visión artificial para medir el crecimiento, el algoritmo de control del servomotor, y se ofrecen comentarios sobre los programas necesarios para el funcionamiento del microprocesador.

#### 3.7.1 Diseño e implementación del algoritmo de visión artificial

En este capítulo, se describen los detalles técnicos del diseño y la implementación de los algoritmos de visión artificial utilizados para medir el crecimiento de plantas en un sistema hidropónico. Estos algoritmos se centran en la estimación del área foliar y la relación píxel-milímetro.

Para ello tendremos en cuenta las siguientes consideraciones:

- A. Diámetro de las canastillas: 60 mm
- B. Etapa de crecimiento: 2 semanas
- C. Dimensiones de las imágenes: 773 px x 655 px

##### 3.7.1.1 Estimación de la relación píxel-milímetro

La medición del crecimiento de las plantas requiere de la estimación de la relación píxel-milímetro (px-mm). Este capítulo detalla el método implementado, incluyendo el uso de algoritmos de segmentación como K-means y técnicas de detección de bordes para definir los contornos de las plantas. La figura 3.33 representa el diagrama de bloques del algoritmo desarrollado.

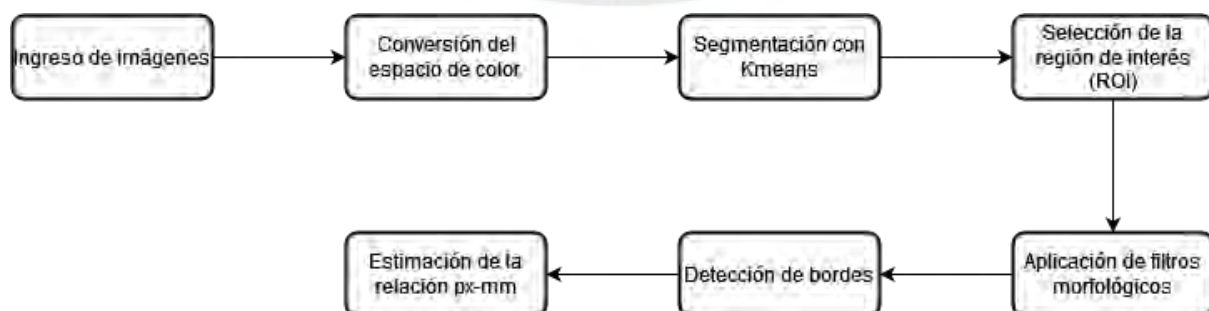


Figura 3.33: Diagrama de bloques de algoritmo 1. Fuente: elaboración propia.

### 3.7.1.1.1 Espacio de color CIELAB

El algoritmo utiliza el espacio de color CIELAB, ya que estudios previos han demostrado que es más eficaz para la medición del área foliar en comparación con los espacios de color RGB y HSV, debido a su mayor sensibilidad y especificidad en una tarea similar (Loresco et al., 2020). En la imagen Figura 3.34 se puede ver la imagen original y la conversión del espacio de color.



Figura 3.34: Conversión a cielab. Fuente: elaboración propia.

### 3.7.1.1.2 Segmentación con Kmeans

Para la segmentación de las imágenes, se utilizó un algoritmo de clasificación no supervisado K-means, con el objetivo de obtener solo la canastilla. La selección del número de clústeres se realizó utilizando el “método del codo”.

El método del codo es importante en K-means para determinar el número óptimo de clústeres (ver figura 3.36) al identificar el punto donde la adición de más clústeres no mejora significativamente la variabilidad intra-cluster, ayudando así a evitar el sobreajuste o la subajuste del modelo. En la imagen Figura 4.1 se puede ver que el punto de inflexión se encuentra con un número de clusters igual a 3. En la siguiente figura 3.35 se puede ver los tres clústeres generados.

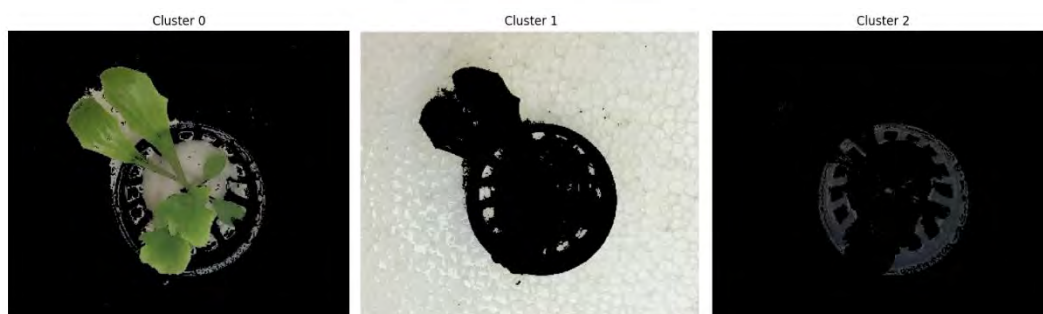


Figura 3.35: Clústeres generados. Fuente: elaboración propia.

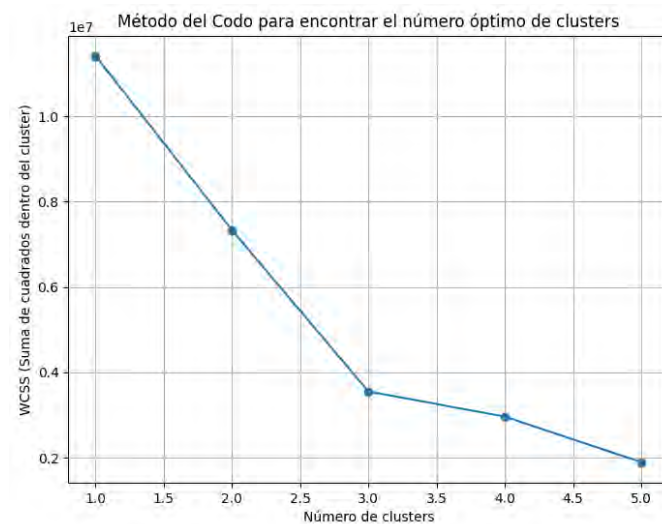


Figura 3.36: Número óptimo de clústeres 1. Fuente: elaboración propia.

### 3.7.1.1.3 Selección de la región de interés (ROI)

Se seleccionó el clúster correspondiente a la canastilla, que contiene las plántulas. Luego, se binarizó la imagen para facilitar el procesamiento posterior.

En este caso se seleccionó el clúster número 2 ya que es el que contiene la canastilla.

### 3.7.1.1.4 Aplicación de filtros morfológicos

Se aplicaron operaciones de dilatación y erosión utilizando un elemento estructurante circular de 5x5 píxeles para mejorar la detección de bordes y reducir el ruido. En la siguiente figura 3.37 se puede ver el kernel seleccionado, la imagen luego de la dilatación y luego de la erosión.

Detalles Técnicos:

- Tipo de kernel: Elemento estructurante circular
- Tamaño del kernel: 5x5 píxeles
- Iteraciones de dilatación: 2
- Iteraciones de erosión: 2

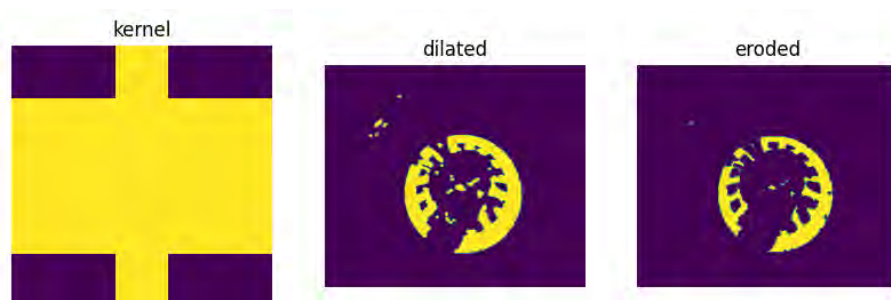


Figura 3.37: Filtros morfológicos 1. Fuente: elaboración propia.

### 3.7.1.1.5 Detección de bordes

Para la detección de bordes se utilizó el filtro Sobel, que permite identificar los contornos de las hojas de manera precisa. En la figura 3.38 se puede apreciar la imagen luego de aplicar el filtro sobel en el eje horizontal, vertical.



Figura 3.38: Filtros aplicados 1. Fuente: elaboración propia.

#### Detalles Técnicos:

- Filtro Sobel en dirección X: Sobel (image, CV\_64F, 1, 0, ksize=5)
- Filtro Sobel en dirección Y: Sobel (image, CV\_64F, 0, 1, ksize=5)
- Tamaño del kernel Sobel: 5x5

### 3.7.1.1.6 Estimación de la Relación Diámetro de Canastillas y Píxeles

Finalmente, se encontró el contorno más grande de la imagen, se calculó el diámetro y se superpuso una línea para medir la cantidad de píxeles del diámetro (ver imagen 3.39).

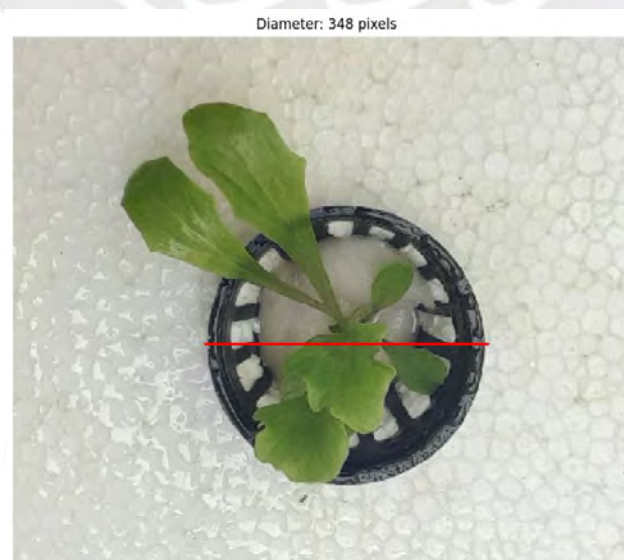


Figura 3.39: Relación pixel-mm. Fuente: elaboración propia.

Podemos obtener en este ejemplo la relación pixel-mm estaría dada por:

$$px\_to\_mm = \frac{diametro\_canastilla}{pixeles\_estimados} = \frac{60\text{ mm}}{348\text{ pixeles}}$$

### 3.7.1.2 Estimación del área foliar

Este capítulo detalla el método implementado para estimar el área foliar, incluyendo el uso de algoritmos de segmentación como K-means y técnicas de detección de bordes para definir los contornos de las plantas. La figura 3.40 representa el diagrama de bloques del algoritmo desarrollado.



Figura 3.40: Diagrama de bloques de algoritmo 2. Fuente: elaboración propia.

#### 3.7.1.2.1 Espacio de color CIELAB

Para comenzar el procesamiento, se carga la imagen de la planta y se convierte al espacio de color CIELAB similar al proceso anterior. (Ver Figura 3.41)



Figura 3.41: Conversión a espacio de color cielab. Fuente: elaboración propia.

### 3.7.1.2.2 Segmentación con Kmeans

Para la segmentación de las imágenes, se utilizó el algoritmo de clasificación no supervisado K-means, con el objetivo de separar solo las hojas. La selección del número de clústeres se realizó utilizando el método del codo.

En la siguiente imagen Figura 3.42 se puede ver que el punto de inflexión se encuentra con un número de clústeres igual a 3.

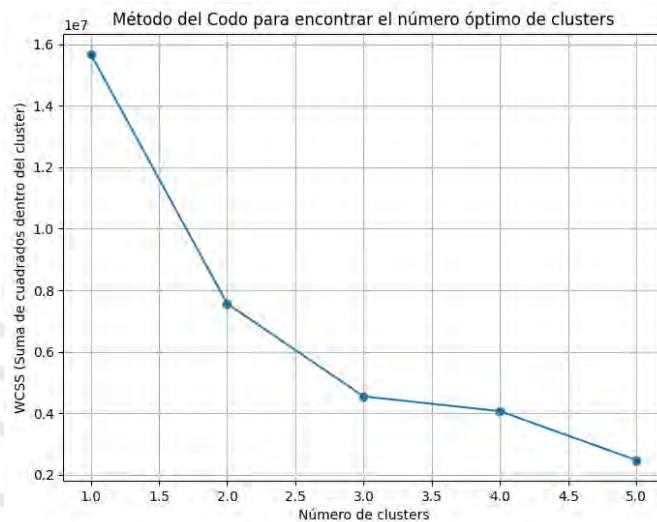


Figura 3.42: Número óptimo de clústeres. Fuente: elaboración propia.

### 3.7.1.2.3 Selección de la región de interés (ROI)

El clúster que contiene las hojas se identifica y se utiliza como región de interés (ROI). Esta selección se basa en la asignación de etiquetas por K-means y permite enfocar el análisis únicamente en las partes relevantes de la imagen. En la figura 3.43 se puede ver que el cluster de interés es el 1.

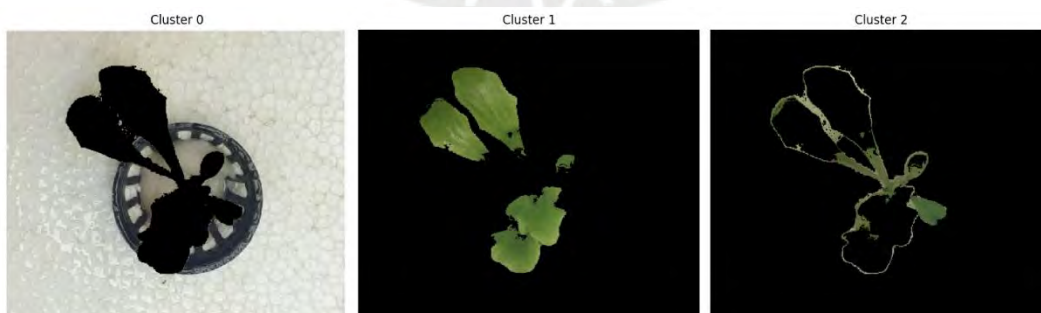


Figura 3.43: Clústeres generados 2. Fuente: elaboración propia.

#### 3.7.1.2.4 Detección de bordes

Se aplican filtros Sobel para detectar los bordes de las hojas en la imagen binarizada. Esto facilita la posterior segmentación y medición del área foliar.

#### 3.7.1.2.5 Aplicación de filtros morfológicos

Para mejorar la precisión en la detección de bordes y eliminar el ruido, se aplica una secuencia de operaciones morfológicas: dilatación con un kernel rectangular de 3x3, cierre, apertura y erosión con un kernel elíptico de 3x3. Estas operaciones mejoran la continuidad de los bordes detectados, esenciales para la estimación precisa del área foliar (ver figura 3.44).

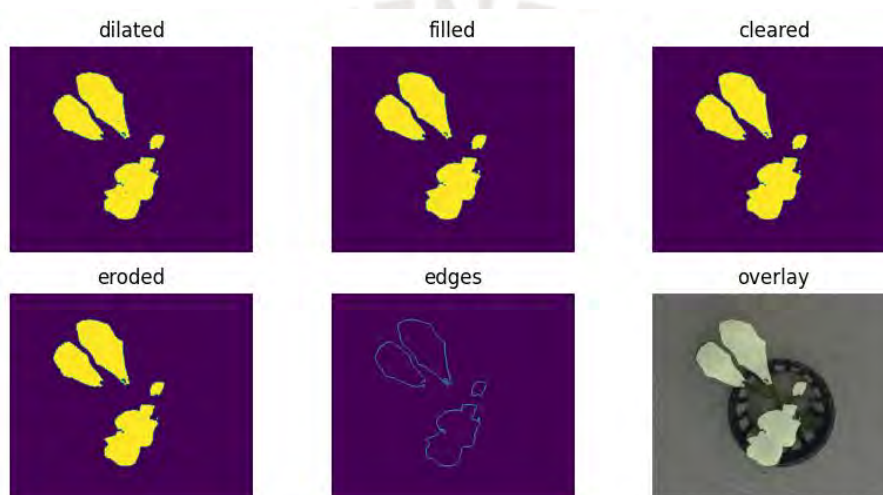


Figura 3.44: Filtros morfológicos aplicados 2. Fuente: elaboración propia.

#### 3.7.1.2.6 Estimación del Área Foliar

Finalmente, se utiliza la función `drawContours` de OpenCV para el relleno de la región generada por los bordes. Luego, se calcula el área foliar en píxeles y se convierte a unidades métricas, considerando el factor de conversión de píxeles a milímetros cuadrados (ver figura 3.45).



Figura 3.45: Estimación de área foliar - planta 06. Fuente: Elaboración propia.

Fórmula para la conversión del área foliar:

$$area\_region\_mm2 = area\_foliar * px\_to\_mm^2$$

Conversión a cm2:

$$area\_region\_cm2 = \frac{area\_region\_mm2}{100}$$

### 3.7.2 Diseño del algoritmo de control del servomotor

Se utilizó el lenguaje de programación de texto estructurado, según la normativa IEC 61131-3, para controlar el servomotor. Se incorporó la lógica de control de brazos robóticos, como los de los robots Kuka, que incluyen paradas de pausa y emergencia. La parada de pausa finaliza la secuencia en una posición específica, mientras que la parada de emergencia detiene el servomotor instantáneamente, requiriendo recalibración.

En el diseño del algoritmo, se adoptó el enfoque de máquina de estados del libro "Controles PLC con texto estructurado". Se utiliza la variable MainSeq para modificar el estado del servomotor, iniciada en cero. Se incluyen botones de inicio, pausa y parada de emergencia. La secuencia normal se ejecuta si no se activan los botones de pausa ni emergencia. El botón de pausa detiene el subsistema en una posición específica, mientras que el de emergencia detiene instantáneamente el servomotor. Es importante destacar que los botones de inicio y pausa son normalmente abiertos, y el de emergencia es normalmente cerrado según normas de seguridad.

Siguiendo las pautas de Beckhoff para el control, se inicia reseteando el servomotor con MC\_Reset. Luego, se habilita y energiza el servo mediante MC\_Power, y se referencia el eje con la información del encoder. El movimiento se controla con MC\_MoveAbsolute. Para detener el servomotor de manera controlada, se utiliza MC\_Halt; mientras que MC\_Stop detiene el eje por emergencia, requiriendo una nueva referencia para continuar la secuencia.

En esta fase, el movimiento es "point to point", con tres ubicaciones predefinidas para el desplazamiento de la cámara.

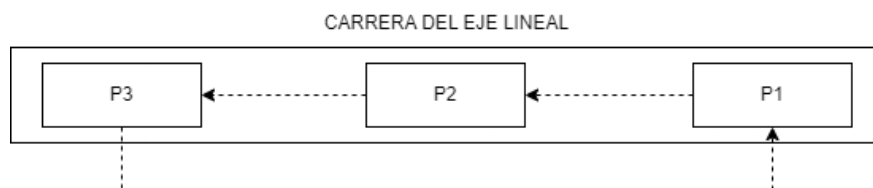


Figura 3.46: Trayectoria de la cámara. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presenta el esquema del algoritmo de control del servomotor:

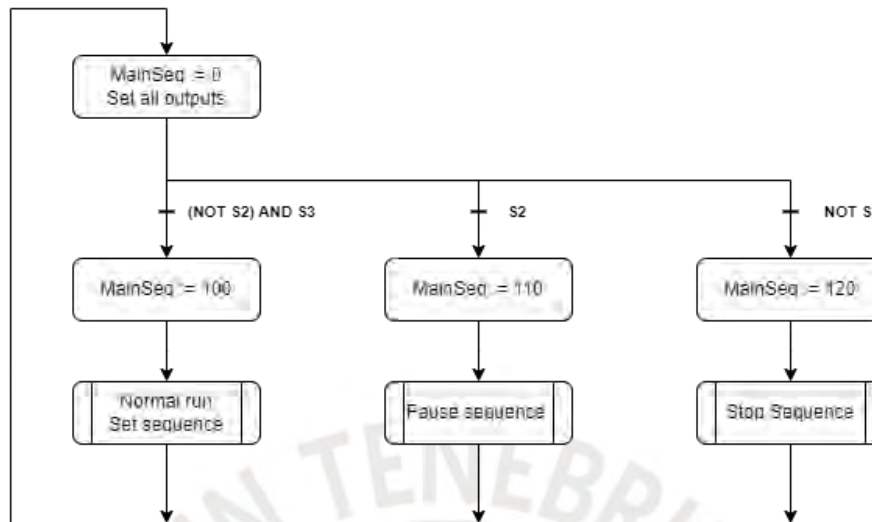


Figura 3.47: Algoritmo propuesto. Fuente: elaboración propia.

Donde:

- S1: botón de inicio,
- S2: botón de pausa
- S3: botón de emergencia

En los anexos se exponen las librerías y subprogramas empleados en el control del servomotor. Se utiliza lenguaje de programación estructurado, siguiendo una máquina de estados que refleja la lógica de los brazos robóticos. El proceso implica pasos como resetear el servomotor, habilitar y energizar el actuador, referenciar el eje y usar bloques específicos para las paradas.

### 3.7.3 Sobre los programas en el microprocesador

El proyecto implica recopilar fotos mediante una cámara conectada a una Raspberry Pi, analizar el crecimiento de hortalizas en las imágenes y enviar la información vía EtherCAT a una computadora industrial. Para lograrlo, se deben seguir pasos como configurar la comunicación entre la Raspberry Pi y el acoplador EtherCAT con la librería PySOEM de Python. También se puede utilizar aplicaciones IoT como DroidCam para la conexión entre la Raspberry Pi y la cámara del celular a través de WiFi o USB. Se requiere la creación de un programa para establecer la comunicación y almacenar las fotos en la Raspberry Pi. Finalmente, la información del análisis se transmite mediante el programa desarrollado para la comunicación con EtherCAT.

La Figura 3.48 muestra un ejemplo de la configuración mencionada, donde se observa la conexión de la Raspberry Pi con el acoplador EtherCAT utilizando el software de CODESYS.

Para establecer la conexión entre la Raspberry Pi y el coupler de EtherCAT, se puede consultar tutoriales en línea para instalar los controladores necesarios en la Raspberry y configurar el software de automatización. La comunicación con TwinCAT3, que emplea el compilador de CODESYS, resulta sencilla mediante este método.

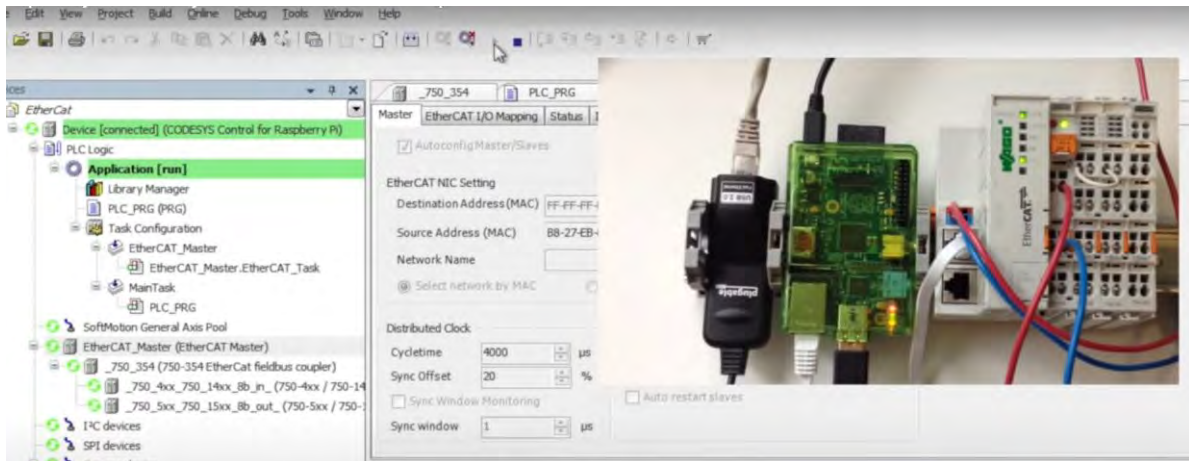


Figura 3.48: Ejemplo de comunicación EtherCAT de Codesys – Raspberry. Fuente: Kurt Braun (2015).

La tesis se centra exclusivamente en el desarrollo del algoritmo para analizar el crecimiento de hortalizas en imágenes, abordado detalladamente en el capítulo de visión. Se realizaron pruebas utilizando Matlab debido a su amplia variedad de librerías para el procesamiento de imágenes. No obstante, se sugiere la migración a la librería OpenCV en Python para la implementación total del programa en la Raspberry Pi. Esta elección se basa en la capacidad de OpenCV para replicar de manera simple y eficiente los filtros empleados en el programa de Matlab.

### 3.8 Planos mecánicos y electrónicos

Se requiere la elaboración de planos en las áreas de diseño mecánico y subsistemas de control eléctrico y electrónico para documentar los avances. Los detalles de los planos mecánicos, eléctricos y electrónicos se encuentran en los anexos de la tesis.

#### 3.8.1 Planos mecánicos

A continuación, se presenta una tabla que resume los planos mecánicos realizados:

Tabla 3.38: Lista de planos mecánicos. Fuente: elaboración propia.

IT	Nombre	Descripción
1	Ensamble general	Ensamble de la estructura principal, incluye tablero eléctrico, soporte para sensores, entre otros.
2	Estructura principal	Estructura de acero inoxidable (esqueleto).
3	Plancha soporte peristálticas	Plancha utilizada para albergar a las bombas peristálticas.
4	Soporte bombas peristálticas	Ensamble de la plancha de soporte y las bombas peristálticas.
5	Soporte de eje lineal	Soporte utilizado por el eje lineal para fijarlo a la estructura principal.
6	Tablero eléctrico	Ensamble del tablero de control (baliza, panel PC, botones.)

### 3.8.2 Planos eléctricos

A continuación, se presenta una tabla que resume los planos eléctricos realizados:

Tabla 3.39: Lista de planos eléctricos. Fuente: elaboración propia.

IT	Nombre	Descripción
1	Listado de componentes 1	Lista de equipos eléctricos y electrónicos - parte 1.
2	Listado de componentes 2	Lista de equipos eléctricos y electrónicos - parte 2.
3	Leyenda de simbología	Simbología de los planos.
4	Alimentación general	Plano del seccionador y alimentación general.
5	Fuente de alimentación Murr	Alimentación de la fuente de 24VDC.
6	Protector de cargas - Mico	Conexiones del protector de cargas.
7	Alimentación servodrive	Conexiones eléctricas del servodrive.
8	Conexión servomotor	Conexiones eléctricas del servomotor.
9	Alimentación switch	Conexiones eléctricas del switch.
10	Alimentación panel PC	Conexiones eléctricas del panel PC.
11	Alimentación E/S EtherCAT	Módulos de entradas y salidas EtherCAT.
12	Conexión entradas EL1008	Conexiones del módulo de entradas digitales.
13	Conexión salidas EL2008	Conexiones del módulo de salidas digitales.
14	Conexión salidas EL2008 - K	Conexiones del módulo de salidas digitales a las cargas.
15	Alimentación raspberry	Conexiones eléctricas del raspberry.
16	Sensores raspberry	Conexiones eléctricas de las entradas del microprocesador.
17	Bombas peristálticas raspberry	Conexiones eléctricas del raspberry con las bombas peristálticas.
18	Listado de componentes	Diagrama de conexiones general.

### 3.8.3 Planos electrónicos

A continuación, se presenta una tabla que resume los planos electrónicos realizados:

Tabla 3.40: Lista de planos electrónicos. Fuente: elaboración propia.

IT	Nombre	Descripción
1	Raspberry shield V1 - groots A	PCB del shield desarrollado para un sensor.
2	Raspberry shield V1 - groots B	Vista 3D del shield.
3	Esquemático raspberry	Plano esquemático de las conexiones del raspberry.



## CAPÍTULO 4: SIMULACIONES Y PRUEBAS

La tesis se enfoca en dos aspectos críticos: el algoritmo de visión artificial, que debe funcionar correctamente, y el algoritmo de control del servomotor, que debe ser validado. A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones realizadas para ambos algoritmos.

### 4.1 Algoritmo de visión artificial

Este capítulo describe las simulaciones realizadas para validar los dos algoritmos de visión artificial propuestos para medir el crecimiento de plantas en un sistema hidropónico. Los algoritmos se enfocan en la estimación del área foliar y la relación píxel-milímetro. Se presentan los resultados obtenidos y se analizan los datos para evaluar el rendimiento de los algoritmos.

Para realizar las simulaciones, se utilizó un sistema compuesto por:

- A. Número total de plántulas analizadas: 6 (ver imagen 4.1)
- B. Diámetro de las canastillas: 60 mm
- C. Etapa de crecimiento: 2 semanas
- D. Fotografías tomadas por: Smartphone Galaxy Note 8
- E. Dimensiones de la imagen: 773 px x 655 px

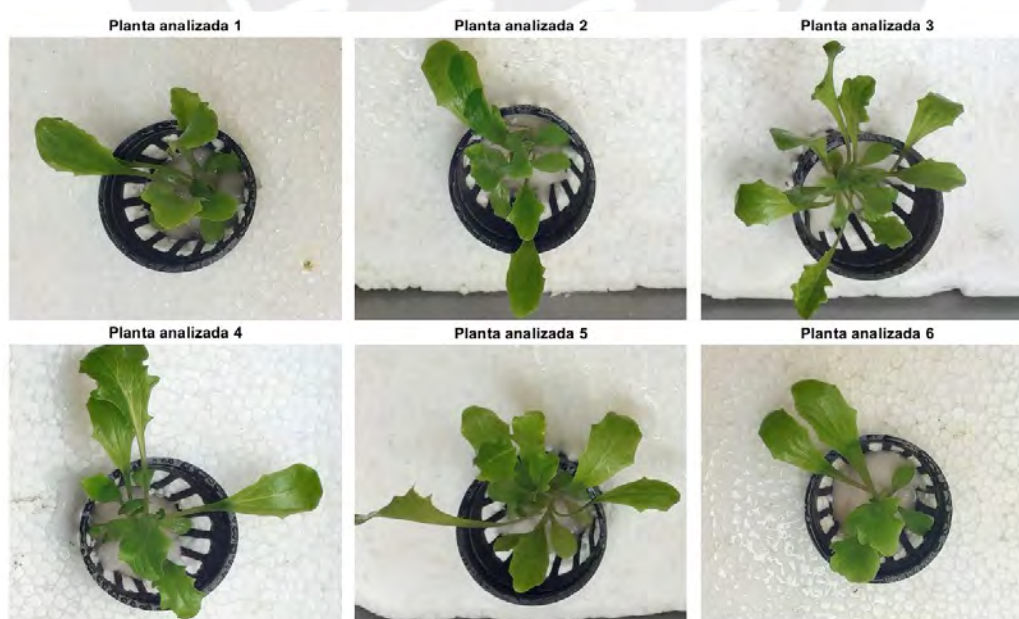


Figura 4.1: Plántulas analizadas. Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.1 Simulaciones del Algoritmo de Estimación de Relación Píxel-Milímetro

##### 4.1.1.1 Proceso de Segmentación

Para la estimación de la relación píxel-milímetro, se implementó el siguiente flujo de trabajo (ver figura 4.2):

1. **Conversión al espacio de color CIELAB:** Las imágenes se convirtieron al espacio de color CIELAB.
2. **Segmentación con K-means:** Se aplicó el algoritmo K-means para segmentar la imagen. El número óptimo de clústeres se determinó usando el método del codo, resultando en 3 clústeres.
3. **Selección de la región de interés (ROI):** Se seleccionó el clúster correspondiente a la canastilla que contiene las plántulas.
4. **Aplicación de filtros morfológicos:** Se aplicaron operaciones de dilatación y erosión para mejorar la detección de bordes y reducir el ruido. El kernel utilizado fue un elemento estructurante circular de 5x5 píxeles.
5. **Detección de bordes:** Se utilizó el filtro Sobel para identificar los contornos de las hojas.
6. **Estimación de la relación píxel-milímetro:** Se encontró el contorno más grande de la imagen y se midió el diámetro en píxeles para calcular la relación píxel-milímetro.

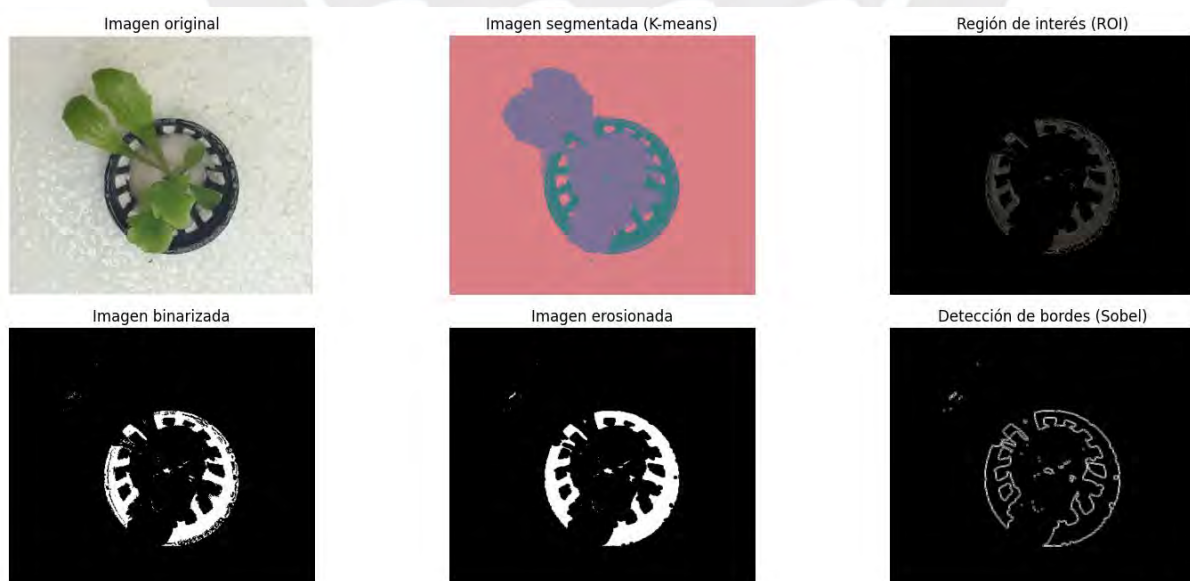


Figura 4.2: Simulación del algoritmo píxel-mm. Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.1.2 Resultados

Este algoritmo se ejecutó solo una vez para hallar la relación deseada y se obtuvo el siguiente resultado:

- Diámetro de Canastilla Estimado: 348 píxeles
- Relación píxel-milímetro:  $60 \text{ mm} / 348 \text{ píxeles} \approx 0.172 \text{ mm/px}$

### 4.1.2 Simulaciones del Algoritmo de Estimación de Área Foliar

#### 4.1.2.1 Proceso de Segmentación

Para la estimación del área foliar, se siguió un proceso similar (ver figura 4.3):

1. Conversión al espacio de color CIELAB
2. **Segmentación con K-means:** El número óptimo de clústeres se determinó como 3.
3. **Selección de la región de interés (ROI):** Se seleccionó el clúster que contenía las hojas.
4. **Detección de bordes:** Aplicación de filtros Sobel.
5. **Aplicación de filtros morfológicos:** Dilatación, cierre, apertura y erosión con un kernel elíptico de 3x3 píxeles.
6. **Estimación del área foliar:** Uso de la función drawContours de OpenCV para rellenar la región generada por los bordes y calcular el área en píxeles (ver figura 4.4).

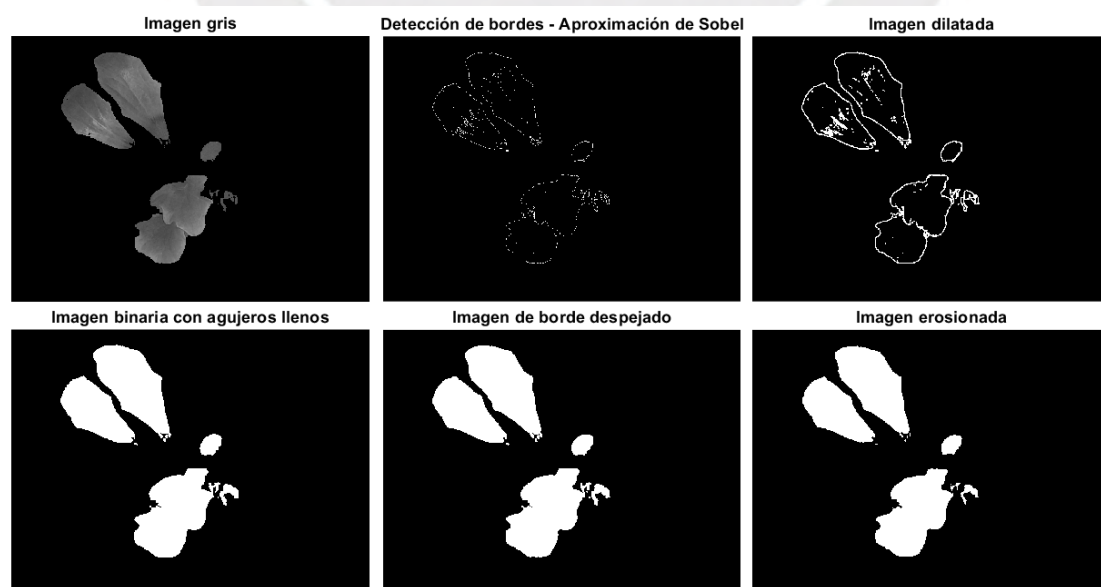


Figura 4.3: Aplicación de filtros seleccionados. Fuente: elaboración propia.

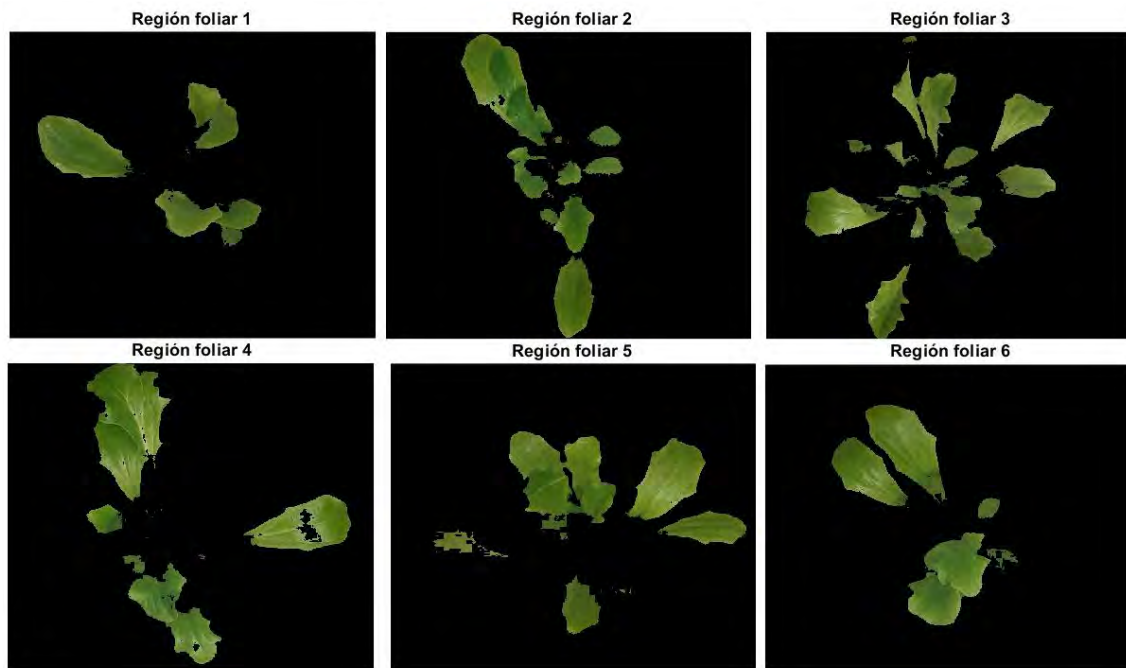


Figura 4.4: Área foliar de las plántulas. Fuente: elaboración propia.

#### 4.1.2.2 Resultados

Se ejecutó el algoritmo una vez para cada planta analizada, observando que el área detectada cubre casi toda la superficie foliar de las hojas. Sin embargo, existen zonas donde la detección es difícil debido a las condiciones de iluminación en las fotografías y las limitaciones del algoritmo. A continuación, se presenta la Tabla 4.1, que resume los resultados de las simulaciones:

Tabla 4.1: Resumen de simulaciones. Fuente: elaboración propia.

Planta	Área Foliar Estimada (píxeles)	Conversión a mm <sup>2</sup>	Conversión a cm <sup>2</sup>
1	57,886	1,720.75	17.21
2	68,536	2,037.34	20.37
3	53,154	1,580.08	15.8
4	64,801	1,926.31	19.26
5	107,795	3,204.37	32.04
6	53,325	1,585.17	15.85

### 4.1.3 Análisis de Resultados

Los algoritmos propuestos permiten obtener una estimación del área foliar de las hortalizas. Aunque los resultados no se han comparado con mediciones reales, las simulaciones realizadas proporcionan una base para evaluar su desempeño. La relación píxel-milímetro y la estimación del área foliar se calcularon a partir de estas simulaciones, utilizando el espacio de color CIELAB y la segmentación K-means para la identificación de regiones de interés y contornos.

Las simulaciones realizadas sugieren que los algoritmos tienen el potencial de ser robustos. Estos algoritmos pueden ser implementados en sistemas hidropónicos para la monitorización y análisis del crecimiento de plantas, ofreciendo una herramienta potencialmente eficiente para la agricultura de precisión.

Para más información sobre el código de los algoritmos revisar los anexos de la tesis.

## 4.2 Algoritmo de control del eje lineal con servomotor

La validación del algoritmo de control del servomotor es fundamental para esta tesis, ya que asegura la estabilidad del subsistema en la captura de imágenes y la ejecución de dos tipos de paradas. Para ello, se realizaron simulaciones y pruebas con equipos proporcionados por una empresa privada, implementando un programa capaz de controlar simultáneamente dos ejes lineales en un sistema cartesiano, que forma parte de un proyecto más amplio. A pesar de utilizar ejes distintos a los inicialmente propuestos, la lógica de control y la adaptación del servomotor fueron similares, lo que resultó valioso para la verificación del algoritmo.



Figura 4.5: Pruebas del algoritmo de control – servomotor. Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas confirman que el algoritmo propuesto cumple con los requisitos del sistema, permitiendo el desplazamiento preciso de la zona del gripper e incorporando los dos tipos de paradas necesarios. Se evaluaron diversas velocidades, se probó el software de programación y se ajustaron las rampas de aceleración para encontrar la configuración óptima. Es importante destacar que se siguieron todos los pasos previamente explicados, incluyendo el proceso de homing del servomotor, la habilitación de los servomotores y el movimiento posterior.

Para más detalles acerca de los resultados de las pruebas, se puede consultar el siguiente video: [https://www.youtube.com/watch?v=fhn00Z\\_SaDY](https://www.youtube.com/watch?v=fhn00Z_SaDY) (a partir del segundo 40)..



Figura 4.6: HMI desarrollado para pruebas. Fuente: elaboración propia.

Consideraciones técnicas de los equipos industriales utilizados en la simulación:

- **Servomotor modelo:** AM8062
- **Servodrive modelo:** AX5112-0000-0203

En esta simulación se emplearon equipos similares a los propuestos en la tesis, lo que permitió probar eficazmente el programa de control. A continuación, se presentan los parámetros PID obtenidos en este caso particular. Aunque estos parámetros no serán exactamente los mismos para los modelos de equipos planteados en la tesis, se obtuvieron de manera similar.

### Parámetros PID

Una de las ventajas de los servomotores y servodrive de Beckhoff es que la estimación de los parámetros PID es automática y no requiere configuraciones adicionales.

Para ejecutar el programa desarrollado en TwinCAT, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Ingresar a TwinCAT.
2. Crear un nuevo proyecto.
3. Escanear la red EtherCAT: este proceso, que se realiza con un solo clic, permite detectar todas las E/S del sistema, incluidos los servomotores y servodrives.
4. Crear el programa utilizando texto estructurado y Ladder.
5. En el programa, especificar las distancias deseadas para movimientos tanto relativos como absolutos, y ejecutar el programa.
6. Pasar del modo configuración al modo online: en este modo, se puede forzar el movimiento y visualizar los parámetros PID por defecto. Si es necesario modificar la aceleración o la velocidad, esto se hace mediante una interfaz intuitiva, y realizando pruebas en modo online se pueden observar los efectos de estas variaciones.

General Settings Parameter **Dynamics** Online Functions Coupling Compensation

Indirect by Acceleration Time

Maximum Velocity (V max): 2956.71 mm/s

Acceleration Time: 1 s

Deceleration Time:  as above 1 s

Acceleration Characteristic:  smooth stiff

Deceleration Characteristic:

a(t):

v(t):

Direct

Acceleration: 3784.59 mm/s<sup>2</sup>

Deceleration:  as above 3784.59 mm/s<sup>2</sup>

Jerk: 17301 mm/s<sup>3</sup>

Download Upload

Figura 4.7: Dinámica del servomotor configurado en TwinCAT. Fuente: Elaboración propia.

7. Para obtener los parámetros PID calculados por el programa TwinCAT, es necesario acceder al apartado de configuraciones del servodrive, el "Drive

Manager". Luego, en el canal A, en el "Controller Overview", se visualizarán los parámetros PID obtenidos.

8. De las pruebas realizadas con un eje lineal de características similares a las consideradas en la tesis y un servomotor del mismo modelo seleccionado, se obtuvieron los siguientes parámetros por defecto:

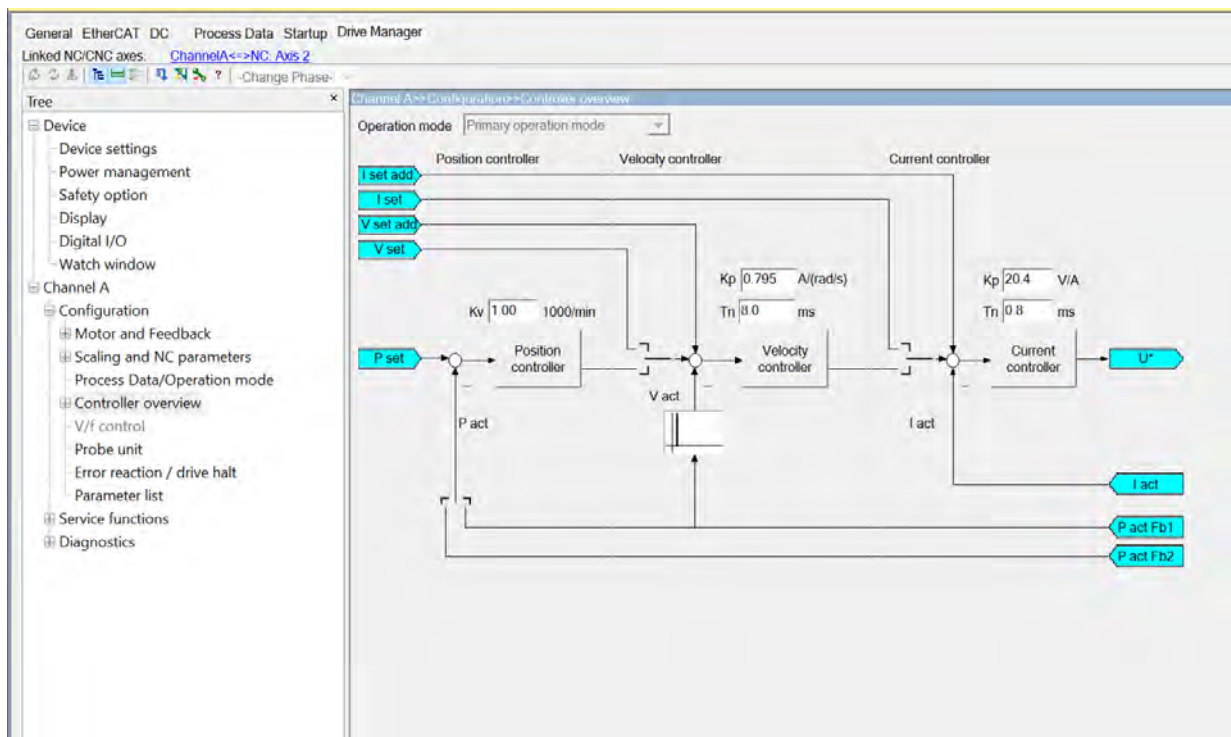


Figura 4.8: Parámetros PID del servodrive en TwinCAT. Fuente: elaboración propia.

## CAPÍTULO 5: ESTIMACIÓN DE COSTOS

En el quinto capítulo, se exploran a fondo los aspectos técnicos y financieros del proyecto. En la sección 5.1, se detallan los costos asociados con los equipos eléctricos y electrónicos requeridos para la implementación. A continuación, la sección 5.2 aborda específicamente los costos vinculados al diseño mecánico y la fabricación de los componentes del proyecto. Luego, en la sección 5.3 se examinan los costos relacionados con la programación y la implementación del proyecto en sí mismo. Finalmente, en la sección 5.4, se realiza un análisis exhaustivo del costo total del proyecto.

### 5.1 Equipos eléctricos y electrónicos

En la siguiente tabla se detalla los costos de los equipos eléctricos y electrónicos necesarios para el proyecto, basándose en una cotización de TECHPRO S.A.C., representante de BECKHOFF. Se incluyen también los costos de importación, servicios para el armado del tablero de control y el diseño del PCB. Asimismo, se consideran todos los gastos para la adquisición y puesta en marcha de los equipos del proyecto.

Tabla 5.1: Costos de equipos de control en dólares. Fuente: elaboración propia.

IT	DESCRIPCIÓN	CÓDIGO	MARCA	CANT	P. UNIT	P. TOTAL
1	ECO-RAIL-2 POWER SUPPLY 1-PHASE, IN: 90 ... 132 VAC / 173 ... 264 VAC OUT: 24V/5ADC	85133	MURR	1	\$ 107.00	\$ 107.00
2	MICO+ 4.6 electronic circuit protection, 4 CHANNELS IN: 24 V DC OUT: 24 V DC / 1-2- 4-6 A	9000-41084- 0100600	MURR	1	\$ 212.73	\$ 212.73
3	Residual current breaker with overcurrent protection (RCBO), Acti9 iC60, 2P, 16A, B curve, 10000A/15kA, A-SI type, 30mA	A9D47216	NA	2	\$ 118.42	\$ 236.84
4	SECCIONADOR 32A, 3P, IP40, 48X48MM, KG32A.K300/BRA503.E	KG32A.K300	NA	1	\$ 89.47	\$ 89.47
5	MIRO 6.2 24VDC-1U OUTPUT RELAY IN: 24 VDC - OUT: 250 VAC/DC / 6 A	6652000	MURR	2	\$ 36.30	\$ 72.60
6	Raspberry + cargador	Raspberry	NA	1	\$ 123.68	\$ 123.68

7	7-inch economy Panel PC CP6606-0001-0020 with ARM Cortex™-A8, 7-inch TFT display, resolution 800 x 480 WVGA, Display only, with single-touch screen	CP6606-0001-0020	BECKHOFF	1	\$ 750.26	\$ 750.26
8	EtherCAT Coupler for E-bus terminals (ELxxxx)	EK1100	BECKHOFF	1	\$ 77.39	\$ 77.39
9	EtherCAT Terminal, 8-channel digital input, 24 V DC, 3 ms	EL1008	BECKHOFF	1	\$ 44.41	\$ 44.41
10	EtherCAT Terminal, 8-channel digital output, 24 V DC, 0.5 A	EL2008	BECKHOFF	1	\$ 48.82	\$ 48.82
11	Digital Compact Servo Drive, 1-axis module, 100...480 V AC, rated output current 6 A, EtherCAT interface, OCT, hardware version 2.0	AX5106-0000-0200	BECKHOFF	1	\$ 1,072.30	\$ 1,072.27
12	Servomotor, 24...48 V DC, Mo = 0.5 Nm, Io = 4 A, nn = 3000 min-1	AM8121-1F10	BECKHOFF	1	\$ 408.49	\$ 408.49
13	Sensor ultrasonico	XX230A12N A00M12	NA	3	\$ 210.53	\$ 631.58
14	E-Stop 30 2NC M12(4) Emergency-Stop	69100	MURR	1	\$ 77.32	\$ 77.32
15	R-Button 30 1NO L M12(4) Illuminated reset button	69110	MURR	3	\$ 58.04	\$ 174.13
16	Sensor de humedad y temperatura ambiental	EZO™ Humidity Probe	NA	1	\$ 46.00	\$ 46.00
17	Sensor de pH más probeta	EZO™ pH	NA	1	\$ 276.00	\$ 276.00
18	Sensor de conductividad más probeta	EZO™ Conductivity	NA	1	\$ 248.00	\$ 248.00
19	Sensor de CO2	EZO™ CO2 Carbon Dioxide	NA	1	\$ 167.00	\$ 167.00
20	Sensor de temperatura de solución nutritiva más probeta	EZO™ RTD	NA	1	\$ 103.00	\$ 103.00
21	Sensor de luz	Seed Studio	NA	1	\$ 70.00	\$ 70.00
22	Bomba peristáltica	EZO-PMPT™ Dosing Pump	NA	1	\$ 95.00	\$ 95.00
23	Bomba de suministro	Seaflo	NA	1	\$ 65.79	\$ 65.79
24	Signal tower Modlight70 Pro equipped with LED modules green, amber, red, buzzer, M12 plug downward	4000-76705-5310000	MURR	1	\$ 280.40	\$ 280.40
25	EXACT12, 8XM12, 4 POLE MOULDED CABLE 5.0m PUR/PVC 8x0,34+3X0.75	8000-88410-3620500	MURR	2	\$ 63.36	\$ 126.73

26	M12 male 0° A-cod. IDC 4-pol., 0.25 - 0.5mm <sup>2</sup> , 4 - 5,1mm	7000-12481-0000000	MURR	16	\$ 10.84	\$ 173.39
27	M12 female 0° A-cod. with cable PUR 4x0.34 bk UL/CSA+drag ch. 5m	7000-12221-6340500	MURR	16	\$ 16.35	\$ 261.65
28	Tarjeta de lectura de sensores	Whitebox T3	NA	2	\$ 100.00	\$ 200.00
29	Eje lineal Bahr (1000 mm)	ELT40	NA	1	\$ 1,200.00	\$ 1,200.00
30	Carcasa Hermética con LEDs	Phillips		2	\$ 50.00	\$ 100.00
31	HERO10 Black GoPro			1	\$ 290.00	\$ 290.00
32	Tablero de acero inoxidable	RITTAL	NA	1	\$ 500.00	\$ 500.00
33	Canaletas, cables, borneras, entre otros		NA	1	\$ 500.00	\$ 500.00
34	Armado de tablero de control		NA	1	\$ 250.00	\$ 250.00
					Total	\$ 9,079.95

## 5.2 Fabricación y diseño mecánico

La tabla muestra detalladamente los costos de fabricación mecánica de la estructura, abarcando el armado, soldadura y montaje. Los datos se derivan de la cotización de MOLDES PERUANOS E.I.R.L., expertos en metalmecánica. También se considera el servicio de diseño mecánico para el proyecto.

### Costos de fabricación

Tabla 5.2: Costos de fabricación mecánica en dólares. Fuente: elaboración propia.

IT	DESCRIPCIÓN	CÓDIGO	CANT	P. UNIT	P. TOTAL
A	Fabricación de estructura - acero inox. 304 (según planos). Incluye armado, mano de obra, soldadura, montaje mecánico, entre otros.	Moldes peruanos	1	\$5,000.00	\$5,000.00
				Total (no incluye IGV)	\$5,000.00

### Costos de diseño

Tabla 5.3: Costos de diseño mecánico en dólares. Fuente: elaboración propia.

IT	DESCRIPCIÓN	CÓDIGO	CANT	P. UNIT	P. TOTAL
B	Servicio de diseño mecánico. (jornada diaria)	D. Aguilar	2	\$ 350	\$ 700.00
				Total (no incluye IGV)	\$ 700.00

### 5.3 Programación e implementación

Se presenta una tabla con los costos de programación y pruebas de computadoras industriales, basados en tarifas estándar de empresas de automatización. Estos costos abarcan mano de obra, así como recomendaciones y asesorías del asesor.

Tabla 5.4: Costos de programación e implementación en dólares. Fuente: elaboración propia.

IT	DESCRIPCIÓN	CÓDIGO	CANT	P. UNIT	P. TOTAL
1	Servicio de programación - automatización. (jornada diaria)	MEC1	5	\$ 350.00	\$1,750.00
2	Pruebas de funcionamiento	MEC2	2	\$ 350.00	\$ 700.00
				Total (no incluye IGV)	\$2,450.00

### 5.4 Costo total del proyecto

La tabla siguiente resume los costos totales del desarrollo de un producto electrónico, incluyendo equipos electrónicos, diseño y fabricación mecánica, programación y pruebas de funcionamiento.

Tabla 5.5: Costo total del proyecto. Fuente: elaboración propia.

IT	DESCRIPCIÓN	SUBTOTAL
1	Equipos electrónicos	\$ 9,079.95
2	Fabricación mecánica	\$ 5,000.00
3	Diseño mecánico	\$ 700.00
4	Programación y pruebas de funcionamiento	\$ 2,450.00
	Total	\$ 17,229.95
	Total + IGV	\$ 20,331.34

## CONCLUSIONES

Después de haber cumplido todos los objetivos planteados en este proyecto, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

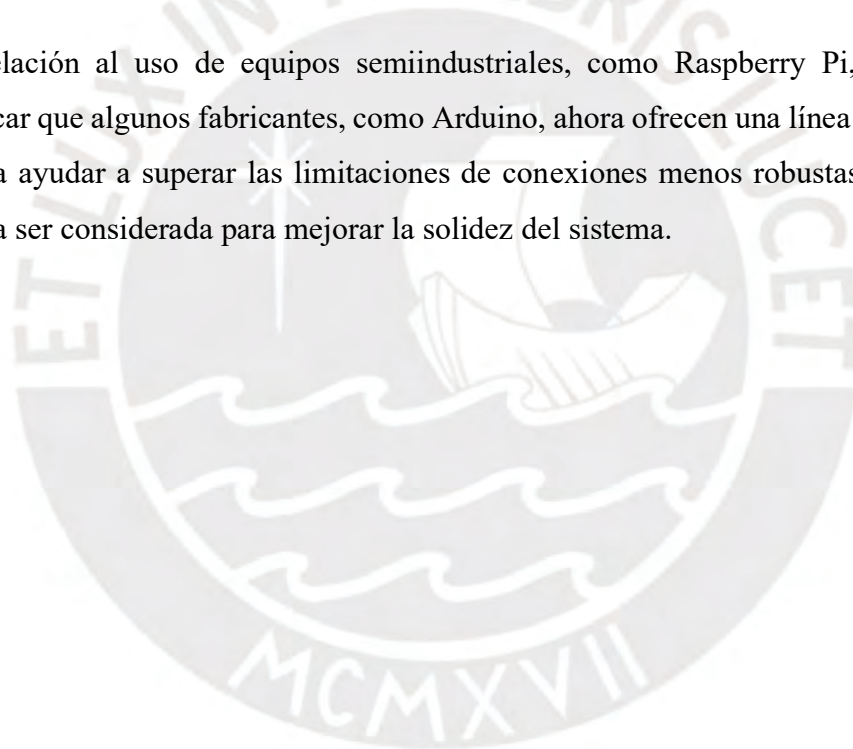
- ✓ Se ha realizado una exhaustiva revisión de la literatura y un análisis detallado sobre la problemática actual en la agricultura de hortalizas, así como el estado actual de los sistemas de cultivo hidropónico vertical. Se destacan proyectos relevantes como Citifarm, que a través de su equipo Grobot concluyó que mantener una temperatura constante beneficia el crecimiento en comparación con fluctuaciones de temperatura en las raíces. Asimismo, el Personal Food Computer, un desarrollo de bajo costo basado en Raspberry Pi y diversos sensores para analizar el crecimiento de plantas, proporcionó fundamentos clave que guiaron la arquitectura de este proyecto de tesis.
- ✓ Se ha diseñado exitosamente una estructura que permite la instalación de la cámara de visión artificial entre los niveles de cultivo, garantizando una disposición eficiente de las bandejas de cultivo y los subsistemas de suministro. Esto asegura la optimización del espacio y facilita el acceso para el mantenimiento y la recolección de los cultivos. Este diseño incluye un eje lineal de la marca alemana Bahr Modultechnik, un servomotor y accesorios estándar que posibilitan la integración a la estructura principal desarrollada en el software Inventor. Asimismo, se llevaron a cabo simulaciones para evaluar la rigidez y se realizó un análisis de esfuerzos mecánicos.
- ✓ Se ha logrado diseñar un subsistema de control que regula la dosificación de nutrientes, la iluminación y el suministro de agua en el sistema hidropónico vertical. Este sistema asegura un ambiente óptimo para el crecimiento de las hortalizas, maximizando la eficiencia del proceso. Mediante la combinación de una computadora industrial y un microprocesador, se ha logrado una solución económica que controla el subsistema de visión a nivel industrial a través de un servomotor, además de adquirir datos de manera efectiva.
- ✓ Se ha logrado diseñar un subsistema electrónico capaz de monitorear automáticamente los parámetros de dosificación de nutrientes, iluminación y riego en tiempo real. Para

ello, se usaron shields de la marca Atlas Scientific, los cuales agilizaron la integración de los sensores mediante conexiones estándar. Asimismo, se desarrolló una PCB específica para la lectura precisa de datos de un sensor particular, consolidando así un subsistema eficiente para el monitoreo de parámetros críticos en entornos de cultivo.

- ✓ El algoritmo de procesamiento de imágenes desarrollado ofrece una alternativa para la estimación del área foliar y el crecimiento de los cultivos. Utilizando el espacio de color CIELab y el algoritmo K-means para la segmentación, junto con operaciones morfológicas y detección de bordes, se facilitó la cuantificación de píxeles en el área de interés. Esto permitió establecer una relación estimada entre píxeles y centímetros, facilitando así la estimación del área foliar y proporcionando información para la mejora en la gestión de los recursos.
- ✓ La inversión total del proyecto se estima en aproximadamente 20,000 USD, lo que representa un ahorro del 50% en comparación con el costo estimado de desarrollar una solución local, según un experto en fabricación de máquinas. Este ahorro se debe a un equilibrio estratégico entre tecnologías más asequibles y avanzadas, como lo serían el uso cámaras industriales de alta gama y la implementación de entornos completamente controlados para la agricultura.

## RECOMENDACIONES

- ✓ Se sugiere considerar la incorporación de cámaras industriales nativas que utilicen el protocolo EtherCAT como una oportunidad de mejora significativa para el sistema. Aunque estas cámaras podrían ser más costosas inicialmente, su implementación simplificaría la integración de equipos.
- ✓ Una posible mejora potencial para el sistema podría ser la transición del principio de hidroponía al de aeroponía. No obstante, se requiere una evaluación exhaustiva para determinar su viabilidad económica antes de llevar a cabo esta modificación.
- ✓ En relación al uso de equipos semiindustriales, como Raspberry Pi, es relevante destacar que algunos fabricantes, como Arduino, ahora ofrecen una línea industrial que podría ayudar a superar las limitaciones de conexiones menos robustas. Esta opción podría ser considerada para mejorar la solidez del sistema.



## BIBLIOGRAFÍA

United Nations. (2017). World population projected to reach 9.8 billion in 2050, and 11.2 billion in 2100. <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/world-population-prospects-2017.html>

Stuart Oda. (2020). Are indoor vertical farms the future of agriculture? [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=z9jXW9r1xr8&list=PLxstmJbTards1LoAYlkUZuI2VjXw41Q&index=3&t=144s>

World Bank. (2020). Chart: Globally, 70% of Freshwater is Used for Agriculture. [Blog post]. <https://blogs.worldbank.org/opendata/chart-globally-70-freshwater-used-agriculture>

The Guardian. (2015). Earth has lost a third of arable land in past 40 years, scientists say. <https://www.theguardian.com/environment/2015/dec/02/arable-land-soil-food-security-shortage>

FAO. (2020). Pérdida y desperdicio de alimentos [Food loss and waste]. <http://www.fao.org/food-loss-and-food-waste/es/>

Irvin Fain. (2019). From Seed To Store: Using Artificial Intelligence to Optimize the Indoor Farms of the Future. [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=3-Fhx9wCE0&list=PLxstmJbTards1LoAYlkUZuI2VjXw41Q&index=2&t=0s>

CNN. (2018). Foodborne illness may be on the rise. Here's why. <https://edition.cnn.com/2018/07/20/health/food-safety-illness-rise-cdc/index.html>

Richman, C. (2015). An open source controlled environment agriculture platform exploration of root zone temperature effects and thermal management [Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology]. DSpace@MIT. <http://hdl.handle.net/1721.1/98768>

Ferrer, E. C., Rye, J., Brander, G., Savas, T., Chambers, D., England, H., & Harper, C. (2019). Personal Food Computer: A New Device for Controlled-Environment Agriculture. In P. Zaphiris, A. Ioannou, & A. I. Antona (Eds.), *Universal Access in Human-Computer*

Interaction. *Multimodality and Assistive Environments* (Vol. 11573, pp. 611-620). Springer. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-02683-7\\_79](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-02683-7_79)

Belista, F. C. L., G, M. P. C., Lucenara, L. L., Policarpio, C. J. G., Tan, X. J. M., & Baldovino, R. G. (2018). A Smart Aeroponic Tailored for IoT Vertical Agriculture using Network Connected Modular Environmental Chambers. 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 1311-1315. IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8666382>

Mohammed, S. (1981). *Tomorrow's Agriculture 'NFT Hydroponics'- Grow within Your Budget*. Springer.

howtogrowmarijuana.com. (2020). Aeroponics - Grow Systems. Retrieved from <https://howtogrowmarijuana.com/aeroponics>

Llanos, H. B., del Castillo Gutierrez, C. R., & Cardenas, M. G. (2020). Análisis de crecimiento funcional, acumulación de biomasa y translocación de materia seca de ocho hortalizas cultivadas en invernadero. *Revista de Investigación Científica*, 15(1), 79-91. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2409-16182015000100010](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2409-16182015000100010)

Carranza, C., Lancho, O., Miranda, D., & Chaves, B. (2020). Análisis del crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) 'Batavia' cultivada en un suelo salino de la Sabana de Bogotá. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/287495735>

Schneider, J., Thiesen, L., Engroff, T., Holz, E., & Altissimo, B. (2018). Growth analysis of lettuce under different substrate compositions. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 93(6), 689-697. <https://doi.org/10.1080/14620316.2018.1502177>

Waterland, N. L., Moon, Y., Tou, J. C., Kim, M. J., Pena-Yewtukhiw, E. M., & Park, S. (2017). Mineral Content Differs among Microgreen, Baby Leaf, and Adult Stages in Three Cultivars of Kale. *Journal of Food Quality*, 2017, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2017/3281297>

Okamoto, T., & Sakane, Y. (2020). An Image Analysis Method for Lettuce Leaf and Root Growth Analysis in Hydroponic Culture. 2019 7th International Workshop on Sensing, Processing and Learning for Intelligent Machines (SPLINE), 114-118. <https://doi.org/10.1109/SPLINE.2019.8650285>

Loresco, P. J. M., Valenzuela, I. C., & Elmer P. Dadios, P. (2020). Color Space Analysis Using KNN for Lettuce Crop Stages Identification in Smart Farm Setup. 2020 IEEE 11th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON), 1-5. <https://doi.org/10.1109/UEMCON51452.2020.9296886>

Calangian, X. A.-r. P., Gonzales, J. Y. C., Hilario, C. A. N., Lopez, J. M. M., Rulona, B. L. E., Valencia, I. J. C., Billones, R. K., Loresco, P. J., Valenzuela, I. C., & Dadios, E. P. (2018). Vision-based Canopy Area Measurements. 2018 IEEE 10th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM), 1-6. <https://doi.org/10.1109/HNICEM.2018.8666251>

Pennisi, G., Orsini, F., Blasioli, S., Cellini, A., Crepaldi, A., Braschi, I., Spinelli, F., Nicola, S., Fernandez, J. A., Stanghellini, C., Gianquinto, G., & Marcelis, L. F. M. (2019). Resource use efficiency of indoor lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivation as affected by red:blue ratio provided by LED lighting. *Nature Scientific Reports*, 9(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50783-z>

Yusof, S. S. S., Thamrin, N. M., Nordin, M. K., Yusoff, A. S. M., & Sidik, N. J. (2016). Effect of artificial lighting on *Typhonium flagelliforme* for indoor vertical farming. *Journal of Agricultural Science*, 8(6), 152-159. <https://doi.org/10.5539/jas.v8n6p152>

Urban Vertical Farm Project. (2020). Vertical farming cost model: My budget. Urban Vertical Farming Project. <https://urbanverticalfarmingproject.com/2018/09/11/vertical-farming-cost/>

Moreno, C. (2020). Comunicación personal. TECHPRO.

Greenwood, D. T. (1988). *Mechanics of machines: Elementary theory and examples* (2<sup>a</sup> ed.). Pergamon Press.






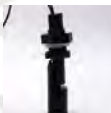









## ANEXOS









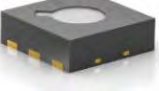







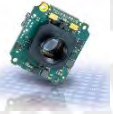

### ANEXO A

#### Matriz morfológica

##### Subsistema de sensores

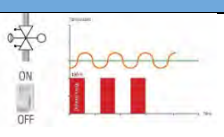
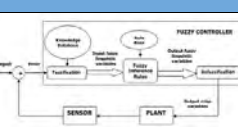
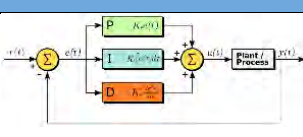
Tabla A1: Subsistema de sensores. Fuente: elaboración propia.

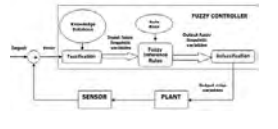
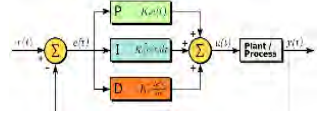
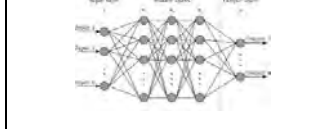











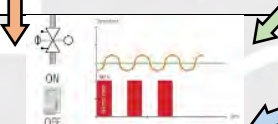
Función Parcial	Principio solución 1	Principio solución 2	Principio solución 3
Sensor nivel del reservorio de nutrientes tipo A	 Sensor de nivel capacitivo	 Sensor de nivel ultrasónico	 Sensor de nivel flotador
Sensor nivel del reservorio de nutrientes tipo B	 Sensor de nivel capacitivo	 Sensor de nivel ultrasónico	 Sensor de nivel flotador
Sensor el nivel del reservorio solución	 Sensor de nivel capacitivo	 Sensor de nivel ultrasónico	 Sensor de nivel flotador
Sensor conductividad eléctrica en la solución nutritiva	 Sensor de conductividad inductiva	 Sensor de conductividad de 4 electrodos	 Sensor de conductividad de 2 electrodos
Sensor temperatura en la solución nutritiva	 Sensores termopares	 Detector de temperatura de resistencia (RTD)	 Termistor del coeficiente de temperatura negativo (NTC)

Sensar humedad en el ambiente	 Sensor de humedad conductivo	 Sensor de humedad capacitivo	 Sensor de humedad electrolítico
Sensar temperatura en el ambiente	 Sensores basados en semiconductores	 Sensor termistor	 Sensor infrarrojo
Sensar CO2 en el ambiente	 Sensores infrarrojos no dispersivos (NDIR)	 Sensores electroquímicos	 Sensores de semiconductores de óxido de metal (MOS)
Sensar pH en la solución nutritiva	 Tiras reactivas	 pH metro portátil	 Circuito embebido con probeta
Sensar luminosidad en el ambiente	 Fotodiodo	 Optoelectrónico	 Fototransistor
Capturar fotografía	 Cámara monocromática	 Cámara a color	 Cámara térmica (infrarrojo)

A. Subsistema de control






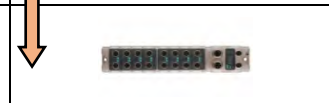
Tabla A2: Subsistema de control. Fuente: elaboración propia.

Función Parcial	Principio solución 1	Principio solución 2	Principio solución 3
Controlar fotoperiodo	 Control On/Off	 Fuzzy logic	 PID

Controlar irrigación	 Fuzzy logic	 PID	 Redes neuronales
Monitorear condiciones del ambiente	 Data Logger	 Sensores ambientales	
Almacenar imágenes	 Flash SD /microSD	 EEPROM	 Disco duro
Procesar imágenes	 Microcontrolador	 Microprocesador	 Laptop
Procesar datos	 Microcontrolador	 PLC/IPC	 Microprocesador
Enviar señales de estatus del sistema	 Control On/Off		






















B. Subsistema de comunicación

Tabla A3: Subsistema de comunicación. Fuente: elaboración propia.

Función parcial	Principio solución 1	Principio solución 2	Principio solución 3
Recibir información	 Módulo de comunicación Ethernet	 Módulo de comunicación EtherCAT	 Módulo de comunicación Profinet
Enviar información	 Módulo de comunicación Ethernet	 Módulo de comunicación EtherCAT	 Módulo de comunicación Profinet



















## C. Subsistema de actuadores







Tabla A4: Subsistema de actuadores. Fuente: elaboración propia.

Función Parcial	Principio solución 1	Principio solución 2	Principio solución 3
Activar luces	 LED (Light Emitting Diode)	 Tubos LEDs	 Luz fluorescente estilo tubo
Activar suministro nutrientes tipo A	 Electroválvula proporcional	 Bomba peristáltica	 Electroválvula de diafragma
Activar suministro nutrientes tipo B	 Electroválvula proporcional	 Bomba peristáltica	 Electroválvula de diafragma
Activar sistema de toma de imágenes	 Eje lineal con accionamiento de piñón y cremallera	 Eje lineal con accionamiento de husillo	 Eje lineal con correa dentada
Encender indicadores luminosos	 Luces piloto	 Baliza	 Display LED 7 segmentos
Accionar alarma	 Alarma visual	 Alarma visual y sonora	 Alarma sonora
Activar suministro de solución nutritiva	 Electrobomba	 Bomba sumergible	 Motobomba

D. Subsistema de energía















Tabla A5: Subsistema de energía. Fuente: elaboración propia.







Función Parcial	Principio solución 1	Principio solución 2	Principio solución 3
Habilitar suministro energético	 Contactor	 Llave seccionadora	
Habilitar energía equipos de potencia	 Llave seccionadora	 Contactor	
Habilitar energía equipos de control	 Llave seccionadora	 Contactor	
Acondicionar energía	 Fuente de alimentación conmutada	 Sistema UPS	 Fuente de alimentación lineal
Energizar módulo de actuadores	 Fuente de alimentación conmutada	 Regulador step down	 Fuente de alimentación lineal
Energizar módulo de control	 Fuente de alimentación conmutada	 Regulador step down	 Fuente de alimentación lineal
Energizar módulo de interfaz	 Fuente de alimentación conmutada	 Regulador step down	 Fuente de alimentación lineal

Energizar módulo de sensores	 Fuente de alimentación conmutada	 Regulador step down	 Fuente de alimentación lineal
Energizar módulo de comunicación	 Fuente de alimentación conmutada	 Regulador step down	 Fuente de alimentación lineal

E. Subsistema de materia
















Tabla A6: Subsistema de materia. Fuente: elaboración propia.

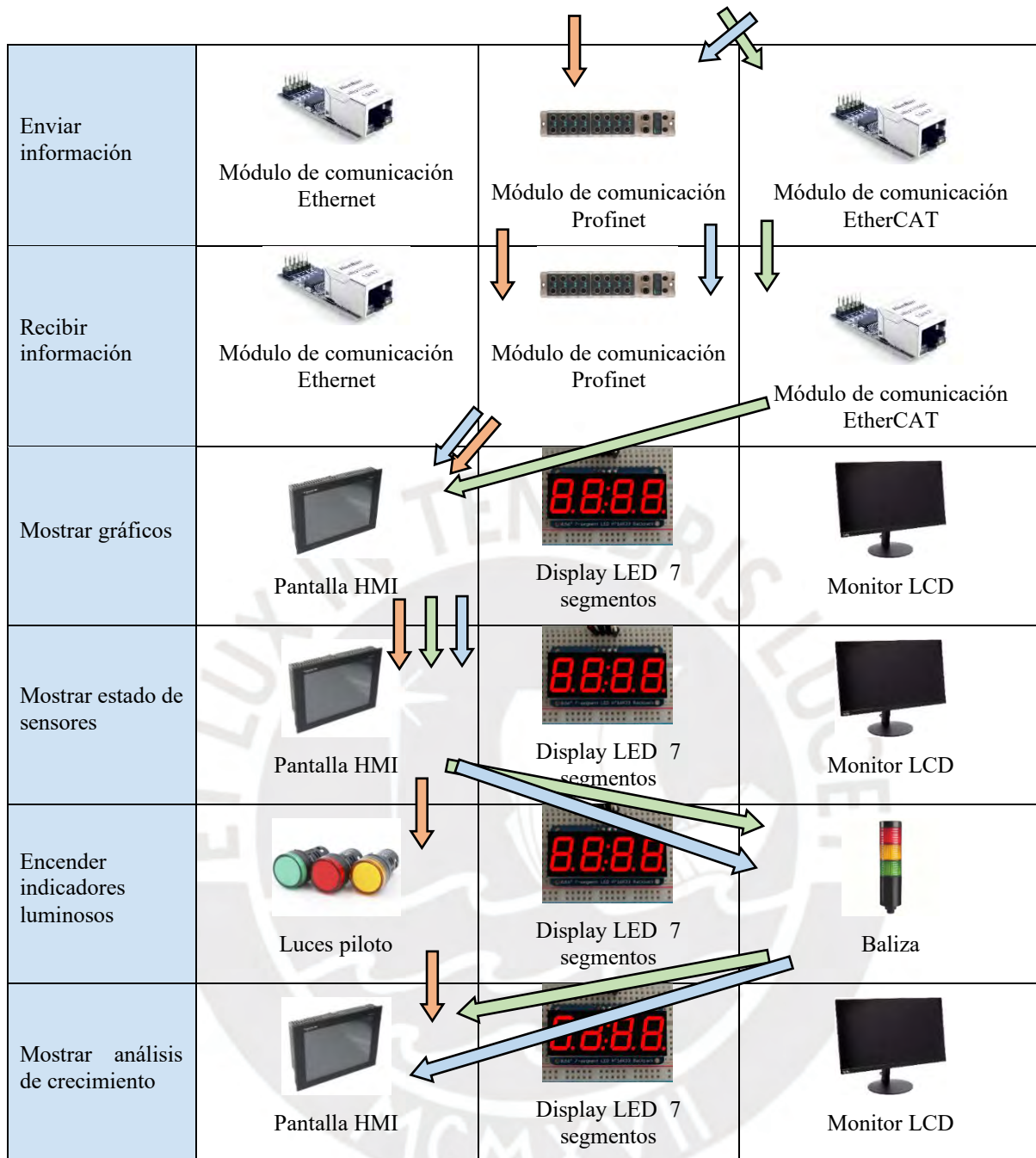
Función Parcial	Principio solución 1	Principio solución 2	Principio solución 3
Almacenar nutriente A	 Tanques	 Tinas plásticas	 Galoneras
Almacenar nutriente B	 Tanques	 Tinas plásticas	 Galoneras
Filtrar nutriente A	 Filtros de malla	 Filtro de disco	
Filtrar nutriente B	 Filtros de malla	 Filtro de disco	
Filtrar agua	 Filtros de malla	 Filtro de disco	
Almacenar solución nutritiva	 Tanques	 Tinas plásticas	

Mezclar nutritiva	solución	 Tanques	 Tinas plásticas
Filtrar nutritiva	solución	 Filtros de malla	 Filtro de disco
Alimentar plantas		 Tuberías de PVC	 Mangueras de polietileno

F. Subsistema de interfaz

Tabla A7: Subsistema de interfaz. Fuente: elaboración propia.

Función Parcial	Principio solución 1	Principio solución 2	Principio solución 3
Iniciar/Apagar sistema	 Interruptor de palanca	 Interruptor luminoso	 Pulsador ON/OFF
Configurar parámetros de riego	 Pantalla HMI	 Teclado + mouse	 Perilla de dial
Iniciar análisis de crecimiento	 Pantalla HMI	 Keypad	 Botones iluminados LED
Desfogue de emergencia	 Pantalla HMI	 Botones iluminados LED	 Botón circular de emergencia
Apagar sistema de emergencia	 Botón de emergencia cableado	 Botón circular de emergencia	 Pulsador de emergencia con llave



## ANEXO B

### Conceptos de solución

#### Concepto de solución A

La solución descrita se compone de dos elementos principales: un módulo de cultivo y una estructura metálica que soporta una serie de componentes para el cultivo de plantas. La estructura metálica está diseñada para sostener las luces LED, los ventiladores y los rieles que permiten el desplazamiento tanto vertical como horizontal de la cámara. Esta estructura está fabricada con materiales resistentes y duraderos para soportar el peso de los componentes y mantenerlos en su lugar durante todo el ciclo de cultivo.

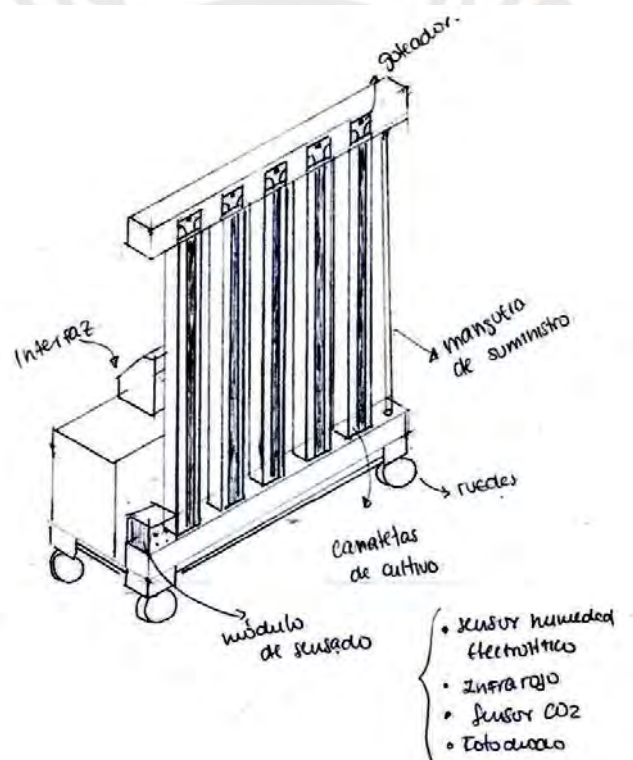


Figura B1: Propuesta de módulo de cultivo A. Fuente: elaboración propia.

El módulo de cultivo, a su vez, está diseñado para albergar las plantas y proporcionarles un ambiente de crecimiento óptimo. Este módulo consiste en el uso de unas canaletas verticales de plástico, que se encargan de contener una espuma especial que sirve para poder sujetar a las hortalizas. Estas canaletas se distribuyen a lo largo de la estructura metálica para aprovechar al máximo el espacio disponible.



Figura B2: Vista superior de la propuesta A. Fuente: elaboración propia.

Asimismo, se distribuirá a través de unos goteros la solución nutritiva que será transportada mediante la manguera de suministro. Esta solución nutritiva contiene los nutrientes necesarios para que las plantas crezcan de manera saludable y productiva. Además, el módulo de cultivo también aloja un módulo de sensado, que incluye un sensor de humedad electrolítico para medir la humedad del ambiente, un infrarrojo para medir la temperatura, un sensor de CO<sub>2</sub> y un fotodiodo para registrar la intensidad de la luz emitida por los LEDs.

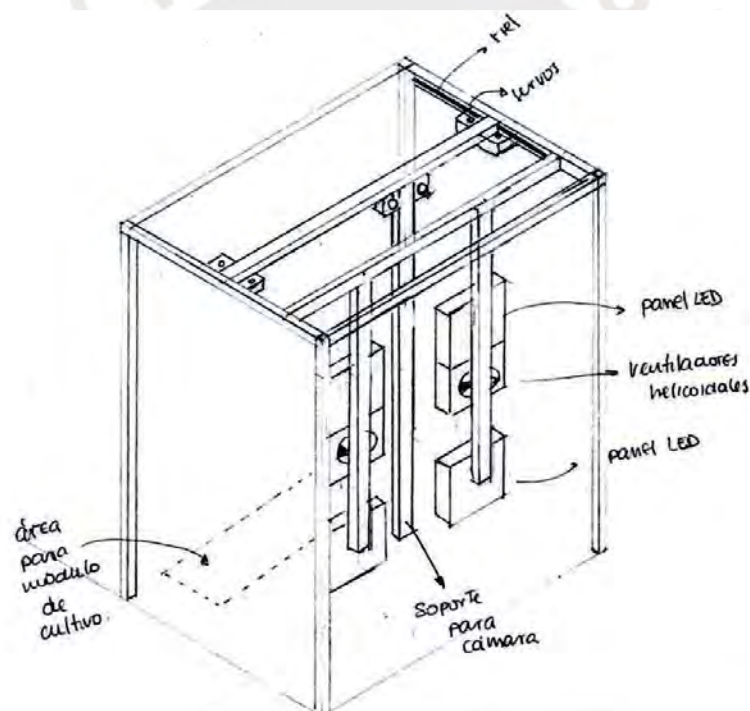


Figura B3: Vista isométrica de la propuesta A. Fuente: elaboración propia.

El uso de canaletas verticales de plástico y una espuma especial para sostener las plantas facilita la siembra y el mantenimiento del cultivo. Esta configuración permite una distribución uniforme de la solución nutritiva y evita que las raíces de las plantas se enreden o dañen durante el crecimiento. Además, el uso de sensores permite un control preciso y automatizado del ambiente de cultivo, lo que puede mejorar significativamente la calidad y cantidad de los cultivos. La medición constante de la humedad, la temperatura y la intensidad de la luz permite

ajustar estos parámetros para optimizar el crecimiento de las plantas, lo que se traduce en una mayor productividad y rentabilidad para el cultivo.

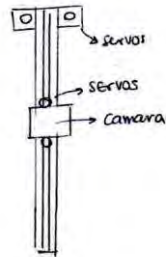


Figura B4: Estructura soporte para cámara. Fuente: elaboración propia.

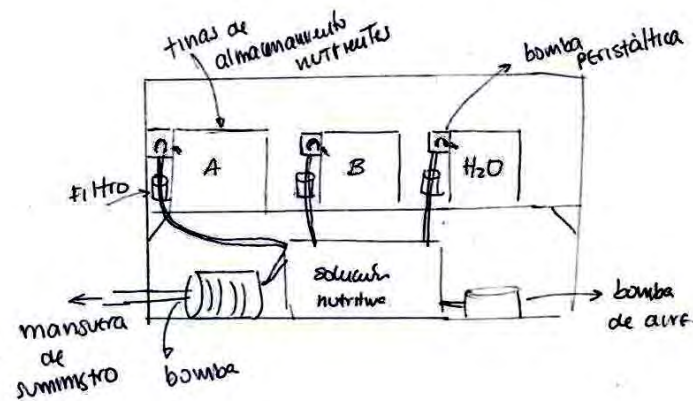


Figura B5: Vista frontal del módulo de nutrientes. Fuente: elaboración propia.

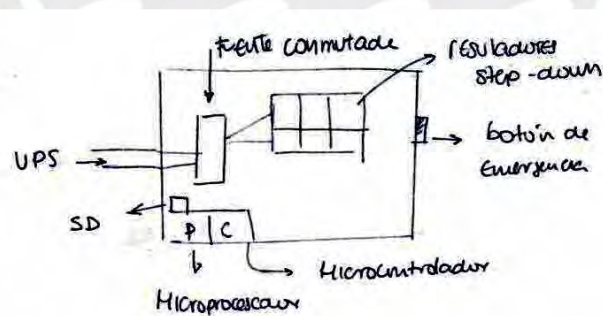


Figura B6: Vista horizontal de la caja de interfaz. Fuente: elaboración propia.

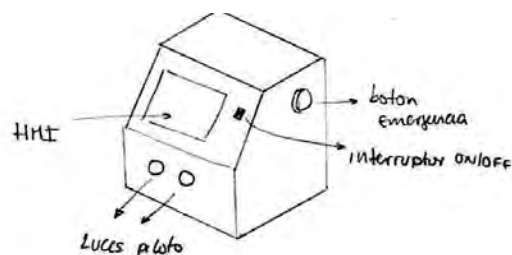


Figura B7: Módulo de la interfaz A. Fuente: elaboración propia.

## Concepto de solución B

La solución para el cultivo se basa en una estructura metálica diseñada para soportar 2 bandejas de cultivo, las cuales son utilizadas para almacenar las plántulas y llevar a cabo el cultivo de las hortalizas. Para garantizar que las plantas reciban los nutrientes adecuados, se utilizan 2 bombas peristálticas para transportar los nutrientes desde un reservorio secundario al reservorio principal. Una vez que se mezcla la solución nutritiva en el reservorio principal, se distribuye a través de una bomba sumergible a los diferentes niveles de cultivo.

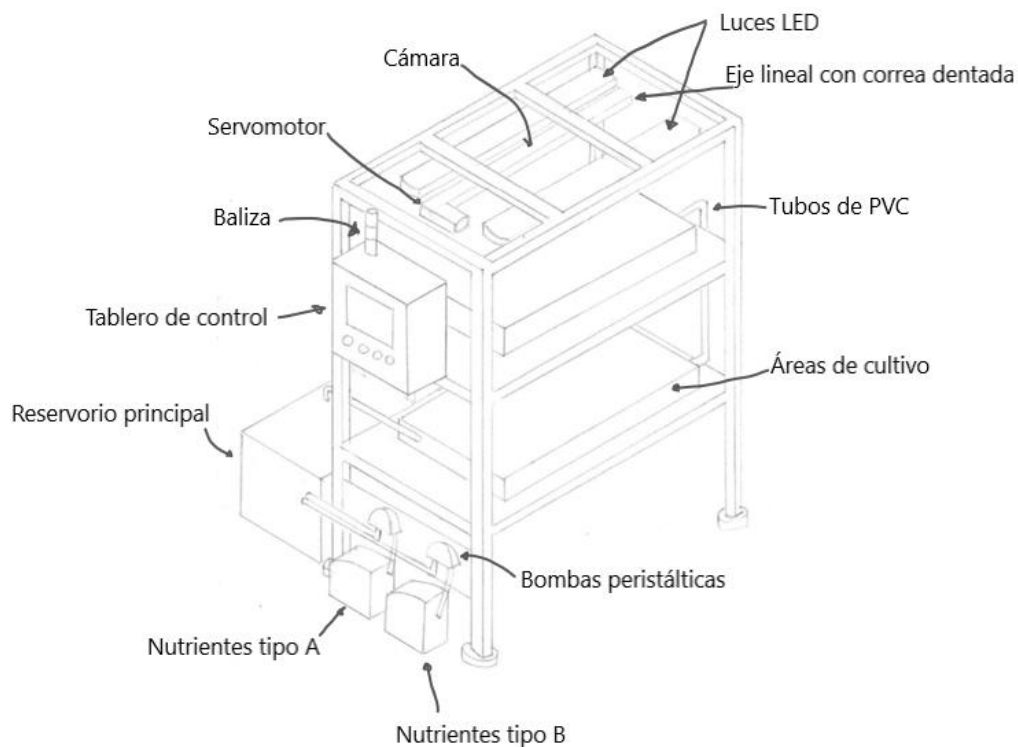


Figura B8: Vista isométrica de la solución B. Fuente: elaboración propia.

Para controlar todo el proceso, se utiliza una computadora industrial o un PLC que permite al usuario interactuar con el sistema mediante una pantalla HMI (interfaz hombre-máquina), botones físicos y una baliza. Esta parte del sistema de control permite al usuario programar y monitorear todo el proceso de cultivo.

Cada nivel de cultivo consta de una bandeja de almacenamiento de plántulas y luces LED para el crecimiento de las hortalizas. El nivel superior cuenta con un eje lineal con correa de entrada que se mueve con un servomotor para desplazar la cámara, lo que permite la inspección y el monitoreo de las plantas.

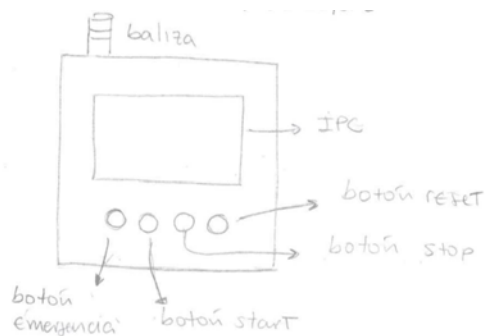


Figura B9: Vista exterior del tablero de control (solución B). Fuente: elaboración propia.

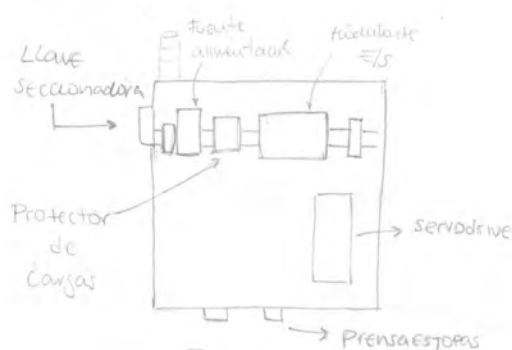


Figura B10: Interior del tablero de control de la solución B. Fuente: elaboración propia.

La parte de control también incluye interruptores termo magnéticos para el paso de corriente y la protección del sistema contra cortocircuitos y sobrecargas. Además, se utiliza una fuente de alimentación para adecuar la energía de suministro público a un estándar industrial de 24 voltios. Para garantizar un control adecuado de los niveles de nutrientes y otros parámetros ambientales, se utilizan sensores en diferentes áreas del sistema. En las áreas de cultivo, se miden la humedad (capacitivo) y la temperatura ambiental, el nivel de CO<sub>2</sub> y la luminosidad. En el reservorio principal, se miden el pH, la temperatura (utilizando un termómetro de resistencia RTD) y la conductividad.

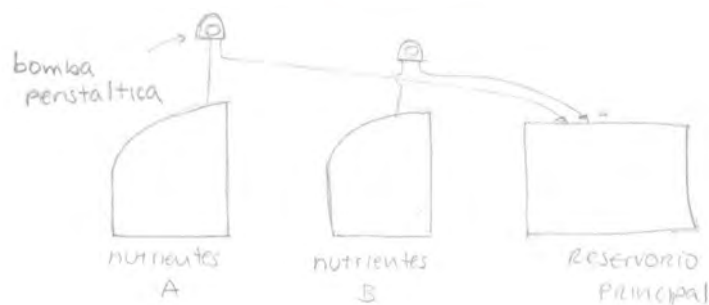


Figura B11: Suministro de nutrientes de la solución B. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, para monitorear los niveles de los reservorios de nutrientes, se utilizan sensores ultrasónicos, que miden la distancia desde la parte superior del líquido hasta la superficie del sensor. En conjunto, todas estas partes del sistema de control garantizan que las plantas reciban los nutrientes adecuados y se mantengan en un ambiente óptimo para su crecimiento.

### Concepto de solución C

La solución propuesta consiste en una estructura metálica que se compone de vigas y ángulos ranurados, cuyo objetivo es sostener todos los componentes del sistema. Esta estructura cuenta con tres niveles de cultivo que permitirán la distribución de los nutrientes mediante mangueras de alimentación y tuberías de PVC, así como también alojarán los ventiladores, las luces leds y un riel para el desplazamiento de la cámara de inspección.

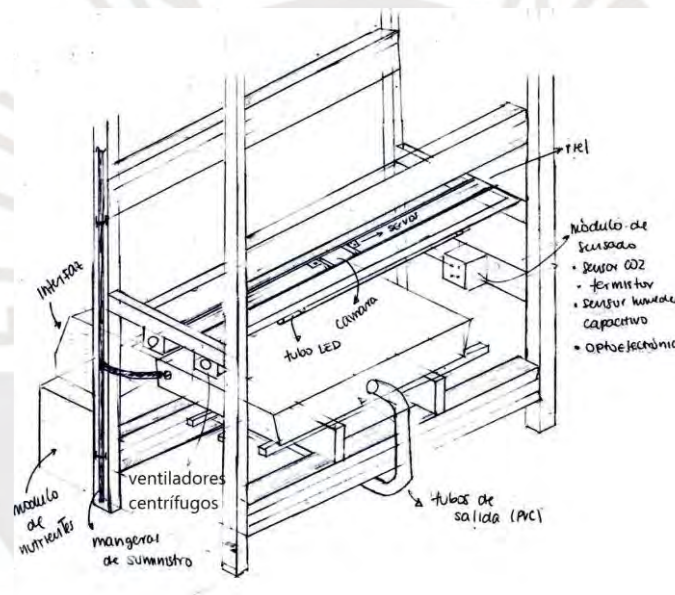


Figura B12: Vista isométrica del módulo de cultivo C. Fuente: elaboración propia.

Además, cada nivel de cultivo albergará un módulo de sensado que contiene un sensor de humedad capacitivo para medir la humedad ambiental, un termistor para medir la temperatura del ambiente, de CO<sub>2</sub> y un optoelectrónico para registrar la intensidad de la luz emitida por los leds. En la parte posterior de la estructura se encuentra el módulo de nutrientes que contiene tres galoneras y una tina de almacenamiento para los nutrientes A, B, agua y la solución nutritiva, respectivamente.

Estas galoneras contienen sensores de nivel y filtran y transportan el agua y los nutrientes a la tina de solución nutritiva mediante bombas peristálticas. Para el almacenamiento de la solución nutritiva se incorpora un sensor de conductividad eléctrica, un termopar, la bomba de

suministro que distribuye la solución mediante las mangueras y la bomba de aire que permite el burbujeo para la oxigenación de las plantas.

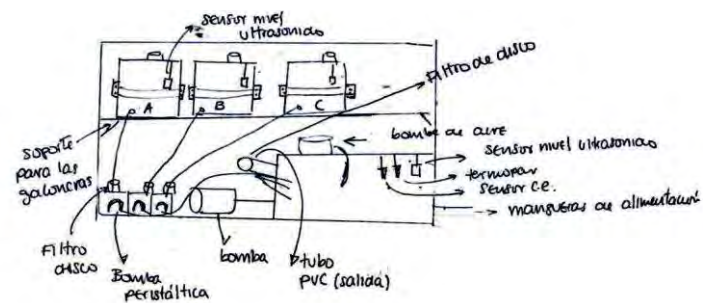


Figura B13: Vista frontal del módulo de nutrientes C. Fuente: elaboración propia.

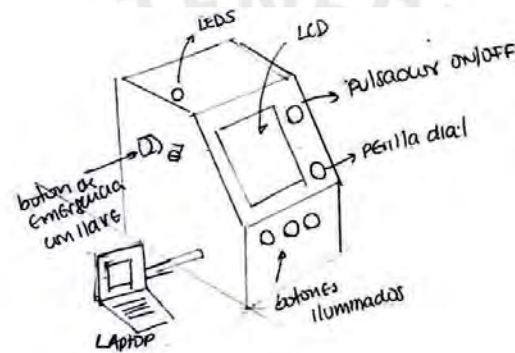


Figura B14: Módulo de interfaz C. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, la interfaz albergará una fuente conmutada, los reguladores step down necesarios para energizar el sistema, un microcontrolador y permitirá interactuar con el usuario mediante una pantalla táctil HMI, luces piloto, un pulsador ON/OFF, un dial y un botón de emergencia. Esta interfaz recibirá la energía gracias a que se conectará a un enchufe de corriente alterna y realizará el análisis de crecimiento con la ayuda de una laptop.

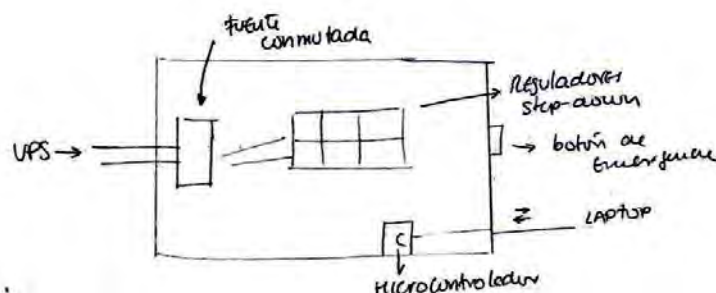
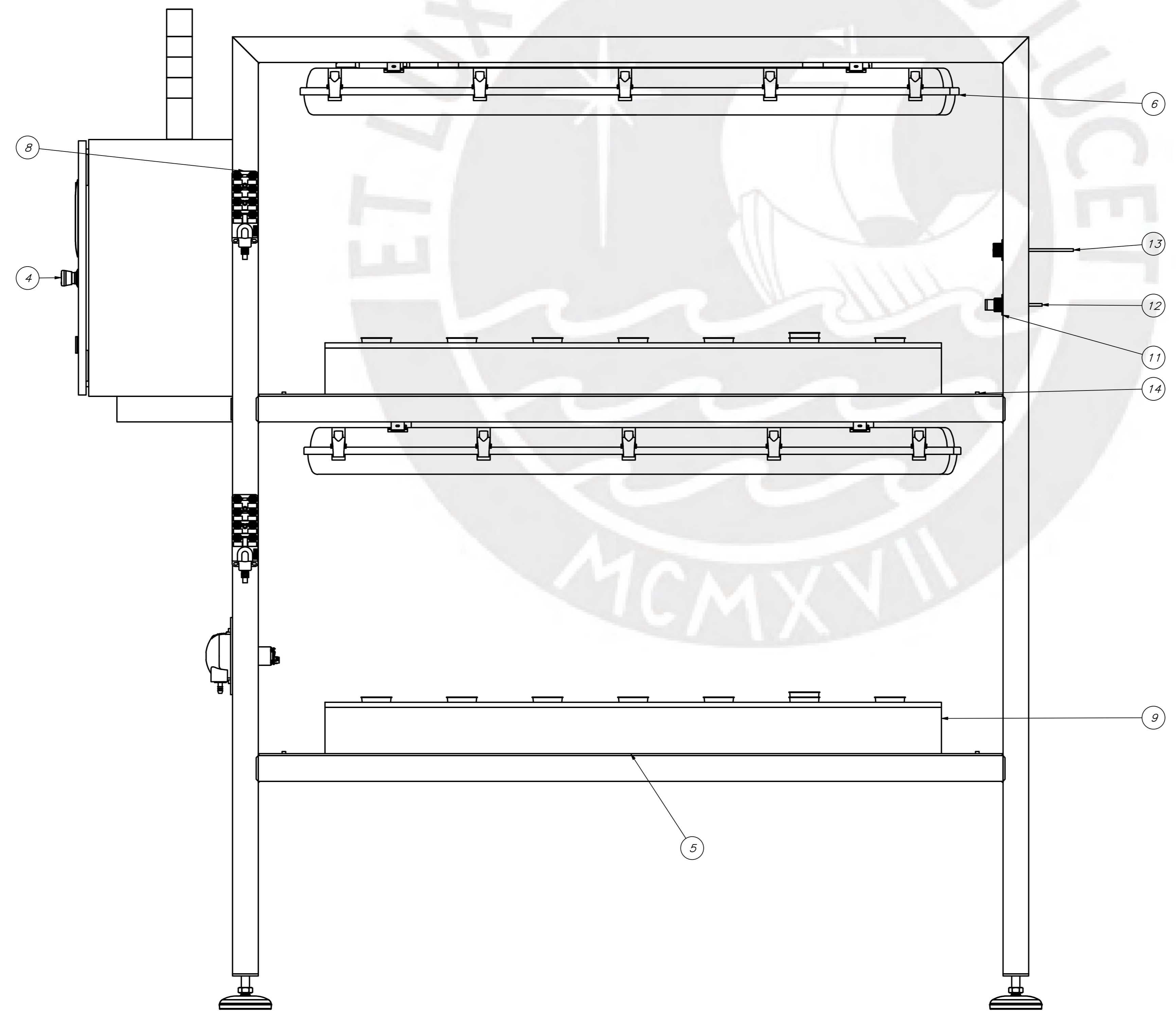
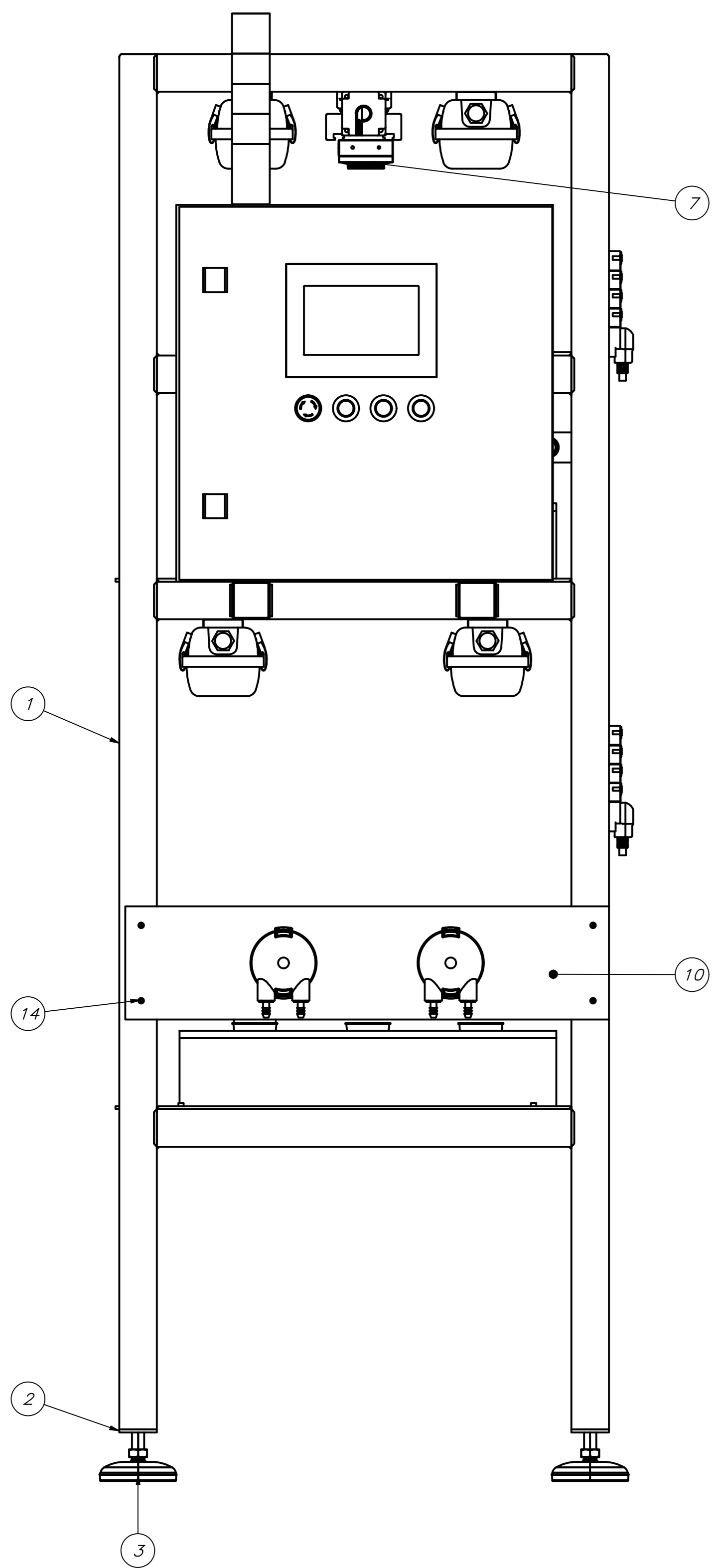
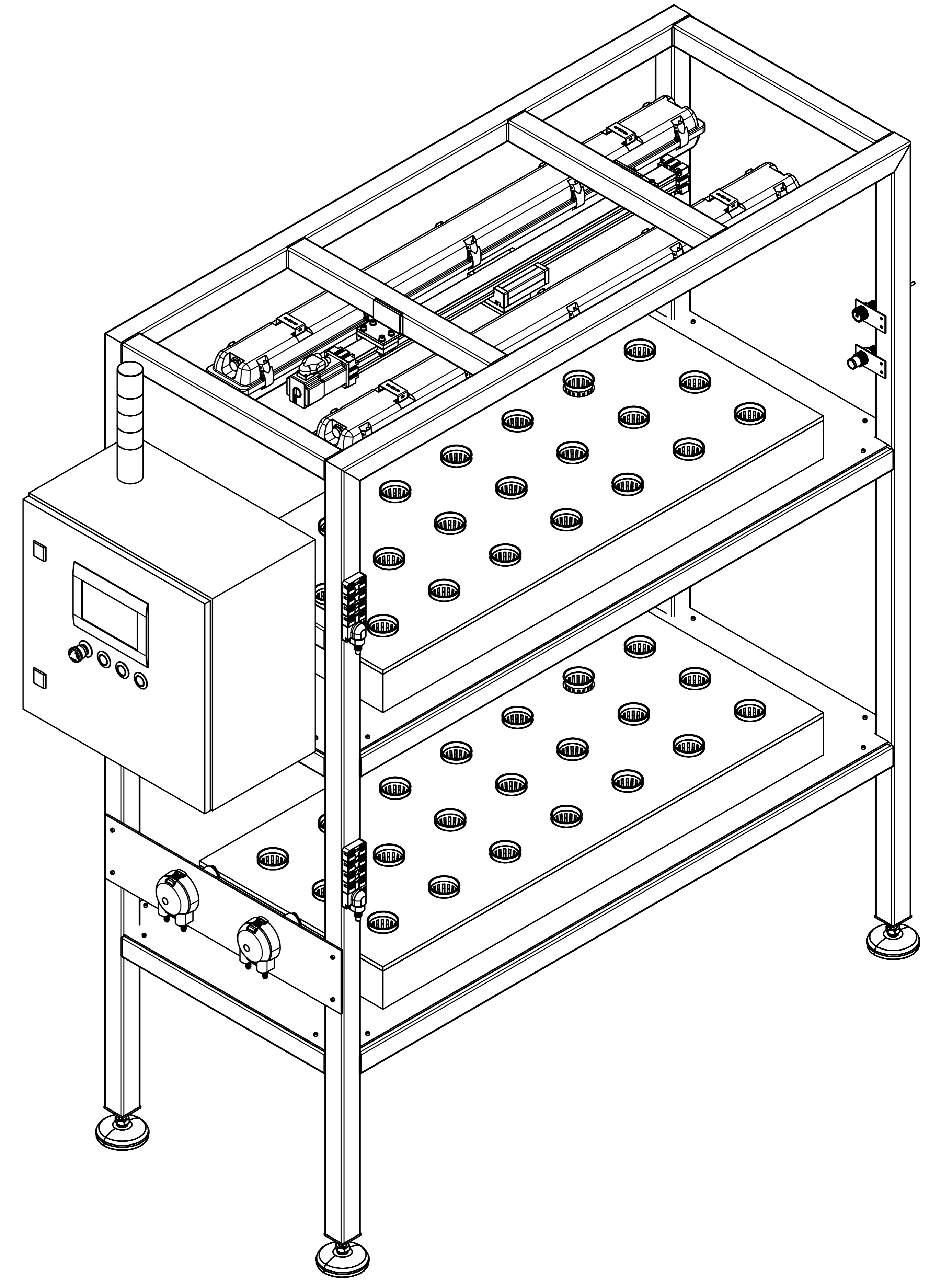
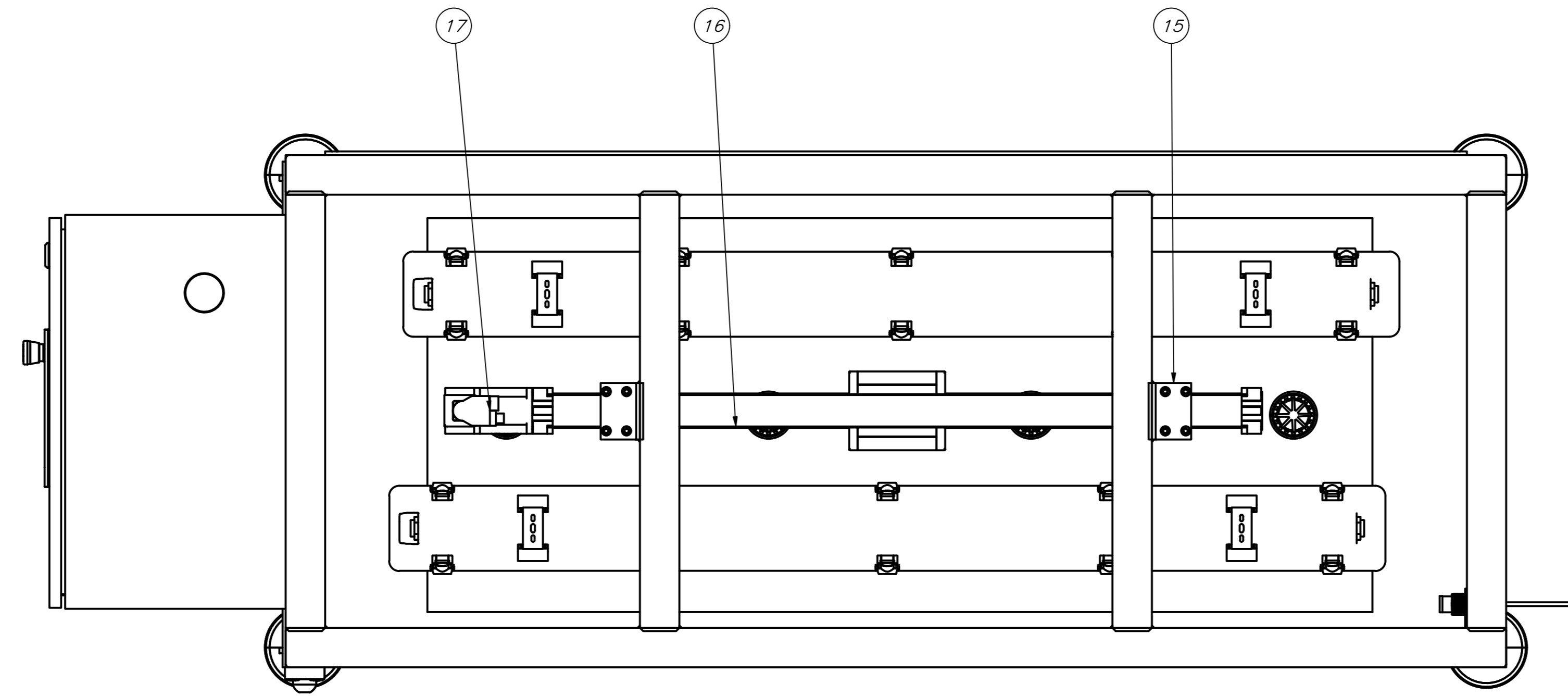


Figura B15: Vista horizontal de la caja de interfaz C. Fuente: elaboración propia.



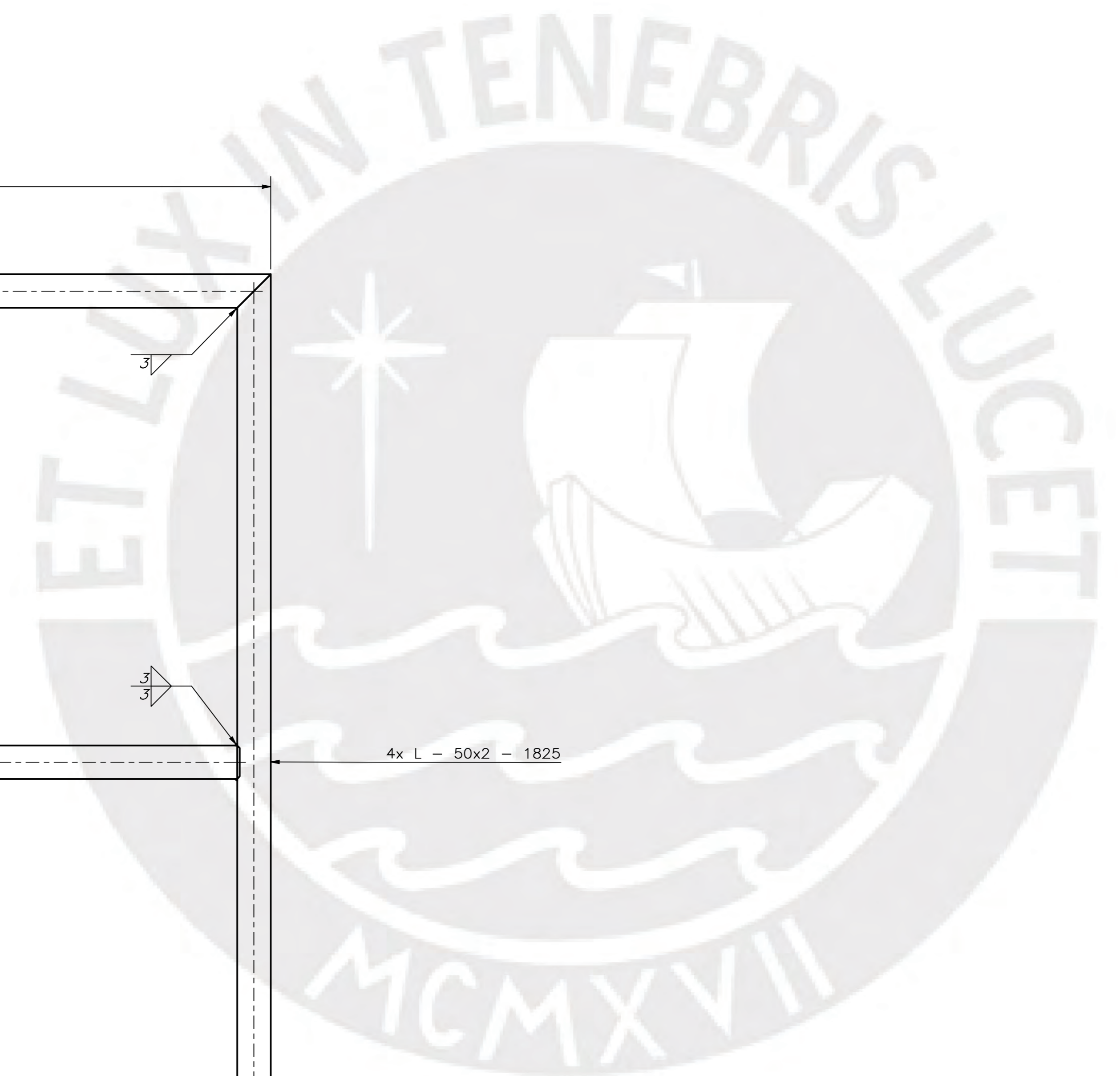
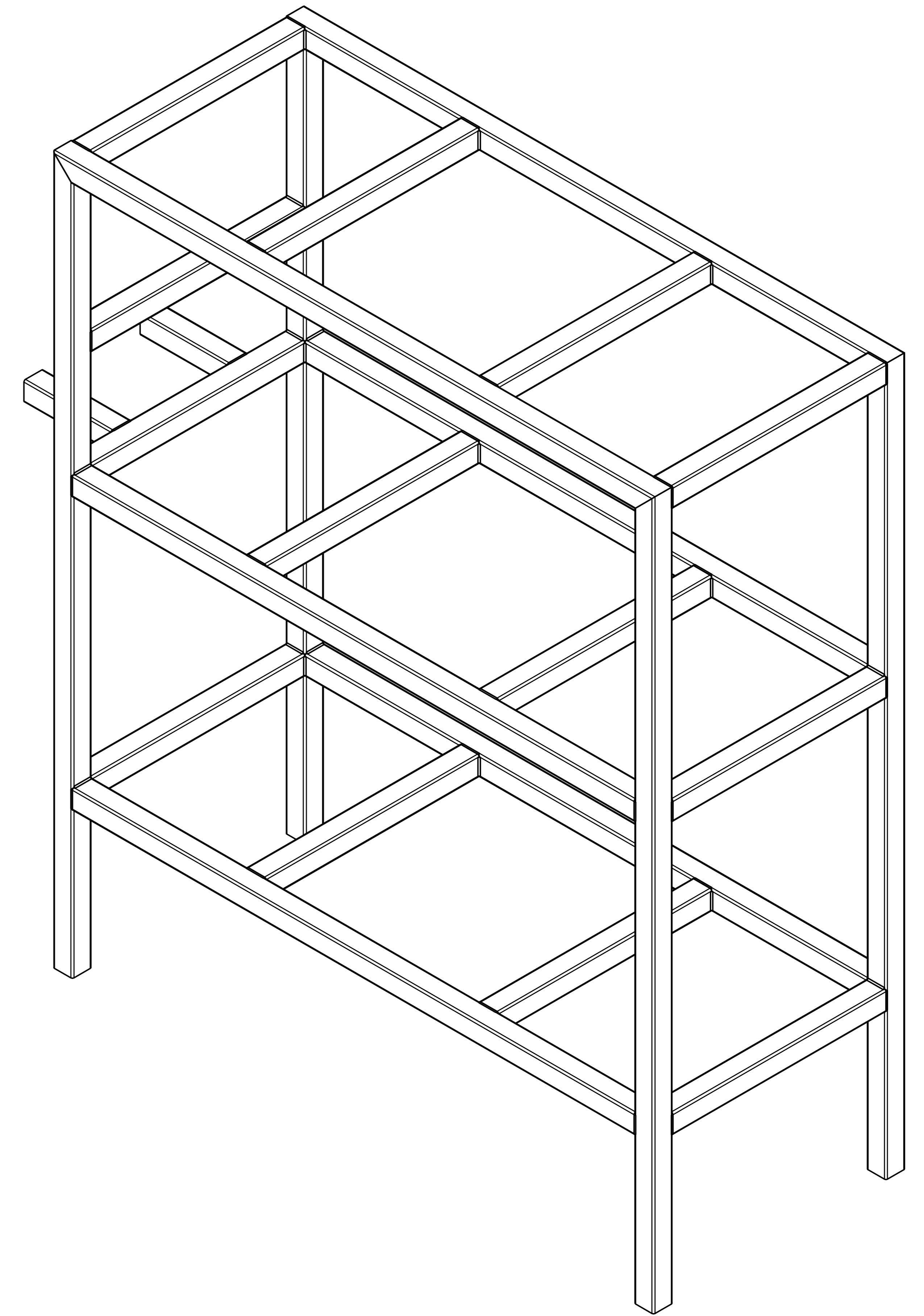
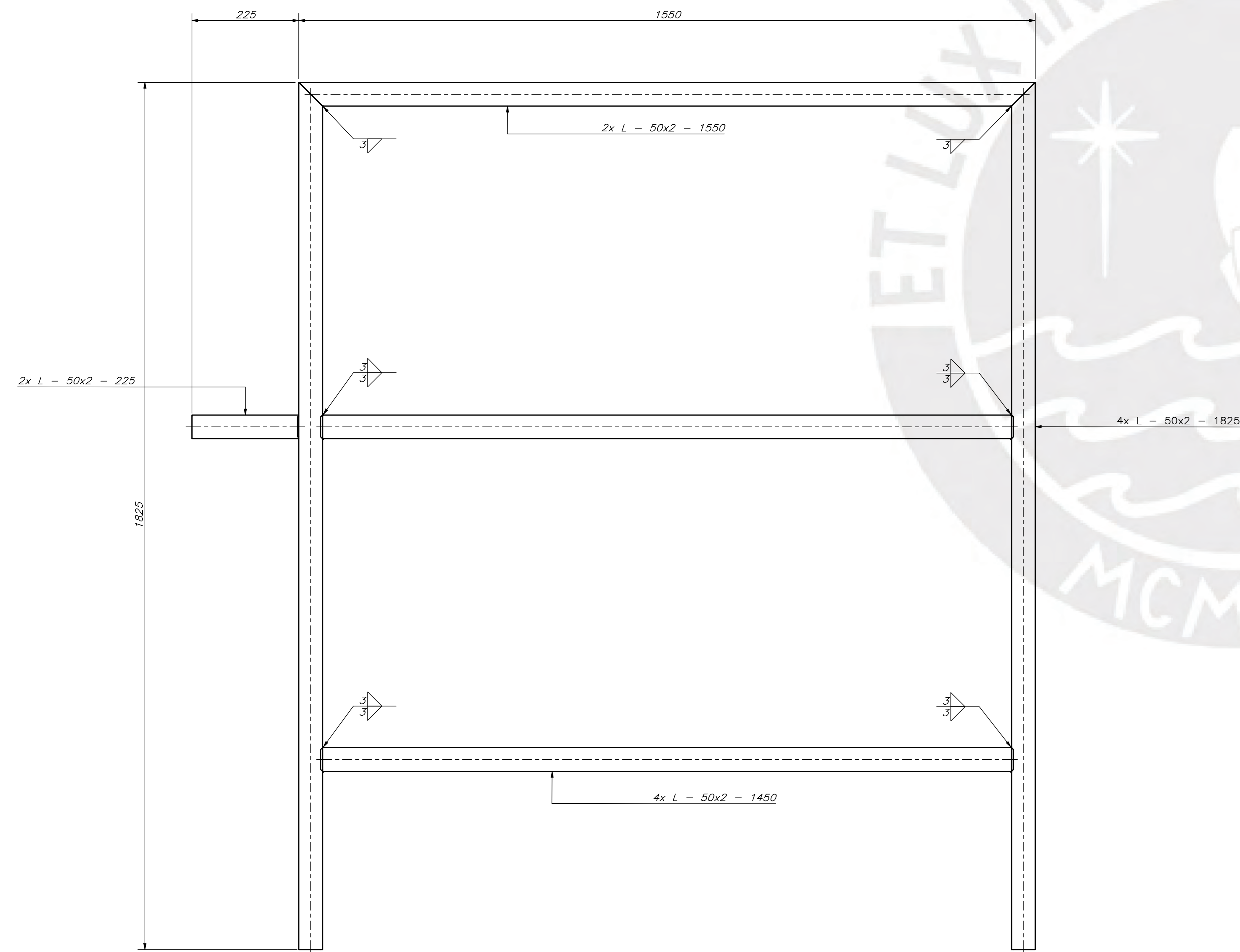
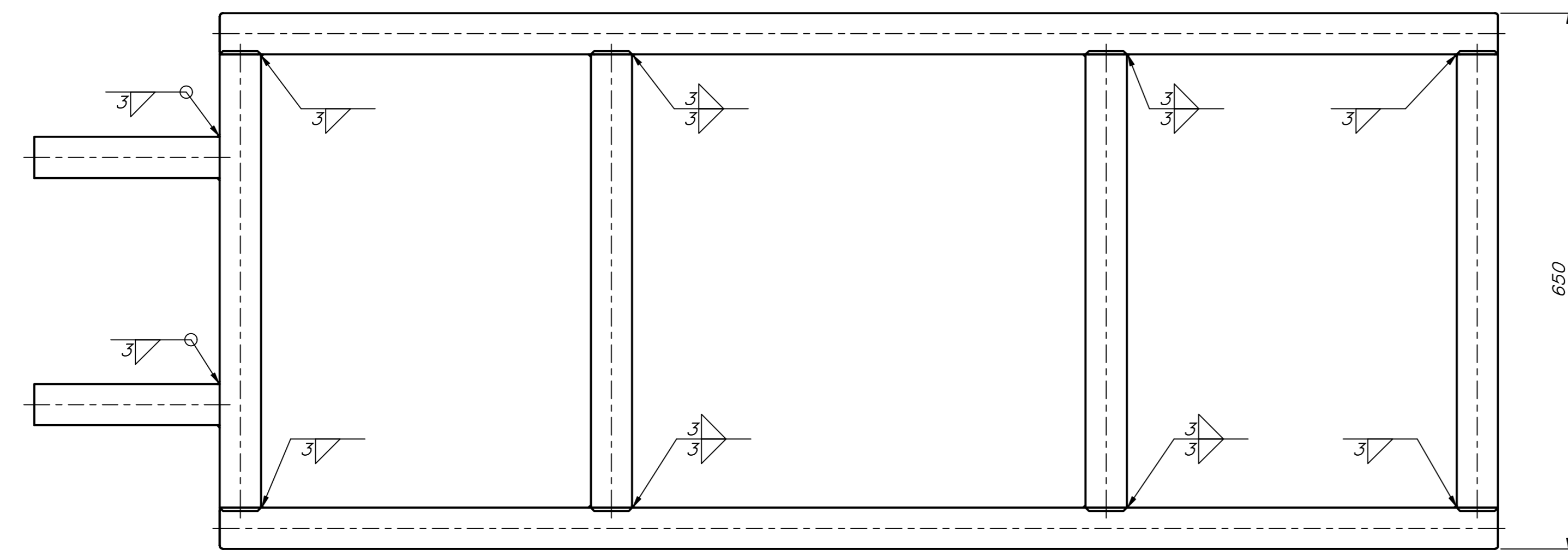
**ANEXO C**

**Planos mecánicos**



POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
17	1	Servomotor AM9121-xx00		Genérico	
16	1	Eje lineal (Ø=122)(750,0)		Genérico	
15	2	Soporte en L para eje lineal		Aceero Inox. AISI 304	
14	20	ISO 4762 - M4 x 8		Aceero Inox. AISI 304	
13	1	Sensar EZ0-Hum		Genérico	
12	1	Sensar EZ0-CO2		Genérico	
11	2	Soporte para sensores		Aceero Inox. AISI 304	
10	1	Ensamble de bombas peristálticas		Genérico	
9	2	Tina de cultivo		Genérico	
8	2	Box multipin para sensores		Genérico	
7	1	Cámara		Genérico	
6	4	Luminarias LED		Genérico	
5	2	Plancha de soporte		Aceero Inox. AISI 304	
4	1	Tablero eléctrico		Aceero Inox. AISI 304	
3	4	Pies gripper		Aceero Inox. AISI 304	
2	4	Placa para soporte de pies		Aceero Inox. AISI 304	
1	1	Estructura principal		Aceero Inox. AISI 304	

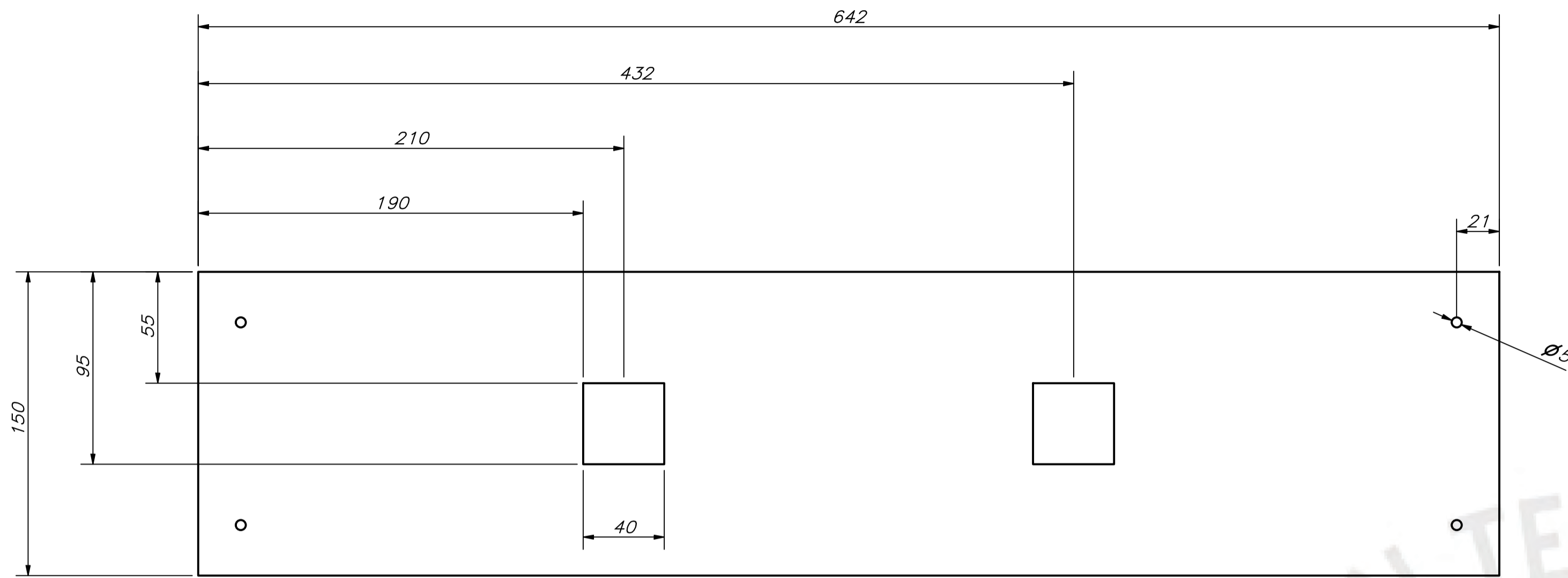
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
 CIENCIAS E INGENIERÍA — INGENIERÍA MECATRÓNICA  
 METODO DE PROYECCIÓN: ESCALA: 1:5  
 20141933 AGUILAR PAREDES, DAVID MOISES FECHA: 2024.06.18  
 LÁMINA: AO



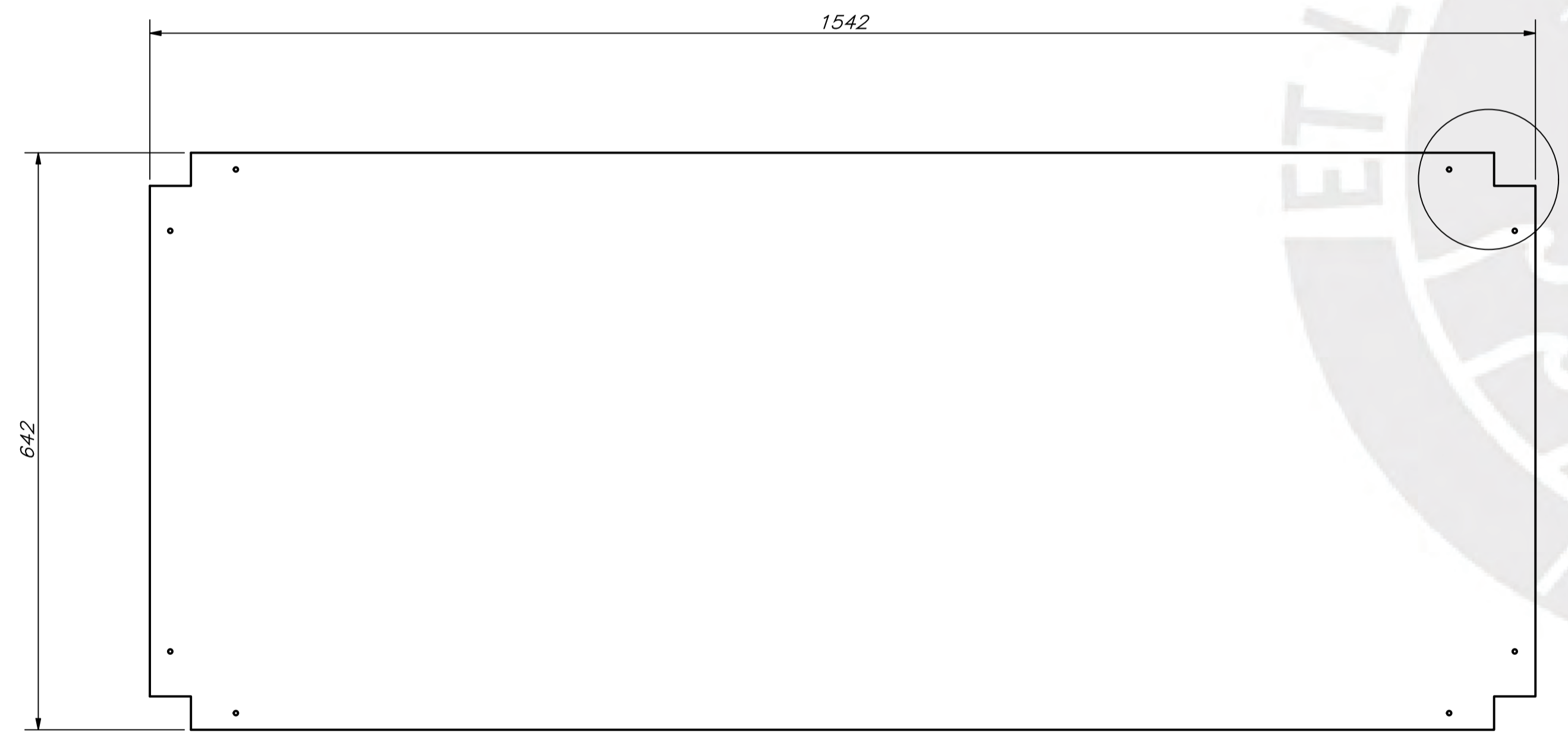
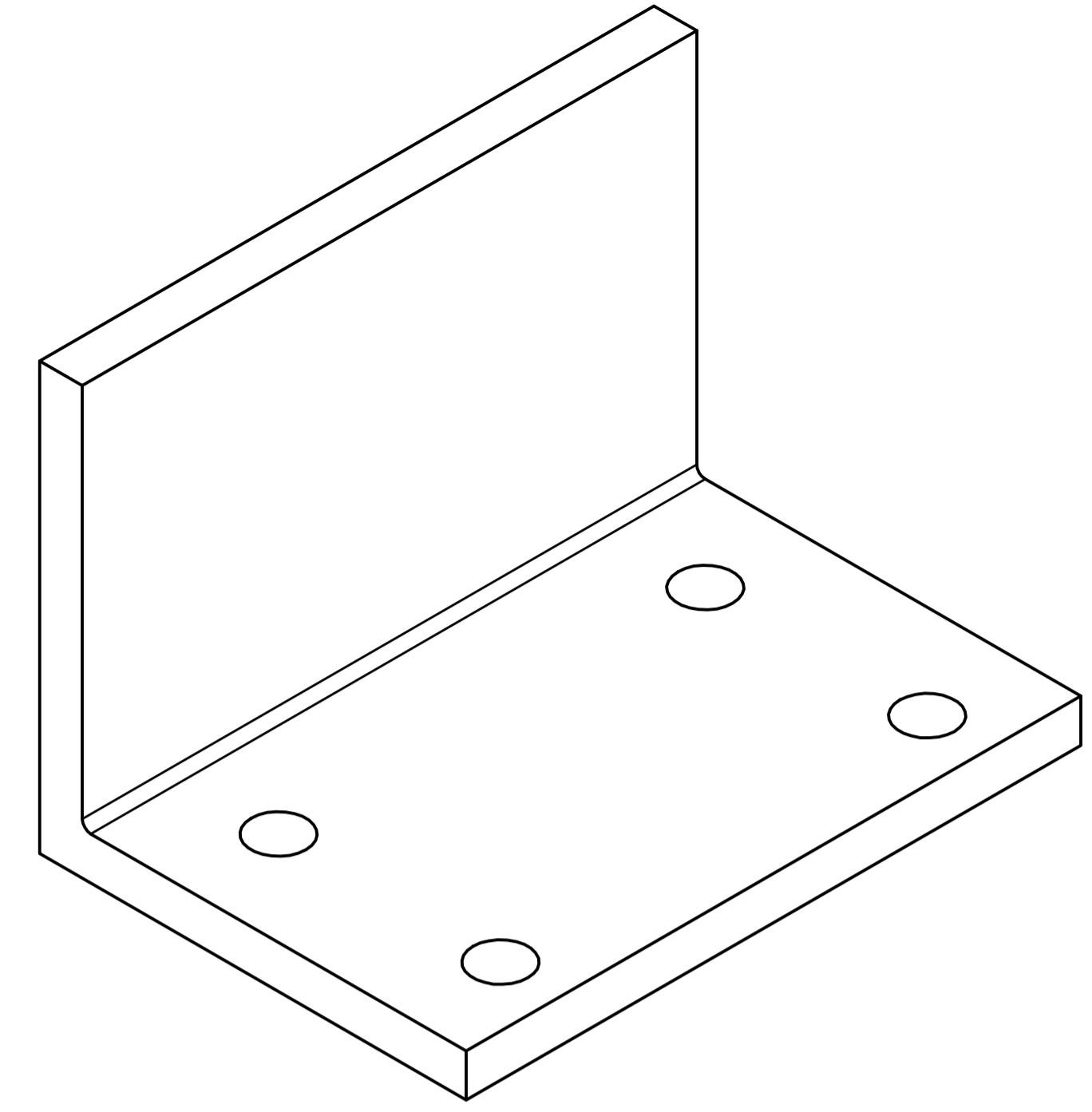
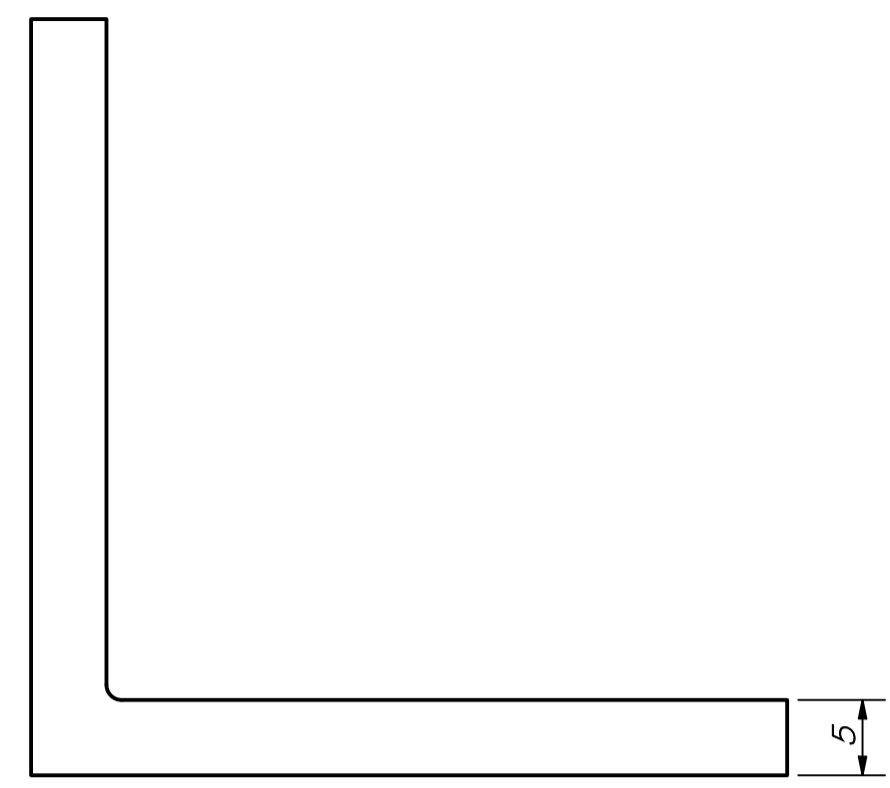
PARTS LIST					
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
5	2	TUBO CUADRADO - 50x50x2 - 225	ISO 10799-2	Aceero Inox. AISI 304	
4	13	TUBO CUADRADO - 50x50x2 - 550	ISO 10799-2	Aceero Inox. AISI 304	
3	4	TUBO CUADRADO - 50x50x2 - 1450	ISO 10799-2	Aceero Inox. AISI 304	
2	2	TUBO CUADRADO - 50x50x2 - 1550	ISO 10799-2	Aceero Inox. AISI 304	
1	4	TUBO CUADRADO - 50x50x2 - 1825	ISO 10799-2	Aceero Inox. AISI 304	

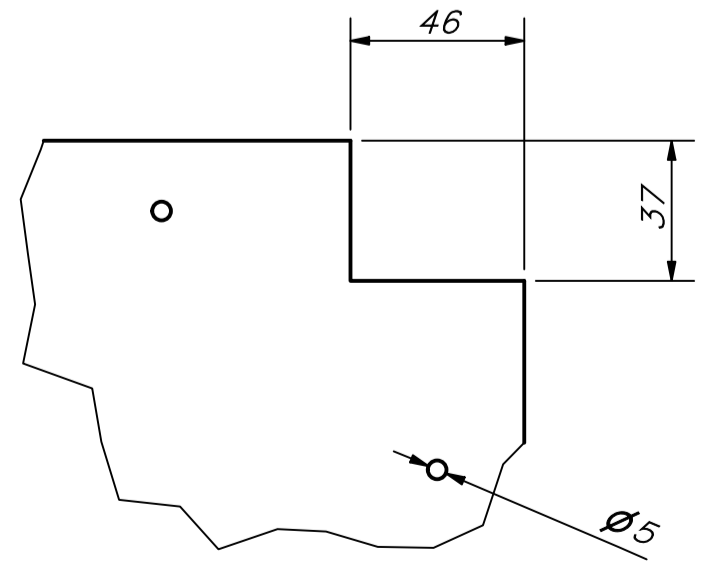
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA		
METODO DE PROYECCIÓN	ESTRUCTURA PRINCIPAL	ESCALA 1:5
20141933	AGUILAR PAREDES, DAVID MOISES	FECHA: 2014.06.18 LÁMINA: AO



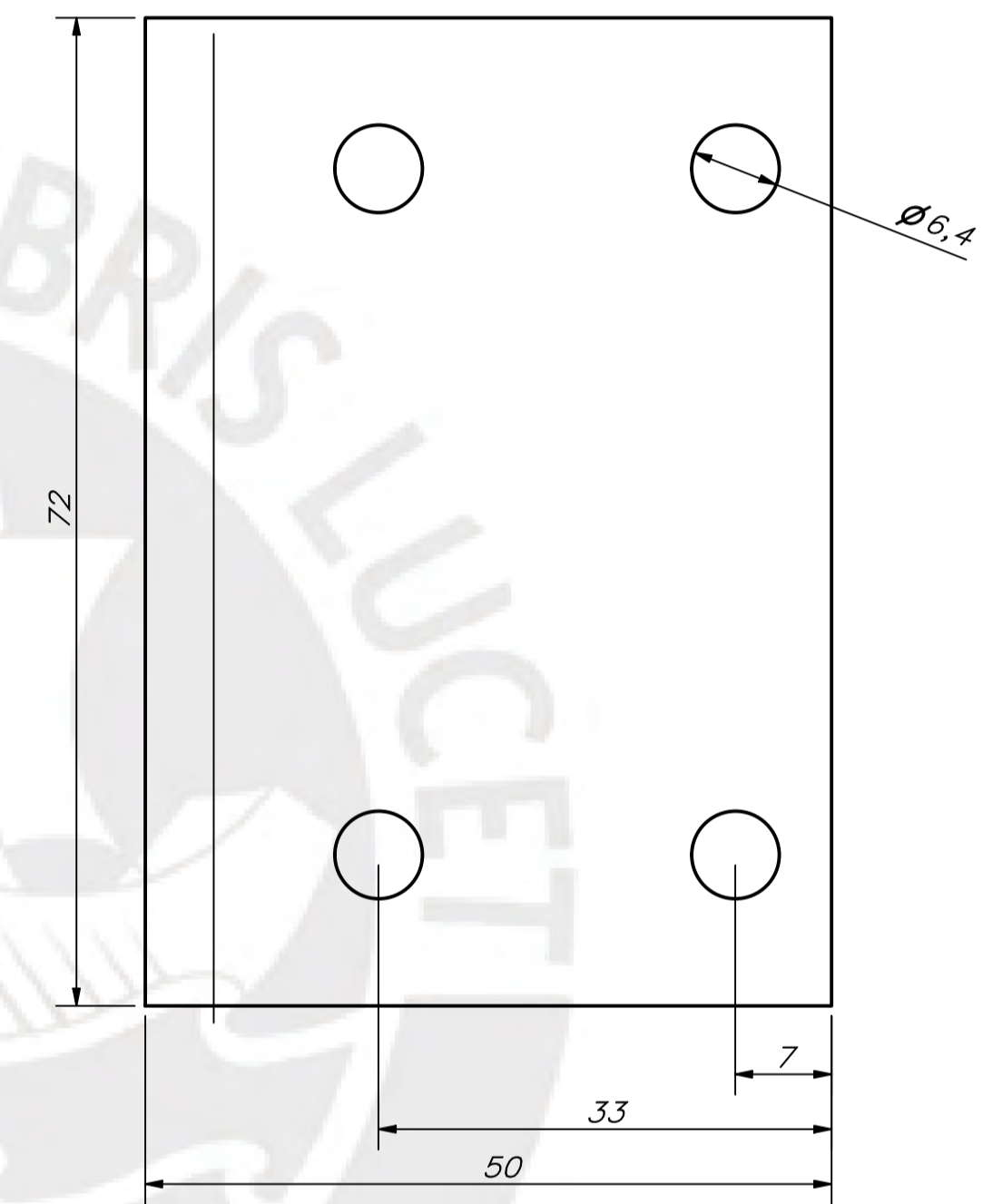
PLANCHA SOPORTE PERISTÁLTICAS  
 ESPESOR 4 mm  
 ESCALA 1:2



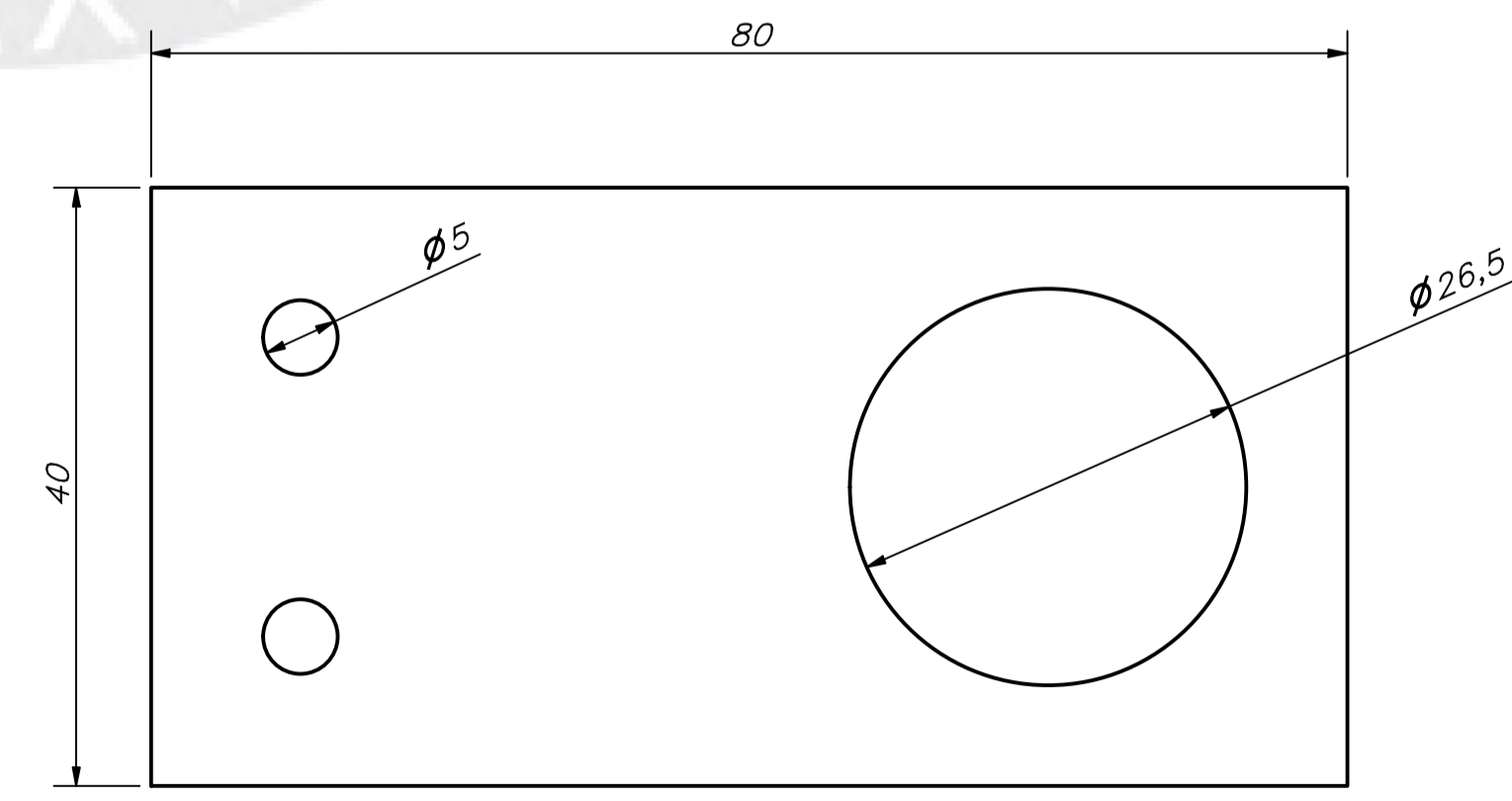
PLACA DE SOPORTE  
 ESPESOR 4 mm  
 ESCALA 1:5



DETALLE A  
 ESCALA 1 : 2

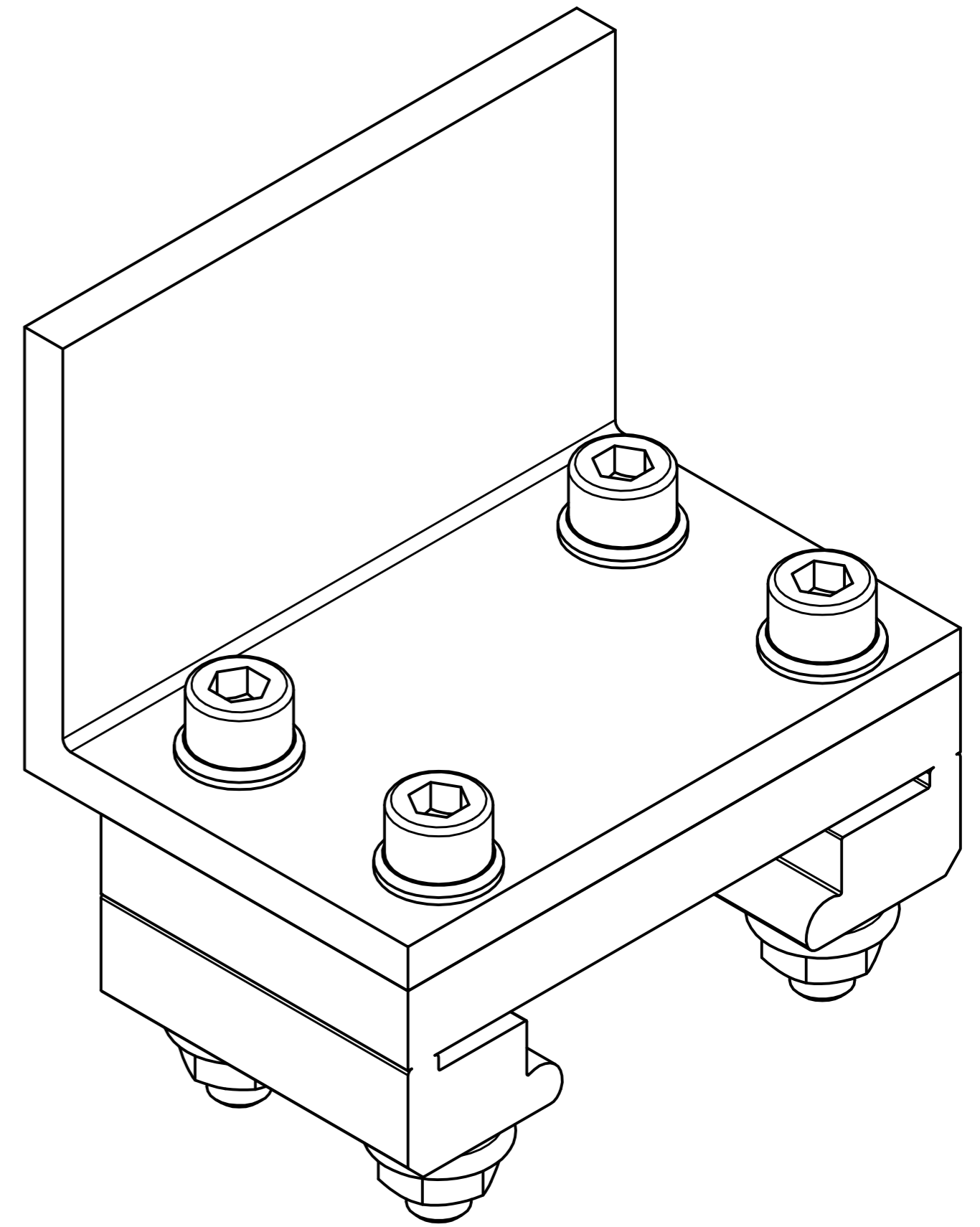
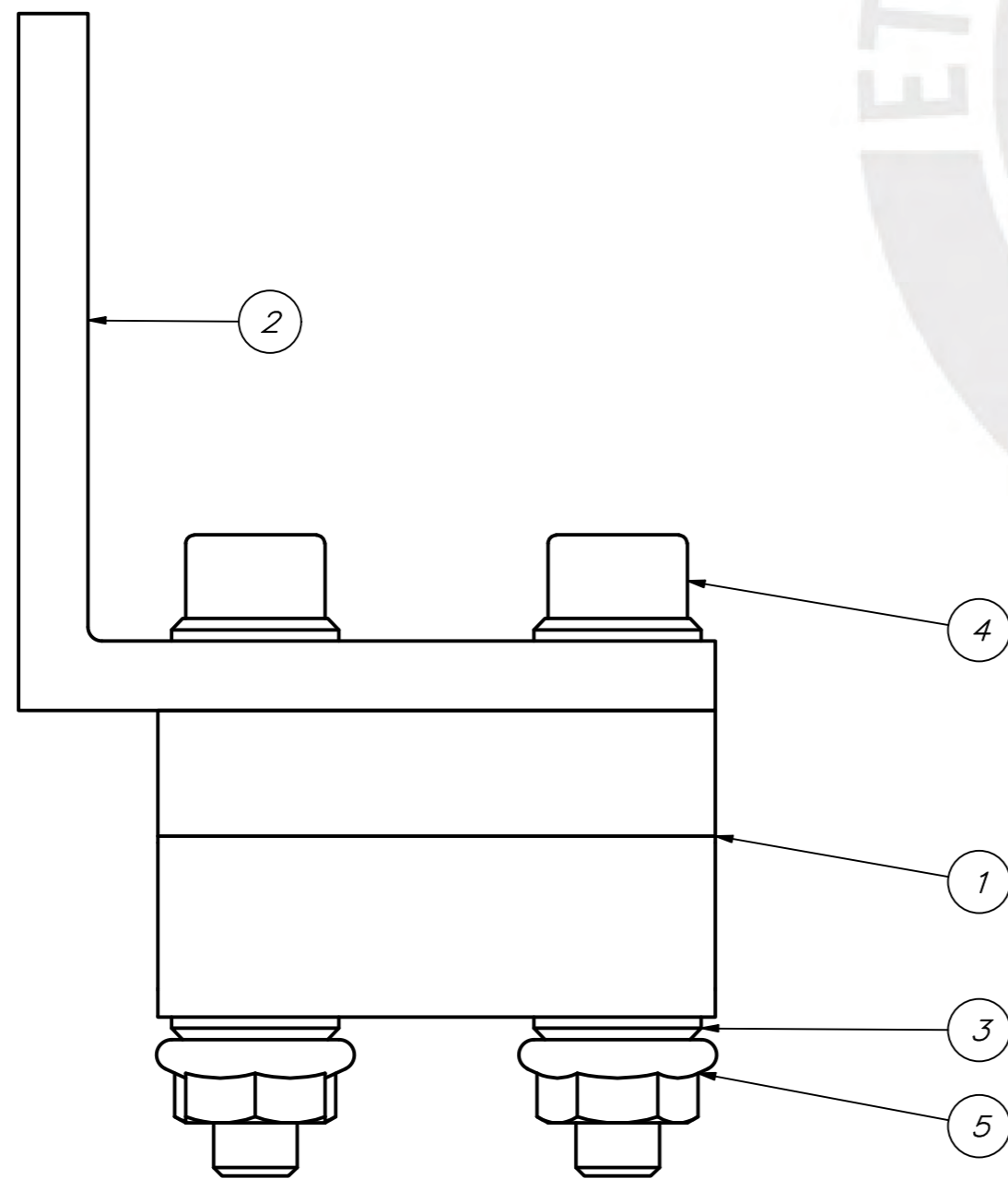
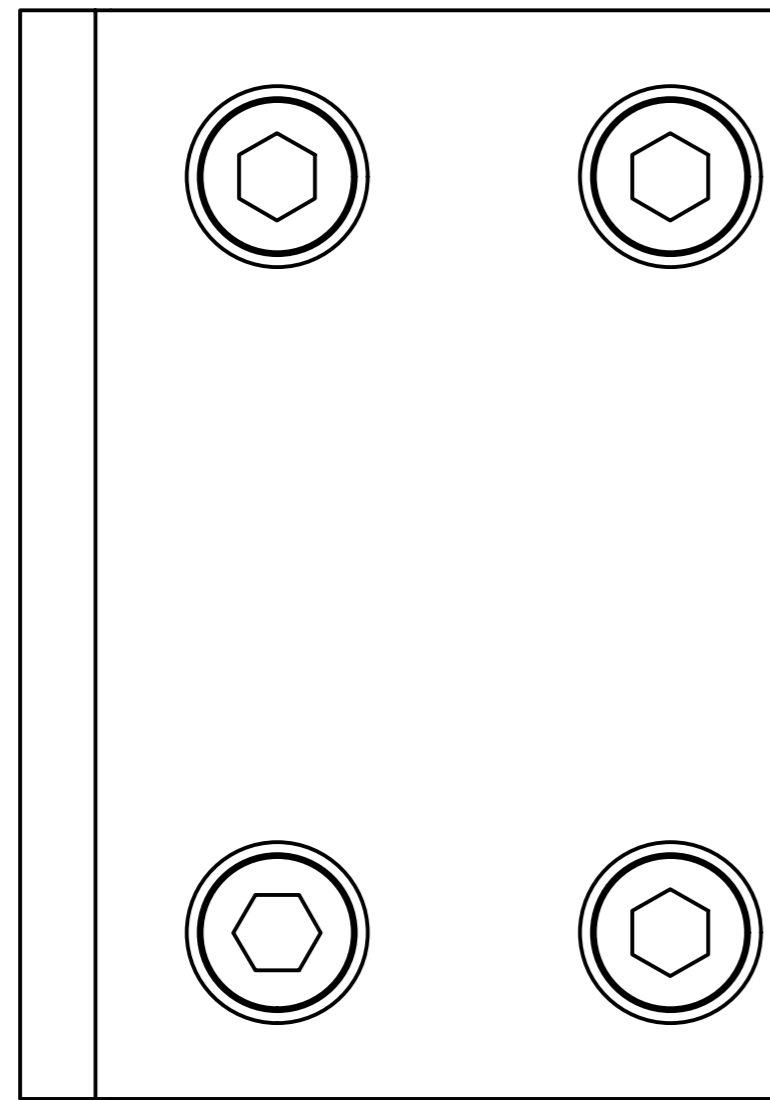


SOPORTE PARA EJE LINEAL  
 PERFIL DIN 59370 - 50 x 5  
 ESCALA 2:1



SOPORTE PARA SENSORES  
 ESPESOR 2mm  
 ESCALA 2:1

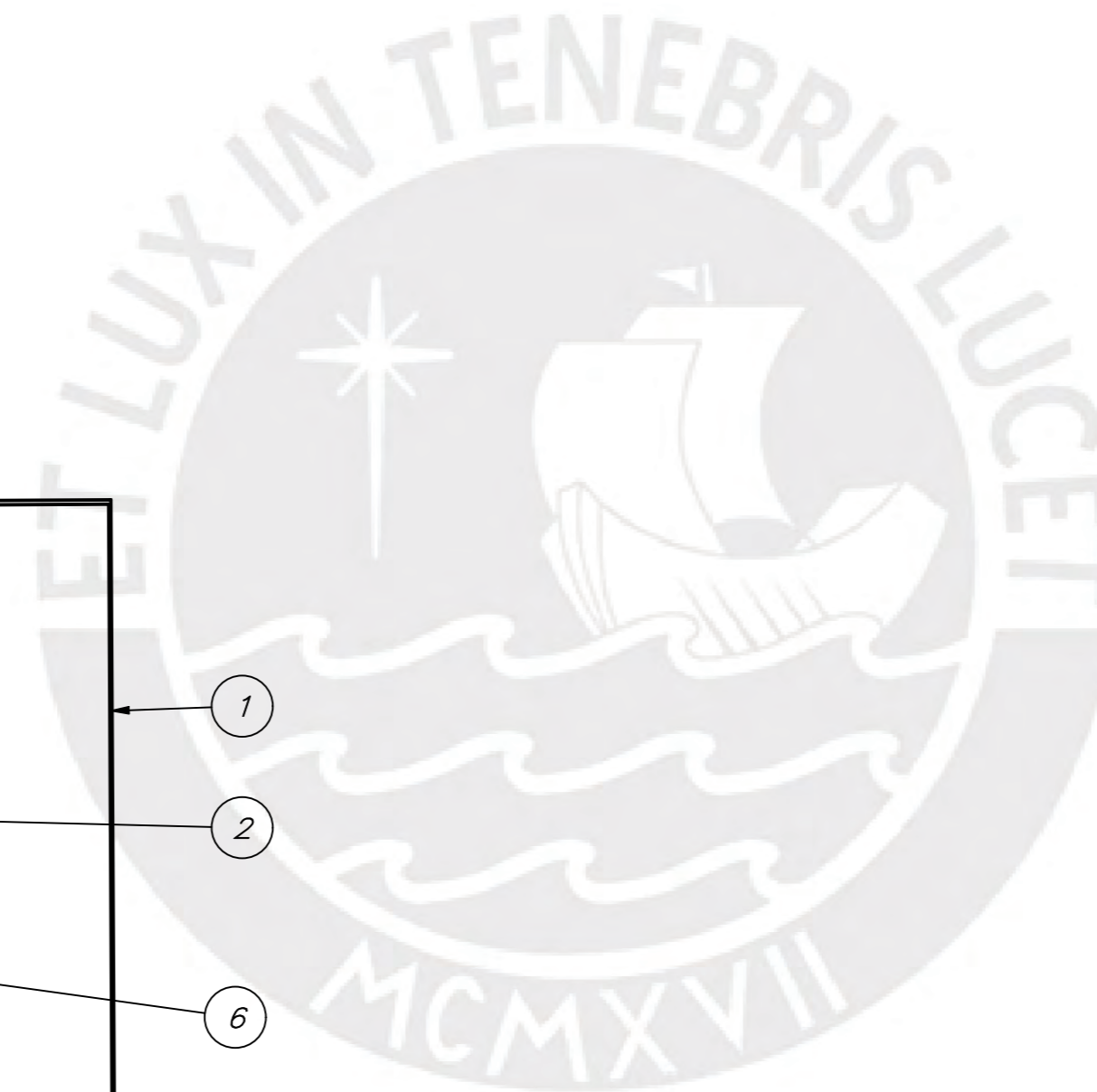
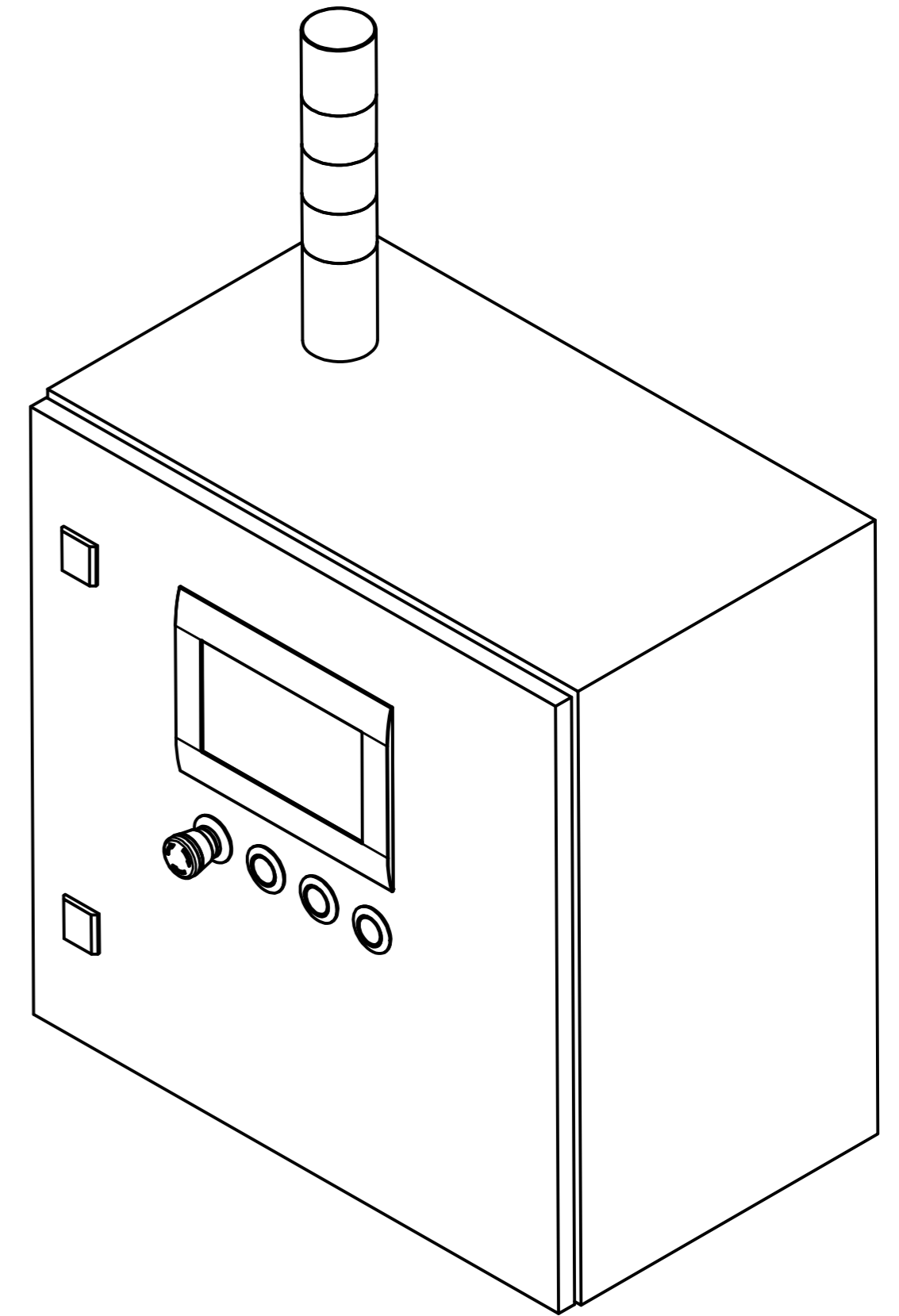
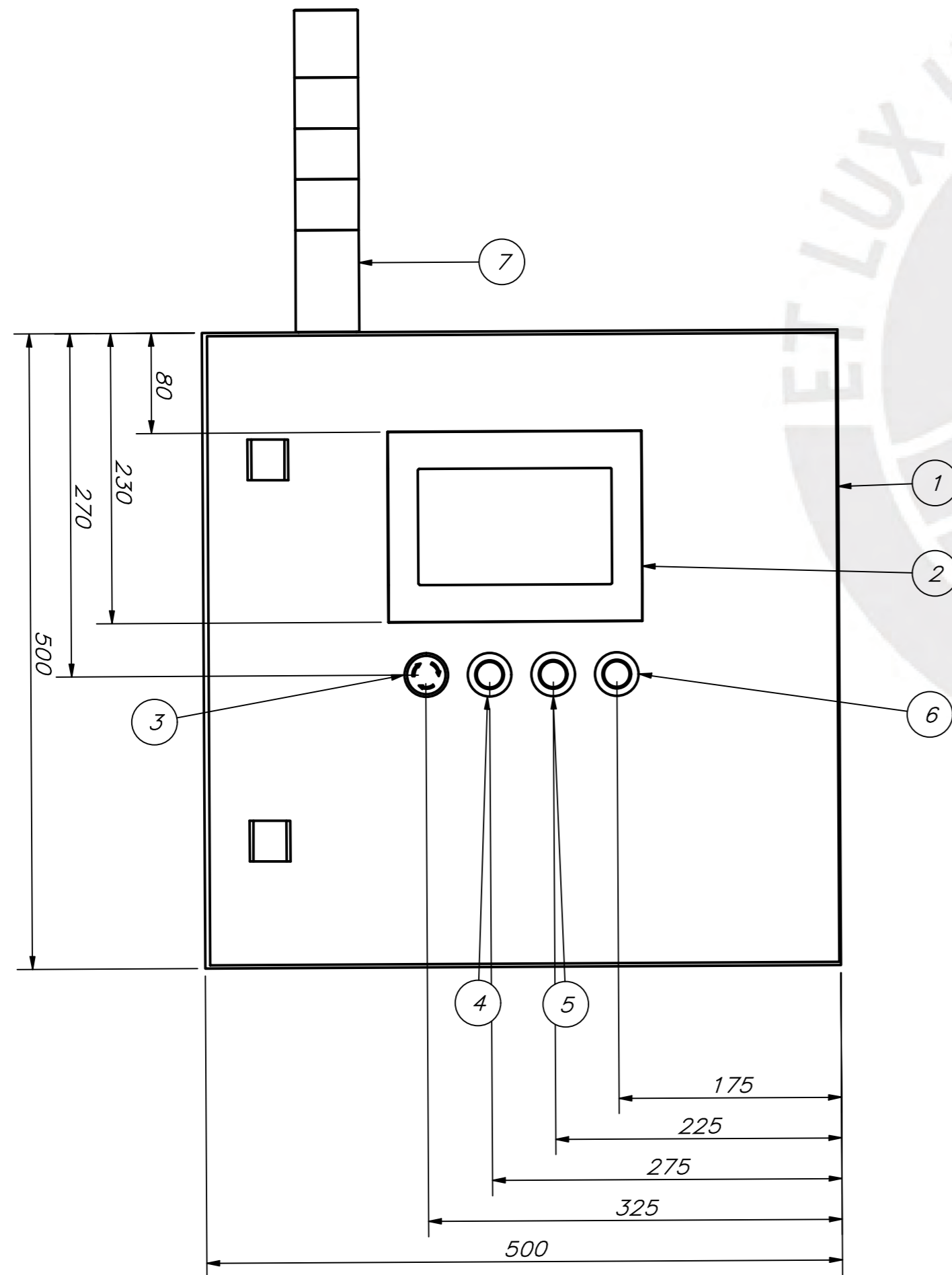
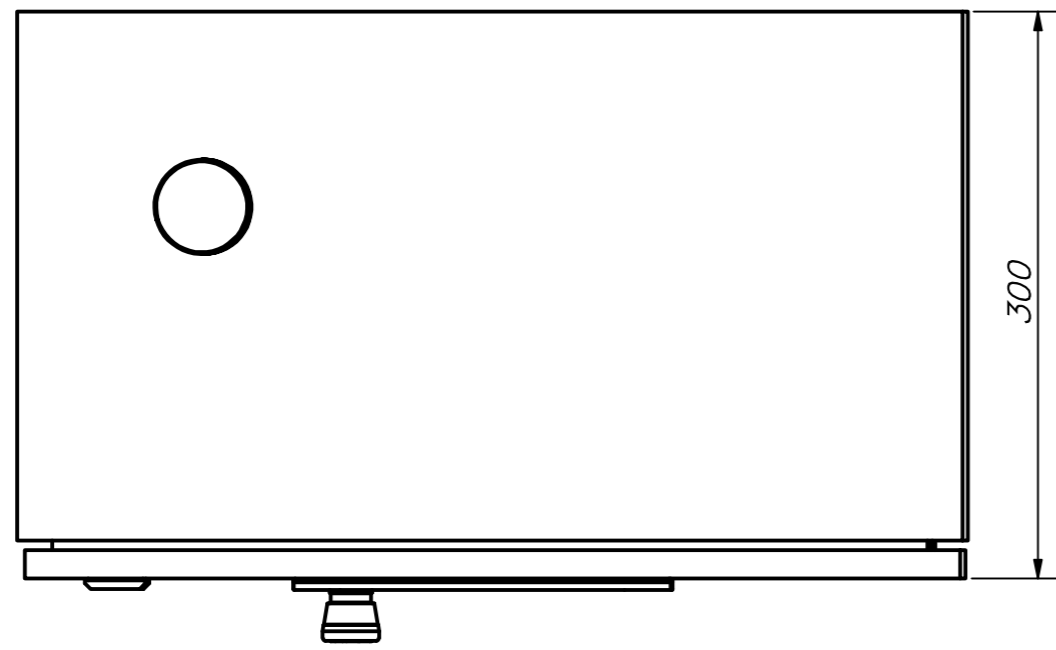
ACABADO SUPERFICIAL	TOLERANCIA GENERAL	MATERIAL
		Acero inox. AISI 304
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	ACCESORIOS VARIOS	ESCALA
20141933	AGUILAR PAREDES, DAVID MOISÉS	FECHA: 2024.06.18
COTA NOMINAL	COTA MÁXIMA	COTA MÍNIMA
		LÁMINA: A1



PARTS LIST					
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
5	4	Rosca M6	ISO 4161	Acero inox. AISI 304	
4	4	Tornillo allen - M6 x 40	ISO 4762	Acero inox. AISI 304	
3	8	Arandela - 6 - 140 HV	ISO 7090	Acero inox. AISI 304	
2	1	Soporte para eje lineal	DIN 59370	Acero inox. AISI 304	
1	1	Accesorio de soporte para eje lineal		Generic	030401EL 40

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
CIENCIAS E INGENIERÍA - INGENIERÍA MECATRÓNICA

MÉTODO DE PROYECCIÓN	ENSAMBLE SOPORTE EJE LINEAL	ESCALA 2:1
20141933	AGUILAR PAREDES, DAVID MOISÉS	FECHA: 2024.06.18
		LÁMINA: A2



PARTS LIST					
POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	NORMA	MATERIAL	OBSERVACIONES
7	1	Baliza		Generic	4000-76502-5310000
6	1	Botón de reset azul		Generic	
5	1	Botón de stop rojo		Generic	69110
4	1	Botón de inicio verde		Generic	69110
3	1	Botón de emergencia		Generic	69100
2	1	Computadora industrial BECKHOFF		Generic	CP6606-0001-0020
1	1	Tablero RITTAL AE 1013.600		Acero Inox.	Marca RITTAL

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ CIENCIAS E INGENIERÍA – INGENIERÍA MECATRÓNICA		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	TABLERO ELÉCTRICO	ESCALA 1:4
20141933	AGUILAR PAREDES, DAVID MOISÉS	FECHA: 2024.06.18
		LÁMINA: A2

## ANEXO C2

### Planos eléctricos

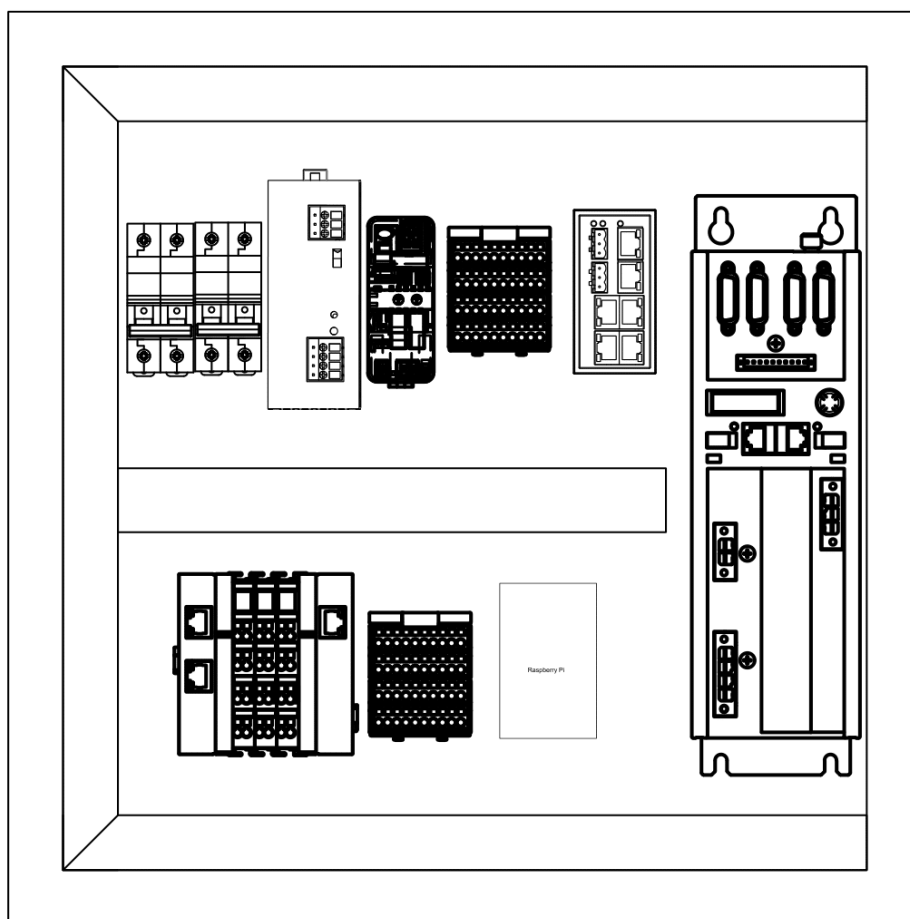
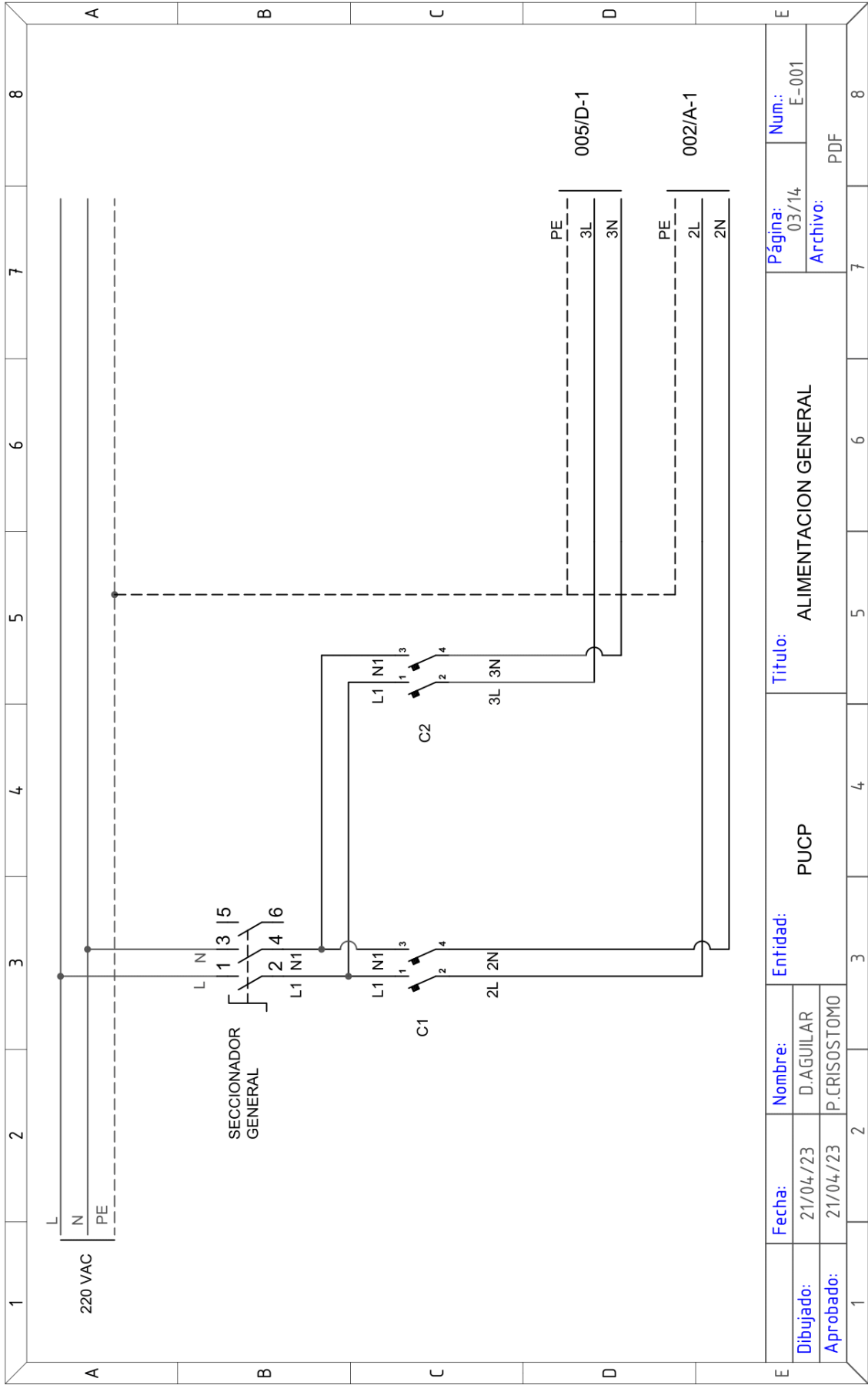


Figura C1: Vista de los componentes del tablero eléctrico. Fuente: elaboración propia.

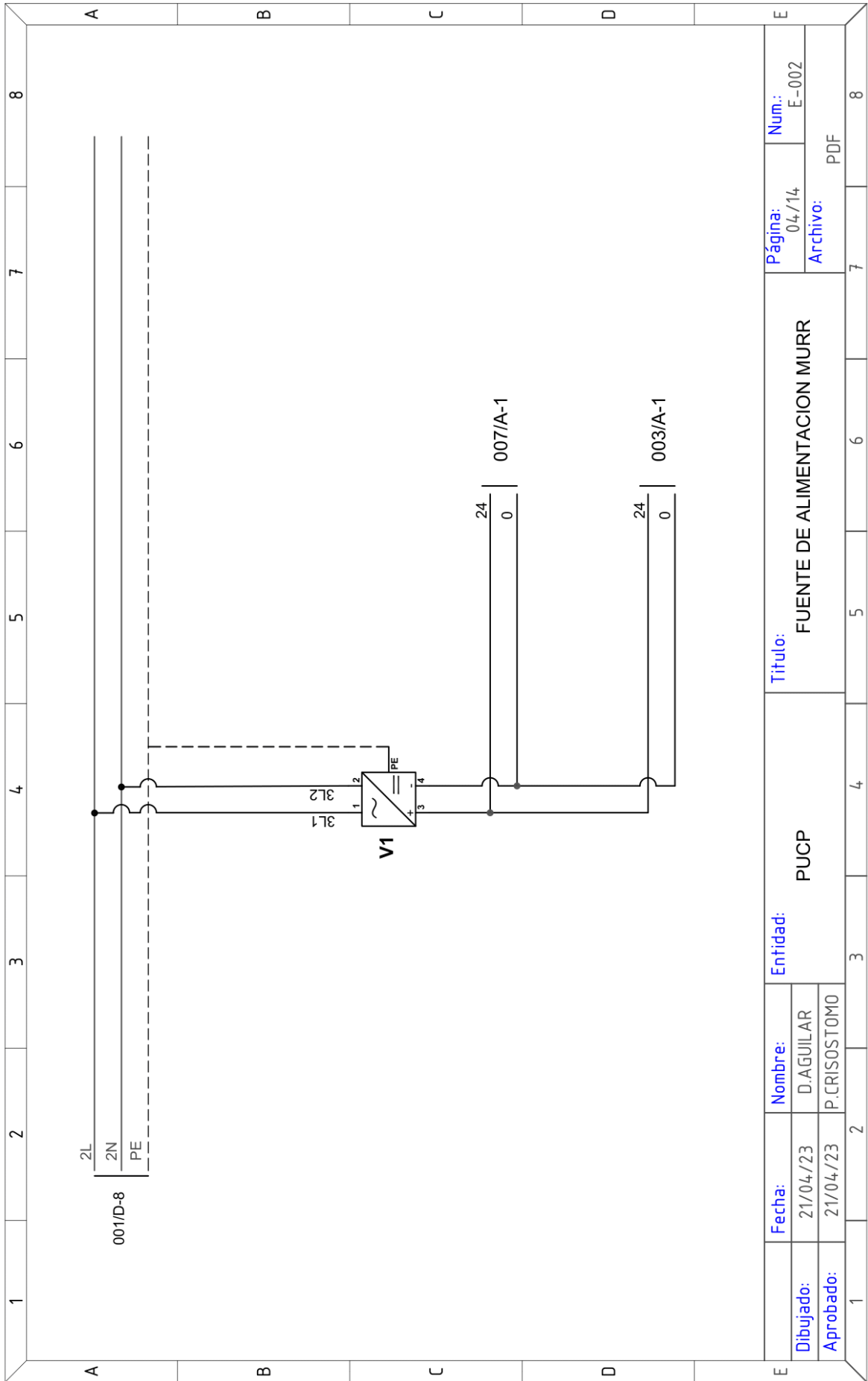
1		2		3		4		5		6		7		8	
A		B		C		D		E		A		B		C	
SÍMBOLO		DESCRIPCIÓN		MARCA		CÓDIGO									
C1		Interruptor termomagnético 3x16		SCHNEIDER		C60N C 16A									
C2		Interruptor termomagnético 2x16		SCHNEIDER		C60N C 16A									
V1		ECO-RAIL-2 Fuente de alimentación		MURR		85133									
MICO		Distribuidor de potencia MICO MURR		MURR		9000-41064-0600000									
SWITCH1		Switch Ethernet		MURR		58170									
PLC1		Panel PC 7"		BECKHOFF		CP6606-0001-0020									
TE1		Acoplador EtherCAT		BECKHOFF		EK1100									
TE2		EtherCAT terminal - 8 entradas digitales		BECKHOFF		EL1008									
TE3		EtherCAT terminal - 8 salidas digitales		BECKHOFF		EL2008									
TE4		EtherCAT extension		BECKHOFF		EK1110									
EMG1		Pulsador de emergencia		MURR		69100									
S1		Pulsador verde iluminado (start)		MURR		69110									
S2		Pulsador rojo iluminado (stop)		MURR		69110									
S3		Pulsador blanco iluminado (reset)		MURR		69110									
CAM1		Cámara		GoPro											
D1		Digital Compact Servo Drives 1-channel		BECKHOFF		AX5106-0000-0200									
M1		Servomotor 0.5 Nm 0.16kW		BECKHOFF		AMB121-0E10-0000									
E		Fecha:		Entidad:		Título:				Página:		Num.:			
Dibujado:		21/04/23		D.AGUILAR		LISTADO DE COMPONENTES				01/10		A-001			
Aprobado:		21/04/23		P.CRISOSTOMO		PUCP				Archivo:		PDF			
1		2		3		4		5		6		7		8	

1	2		3			4		5		6		7		8	
A	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	MARCA	CÓDIGO												
D11 ... D13	Sensor ultrasonido	SCHNEIDER ELECTRIC	C60N C 16A												
A11	Sensor de humedad y temperatura ambiental	SCHNEIDER ELECTRIC	C60N C 16A												
A12	Sensor pH	ATLAS SCIENTIFIC													
A13	Sensor conductividad	ATLAS SCIENTIFIC													
A14	Sensor CO2	ATLAS SCIENTIFIC													
A15	Sensor temperatura (solución)	ATLAS SCIENTIFIC													
A16	Sensor de luz	ATLAS SCIENTIFIC													
K7 - K8	Bomba peristáltica	ATLAS SCIENTIFIC													
K1	Bomba de suministro	SEAFLOW													
K2	Leds	PHILLIPS													
BOX	Box multipin	MURR													
K3	Baliza - Alarma	MURR													
K4	Baliza - Led rojo	MURR													
K5	Baliza - Led amarillo	MURR													
K6	Baliza - Led verde	MURR													
uP	Raspberry Pi	Raspberry													
E	Nombre:	Entidad:	PUCP	Título:	LISTADO DE COMPONENTES										
Dibujado:	Fecha:	Nombre:	Entidad:	PUCP	Título:	LISTADO DE COMPONENTES	Página:	01/10	Num.:	A-001					
Aprobado:	21/04/23	21/04/23	P.CRISOSTOMO	PUCP	LISTADO DE COMPONENTES	PDF									
1	2		3			4		5		6		7		8	

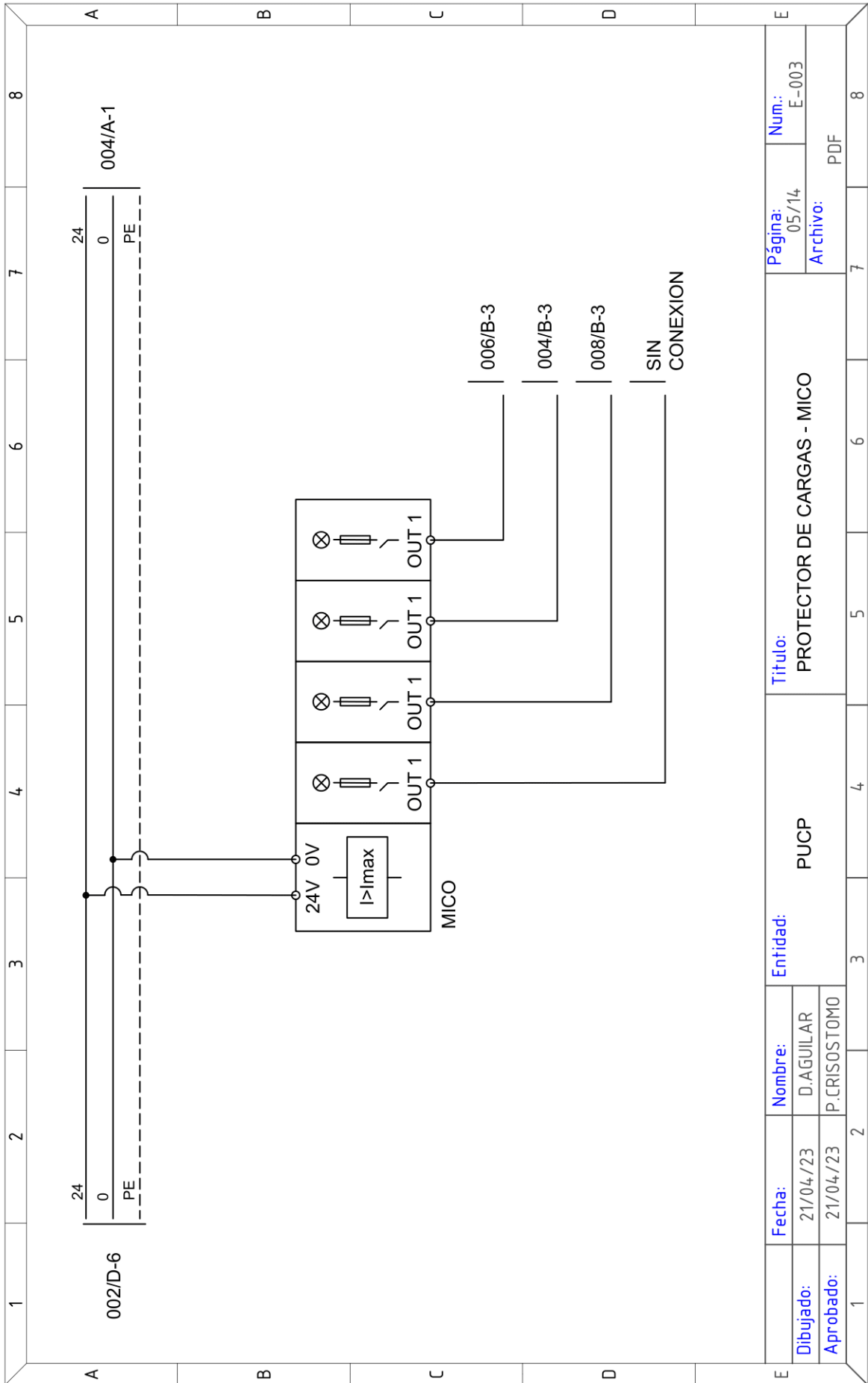




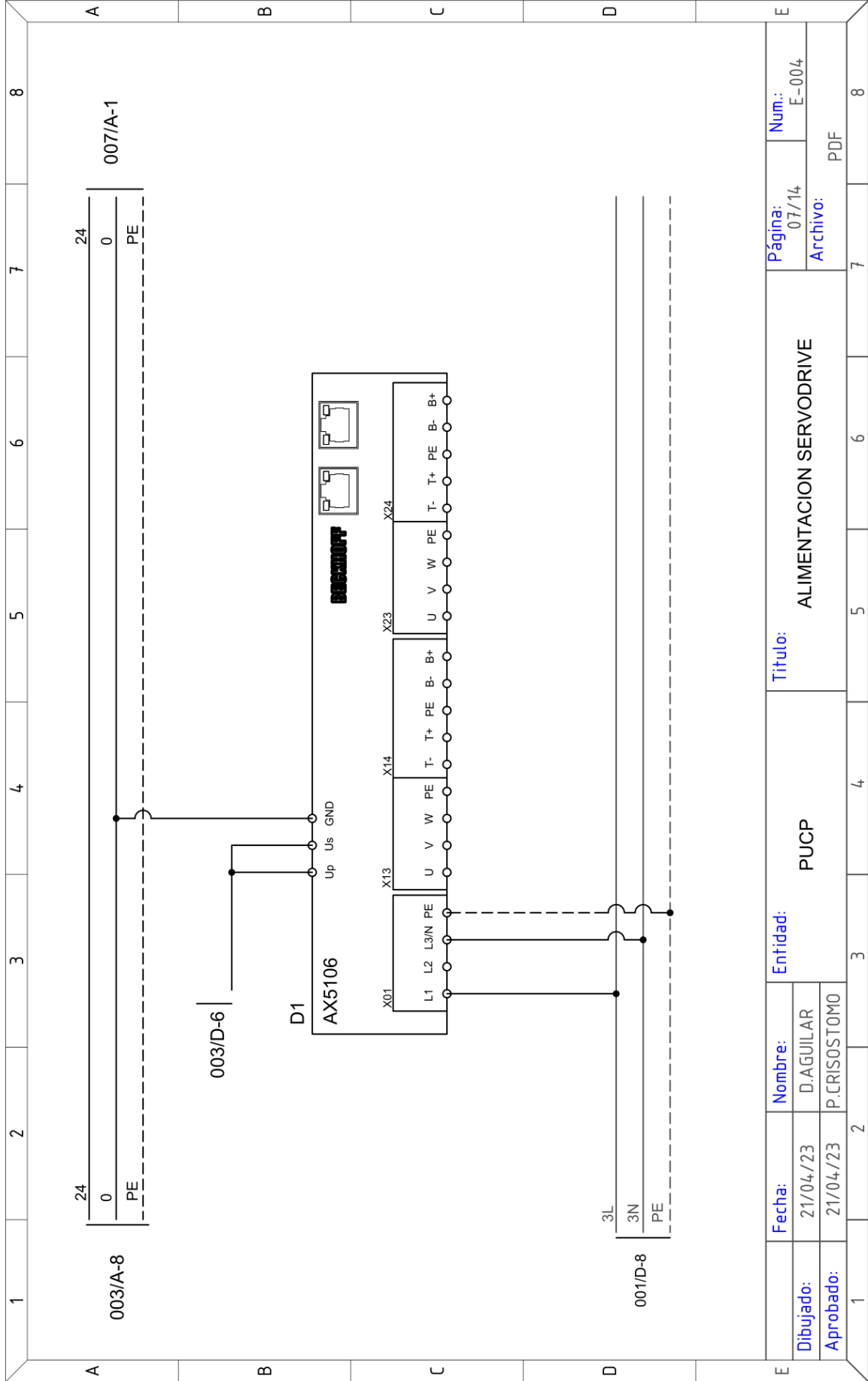
E		Fecha:		Nombre:		Entidad:		Titulo:		Página:		Num.:	
Dibujado:		21/04/23		D.AGUILAR		PUCP		ALIMENTACION GENERAL		03/14		E-001	
Aprobado:		21/04/23		P.CRISOSTOMO						Archivo:		PDF	
1	2	3	4	5	6	7	8						



Dibujado:		Fecha:		Nombre:		Entidad:		Titulo:		Página:		Num.:	
Aprobado:		21/04/23		D.AGUILAR		PUCP		FUENTE DE ALIMENTACION MURR		04/14		E-002	
		21/04/23		P.CRISOSTOMO						Archivo:		PDF	
1		2		3		4		5		6		7	
A		B		C		D		E		8		8	

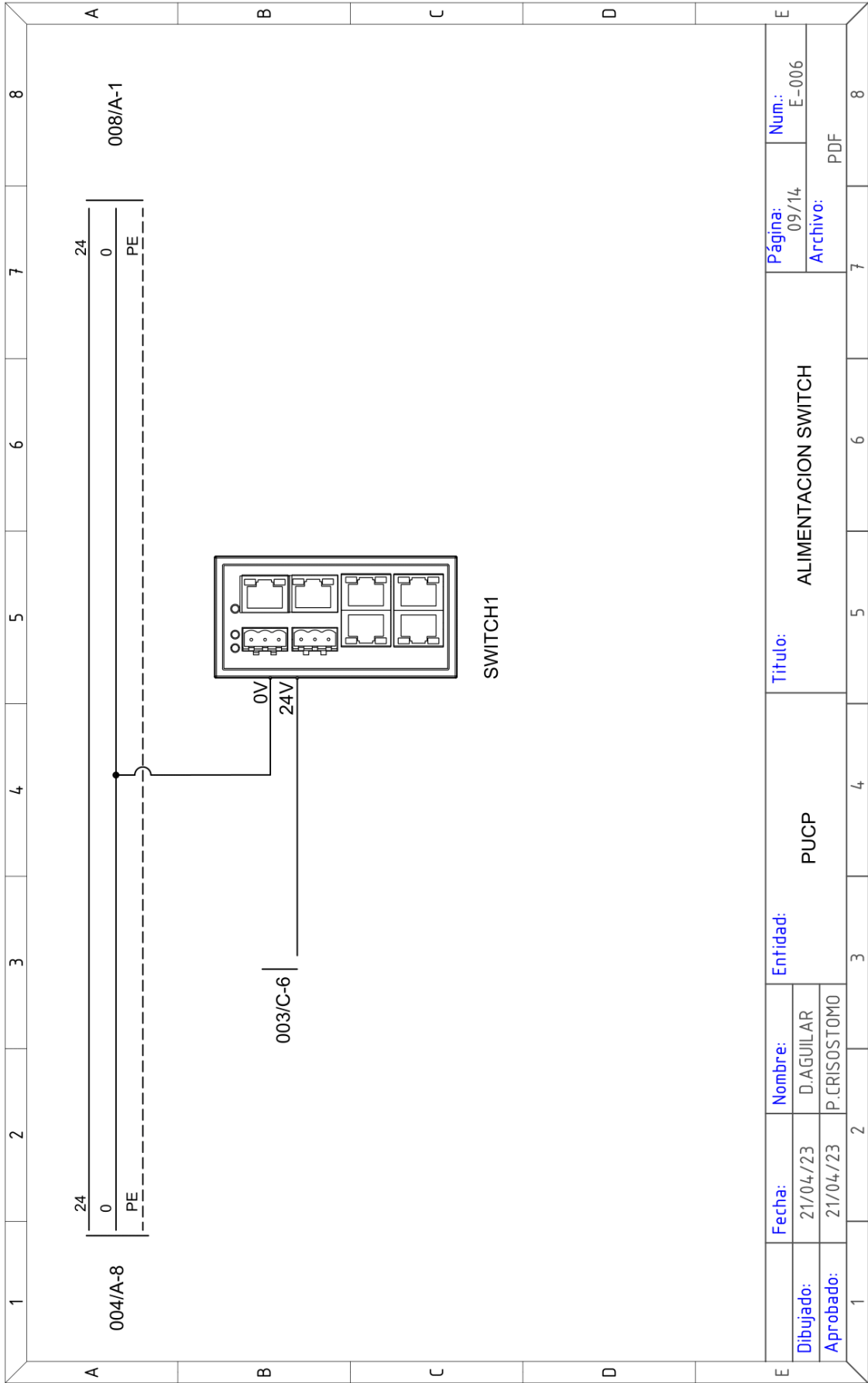


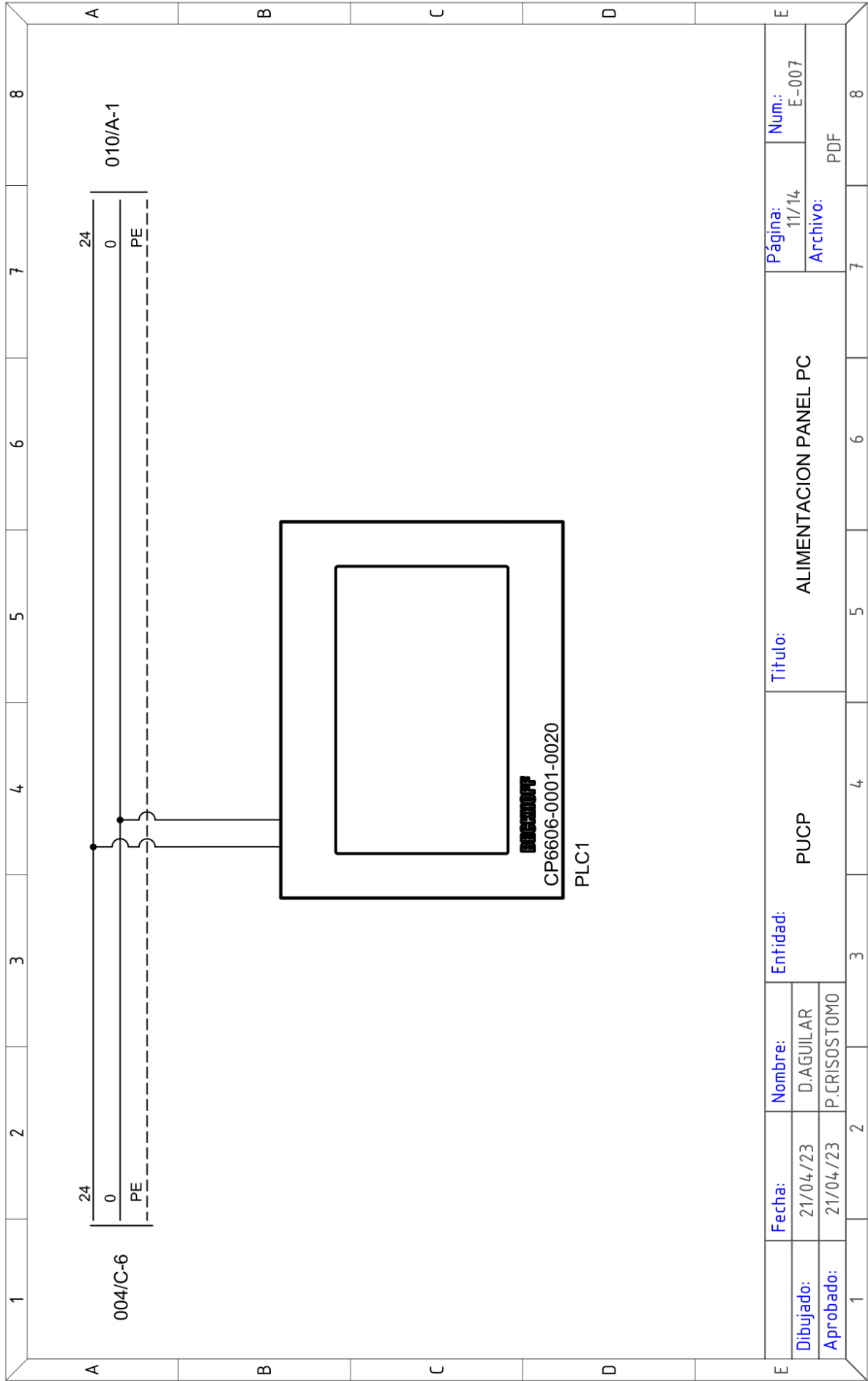
Dibujado:		Fecha:		Entidad:		Titulo:		Página:		Num.:	
Aprobado:		21/04/23		PUCP		PROTECTOR DE CARGAS - MICO		05/14		E-003	
		21/04/23		P.CRISOSTOMO				Archivo:		PDF	



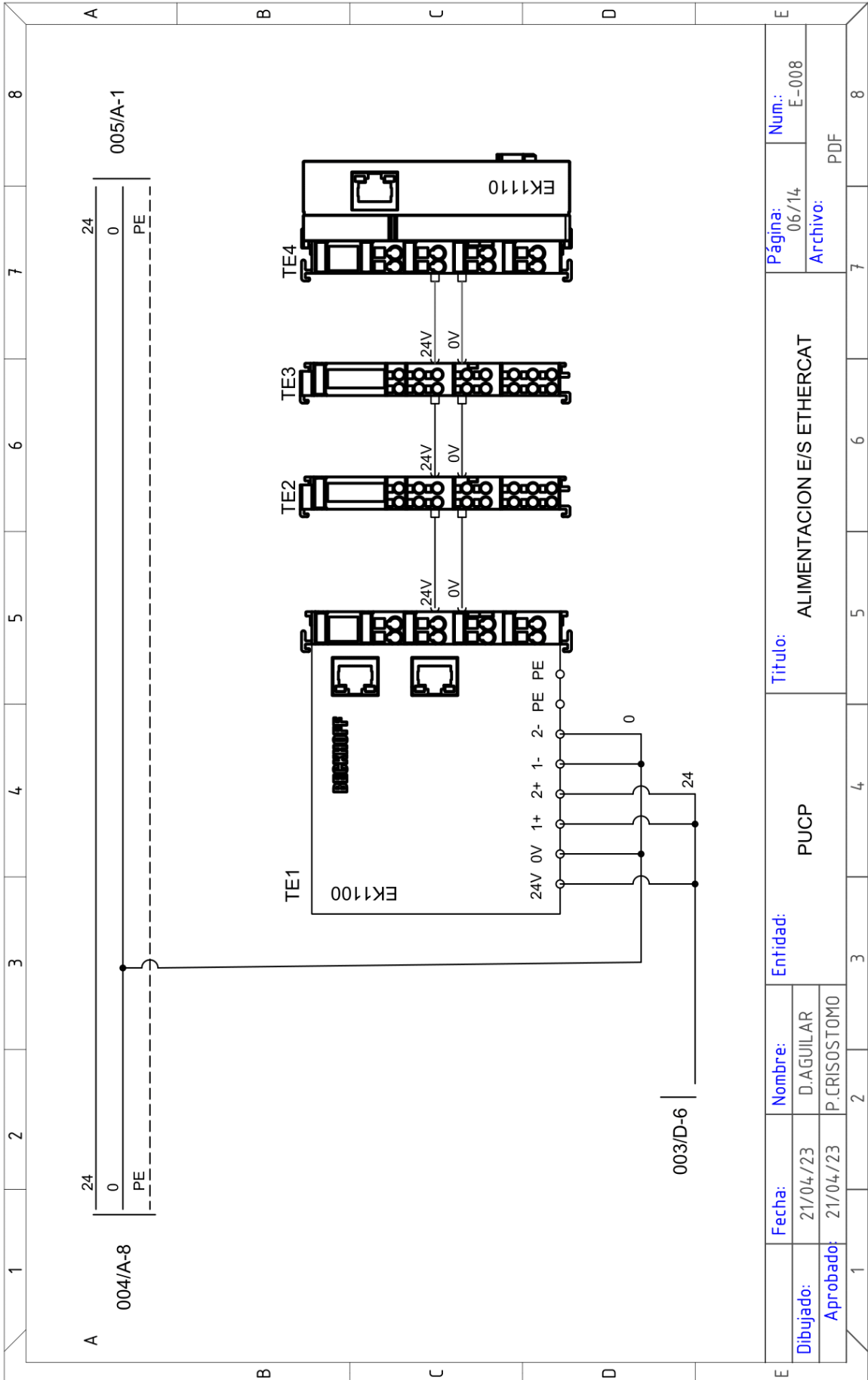
003/A-8		007/A-1	
24	0	24	0
PE	PE	PE	PE
003/D-6		001/D-8	
3L	3N	3L	3N
PE	PE	PE	PE
D1		D1	
AX5106		AX5106	
Up Us GND		Up Us GND	
X01		X01	
L1 L2 L3/N PE		L1 L2 L3/N PE	
U V W PE T- T+ PE B- B+		U V W PE T- T+ PE B- B+	
X13		X13	
U V W PE T- T+ PE B- B+		U V W PE T- T+ PE B- B+	
X14		X14	
U V W PE T- T+ PE B- B+		U V W PE T- T+ PE B- B+	
X24		X24	
U V W PE T- T+ PE B- B+		U V W PE T- T+ PE B- B+	
Fecha:		Fecha:	
21/04/23		07/14	
Nombre:		Num.:	
D.AGUILAR		E-004	
Entidad:		Archivo:	
PUCP		PDF	
Dibujado:		Título:	
21/04/23		ALIMENTACION SERVODRIVE	
Aprobado:		Página:	
P.CRISOSTOMO		7	
1		8	



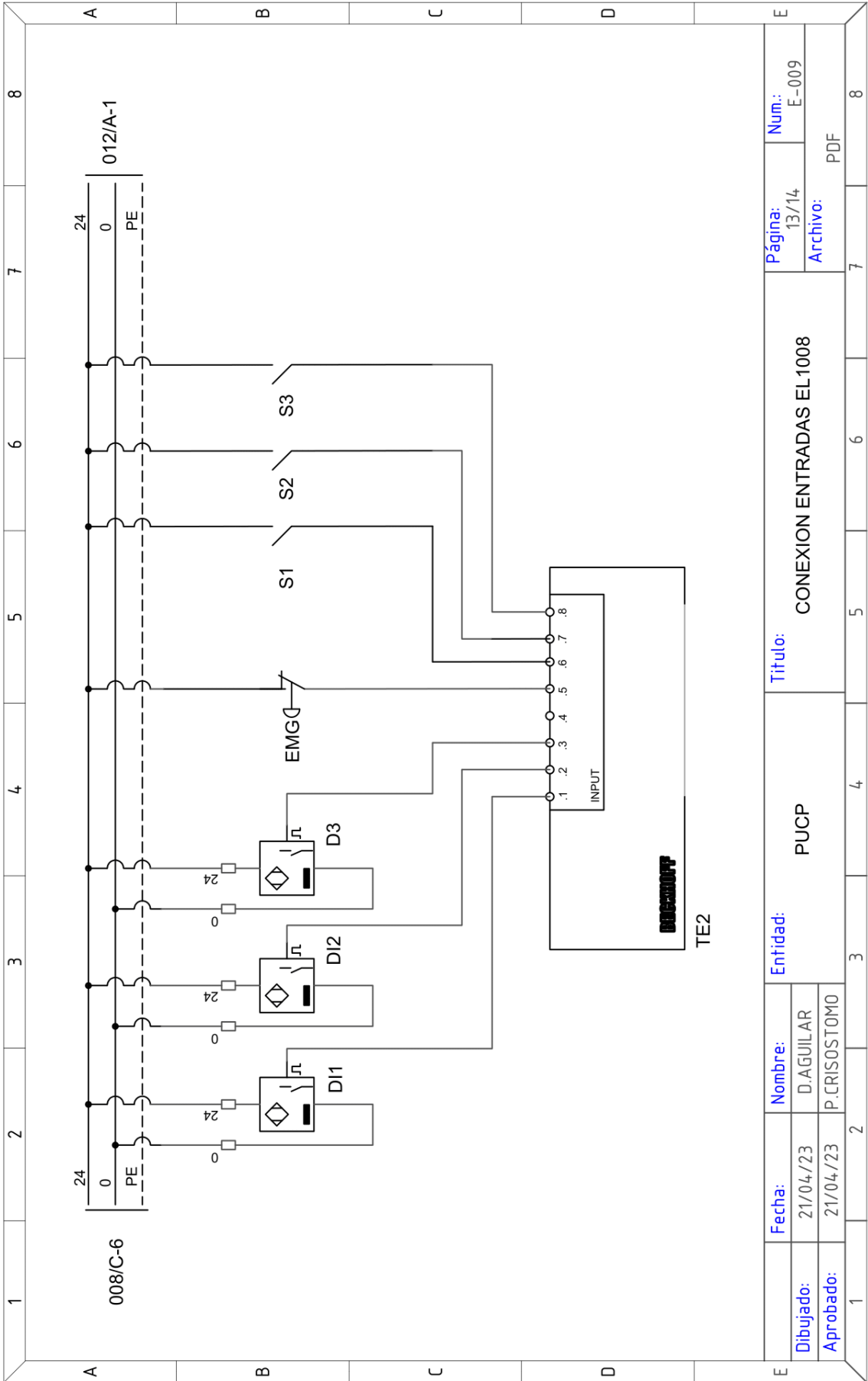




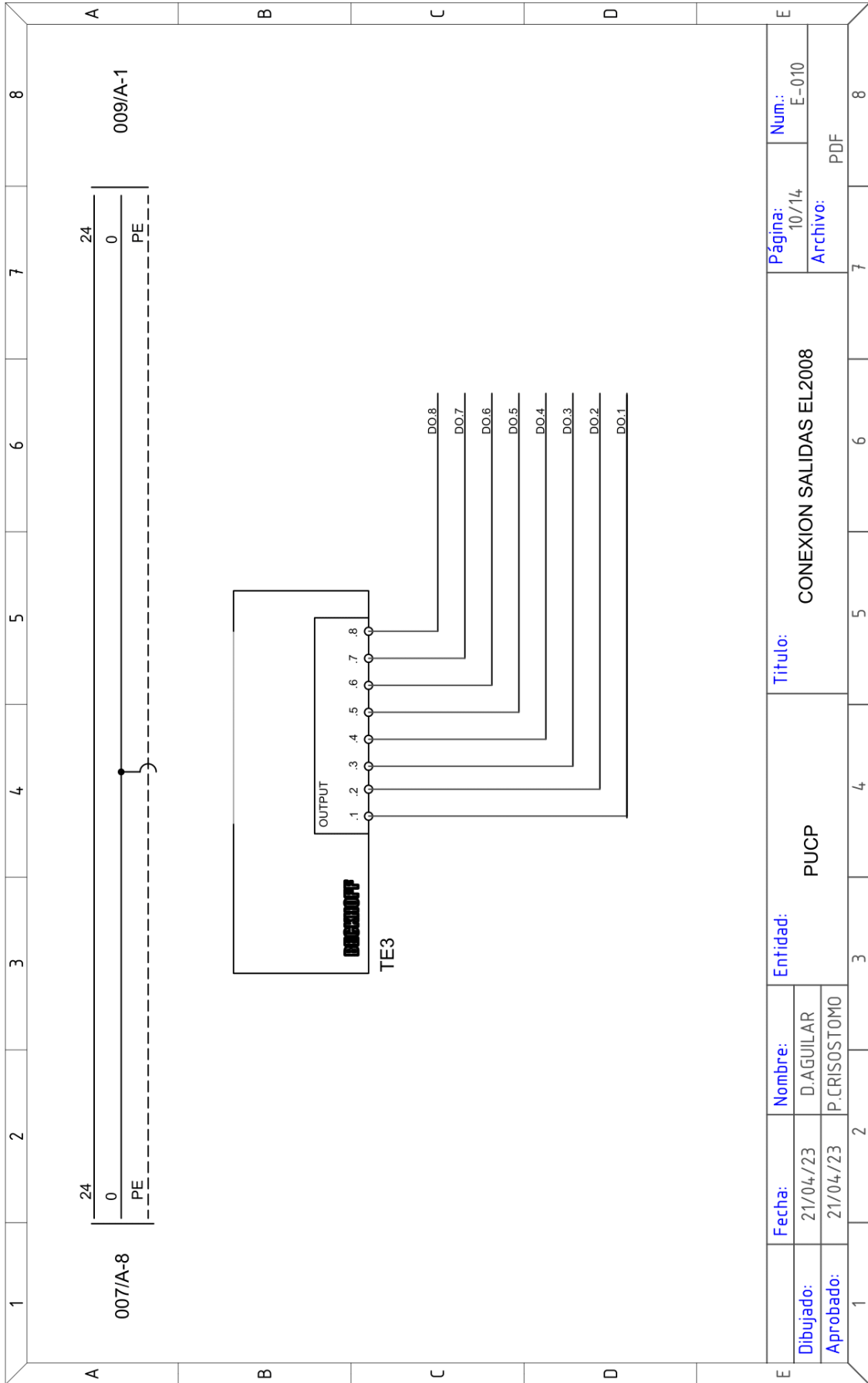
Fecha:		Nombre:		Entidad:		Titulo:		Página:		Num.:	
21/04/23		D.AGUILAR		PUCP		ALIMENTACION PANEL PC		11/14		E-007	
Aprobado:		21/04/23		P.CRISOSTOMO				Archivo:		PDF	
1		2		3		4		5		6	
7		8		A		B		C		D	



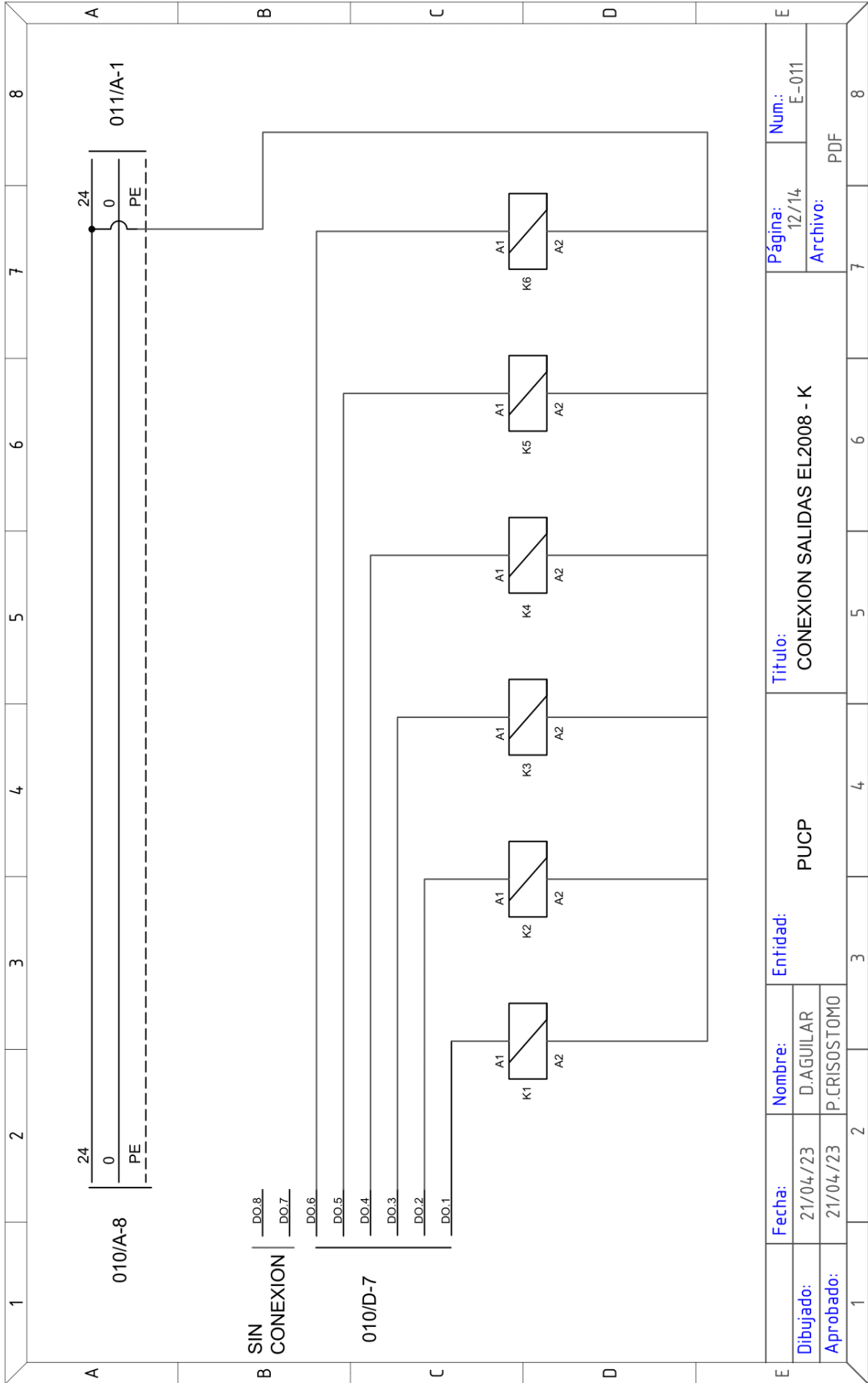
Fecha:		Entidad:		Título:		Página:		Num.:	
21/04/23		PUCP		ALIMENTACION E/S ETHERCAT		06/14		E-008	
Dibujado:		Nombre:		Archivo:		PDF			
21/04/23		D.AGUILAR		P.CRISOSTOMO					
Aprobado:		2		3		4		5	
1		2		3		4		5	
6		7		8		7		8	

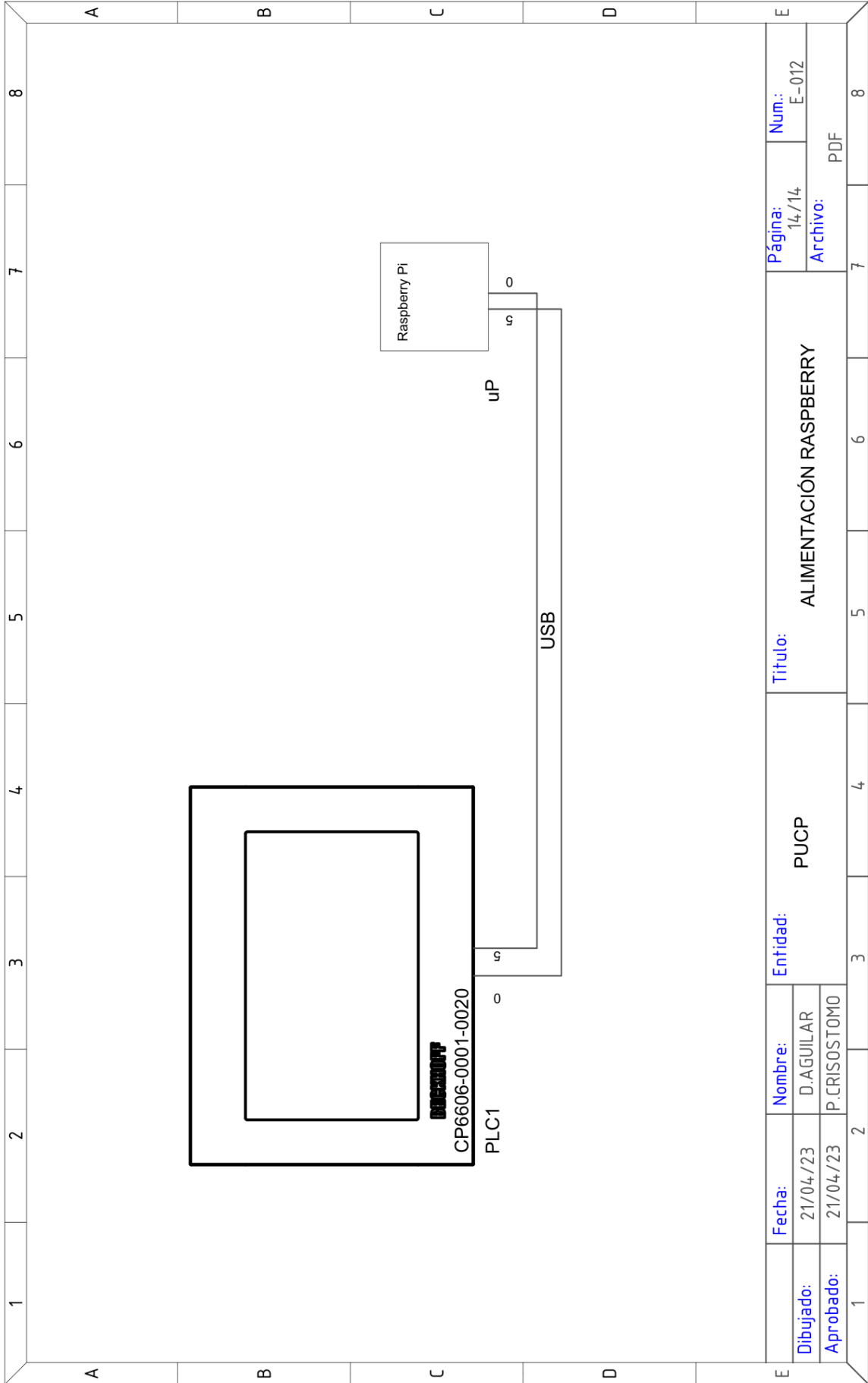


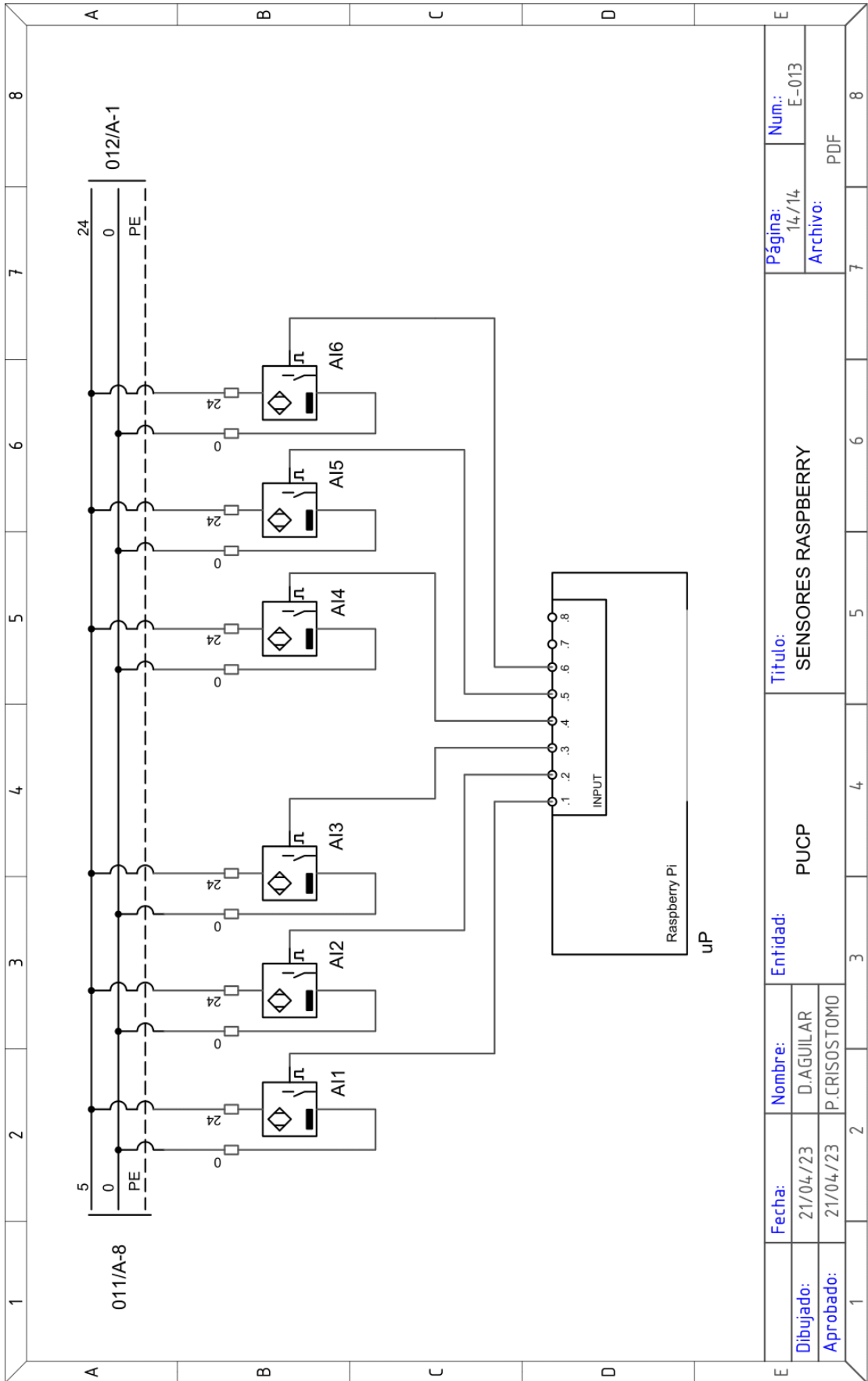
Fecha:		Nombre:		Entidad:		Titulo:		Página:		Num.:	
Dibujado:		D.AGUILAR		PUCP		CONEXION ENTRADAS EL1008		13/14		E-009	
Aprobado:		P.CRISOSTOMO						Archivo:		PDF	
1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4



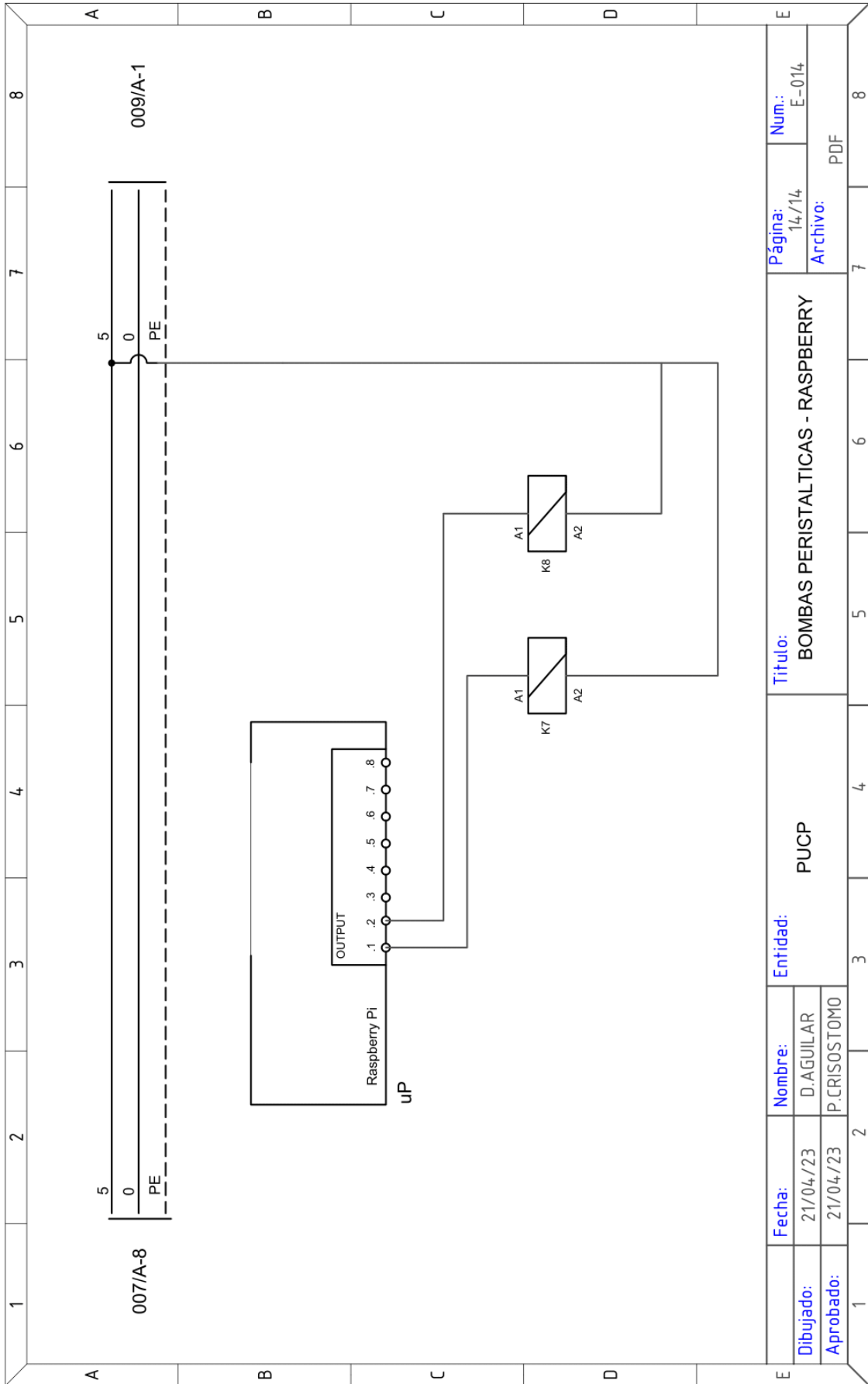
Fecha:		Nombre:		Entidad:		Titulo:		Página:		Num.:	
Dibujado:		D.AGUILAR		PUCP		CONEXION SALIDAS EL2008		10/14		E-010	
Aprobado:		P.CRISOSTOMO						Archivo:		PDF	
1	2	3	4	5	6	7	8				



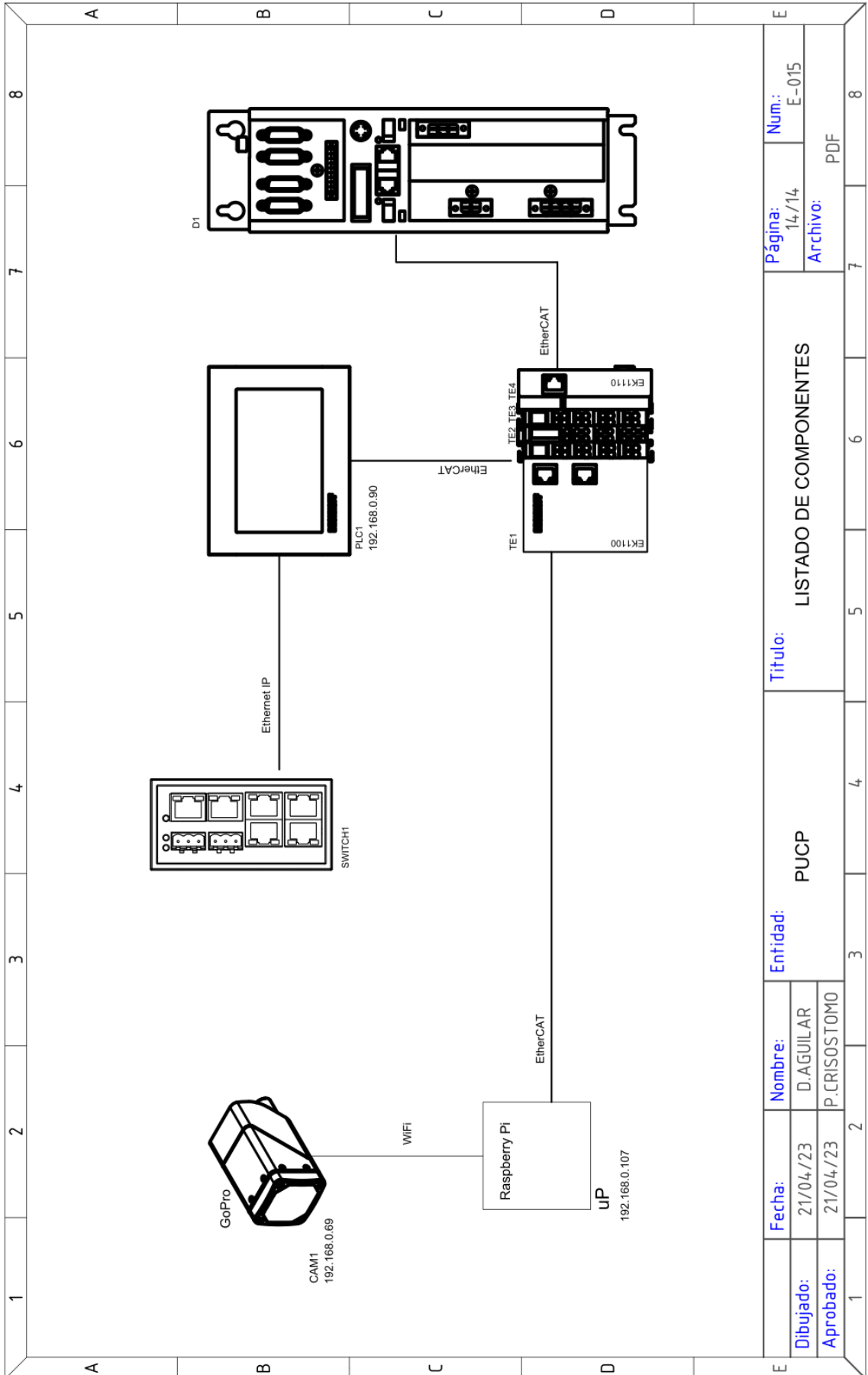




Dibujado: 21/04/23		Nombre: D.AGUILAR		Entidad: PUCP		Titulo: SENSORES RASPBERRY		Página: 14/14		Num.: E-013	
Aprobado: 21/04/23		P.CRISOSTOMO						Archivo: PDF			



007/A-8		009/A-1	
5	0	5	0
PE		PE	
Raspberry Pi		Raspberry Pi	
uP		uP	
.1 .2 .3 .4 .5 .6 .7 .8		.1 .2 .3 .4 .5 .6 .7 .8	
OUTPUT		OUTPUT	
K7		K8	
A1 A2		A1 A2	
A1 A2		A1 A2	
Entidad: PUCP		Entidad: PUCP	
Nombre: D.AGUILAR		Nombre: D.AGUILAR	
Fecha: 21/04/23		Fecha: 21/04/23	
Aprobado: 21/04/23		Aprobado: 21/04/23	
P.CRISOSTOMO		P.CRISOSTOMO	
Título: BOMBAS PERISTALTICAS - RASPBERRY		Título: BOMBAS PERISTALTICAS - RASPBERRY	
Página: 14/14		Página: 14/14	
Num.: E-014		Num.: E-014	
Archivo: PDF		Archivo: PDF	

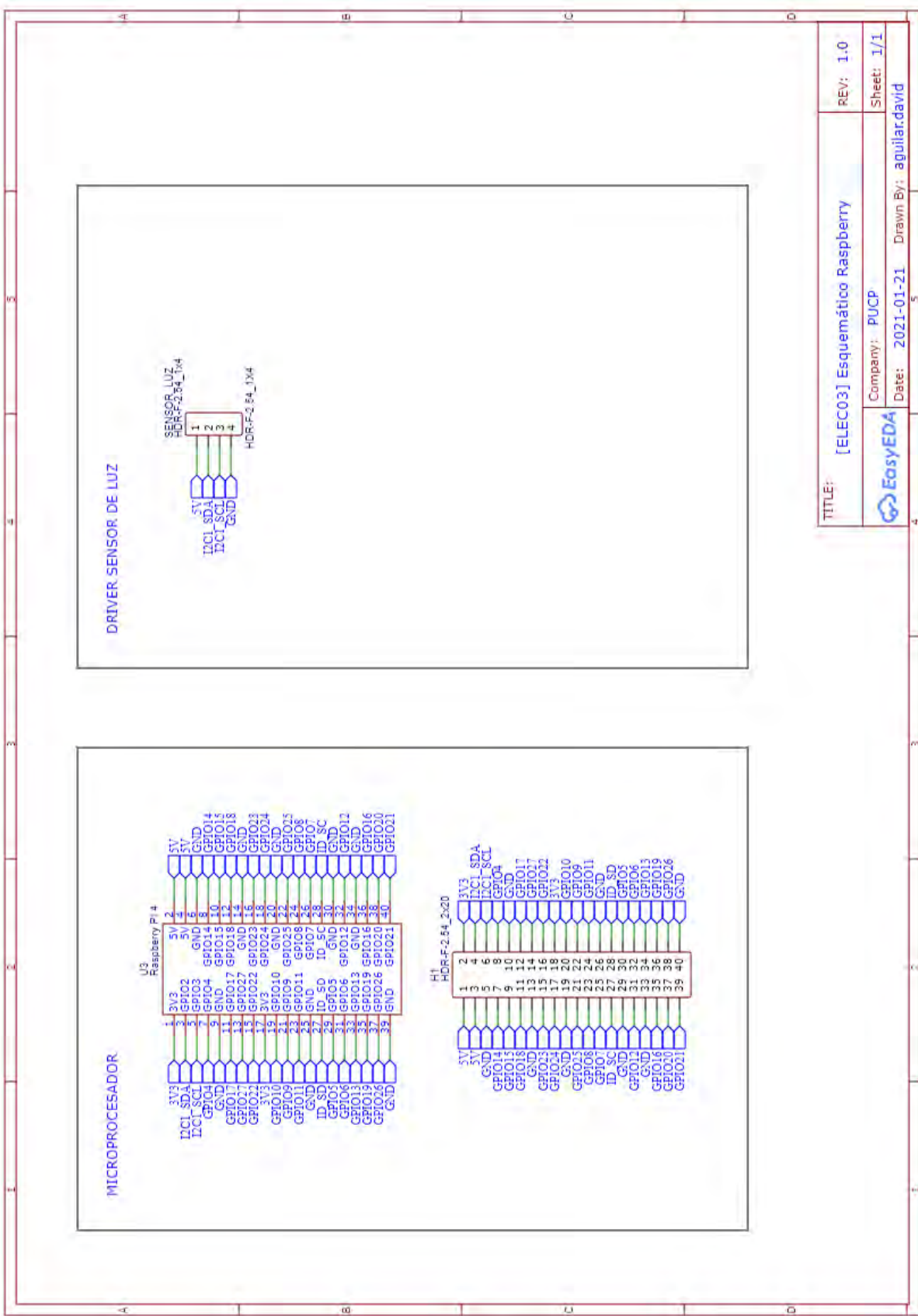


<b>Fecha:</b>		<b>Nombre:</b>		<b>Entidad:</b>		<b>Título:</b>		<b>Página:</b>	<b>Num.:</b>
21/04/23		D.AGUILAR		PUCP		LISTADO DE COMPONENTES		14/14	E-015
<b>Aprobado:</b>		21/04/23		P.CRISOSTOMO				<b>Archivo:</b> PDF	
1	2	3	4	5	6	7	8		



**ANEXO D**

**Planos electrónicos**



TITLE:	[ELEC03] Esquemático Raspberry	REV: 1.0
	Company: PUCP	Sheet: 1/1
	Date: 2021-01-21	Drawn By: aguilardavid



## ANEXO E

### Cotizaciones solicitadas

A. Estructura mecánica, soldadura, entre otros.

Av. Univ. Norte Mz. 24 Lt. 25 A.H. Laura Caller Iberico – Los Olivos  
 Tel: (+51) 998 154 260  
 Email: moldesperuanos@gmail.com

**MOLDES PERUANOS**  
**E.I.R.L**

RUC 20517420523  
**COTIZACIÓN**  
 N.º 001-0782

Contacto : **DAVID AGUILAR PAREDES** Fecha **03/05/2023**  
 Telefono : **+51 943 752 483**  
 Direccion : Email [aguilardavid@pucp.pe](mailto:aguilardavid@pucp.pe)

Item	Descripcion	Cant.	Valor Unitario	Valor Total
1	<b>*FABRICACIÓN DE ESTRUCTURA ACERO INOX 304 (SEGÚN PLANOS).</b> INCLUYE ARMADO, MANO DE OBRA, SOLDADURA, MONTAJE MECÁNICO, ENTRE OTROS.	1	\$ 4,237.29	\$ 4,237.29
El valor unitario no incluye IGV			SUB-TOTAL	\$ 4,237.29
Total por cancelar			IGV 18%	\$ 762.71
				\$ 5,000.00

SON: CINCO MIL CON 00/100 DOLARES AMERICANOS.

- **Condiciones Comerciales:**
  - ✓ VALIDEZ DE LA COTIZACIÓN: 7 DÍAS
  - Forma de pago: **CONTADO**
  - Tiempo de entrega: **10 días útiles**
- **Realizar depósitos a las siguientes cuentas:**
  - C.C. BCP DOLARES: 191-2676937-1-75
  - CCI BCP DOLARES: 002-191-002676937175-53
  - C. DETRACCIONES: 00-059-017713

Figura E1: Cotización de estructura mecánica. Fuente: Moldes Peruanos E.I.R.L.

B. Equipos electrónicos, de control, entre otros.



Cliente : PUCP

Fecha : 3/05/2023  
Cotización : DA2023 -1859  
Moneda : Dólares

Atención : Sr. David Aguilar  
Dpto. : Ingeniería  
Ref. : Beckhoff - Alemania

Forma de pago : Contado  
Lugar de entrega : Almacenes en Lima  
Garantía : 3 meses (solo por defecto de fabricación)

IT	DESCRIPCIÓN	CÓDIGO	MARCA	CANT	P. UNIT	P. TOTAL
1	ECO-RAIL-2 POWER SUPPLY 1-PHASE, IN: 90 ... 132 VAC / 173 ... 264 VAC OUT: 24V/5ADC	85133	MURR	1	USD 107.00	USD 107.00
2	MICO+ 4.6 electronic circuit protection, 4 CHANNELS IN: 24 V DC OUT: 24 V DC / 1-2-4-6 A	9000-41084-0100600	MURR	1	USD 212.73	USD 212.73
3	Residual current breaker with overcurrent protection (RCBO), Acti9 iC60, 2P, 16A, B curve, 10000A/15kA, A-SI type, 30mA	A9D47216	PROVEEDOR	2	USD 118.42	USD 236.84
4	SECCIONADOR 32A, 3P, IP40, 48X48MM, KG32A.K300/BRA503.E	KG32A.K300	PROVEEDOR	1	USD 89.47	USD 89.47
5	MIRO 6.2 24VDC-1U OUTPUT RELAY IN: 24 VDC - OUT: 250 VAC/DC / 6 A	6652000	MURR	2	USD 36.30	USD 72.60
6	Cargador raspberry	Raspberry	PROVEEDOR	1	USD 23.68	USD 23.68
7	7-inch economy Panel PC CP6606- 0001-0020 with ARM Cortex™-A8, 7- inch TFT display, resolution 800 x 480 WVGA, Display only, with single-touch screen	CP6606-0001-0020	BECKHOFF	1	USD 750.26	USD 750.26
8	EtherCAT Coupler for E-bus terminals (ELxxxx)	EK1100	BECKHOFF	1	USD 77.39	USD 77.39
9	EtherCAT Terminal, 8-channel digital input, 24 V DC, 3 ms	EL1008	BECKHOFF	1	USD 44.41	USD 44.41
10	EtherCAT Terminal, 8-channel digital output, 24 V DC, 0.5 A	EL2008	BECKHOFF	1	USD 48.82	USD 48.82
11	Digital Compact Servo Drive, 1-axis module, 100...480 V AC, rated output current 6 A, EtherCAT interface, OCT, hardware version 2.0, firmware version version 2.06	AX5106-0000-0200	BECKHOFF	1	USD 1,072.27	USD 1,072.27
12	Servomotor, 24...48 V DC, Mo = 0.5 Nm, Io = 4 A, nn = 3000 min-1	AM8121-1F10	BECKHOFF	1	USD 408.49	USD 408.49
13	Sensor ultrasonico	XX230A12NA00M12	PROVEEDOR	3	USD 210.53	USD 631.58

Representaciones exclusivas:



						
14	E-Stop 30 2NC M12(4) Emergency-Stop	69100	MURR	1	USD 77.32	USD 77.32
15	R-Button 30 1NO L M12(4) Illuminated reset button	69110	MURR	3	USD 58.04	USD 174.13
16	Sensor de humedad y temperatura ambiental	EZO™ Embedded Humidity Probe	PROVEEDOR	1	USD 46.00	USD 46.00
17	Sensor de pH más probeta	EZO™ pH Circuit	PROVEEDOR	1	USD 276.00	USD 276.00
18	Sensor de conductividad más probeta	EZO™ Conductivity Circuit	PROVEEDOR	1	USD 248.00	USD 248.00
19	Sensor de CO2	EZO™ CO2 Carbon Dioxide Sensor	PROVEEDOR	1	USD 167.00	USD 167.00
20	Sensor de temperatura de solución nutritiva más probeta	EZO™ RTD Circuit	PROVEEDOR	1	USD 103.00	USD 103.00
21	Sensor de luz	Seed Studio Industrial Light Intensity Sensor	PROVEEDOR	1	USD 70.00	USD 70.00
22	Bomba peristáltica	EZO-PMP™ Embedded Dosing Pump	PROVEEDOR	1	USD 95.00	USD 95.00
23	Bomba de suministro	Seafflo	PROVEEDOR	1	USD 65.79	USD 65.79
24	Signal tower Modlight70 Pro equipped with LED modules green,amber,red,buzzer,M12 plug downward	4000-76705-5310000	MURR	1	USD 280.40	USD 280.40
25	EXACT12, 8XM12, 4 POLE MOULDED CABLE 5.0m PUR/PVC 8x0,34+3x0.75, UL/CSA	8000-88410-3620500	MURR	2	USD 63.36	USD 126.73
26	M12 male 0° A-cod. IDC 4-pol., 0.25 - 0.5mm², 4 - 5,1mm	7000-12481-0000000	MURR	16	USD 10.84	USD 173.39
27	M12 female 0° A-cod. with cable PUR 4x0.34 bk UL/CSA+drag ch. 5m	7000-12221-6340500	MURR	16	USD 16.35	USD 261.65
28	Tarjeta de lectura de sensores	Whitebox T3	PROVEEDOR	2	USD 100.00	USD 200.00
29	Eje lineal con correa dentada (1000 mm)	ELZ40	PROVEEDOR	1	USD 1,200.00	USD 1,200.00
30	Tablero de acero inoxidable	RITTAL	PROVEEDOR	1	USD 500.00	USD 500.00
31	Canaletas, cables, borneras, entre otros		PROVEEDOR	1	USD 500.00	USD 500.00
32	Armado de tablero de control		PROVEEDOR	1	USD 250.00	USD 250.00
					Total (no incluye IGV)	USD 8,589.95

Representaciones exclusivas:



**BECKHOFF**  
New Automation Technology



**MURR**  
ELEKTRONIK



**EMERSON** | AVENTICS

Figura E2: Cotización de equipos de control. Fuente: elaboración propia.

## ANEXO F

### Algoritmos desarrollados

#### Algoritmo de procesamiento de imágenes

A continuación, se presenta el código del algoritmo implementado en MATLAB:

#### Relación pixel-mm

```
# Importamos las librerías
import cv2
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Definimos una función para graficar usando matplotlib
def mostrar_imagenes(imagenes, titulos, filas=3, columnas=3):
    plt.figure(figsize=(15, 10))
    for i, (imagen, titulo) in enumerate(zip(imagenes, titulos)):
        plt.subplot(filas, columnas, i+1)
        plt.imshow(imagen, cmap='gray')
        plt.title(titulo)
        plt.axis('off')
    plt.tight_layout()
    plt.show()

# Leer la imagen
imagen = cv2.imread('/content/Planta6.png')
imagen_rgb = cv2.cvtColor(imagen, cv2.COLOR_BGR2RGB)

# Convertir de RGB a CIELAB
imagen_cielab = cv2.cvtColor(imagen, cv2.COLOR_BGR2LAB)

# Mostrar las imágenes
plt.figure(figsize=(10, 5))

plt.subplot(1, 3, 1)
plt.imshow(imagen)
plt.title('Imagen BGR')
plt.axis('off')

plt.subplot(1, 3, 2)
plt.imshow(imagen_rgb)
plt.title('Imagen RGB')
plt.axis('off')

plt.subplot(1, 3, 3)
```

```

plt.imshow(imagen_cielab)
plt.title('Imagen CIELAB')
plt.axis('off')

# Remodelar la imagen para el clustering
pixel_values = imagen_cielab.reshape((-1, 3))
pixel_values = np.float32(pixel_values)

# Definir criterios y aplicar K-means
criteria = (cv2.TERM_CRITERIA_EPS + cv2.TERM_CRITERIA_MAX_ITER, 100,
0.2)
k = 3 # Número de clusters
_, labels, centers = cv2.kmeans(pixel_values, k, None, criteria, 10,
cv2.KMEANS_RANDOM_CENTERS)

# Mostrar cada cluster por separado
cluster_images = []
cluster_titles = []

for i in range(k):
    mask = labels == i
    mask = mask.reshape(imagen.shape[:2]) # Asegurar que la máscara
tenga la misma forma que la imagen
    masked_image = np.copy(imagen_rgb)
    masked_image[~mask] = 0 # Poner en negro los píxeles que no
pertenecen al cluster
    cluster_images.append(masked_image)
    cluster_titles.append(f'Cluster {i}')

# Mostrar las imágenes de cada cluster
mostrar_imagenes(cluster_images, cluster_titles, filas=2, columnas=k)

# Convertir a uint8 y mapear los centros a los píxeles originales
centers = np.uint8(centers)
segmented_image = centers[labels.flatten()]
segmented_image = segmented_image.reshape(imagen.shape)

# Seleccionar el cluster correspondiente a la canastilla
leaf_cluster_index = 2 # Suponer que el cluster 1 corresponde
mask = labels.reshape(imagen.shape[:2]) == leaf_cluster_index
roi = np.zeros_like(imagen)
roi[mask] = imagen[mask]

# Convertir a escala de grises y binarizar
gray = cv2.cvtColor(roi, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
_, binary = cv2.threshold(gray, 1, 255, cv2.THRESH_BINARY)

```

```
# Aplicar dilatación y erosión con un elemento estructurante circular
kernel = cv2.getStructuringElement(cv2.MORPH_ELLIPSE, (5, 5))
dilated = cv2.dilate(binary, kernel, iterations=2)
eroded = cv2.erode(dilated, kernel, iterations=2)

# Mostrar las imágenes
plt.figure(figsize=(10, 5))

plt.subplot(1, 3, 1)
plt.imshow(kernel)
plt.title('kernel')
plt.axis('off')

plt.subplot(1, 3, 2)
plt.imshow(dilated)
plt.title('dilated')
plt.axis('off')

plt.subplot(1, 3, 3)
plt.imshow(eroded)
plt.title('eroded')
plt.axis('off')

# Aplicar Sobel para la detección de bordes
sobelx = cv2.Sobel(eroded, cv2.CV_64F, 1, 0, ksize=5)
sobely = cv2.Sobel(eroded, cv2.CV_64F, 0, 1, ksize=5)
edges = cv2.magnitude(sobelx, sobely)

# Mostrar las imágenes
plt.figure(figsize=(10, 5))

plt.subplot(1, 3, 1)
plt.imshow(sobelx)
plt.title('sobelx')
plt.axis('off')

plt.subplot(1, 3, 2)
plt.imshow(sobely)
plt.title('sobely')
plt.axis('off')

plt.subplot(1, 3, 3)
plt.imshow(edges)
plt.title('edges')
plt.axis('off')

# Convertir la magnitud a formato binario
```

```

edges = np.uint8(edges)
_, binary_edges = cv2.threshold(edges, 50, 255, cv2.THRESH_BINARY)

# Encontrar contornos en la imagen de bordes
contours, _ = cv2.findContours(binary_edges, cv2.RETR_TREE,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)

# Encontrar el contorno más grande, que asumimos es el de la canastilla
largest_contour = max(contours, key=cv2.contourArea)

# Encontrar el círculo mínimo que encierra el contorno más grande
(x, y), radius = cv2.minEnclosingCircle(largest_contour)
center = (int(x), int(y))
radius = int(radius)

# Calcular el diámetro
diameter = 2 * radius

# Dibujar la línea del diámetro en la imagen original
image_with_diameter = imagen.copy()
cv2.line(image_with_diameter, (center[0] - radius, center[1]),
(center[0] + radius, center[1]), (0, 0, 255), 2)

# Mostrar la imagen con el diámetro
plt.figure(figsize=(10, 10))
plt.imshow(cv2.cvtColor(image_with_diameter, cv2.COLOR_BGR2RGB))
plt.title(f'Diameter: {diameter} pixels')
plt.axis('off')
plt.show()

```

### **Estimación área foliar:**

```

# Importamos las librerías
import cv2
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Definimos una función para graficar usando matplotlib
def mostrar_imagenes(imagenes, titulos, filas=3, columnas=3):
    plt.figure(figsize=(15, 10))
    for i, (imagen, titulo) in enumerate(zip(imagenes, titulos)):
        plt.subplot(filas, columnas, i+1)
        plt.imshow(imagen, cmap='gray')
        plt.title(titulo)
        plt.axis('off')
    plt.tight_layout()
    plt.show()

```

```

# Leer la imagen
imagen = cv2.imread('/content/Planta6.png')
imagen_rgb = cv2.cvtColor(imagen, cv2.COLOR_BGR2RGB)

# Convertir de RGB a CIELAB
imagen_cielab = cv2.cvtColor(imagen, cv2.COLOR_BGR2LAB)

# Clustering k-means en el espacio AB de CIELAB
ab = imagen_cielab[:, :, 1:3]
ab = ab.reshape((-1, 2))
ab = np.float32(ab)

# Definir criterios y aplicar K-means
criteria = (cv2.TERM_CRITERIA_EPS + cv2.TERM_CRITERIA_MAX_ITER, 100,
0.2)
k = 3 # Número de clusters
_, labels, centers = cv2.kmeans(ab, k, None, criteria, 3,
cv2.KMEANS_RANDOM_CENTERS)
labels = labels.reshape(imagen_cielab.shape[:2])

# Convertir a uint8 y mapear los centros a los píxeles originales
centers = np.uint8(centers)
segmented_image = centers[labels]
segmented_image = segmented_image.reshape(imagen_cielab.shape[0],
imagen_cielab.shape[1], -1)

# Seleccionar el cluster correspondiente a las hojas
leaf_cluster_index = 1 # Suponer que el cluster 2 corresponde a las
hojas
mask = labels.reshape(imagen_cielab.shape[:2]) == leaf_cluster_index
roi = np.zeros_like(imagen)
roi[mask] = imagen[mask]

# Convertir a escala de grises y binarizar
gray = cv2.cvtColor(roi, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
_, binary = cv2.threshold(gray, 1, 255, cv2.THRESH_BINARY)

# Detección de bordes usando Sobel
sobelx = cv2.Sobel(binary, cv2.CV_64F, 1, 0, ksize=3)
sobely = cv2.Sobel(binary, cv2.CV_64F, 0, 1, ksize=3)
edges = cv2.magnitude(sobelx, sobely)
edges = np.uint8(edges)

# Dilatación
kernel = cv2.getStructuringElement(cv2.MORPH_RECT, (3, 3))
dilated = cv2.dilate(edges, kernel, iterations=1)

```

```

# Llenar brechas interiores
filled = cv2.morphologyEx(dilated, cv2.MORPH_CLOSE, kernel)

# Retirar objetos conectados con el borde
cleared = cv2.morphologyEx(filled, cv2.MORPH_OPEN, kernel)

# Suavizar el objeto
kernel_diamond = cv2.getStructuringElement(cv2.MORPH_ELLIPSE, (3, 3))
eroded = cv2.erode(cleared, kernel_diamond, iterations=1)

# Visualizar la segmentación
overlay = cv2.addWeighted(imagen_rgb, 0.5, cv2.cvtColor(eroded,
cv2.COLOR_GRAY2RGB), 0.9, 0)

# prueba
# Contar los píxeles en la región de interés

# Encontrar contornos de las hojas
contours, _ = cv2.findContours(eroded, cv2.RETR_EXTERNAL,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)

# Crear una máscara para el área foliar
area_foliar_mask = np.zeros_like(imagen_rgb)
cv2.drawContours(area_foliar_mask, contours, -1, (255, 255, 255),
thickness=cv2.FILLED)

# Convertir a escala de grises y binarizar la máscara
area_foliar_mask_gray = cv2.cvtColor(area_foliar_mask,
cv2.COLOR_BGR2GRAY)
_, area_foliar_mask_binary = cv2.threshold(area_foliar_mask_gray, 1,
255, cv2.THRESH_BINARY)

# Calcular el área foliar en píxeles
area_foliar = np.sum(area_foliar_mask_binary > 0)
print(f'Área de las hojas (sin bordes): {area_foliar} píxeles')

# Convertir a escala de grises
imagen_gray = cv2.cvtColor(imagen, cv2.COLOR_BGR2GRAY)

# Generar imagen con el área foliar en color y fondo gris
area_foliar_rgb = imagen_rgb.copy()
area_foliar_rgb[area_foliar_mask_binary > 0] =
imagen_rgb[area_foliar_mask_binary > 0] # Mantener el color original
donde hay área foliar
gray_background = cv2.cvtColor(imagen_gray, cv2.COLOR_GRAY2RGB)

```

```

area_foliar_rgb[area_foliar_mask_binary == 0] =
gray_background[area_foliar_mask_binary == 0] # Poner gris donde no
hay área foliar

# Calcular el área en milímetros cuadrados
# Suponiendo que 348 px son equivalentes a 60 mm
px_to_mm = 60 / 348 # Factor de conversión de píxeles a milímetros
area_region_mm2 = area_foliar * px_to_mm * px_to_mm

# Convertir a centímetros cuadrados
area_region_cm2 = area_region_mm2 / 100 # 1 cm^2 = 100 mm^2

print(f"El área de la región de interés es: {area_region_cm2:.2f} cm²")

```

### **Método del codo para hallar el K óptimo:**

```

import cv2
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Leer la imagen en CIELAB
imagen = cv2.imread('/content/Planta6.png')
imagen_cielab = cv2.cvtColor(imagen, cv2.COLOR_BGR2LAB)

# Remodelar la imagen para el clustering
pixel_values = imagen_cielab.reshape((-1, 3))
pixel_values = np.float32(pixel_values)

# Calcular WCSS para diferentes valores de k
wcss_values = []
max_k = 5 # Número máximo de clusters a probar

for k in range(1, max_k + 1):
    _, labels, centers = cv2.kmeans(pixel_values, k, None,
criteria=(cv2.TERM_CRITERIA_EPS + cv2.TERM_CRITERIA_MAX_ITER, 100,
0.2), attempts=10, flags=cv2.KMEANS_RANDOM_CENTERS)
    wcss = np.sum(np.min(np.square(pixel_values -
centers[labels.flatten()]), axis=1))
    wcss_values.append(wcss)

# Graficar la curva del codo
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.plot(range(1, max_k + 1), wcss_values, marker='o')
plt.xlabel('Número de clusters')
plt.ylabel('WCSS (Suma de cuadrados dentro del cluster)')

```

```
plt.title('Método del Codo para encontrar el número óptimo de
clusters')
plt.grid(True)
plt.show()
```

## Algoritmo de control de servomotores

A continuación, se presenta las librerías de Motion control utilizadas y los subprogramas desarrollados para el control del servomotor.

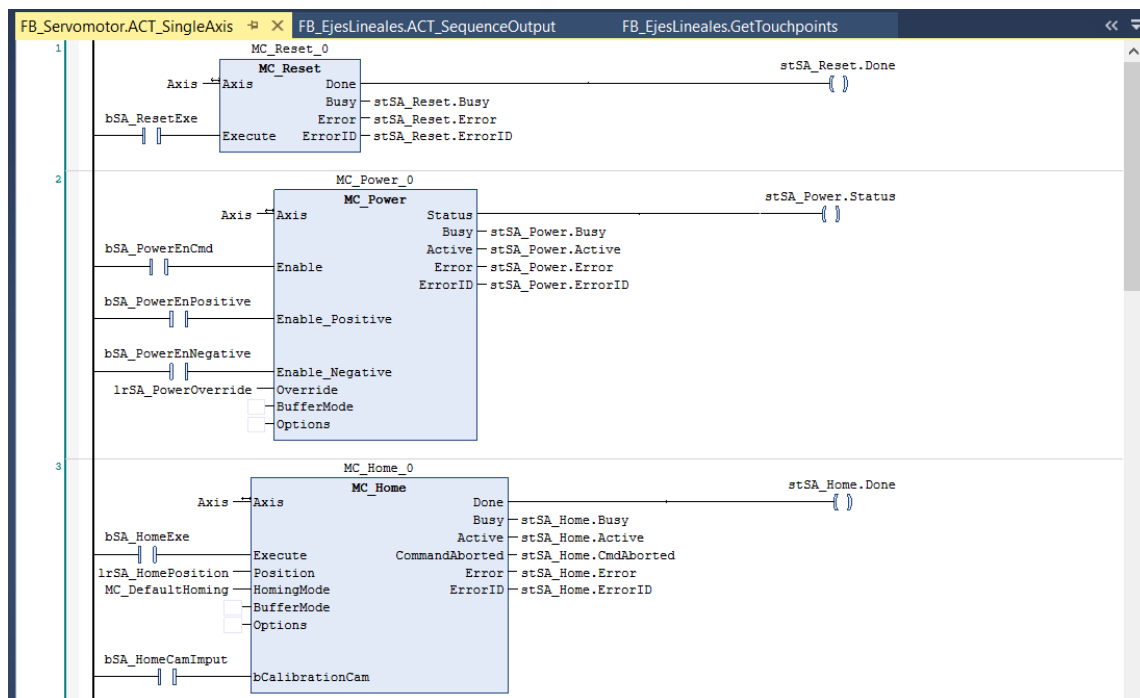


Figura F1: Librería para motion control. Fuente: TwinCAT3 – elaboración propia.

- Subprograma ACT\_MainSeqExe

```
//ACTION MainSeqEXE
ACT_SequenceOutput(); //has to be executed first, because output can be overwritten
CASE MainSeq OF
  100:
    ACT_Sequence();
  110:
    SeqSaved:= Seq; //Saves the Seq number
    Seq:= 0; //Set to stop M1 motor
```

```

    ACT_SequenceOutput(); //Executes to stop M1 motor
120:
    Seq := 30; //Reset
END_CASE;

```

- Subprograma ACT\_MainSeqSelect

```

//ACTION MainSeqSelect
//Handles the switches and sets the required main sequence number
IF NOT S2 AND S3 THEN //Not pause or emergency stop activated.
    MainSeq:= 100; //Normally run
END_IF;

IF S2 THEN //Pause switch activated
    MainSeq:= 110;
END_IF;

IF NOT S3 THEN //Stop, NC switch (must important and therefore placed last)
    MainSeq:= 120;
END_IF;

```

- Subprograma ACT\_Sequence

```

//ACTION Sequence - LinearAxis – set sequence number
CASE Seq OF
    0 : // Emergency state
        IF S1 THEN
            Seq := 10; // Set to next sequence
        END_IF

    10 : // Condiciones iniciales
        i := 1;
        Seq := 20;

```

```
20 : // Reset AxisX
    IF AxisX.stSA_Reset.Done THEN
        AxisX.bSA_ResetExe := FALSE;
        Seq := 30;
    ELSIF AxisX.stSA_Reset.Error THEN
        Seq := 1000;
    END_IF

30 : // PowerEnable X
    IF AxisX.stSA_Power.Status THEN
        Seq := 35;
    ELSIF AxisX.stSA_Power.Error THEN
        Seq := 1000;
    END_IF

35 : // Verifica si se requiere hacer el homing
    IF NOT E6.bHomingDoneX AND bAutomatico THEN
        Seq := 40;
    ELSE
        Seq := 60;
    END_IF;

40 : // Espera que se presione el botón bEmpezarHomingX
    IF bEmpezarHomingX THEN
        Seq := 50;
    END_IF

50 : // Homing X
    IF AxisX.stSA_Home.Done THEN
        AxisX.bSA_HomeExe := FALSE;
        Seq := 60;
    ELSIF AxisX.stSA_Home.Error THEN
        Seq := 1000;
    END_IF
```

```

60 : // Espera bMove2Home
    IF bMove2Home THEN
        Seq := 110;
    END_IF

    IF NOT bAutomatico THEN
        Seq := 1010;
    END_IF

110 : // Axis X - avanza hasta Xhome
    IF AxisX.stSA_MovAbs.Active THEN (* axis is executing job but is not yet finished *)
        AxisX.stSA_AbsCmd.bExe := FALSE;
    ELSIF AxisX.stSA_MovAbs.CmdAborted OR AxisX.stSA_MovAbs.Error THEN
        Seq := 1000;
    END_IF

    IF AxisX.stSA_MovAbs.Done THEN
        AxisX.stSA_AbsCmd.bExe := FALSE;
        Seq := 130;
    END_IF

END_CASE;

```

- Subprograma ACT\_SequenceOutput

```

//ACTION SequencetOutPut – LinearAxis - check the Seq variable and set digital outputs
CASE Seq OF

```

```

0 : // Emergency state

```

```

    AxisX.bSA_HaltExe := TRUE;
    AxisX.bSA_PowerEnCmd := FALSE;
    AxisX.bSA_PowerEnNegative := FALSE;
    AxisX.bSA_PowerEnPositive := FALSE;

```

```
AxisZ.bSA_HaltExe := TRUE;  
AxisZ.bSA_PowerEnCmd := FALSE;  
AxisZ.bSA_PowerEnNegative := FALSE;  
AxisZ.bSA_PowerEnPositive := FALSE;
```

```
strMsg := 'Estado de emergencia';
```

```
10 : // Condiciones iniciales
```

```
AxisX.bSA_HaltExe := FALSE;  
AxisZ.bSA_HaltExe := FALSE;  
AxisX.bSA_HomeExe := FALSE;  
AxisZ.bSA_HomeExe := FALSE;  
AxisX.stSA_AbsCmd.bExe := FALSE;  
AxisZ.stSA_AbsCmd.bExe := FALSE;
```

```
20 : // Reset AxisX
```

```
IF NOT AxisX.stSA_Reset.Done THEN  
    AxisX.bSA_ResetExe := TRUE;  
END_IF  
strMsg := 'Reset eje X';
```

```
30 : // PowerEnable X
```

```
IF NOT AxisX.stSA_Power.Status THEN  
    AxisX.bSA_PowerEnCmd := TRUE;  
    AxisX.bSA_PowerEnNegative := TRUE;  
    AxisX.bSA_PowerEnPositive := TRUE;  
END_IF  
strMsg := 'PowerEnable eje X';
```

```
35: // Verifica si el eje X está referenciado
```

```
40 : // Espera bEmpezarHomingX
```

```
strMsg := 'Esperando inicio de homing eje X';
```

```
50 : // Homing X
```

```
IF NOT AxisX.stSA_Home.Done THEN
```

```
    AxisX.bSA_HomeExe := TRUE;
```

```
END_IF
```

```
strMsg := 'Proceso de homing X';
```

```
60 : // Espera bMove2Home
```

```
strMsg := 'Esperando inicio posición Home';
```

```
110 : // Axis X - avanza hasta Xhome
```

```
AxisX.stSA_AbsCmd.lrPosition := E6.arrPosition[-1].X;
```

```
AxisX.stSA_AbsCmd.lrVelocity := E6.lrTargetSpeed_X;
```

```
AxisX.stSA_AbsCmd.bExe := TRUE;
```

```
strMsg := 'Avanzando hasta X home';
```

```
END_CASE
```

## ANEXO G

### Lista de exigencias

A continuación, se presentan las exigencias consideradas en el desarrollo de esta tesis, según las especificaciones establecidas:

Tabla G.1: Listas de exigencias del proyecto – parte 1. Fuente: elaboración propia.

LISTA DE EXIGENCIAS			Edición: Rev 1.
PROYECTO	Diseño de un sistema automático para el cultivo vertical de hortalizas e inspección mediante visión artificial.		Fecha: 29.04.2020
FUNCIÓN PRINCIPAL	Controlar el suministro de flujo de nutrientes, la iluminación y analizar el crecimiento de cultivos verticales.		
CLIENTE	MUÑOZ SALAS, KAROL CRISOSTOMO ROMERO, PEDRO MOISÉS		Elaborado: David Aguilar
Fecha (cambios)	Descripción		Responsable
1/5/2020	Geometría	El tamaño máximo permitido para el sistema es una superficie de 2x2 metros y una altura de 2 metros (E).	David Aguilar
1/5/2020	Energía	<b>Entrada:</b> El sistema se alimentará con electricidad de una fuente monofásica de 220VAC-60Hz (E) y contará con respaldo autónomo mediante baterías recargables de 24VDC con una autonomía mínima de 1 hora (D). <b>Salida:</b> Calor, Vibración, Ruido	David Aguilar
1/5/2020	Materia	El sistema necesitará suministro constante de agua y nutrientes A y B, así como plántulas para iniciar la maduración de las plantas. (E) Además, permitirá la evacuación del agua mezclada con nutrientes sobrantes después de su uso. (D)	David Aguilar
1/5/2020	Señales	<b>Señales de entrada:</b> Inicio/Apagado (E) Frecuencia de riego (E) Frecuencia de toma de mediciones (E) Tiempo de encendido de las luces (E) Apagado de emergencia (E) <b>Señales de salida:</b> Estado del sistema: Encendido/Apagado (E) Temperatura del ambiente y de la solución (E) Batería baja (D) Nivel de tanques bajo (E) Humedad, pH, conductividad eléctrica (E) y ppm (D) Análisis de crecimiento del cultivo (E)	David Aguilar

Tabla G.2: Listas de exigencias del proyecto – parte 2. Fuente: elaboración propia.

Fecha (cambios)	Descripción		Responsable
1/5/2020	Electrónica	Se realizará el diseño de la distribución eléctrica y, en caso de ser necesario, la tarjeta distribuidora de señales (PCB). Además, se llevará a cabo el aislamiento del sistema de control de los actuadores y sensores. (E)	David Aguilar
1/5/2020	Seguridad	Requisitos del sistema: Apagado de emergencia. Alarmas que indiquen malfuncionamientos en cada subsistema. Mal comportamiento del sistema: a. Nivel bajo del volumen en los tanques. b. Alta o baja frecuencia de riego. c. Falla de suministro de nutrientes. d. Falla en muestreo de imágenes.	David Aguilar
1/5/2020	Ergonomía	La interfaz del sistema debe ser fácilmente accesible y los monitores de control y los pulsadores de emergencia deben estar claramente visibles.	David Aguilar
1/5/2020	Control	<b>Variables del sistema a controlar</b> Suministro de nutrientes tipo A (E) Suministro de nutrientes tipo B (E) Solución nutritiva (E) Suministro de agua (D) Activación de luces LEDs (E) Muestreo de imágenes (E) Posición de la cámara (E)	David Aguilar
1/5/2020	Montaje	El ensamblado del sistema debe ser rápido, no más de dos horas, y requiere fijación al piso. (E)	David Aguilar
1/5/2020	Uso	Nivel de ruido limitado a 60 dB según Resolución Ministerial N° 375-2008-TR. (E) Operación en un rango de temperatura ambiental de 10-40°C. (E) Facilidad de uso para personal especializado en hidroponía. (E) Necesidad de toma de energía eléctrica con puesta a tierra. (E)	David Aguilar
1/5/2020	Mantenimiento	Mantenimiento preventivo después de cada ciclo de cultivo en el sistema. (E)	David Aguilar
3/5/2020	Transporte	El sistema será transportable (E) y modular. (D)	David Aguilar