

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO DE UN VEHÍCULO TERRESTRE AUTÓNOMO PARA LA
DETECCIÓN DE ENFERMEDADES EN CULTIVOS AGRÍCOLAS Y
APLICACIÓN EFICIENTE DE PESTICIDAS**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

AUTOR:

Eddye Fabricio Marin Silva

ASESOR:

Jorge Luis Isaac Ramirez Chavez


Lima, 2026

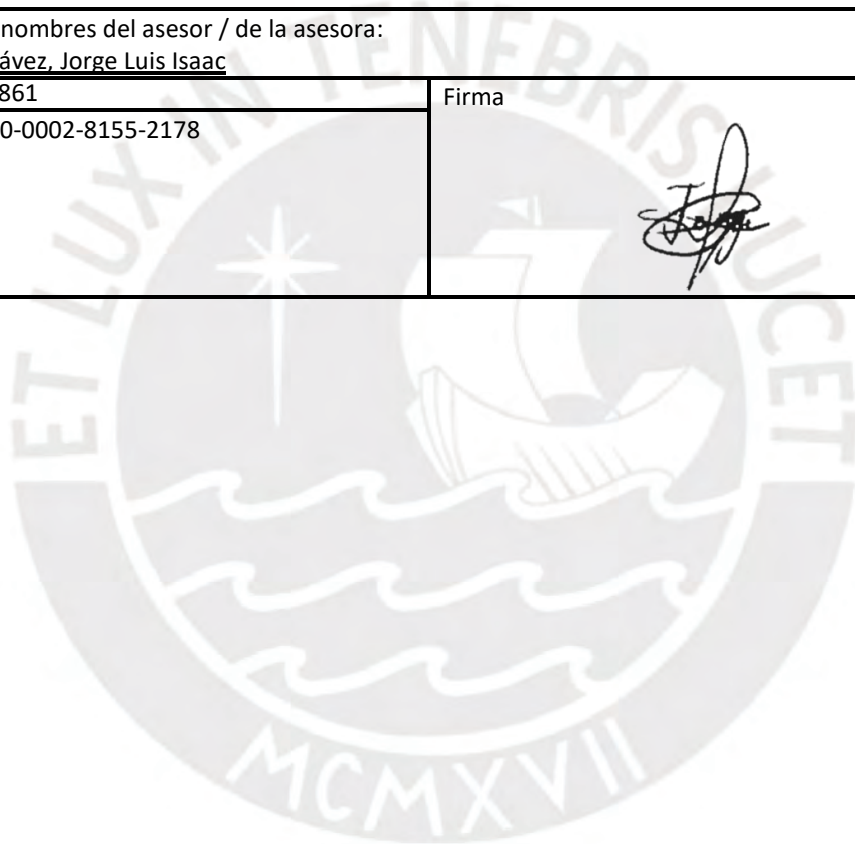
Informe de Similitud

Yo, Jorge Luis Isaac Ramírez Chávez, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado “Diseño de un vehículo terrestre autónomo para la detección de enfermedades en cultivos agrícolas y aplicación eficiente de pesticidas” del/de la autor(a)/ de los(as) autores(as) Eddy Fabricio Marin Silva dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 20 %. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 20/04/2026.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima 25 de Abril de 2026

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>Ramírez Chávez, Jorge Luis Isaac</u>	
DNI: 73107861	Firma 
ORCID: 0000-0002-8155-2178	



AGRADECIMIENTOS

A Maribel Silva Garcia, mi madre, por ser mi
gran soporte y siempre confiar en mi.

A Percy Marin Garcia, mi padre, por hacerme
una persona fuerte.



RESUMEN

La presente investigación se fundamenta en la amenaza que representan las enfermedades de las plantas para la seguridad alimentaria y la economía agrícola en Perú, donde las pérdidas superan el 25% y las intoxicaciones por pesticidas entre 2019 y 2022 evidencian riesgos sanitarios significativos.

El estudio tiene como objetivo desarrollar un vehículo agrícola autónomo para hileras mayores a 40 cm que optimiza la detección de enfermedades en cultivos y la aplicación localizada de pesticidas. Se plantea la hipótesis de que la integración de metodologías mecatrónicas y principios de Agricultura 4.0 reduce las pérdidas de cultivos y la incidencia de intoxicaciones por pesticidas.

La investigación se sustenta en supuestos de agricultura de precisión y en el marco metodológico del diseño mecatrónico VDI 2221, que prioriza la definición de requisitos, el análisis funcional y la generación de soluciones mediante matriz morfológica.

Se realiza un análisis de tecnologías disponibles, se define el diagrama funcional y se generan propuestas para cada función del sistema. Se desarrollan y comparan tres conceptos de solución mediante criterios técnicos y económicos para seleccionar el concepto óptimo. El diseño integra subsistemas mecánicos, electrónicos y de control.

El concepto seleccionado presenta una estructura y un subsistema de detección/aspersión validados con factor de seguridad mínimo 2, una electrónica que soporta hasta 10 horas de autonomía y un algoritmo de control que permite operaciones autónomas en campo. Se entregan planos y una estimación de costos.

La agricultura de precisión impulsa modelos mecanizados que permiten reducir pérdidas, disminuir intoxicaciones y elevar los estándares de calidad de los productos agrícolas.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ÍNDICE DE TABLAS	iii
ÍNDICE DE FIGURA.....	iv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES	3
1.1 Problemática	3
1.2 Propuesta de solución	8
1.3 Objetivos del trabajo.....	8
1.4 Alcance	9
1.5 Metodología.....	9
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	11
2.1 Agricultura 4.0.....	11
2.2 Robótica agrícola.....	14
2.3 Artículos académicos.....	16
2.4 Productos comerciales	22
2.5 Patentes.....	27
CAPÍTULO 3: DISEÑO CONCEPTUAL.....	31
3.1 Lista de Requerimientos	31
3.2 Black Box	33
3.3 Estructura de Funciones.....	34
3.4 Matriz morfológica.....	37
3.6 Evaluación	40
3.7 Solución óptima.....	44
CAPÍTULO 4: DISEÑO MECATRÓNICO.....	47
4.1 Diseño mecánico	47
4.2 Diseño electrónico	57
4.3 Diseño de control.....	70
CAPÍTULO 5: SIMULACIONES Y PRUEBAS DE CONCEPTO	81
5.1 Simulaciones	81
5.2 Base de datos	87
5.3 Código	88
5.4 Interfaz.....	89
CAPÍTULO 6: PLANOS Y COSTOS.....	91
6.1 Planos mecánicos.....	91
6.2 Análisis de costos	92
CONCLUSIONES	95
RECOMENDACIONES	97
BIBLIOGRAFÍA	98
ANEXOS	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Intoxicación Aguda por Plaguicidas (IAP): Distribución y proporción de casos notificados por departamentos	6
Tabla 2.1. Resumen técnico de los 3 artículos	20
Tabla 2.2. Resumen técnico de los productos comerciales	25
Tabla 3.1. Lista de Requerimientos de productos	32
Tabla 3.2. Matriz Morfológica del Dominio de Interfaz	37
Tabla 3.3. Matriz Morfológica del Dominio de Energía	37
Tabla 3.4. Matriz Morfológica del Dominio de Control	38
Tabla 3.5. Matriz Morfológica del Dominio de Actuadores	38
Tabla 3.6. Matriz Morfológica del Dominio de Sensores	39
Tabla 3.7. Matriz Morfológica del Dominio de Mecánico	40
Tabla 3.8. Pesos relativos	40
Tabla 3.9. Efectividad de las soluciones	41
Tabla 3.10. Tabla de evaluación técnica	42
Tabla 3.11. Tabla de evaluación económica	44
Tabla 4.1. Tabla comparativa de ruedas	48
Tabla 4.2. Tabla comparativa de motores Dc	50
Tabla 4.3. Tabla comparativa de tanques de almacenamiento	53
Tabla 4.4. Tabla comparativa de bombas de agua	54
Tabla 4.5. Tabla comparativa de lanzas pulverizadora	55
Tabla 4.6. Tabla comparativa de válvulas	55
Tabla 4.7. Tabla comparativa de ventiladores axiales	56
Tabla 4.8. Tabla comparativa de microcomputadoras	58
Tabla 4.8. Tabla comparativa de microcontroladores	59
Tabla 4.9. Tabla comparativa de cámaras de profundidad	60
Tabla 4.10. Tabla comparativa de Sensor Lidar	61
Tabla 4.11. Tabla comparativa de Sensores Inerciales	62
Tabla 4.12. Tabla comparativa de indicadores de batería	62
Tabla 4.13. Tabla comparativa de módulos de cámaras	63
Tabla 4.14. Tabla comparativa de sensores de nivel	64
Tabla 4.15. Tabla comparativa de sensores de nivel	64
Tabla 4.16. Cálculo de potencia para sensores y actuadores	65
Tabla 4.17. Cálculos de potencia para el sistema de control	65
Tabla 4.18. Peso total del vehículo	66
Tabla 4.19. Cultivos disponibles en la interfaz	71
Tabla 5.1. Listado de planos mecánicos	91
Tabla 5.2. Costos de materia prima	92
Tabla 5.3. Costos de componentes mecánicos	92
Tabla 5.4. Costos de componentes mecánicos	93
Tabla 5.5. Costos de diseño	94
Tabla 5.6. Costos de fabricación	94
Tabla 5.7. Costo total	94

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1.1 Causas de pérdidas pre cosecha para determinados países y cultivos	4
Figura 1.2. Casos notificados de intoxicación aguda por plaguicidas según semanas epidemiológicas (SE) Perú 2019-2022*.....	5
Figura 1.3. Metodología VDI 2221	9
Figura 2.1 Dron pulverizador DJI AGRAS T30.....	10
Figura 2.2 SENSORES PARA AGRICULTURA DE PRECISIÓN.....	11
Figura 2.3 Cámara Multiespectral Parrot Sequoia +.....	11
Figura 2.4 Robótica Agricultura 4.0.....	12
Figura 2.5. Global market volume of agricultural robots from 2020 to 2030 (in billion units)	14
Figura 2.6 Agrobot AUTOMATO.....	15
Figura 2.6 Vista superior del prototipo	16
Figura 2.7 Funcionamiento de sistema prototipo en campo	17
Figura 2.8 UGV y subsistemas a bordo	19
Figura 2.9 Dron pulverizador DJI AGRAS T30.....	22
Figura 2.10. Vista desde el cultivo FarmDroid FD 20	23
Figura 2.11 ROBOTTI LR	25
Figura 2.12 Aparato para el control de malezas.....	28
Figura 2.13 Prototipo de la patente	29
Figura 2.14 Sistema para defender cultivos mediante la dispensación de insecticidas.....	30
Figura 3.1 . BlackBox.....	33
Figura 3.2 . Estructura de funciones del sistema.....	35
Figura 3.3 Evaluación técnico-económica.....	44
Figura 3.4. Solución óptima.....	45
Figura 3.5 Diagrama de bloques	46
Figura 4.1. Modelo cinemático de un robot diferencial	47
Figura 4.2 Diagrama de cuerpo libre de cada rueda.....	49
Figura 4.3 Motor con soporte y key.....	51
Figura 4.4 Acople Rueda-Motor.....	51
Figura 4.5 Motor acoplado a rueda.....	52
Figura 4.6 Unión de perfiles mediante ángulos de 90.....	53
Figura 4.7 Estructura con tanque de almacenamiento	54
Figura 4.9 Ubicación de sistema de aspersión en el vehículo	57
Figura 4.10 Distribución de componentes en el vehículo	66
Figura 4.11 Diagrama de conexiones.....	67
Figura 4.12. Diagrama esquemático	69
Figura 4.13. Tarjeta electrónica PCB.....	70
Figura 4.14. Interfaz de inicio.....	71
Figura 4.15. Interfaz de personalización.....	72
Figura 4.16 Diagrama de flujo de inicialización de parámetros.....	74
Figura 4.17. Diagrama de flujo del algoritmo de detección.....	76
Figura 4.18. Diagrama de flujo de desplazamiento autónomo.....	77
Figura 4.19 Diagrama de flujo de modos de operación	78
Figura 4.20. Diagrama de flujo general	80

Figura 5.1 Desplazamiento placa inferior Acero inoxidable 4mm	81
Figura 5.2 Estructura vehículo vista inferior	82
Figura 5.3 Desplazamiento placa inferior Aluminio 2mm.....	83
Figura 5.4 Tensión de VonMises en los agujeros de la placa.....	83
Figura 5.5 Coeficiente de seguridad placa	84
Figura 5.6 Desplazamiento estructura vehículo.....	85
Figura 5.7 Centro de gravedad del vehículo	85
Figura 5.9 Desplazamiento soporte motor	86
Figura 5.10 Tensión VonMises soporte motor	86
Figura 5.11 Coeficiente de seguridad soporte motor	87
Figura 5.12 Selección y segmentación de la imagen	89
Figura 5.13 Interfaz evaluando exactitud.....	90
Figura 5.14 Resultado final interfaz.....	90



INTRODUCCIÓN

En un contexto global, la agricultura enfrenta una problemática crítica derivada del uso desmedido de plaguicidas y fertilizantes. Este incremento, impulsado por la creciente demanda de alimentos y materias primas, plantea riesgos graves para la salud y el ambiente, con alrededor de 385 millones de casos de intoxicación no mortal y 11,000 muertes anuales. El consumo mundial ha aumentado de forma sostenida —más del 70 % en plaguicidas y 37 % en fertilizantes desde 2000— y se observa tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo: en los primeros predomina la búsqueda de rentabilidad, mientras que en los segundos la necesidad de evitar pérdidas de alimentos, siendo más severas las consecuencias donde la regulación es menos estricta.

En respuesta a la problemática, se presenta la propuesta de solución de un vehículo autónomo diseñado para reducir la aplicación excesiva e incrementar la precisión en la dosificación de pesticidas. Este vehículo se posiciona como una respuesta innovadora, integrando sensores avanzados capaces de detectar plagas y enfermedades de manera localizada, lo que permite dosificar y aplicar el producto únicamente en las áreas afectadas. Al operar de forma autónoma, el vehículo elimina la exposición directa de los agricultores durante la fumigación, reduciendo significativamente los riesgos de intoxicación tanto ocupacionales como accidentales. La visión es clara: no solo modernizar la agricultura, sino también enfrentar de manera directa las consecuencias del uso indiscriminado de plaguicidas. Esta propuesta promete mejorar la eficiencia productiva, al tiempo que protege la salud humana y contribuye a la conservación del medio ambiente.

La investigación se desglosa en capítulos, cada uno diseñado para explorar aspectos específicos del problema y la solución. En el primer capítulo, se analiza la situación actual de la aplicación de

pesticidas en los cultivos agrícolas de Perú, resaltando la falta de eficiencia y la necesidad imperante de un diseño específico para las condiciones agrícolas locales. Además, se definen los objetivos, el alcance de la investigación y la metodología a seguir. El segundo capítulo se sumerge en la realidad de los cultivos agrícolas peruanos, detallando las prácticas actuales de aplicación de pesticidas, así como explorando productos comerciales, patentes e investigaciones relacionadas. El tercer capítulo ahonda en las entradas y salidas del sistema, junto con las funciones específicas del vehículo autónomo, evaluando varios conceptos de solución para seleccionar el diseño conceptual óptimo. El cuarto capítulo especifica dicho diseño, destacando las características de las zonas de aplicación, navegación y monitoreo. Finalmente, las conclusiones ponen el broche final a esta investigación, ofreciendo perspectivas y reflexiones sobre el camino hacia una agricultura más sostenible y segura.

Esta investigación no solo se erige como una respuesta a la problemática actual en la agricultura peruana, sino que también se presenta como un catalizador para la transición hacia una Agricultura 4.0, impulsada por tecnologías digitales y sostenibilidad. La implementación de vehículos autónomos especializados no solo busca mejorar la eficiencia agrícola, sino que también plantea un cambio fundamental hacia prácticas más seguras y respetuosas con el medio ambiente, marcando el camino hacia un futuro agrícola más prometedor en el Perú.

CAPÍTULO 1: ANTECEDENTES

En esta sección, se aborda la actual problemática nacional en la aplicación de pesticidas en la agricultura peruana, abarcando actividades como el control de calidad del cultivo, aplicación y dosificación. Se plantea una propuesta de solución junto con los alcances y objetivos de la presente tesis, que busca mejorar la eficiencia y sostenibilidad en el uso de pesticidas. A continuación, se proporciona un análisis detallado del estado actual de la tecnología aplicada en la gestión de pesticidas, explorando las limitaciones y oportunidades existentes. Además, se expone la metodología utilizada para el diseño del vehículo autónomo para la administración eficiente de pesticidas.

1.1 Problemática

Las enfermedades de las plantas representan una amenaza significativa para la seguridad alimentaria y la economía agrícola. La falta de una identificación precisa y un manejo efectivo de estas enfermedades puede resultar en pérdidas devastadoras para los agricultores, así como en una disminución en la disponibilidad de alimentos para la población.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), cerca del 80% de la dieta humana depende de alimentos de origen vegetal, lo que convierte a la producción agrícola en un pilar esencial de la seguridad alimentaria mundial. Sin embargo, esta base se encuentra en riesgo, ya que hasta un 40% de la producción agrícola global se pierde cada año debido a plagas y enfermedades. [1] En otras palabras, gran parte de los cultivos que sostienen la alimentación de la población mundial están amenazados, y cada pérdida en el campo repercute directamente en la disponibilidad de los alimentos que conforman la mayor parte de nuestra ingesta.

En el año 2019, el Instituto Internacional de Investigación sobre Políticas Alimentarias (IFPRI) analizó las causas de las pérdidas en distintas etapas de la producción agrícola en varios países, incluido Perú. Se encontró que las principales razones de las pérdidas son la infestación por plagas, enfermedades y sequías. Según la Figura 1.1, en Perú más del 25% de las pérdidas se deben a plagas y enfermedades. [2] Estos resultados resaltan la necesidad de adoptar medidas eficaces de control de plagas y enfermedades para reducir las pérdidas y mejorar la productividad agrícola.

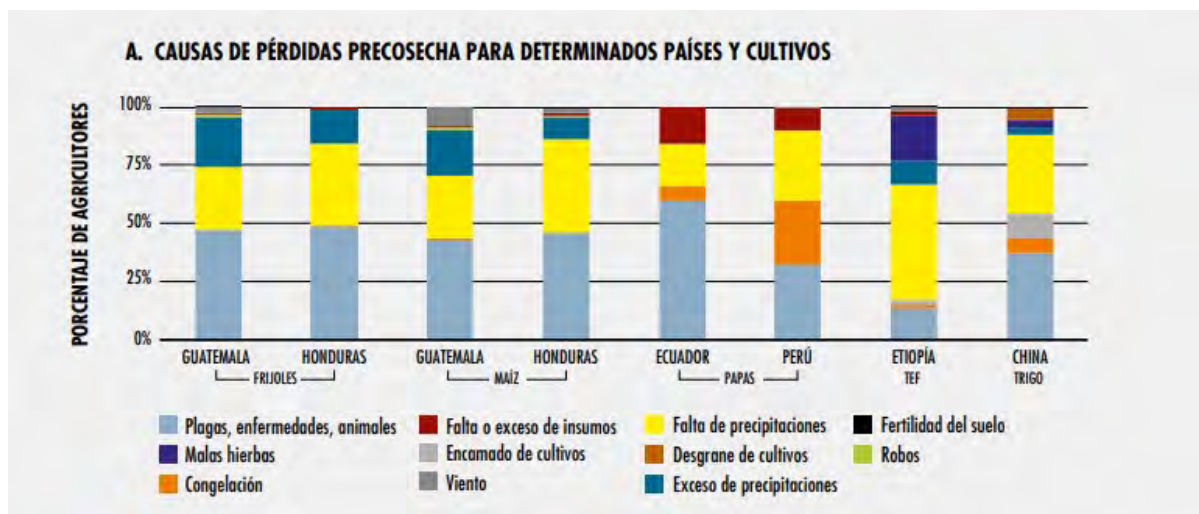


Figura 1.1 Causas de pérdidas pre cosecha para determinados países y cultivos
Fuente: [2]

Cultivida (asociación civil privada de carácter gremial y sin fines de lucro, que representa a la Industria de la Ciencia de los Cultivos en Perú) destacó la importancia de los plaguicidas para asegurar la oferta alimentaria, protegiendo los cultivos de plagas y enfermedades. Además de mejorar el rendimiento, los productos fitosanitarios prolongan la vida útil de los cultivos almacenados y protegen los alimentos consumidos. La productividad agrícola es fundamental para satisfacer la demanda a precios asequibles, y los plaguicidas ayudan a incrementarla. Estas herramientas son clave para reducir las pérdidas de cultivos y aumentar la productividad, asegurando un suministro abundante de alimentos. [3]

Sin embargo, la aplicación manual de pesticidas en la agricultura peruana plantea serios desafíos, el error humano durante esta actividad resulta en la aplicación de dosis excesivas o insuficientes de productos químicos. El exceso de dosis genera contaminación ambiental y riesgos de intoxicación para los trabajadores agrícolas, mientras que dosis insuficientes no logran controlar eficazmente las plagas. La mala manipulación, la falta de equipos de protección y la ausencia de asesoramiento también contribuyen significativamente a esta problemática. La falta de capacitación y la ausencia de medidas de seguridad adecuadas aumentan el riesgo de errores durante la aplicación de pesticidas, lo que puede agravar los problemas mencionados anteriormente. Además, la falta de orientación sobre el uso adecuado de los productos químicos deja a los trabajadores agrícolas sin las herramientas necesarias para aplicar los pesticidas de manera segura y eficiente. Estas consecuencias no solo aumentan los costos y la ineficiencia en el uso de productos químicos, sino que también contribuyen a la resistencia de las plagas, la contaminación del suelo y del agua, y representan una amenaza para la biodiversidad y el medio ambiente en general. Asimismo, afecta la seguridad alimentaria al aumentar el riesgo de intoxicación para los consumidores y contribuye a la generación de residuos químicos en los alimentos, lo que puede tener efectos adversos a largo plazo en la salud pública.

Entre el año 2019 y mediados del 2022, Perú experimentó una situación crítica relacionada con el uso de pesticidas. En ese periodo como se puede observar en la Figura 1.2, se registraron alrededor de 5,679 casos de intoxicación, con un promedio de 30 casos por semana.

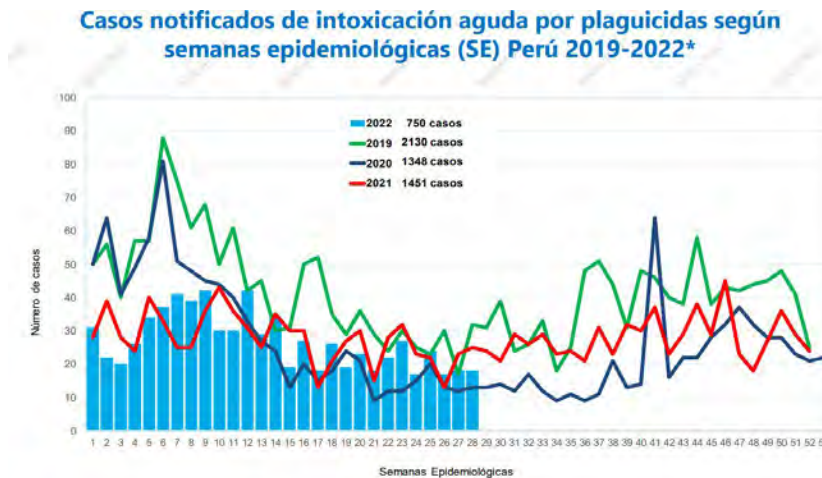


Figura 1.2. Casos notificados de intoxicación aguda por plaguicidas según semanas epidemiológicas (SE) Perú 2019-2022*.

Fuente: [4]

Los datos epidemiológicos muestran que más de la mitad de los casos corresponden a exposiciones voluntarias (50.9%), seguidas por las de carácter ocupacional (27.4%) y accidental (19.6%), lo que evidencia tanto el mal uso intencional como la falta de medidas de protección adecuadas en el trabajo agrícola. Asimismo, los grupos más afectados fueron agricultores (33.2%), estudiantes (22.8%) y trabajadores independientes (21.0%), reflejando la vulnerabilidad de quienes manipulan plaguicidas sin capacitación suficiente y de poblaciones expuestas en ámbitos no laborales. En cuanto a las vías de exposición, predominó la oral (64.7%), seguida por la cutánea (20.8%) y la respiratoria (13.2%), lo que sugiere deficiencias en el almacenamiento, manipulación y control de acceso a estos productos. [4]

Según la Tabla 1 en 2020 y 2021 las zonas agrícolas del norte de Lima y las áreas selváticas de Junín, Amazonas y Ayacucho fueron los puntos con mayor incidencia. Las muertes por envenenamiento superan a las causadas por enfermedades infecciosas, con 1,106 intoxicaciones agudas y veinte muertes registradas, según el Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades. [5]

Tabla 1.1. Intoxicación Aguda por Plaguicidas (IAP): Distribución y proporción de casos notificados por departamentos.

Departamentos	2020*			2021**		
	Casos	%	TIA X 100,000 habitantes	Casos	%	TIA X 100,000 habitantes
Lima	609	43,4	8,5	526	37,1	6,9
Arequipa	202	14,4	17,0	180	12,7	14,9
Junín	72	5,1	9,0	121	8,5	13,3
Cusco	0	0,0	0,0	104	7,3	12,5
Tacna	61	4,3	17,7	82	5,8	23,2
Ayacucho	81	5,8	23,8	81	5,7	19,7
Amazonas	79	5,6	37,2	63	4,4	33,7
Piura	62	4,4	7,5	46	3,2	5,7
San Martín	19	1,4	14,2	41	2,9	22,3
Pasco	35	2,5	24,8	33	2,3	22,0
Ancash	56	4,0	8,5	32	2,3	6,3
Huánuco	27	1,9	17,2	28	2,0	12,1
Huancavelica	64	4,6	38,9	21	1,5	16,1
Apurímac	15	1,1	9,2	20	1,4	15,0
Callao	4	0,3	0,5	10	0,7	1,1
Puno	4	0,3	2,3	7	0,5	2,4
Cajamarca	1	0,1	31,6	6	0,4	3,5
Tumbes	0	0,0	0,0	5	0,4	14,2
Madre de Dios	0	0,0	0,0	4	0,3	32,0
Ica	7	0,5	16,0	4	0,3	28,0
La Libertad	4	0,3	8,3	2	0,1	7,8
Ucayali	0	0,0	0,0	1	0,1	2,5
Loreto	1	0,1	1,0	0	0,0	0,0
Total	1403	100,0	10,3	1417	100,0	9,3

Fuente: [5]

Las empresas agrícolas peruanas, en busca de mayor eficiencia y rentabilidad, han implementado tecnologías como poda mecanizada, aplicaciones con atomizadoras, evaluaciones con drones y riego automatizado (Monitoreado por estaciones meteorológicas automatizadas). Sin embargo, el futuro agrícola peruano se vislumbra en la Agricultura 4.0, impulsada por tecnologías digitales como la inteligencia artificial, el Internet de las cosas (IoT) y el análisis de datos [6]. La transición hacia la Agricultura 4.0 en el Perú emerge como un reto y una oportunidad crucial, la integración de tecnologías como la inteligencia artificial, el aprendizaje automático y la robótica en las prácticas agrícolas ofrece un horizonte prometedor para aumentar la competitividad, diversificar la oferta exportable y generar empleos de calidad en el sector agrícola. Esta transformación no solo apunta a mejorar la eficiencia, sino que también aborda directamente la problemática asociada al uso de pesticidas en la agricultura peruana.

1.2 Propuesta de solución

La propuesta de solución se basa en el desarrollo de un vehículo autónomo para la administración precisa de pesticidas en la agricultura peruana. Este enfoque busca reducir la exposición innecesaria a productos químicos para los agricultores y trabajadores durante la aplicación manual. El vehículo integrará visión artificial para la detección temprana de enfermedades en las plantas. Al implementar un algoritmo de aplicación precisa de pesticidas, se espera reducir la contaminación ambiental y los riesgos de intoxicación aguda en los consumidores. Esta solución ayudaría a mitigar el riesgo de resistencia de las plagas al evitar la liberación indiscriminada de productos químicos en el suelo y el agua, buscando ofrecer beneficios a largo plazo al disminuir la necesidad global de productos químicos en la agricultura.

1.3 Objetivos del trabajo

Esta sección expone el propósito fundamental y los logros específicos asociados al proyecto de investigación.

1.3.1 Objetivo general

Desarrollo del diseño de un vehículo autónomo para la administración eficiente de pesticidas en la agricultura peruana, con el propósito de mejorar la precisión, sostenibilidad y seguridad en la aplicación de productos químicos, para el desarrollo de prácticas agrícolas más eficientes y respetuosas con el medio ambiente.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar el diseño conceptual de un vehículo terrestre autónomo especializado en la aplicación precisa de pesticidas, basado en una investigación exhaustiva del estado del arte y una lista de requerimientos definidos para el diseño del sistema.

- Efectuar cálculos mecánicos para la selección de materiales adecuados que cumplan con los requisitos de resistencia, durabilidad y peso para garantizar un diseño mecánico óptimo.
- Seleccionar los componentes electrónicos necesarios, realizando cálculos de potencia para el funcionamiento óptimo y la selección del suministro de energía .
- Desarrollar una estrategia de control mediante un diagrama de flujo que identifique variables críticas para la detección de enfermedades y la aplicación eficiente de pesticidas, evaluando la efectividad del algoritmo en condiciones controladas.
- Elaborar planos detallados del diseño mecánico y electrónico del vehículo como guía para evaluar los costos de fabricación y ensamblaje de los componentes.

1.4 Alcance

El alcance del trabajo se orienta a desarrollar un concepto de solución de un vehículo terrestre autónomo para la aplicación eficiente de pesticidas en cultivos agrícolas. Para ello, la investigación de este sistema se fundamenta en el análisis exhaustivo de las tecnologías disponibles en la actualidad. Además, la selección del concepto óptimo de solución se respalda en un análisis técnico-económico que justifica su elección.

1.5 Metodología

En este proyecto, se utiliza la metodología de diseño mecatrónico basada en las normas VDI 2206 y VDI 2221. Las tres etapas principales incluyen: definición de la problemática, investigación del estado del arte y desarrollo de conceptos. La metodología garantiza una progresión ordenada desde la comprensión de la problemática hasta la identificación y evaluación de soluciones, siguiendo principios mecatrónicos y normativas establecidas.

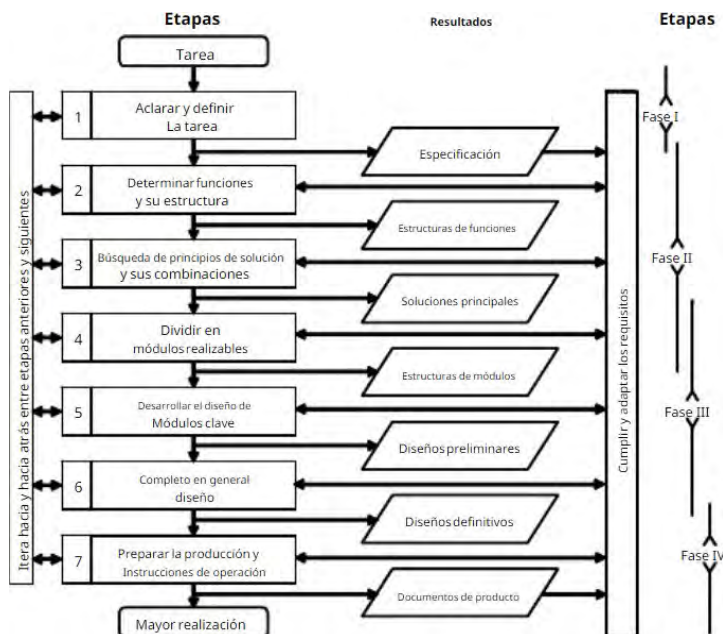


Figura 1.3. Metodología VDI 2221.

Fuente: [8]

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se brindará información relevante sobre la agricultura 4.0 y robótica agrícola, explorando modelos comerciales, patentes y estudios pertinentes relacionados con la propuesta de solución planteada en el capítulo anterior.

2.1 Agricultura 4.0

La Agricultura 4.0, también conocida como la Cuarta Revolución Industrial aplicada a la agricultura, representa la evolución de la agricultura de precisión. En este enfoque, la toma de decisiones se basa en un análisis detallado de datos recopilados y transmitidos mediante tecnologías digitales avanzadas, con el objetivo de proporcionar un apoyo preciso al agricultor y aumentar la rentabilidad y la sostenibilidad económica, medioambiental y social.

En el marco de la Agricultura 4.0, se observan diversas tecnologías fundamentales como drones, sensores, cámaras y robótica, que desempeñan un papel crucial en la supervisión de los cultivos [9]. Los drones realizan sobrevuelos equipados con sensores y cámaras para recopilar datos esenciales, como la fertilidad del suelo y el desarrollo de los cultivos. Además estos también pueden realizar las acciones necesarias para la fumigación como se observa en la Figura 2.1.



Figura 2.1 Dron pulverizador DJI AGRAS T30

Fuente: [10].

En la Figura 2.2 se destaca el intercambio de información que mandan estos sensores ambientales, proporcionando información detallada sobre aspectos como temperatura, suelo y humedad, permitiendo ajustar las necesidades de los cultivos, como la cantidad de fertilizante requerida.



Figura 2.2 SENSORES PARA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

Fuente: [11].

Las cámaras en la agricultura, desempeñan un papel integral en el monitoreo de los cultivos, abarcando desde cámaras convencionales hasta aquellas hiperespectrales que posibilitan análisis más profundos de la composición de los cultivos, los datos que estas cámaras son de gran ayuda al momento de tomar decisiones al momento del cultivo, en la Figura 2.3 se presenta un mapa de calor captado con este tipo de cámaras demostrando su beneficio.

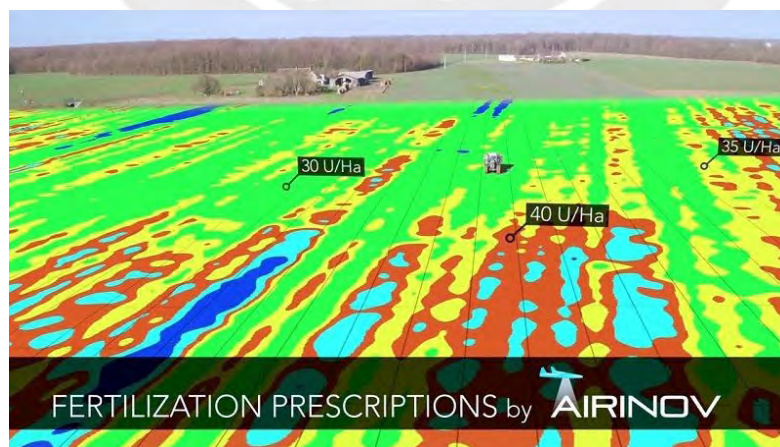


Figura 2.3 Cámara Multiespectral Parrot Sequoia +.

Fuente: [12]

La robótica en la agricultura, presentada en la Figura 2.4, se manifiesta a través de brazos robóticos y vehículos autónomos, los cuales automatizan diversas tareas de mantenimiento y evaluación del estado de los cultivos mediante sensores. Un ejemplo práctico es la automatización de la poda de vides.



Figura 2.4 Robótica Agricultura 4.0

Fuente: [9]

Estas tecnologías, junto con la conectividad proporcionada por el Internet de las Cosas, el procesamiento de Big Data y la inteligencia artificial, permiten la toma de decisiones en tiempo real. Este enfoque tecnológico no solo contribuye a evitar desperdicios y controlar los costos de producción, sino que también mejora la sostenibilidad y la calidad general de la producción agrícola. A pesar de la reticencia inicial, la Agricultura 4.0 ofrece beneficios económicos al optimizar los recursos, reducir el desperdicio de agua y fertilizantes, y aumentar la productividad. Además, aporta beneficios medioambientales al mejorar la sostenibilidad y reduce la carga de trabajo para los agricultores. También se traduce en productos finales de mayor calidad, promoviendo la salud y la conservación de propiedades nutricionales. La importancia de esta evolución tecnológica radica en su capacidad para optimizar la producción de alimentos de manera sostenible, preparando a los productores para los desafíos futuros de manera más eficiente.

A pesar de estos avances, la FAO destaca que el progreso en la actividad agrícola no solo depende de las innovaciones tecnológicas, sino también del compromiso de los agricultores. Por ello, la implementación exitosa de la Agricultura 4.0 requiere políticas y marcos adecuados que faciliten el acceso a estas tecnologías, especialmente para los pequeños agricultores [13].

2.2 Robótica agrícola

La robótica agrícola, en constante evolución, se ha convertido en un pilar esencial de la revolución tecnológica en la agricultura. Este campo especializado de la robótica se enfoca en diseñar, desarrollar y aplicar robots y sistemas autónomos, también conocidos como agrobots, para abordar desafíos cruciales en el sector agrícola. Su propósito central es optimizar la eficiencia, rentabilidad y sostenibilidad, enfrentando problemas como la escasez de mano de obra, altos costos de producción y la creciente demanda de los consumidores.

Según las estimaciones recopiladas por Mahsa Shahbandeh, una experta en investigación que abarca agricultura y bienes de consumo masivo, la Figura 2.5 representa el volumen actual y proyectado del mercado de robots agrícolas a nivel mundial desde el año 2020 hasta 2030. Se espera que para el año 2030, el mercado global de robots agrícolas crezca hasta alcanzar aproximadamente 36 mil millones de unidades [7].

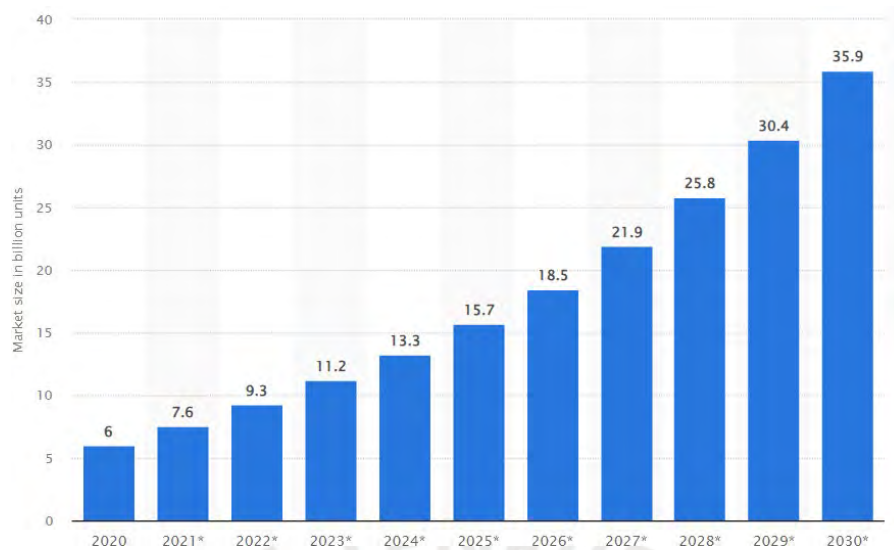


Figura 2.5. Global market volume of agricultural robots from 2020 to 2030 (in billion units)

Fuente: [7]

Desde robots terrestres autodirigidos hasta drones aéreos, la robótica agrícola engloba diversas tecnologías diseñadas para ejecutar tareas específicas, como recolección de frutas, detección de plagas y aplicación precisa de fertilizantes y pesticidas [14]. Estos avances buscan no solo aumentar la productividad y eficiencia, sino también reducir la dependencia de la mano de obra humana y elevar la calidad general de los cultivos.

En los últimos cinco años, la robótica agrícola ha experimentado notables avances, siendo una respuesta estratégica para superar desafíos en el sector agrícola [15]. Desde cosechadoras automáticas hasta agrobots como es del AUTOMATO presentado en la Figura 2.6 destacando su funcionamiento en la cosecha de tomates, con visión artificial y GPS, la automatización agrícola ha demostrado eficiencia en tareas manuales y pesadas, especialmente en la manipulación de cultivos delicados como la lechuga y las fresas.



Figura 2.6 Agrobot AUTOMATO.
Fuente: AUTOMATO ROBOTS

Aunque la implementación de la robótica agrícola presenta desafíos, como la necesidad de infraestructura tecnológica y adaptación a nuevos protocolos de mantenimiento, se espera que la automatización alcance entre el 60% y 80% en los próximos años [14]. Este avance no solo aumentará la eficiencia y sostenibilidad, sino que también abrirá la puerta a un futuro agrícola más innovador y resiliente.

2.3 Artículos académicos

2.3.1 Diseño de un sistema automático para la aspersión de plaguicidas en rosas cultivadas en invernadero

El enfoque del trabajo se centra en el diseño de un sistema automático para la aspersión de plaguicidas en invernaderos con cultivos de rosas. Este diseño se fundamenta en una revisión de sistemas previos, definiendo parámetros preliminares relacionados con las limitaciones del entorno y evaluando alternativas de solución. Se diseñan los subsistemas de aspersión, locomoción y percepción (este último solo si el sistema móvil arroja resultados favorables), así como el subsistema eléctrico y electrónico, y finalmente, el subsistema de monitoreo y control.

El proyecto detalla una plataforma móvil con una autonomía de hasta 8 horas, empleando un grupo electrógeno de 10 KVA. Se presenta una vista superior del prototipo en la Figura 2.6, en la cual se aprecia la distribución de cargas . La capacidad del tanque, de 0,1 m³, proporciona un tiempo de aspersión de 30 a 40 minutos a una velocidad máxima de 5 km/h. El subsistema de aspersión incorpora 6 boquillas ISO tipo cono a una presión de trabajo de 300 kPa, con dos electroválvulas proporcionales y una bomba de membrana de 447,42 W. El subsistema de percepción se compone de 6 sensores ultrasónicos para detectar y medir distancias, 8 sensores mecánicos de seguridad, un sensor de orientación y encoders para indicar posición y velocidad al sistema de control. Un PLC S7-1200 recibe señales, realiza el tratamiento según algoritmos predefinidos, controla los subsistemas y muestra variables para monitoreo.

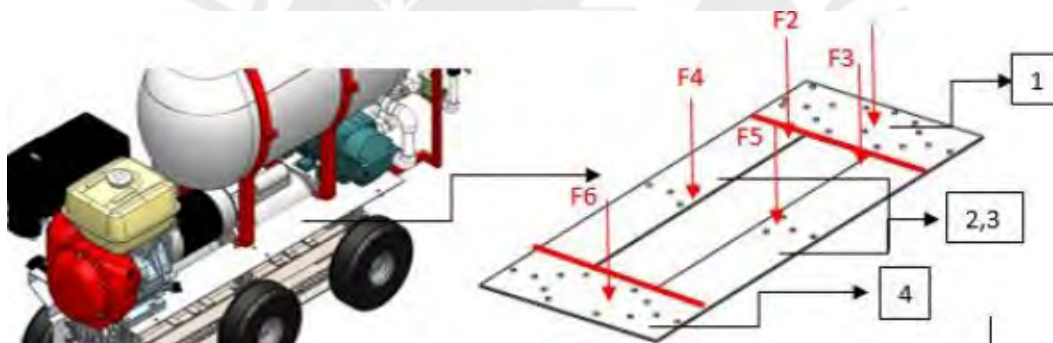


Figura 2.6 Vista superior del prototipo.

Fuente: [16]

Aunque el proyecto se orienta a mejorar la seguridad del operario y generar beneficios económicos, este presenta algunas desventajas. La duración limitada de la autonomía de la plataforma y el tiempo de aspersión podría plantear desafíos en términos de eficiencia operativa. Además, la dependencia de un tanque de capacidad reducida podría requerir recargas frecuentes, afectando la continuidad de las operaciones. El subsistema de percepción solo se activa si el sistema móvil muestra resultados

positivos podría plantear incertidumbres sobre su efectividad y utilidad. Estos puntos podrían ser áreas de mejora y consideración para futuras iteraciones del diseño.

2.3.2 Sistema inteligente para el manejo de malezas en el cultivo de piña con conceptos de agricultura de precisión

El artículo presenta un innovador sistema inteligente diseñado para la detección precisa de malezas y la aplicación eficiente de herbicidas en cultivos de piña, incorporando principios de agricultura de precisión. Se muestra su funcionamiento en la Figura 2.7, este utiliza un sistema de visión artificial para capturar la reflectancia de las plantas en el espectro visible y un sistema embebido para procesar imágenes en tiempo real, implementado en un vehículo terrestre que se desplaza entre surcos de cultivo.



Figura 2.7 Funcionamiento de sistema prototipo en campo.

Fuente: [17]

El algoritmo de detección de malezas específico para piña demostró una eficiencia superior al 80%, cumpliendo con éxito los requisitos para identificar y aplicar insumos solo en áreas necesarias. No obstante, durante las pruebas, se identificaron limitaciones, como la duración de la batería y la necesidad de explorar fuentes de alimentación más adecuadas y vehículos más grandes para operaciones continuas en campo.

En relación con el diseño del sistema, la implementación final ubicó el tanque en la parte superior y la bomba en la inferior, garantizando la alimentación por gravedad. Aunque el montaje del sistema de bombeo y aspersión se ajustó al cuerpo del vehículo para una aplicación precisa, se destacó la importancia de evaluar el prototipo en diversas condiciones y mejorar aspectos como la adquisición de datos, vehículos avanzados y algoritmos más sofisticados.

En conclusión, el artículo resalta la viabilidad de un sistema de detección de malezas a bajo costo, integrado exitosamente en un vehículo de tamaño reducido para aplicaciones agrícolas. Aunque se evidenció un desempeño satisfactorio, se enfatiza la necesidad de evaluaciones adicionales y mejoras en diversos aspectos para garantizar la eficacia del sistema en diferentes condiciones operativas.

2.3.3 Flotas de robots para el control de plagas ambientalmente seguro en la agricultura

Este artículo aborda el desarrollo y evaluación de una nueva generación de sistemas automáticos y robóticos diseñados para el control eficaz de malezas y plagas. El presente artículo detalla los objetivos científicos y técnicos, así como los desafíos y resultados obtenidos en tres tipos de cultivos comúnmente encontrados. La flota de robots terrestres (UGVs) fue diseñada para aplicar tratamientos en la agricultura, incorporando sistemas avanzados como GNSS y percepción terrestre. En la Figura 2.8 se tiene información detallada de los subsistemas presentes en el UGV, basado en chasis comerciales y su Sistema de Toma de Decisiones de Alto Nivel (HLDMS) coordinó los sistemas a bordo, con pruebas de diferentes versiones. El Sistema de Percepción Terrestre, con una velocidad de operación de 0,83 m/s, logró procesar datos en menos de 2,4 s, destacando su eficiencia en la detección de malezas en campos de maíz. La detección de malezas clasificó niveles de densidad verde en imágenes. Para cultivos de hileras estrechas, el Sistema de Detección Remota

fue utilizado, siendo una alternativa fuera de línea. Tres sistemas de pulverización se desarrollaron, destacando un sistema de parches de malezas que logró ahorros significativos de líquido aplicado durante las pruebas, demostrando la eficiencia del Sistema de Actuación de Alto Nivel y el Sistema de Dispositivos, especialmente en campos con menor área infestada de malezas.

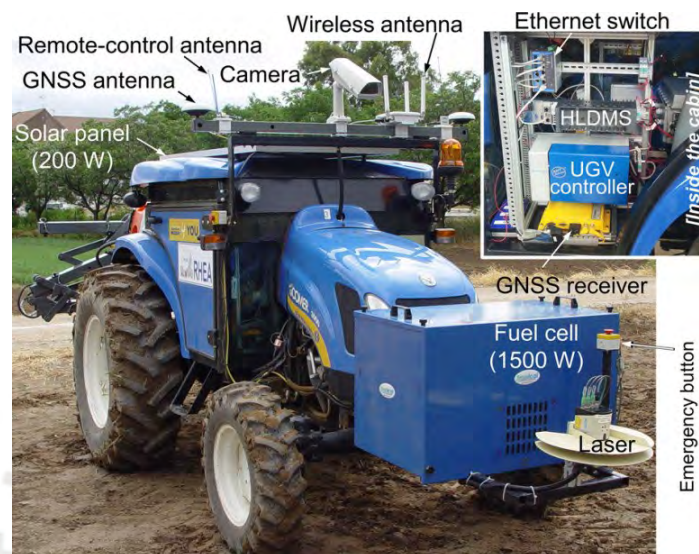





Figura 2.8 UGV y subsistemas a bordo.
Fuente: [18]

Aunque la utilización de vehículos terrestres comerciales para la base de los UGV proporcionó beneficios en términos de fiabilidad y disponibilidad temprana, también introdujo un desafío importante en términos de seguridad. El diseño de un sistema de seguridad adecuado se convirtió en una necesidad crítica para mitigar los riesgos asociados con vehículos más pesados y cargas mayores, subrayando la complejidad de equilibrar la robustez y la seguridad en sistemas robóticos agrícolas.

Tabla 2.1. Resumen técnico de los 3 artículos.

Características	Sistema automático de aspersión de plaguicidas Fuente: [16] 	Sistema inteligente para el manejo de malezas Fuente: [17] 	UGVs para el control de plagas Fuente: [18] 
Autonomía	Hasta 8 horas	1 hora y 30 minutos	Sin información
Capacidad del Tanque	100 L	1 L	A partir de 20 L
Peso	316,36 Kg	5-15 Kg	1826 kg
Velocidad	5 km/h	3 km/h	3 km/h
Sistemas de Percepción	Sensores ultrasónicos, de orientación y encoders.	Sistema de visión artificial, cámara digital Unitec.	Terrestre, sistema de Detección Remota.
Unidad de control	PLC	Raspberry Pi 2	compactRIO 9082
Detección mediante visión artificial	No	Sí	Sí
Eficiencia de detección	No usa visión artificial	Eficiencia superior al 80%	Eficiencia de hasta 91%
¿Es autónomo?	No	No	Sí

Fuente: Elaboración propia

La autonomía limitada, el tiempo de aspersión y la dependencia de tanques de capacidad reducida emergen como limitantes, impactando directamente en la eficiencia operativa de los sistemas. Además, la duración de la batería, la necesidad de explorar fuentes de alimentación más adecuadas y la consideración de vehículos más grandes son obstáculos compartidos que requieren atención para mejorar la efectividad de los sistemas. El aumento del peso de los vehículos en este último caso también genera preocupaciones de seguridad. Estas limitaciones identificadas ofrecen áreas claras para futuras investigaciones y mejoras en la implementación de sistemas automáticos agrícolas.

2.4 Productos comerciales

2.4.1 DJI AGRAS T40

El AGRAS T40 es un dron diseñado por la compañía líder en drones DJI, este presenta un diseño innovador con rotor doble coaxial, permitiendo transportar hasta 40 kg para rociado y 50 kg (70L) para esparcimiento de sólidos. Equipado con un sistema de pulverización atomizado dual, radar de matriz en fase activa y visión binocular, este dron ofrece versatilidad para diversas misiones agrícolas, como topografía, mapeo, pulverización y esparcimiento, garantizando precisión en cada operación. Con un diseño plegable que reduce su tamaño en un 70%, este dron es altamente portátil.

En términos de productividad, el AGRAS T40 puede cubrir 21.3 hectáreas por hora en cultivos y 4 hectáreas por hora en árboles frutales. Para esparcimiento, puede distribuir hasta 1.5 toneladas de fertilizante por hora. Esto se logra gracias al rotor doble coaxial, que aumenta la capacidad de carga en un 30%. La capacidad de fumigación es una de sus grandes ventajas, pudiendo dispersar hasta 8 litros por minuto con un ancho de fumigación de 9 metros lo cual se destaca en la Figura 2.9.



Figura 2.9 Dron pulverizador DJI AGRAS T30
Fuente: [10].

Su alcance es de hasta 5 km, brindando una amplia cobertura en las operaciones agrícolas. La capacidad de proporcionar información de fumigación en tiempo real permite una gestión precisa y eficiente de los recursos. Para garantizar la seguridad y evitar obstáculos, el dron está equipado con un radar detector de obstáculos omnidireccional. Además, su módulo RTK de posicionamiento

preciso asegura una navegación precisa incluso en entornos complejos. Con una clasificación de protección e impermeabilidad IP67, puede operar en condiciones climáticas adversas con total fiabilidad. Sus baterías inteligentes ofrecen hasta 1.000 ciclos de carga y una carga rápida de tan solo 10 minutos, lo que garantiza una alta disponibilidad operativa.

2.4.2 FARMDROID FD20

FarmDroid FD20 es el primer robot de siembra y deshierbe totalmente automático del mundo, destacando por su avanzado sistema de siembra. Al ser configurado, este robot planifica la disposición completa del campo, colocando cada semilla con una precisión de hasta 8 mm desde su ubicación designada, logrando un patrón uniforme que asegura un espacio óptimo para que cada semilla prospere.

Su distintiva capacidad de memoria le permite recordar la ubicación exacta de cada semilla, permitiéndole iniciar el control de malezas incluso antes de que los cultivos emerjan, proporcionando rendimientos más altos al reducir la competencia de las malezas. Además, se destaca por prescindir de costosos y complicados sistemas de cámaras, confiando en la siembra con GPS de alta precisión.

FarmDroid FD20 opera completamente con energía solar, alimentando sus baterías con cuatro paneles solares en la parte superior, lo que garantiza de 18 a 24 horas de operación diaria, dependiendo de las condiciones climáticas. Su versatilidad se manifiesta en su capacidad para adaptarse a más de 50 cultivos diferentes, desde su enfoque inicial en la remolacha azucarera hasta la gestión exitosa de diversos cultivos, como perejil, cebolla, remolacha, cilantro, entre otros. Se proporciona una vista desde el suelo de cómo es que este robot opera en la Figura 2.10.



Figura 2.10. Vista desde el cultivo FarmDroid FD 20

Fuente: [19]

Este robot representa la visión de la agricultura de precisión y ha evolucionado en estrecha colaboración con los agricultores y distribuidores, expandiendo sus capacidades más allá de su diseño inicial. El FarmDroid FD20 demuestra confianza en la precisión tanto en la siembra como en el deshierbe, consolidándose como una solución líder en la agricultura automatizada. Su laboratorio de pruebas de semillas colabora activamente para experimentar con nuevos cultivos, consolidándose como un aliado versátil y efectivo en el mundo agrícola.

2.4.3 ROBOTTI LR

ROBOTTI permite la recopilación automática de datos del terreno y de los cultivos, así como datos técnicos, facilitando la toma de decisiones y la optimización de los sistemas de gestión agrícola. El componente principal es un versátil conductor de herramientas diseñado para realizar diversas operaciones en el campo de cultivo, desde la siembra y deshierbe hasta el arado y la fumigación. El diseño incluye componentes estándar que son fáciles de adquirir, lo que lo hace robusto y de mantenimiento sencillo.

El nuevo modelo ROBOTTI LR posee hasta 60 horas de autonomía antes de repostar. Equipado con un motor Kubota Stage V y un sistema hidráulico mejorado, presenta un alto par motor en cada




rueda y una capacidad de carga de 1.2 toneladas, siendo eficiente y fácil de integrar en diferentes entornos agrícolas.

ROBOTTI destaca por su fusión entre tecnología avanzada y simplicidad mecánica. Su sistema de dirección único le permite maniobrar en zonas estrechas como las que se pueden observar en la figura 2.11 , aprovechando al máximo el terreno, especialmente en sistemas de camas de cultivo. La seguridad se basa en 7 sistemas diferentes para garantizar un funcionamiento confiable y el cumplimiento de las normativas de la Unión Europea. Estos sistemas incluyen tecnologías avanzadas como láser escáner 3D (LIDAR), parachoques con sensor de presión, vallado virtual con tecnología GPS y monitoreo constante que detecta el deslizamiento de las ruedas y evita atascos. Además, cuenta con un botón de parada en el mando a distancia, función de parada desde la interfaz móvil y web, así como 5 interruptores de parada de emergencia. Cuando cualquiera de estos sistemas se activa, el robot se detiene inmediatamente y notifica la situación. Para una operación segura, se marcan todos los obstáculos conocidos en el plan de trabajo, como vallas, postes eléctricos y arbustos. Asimismo se obtiene una reacción rápida al detectar la presencia de personas o animales, brindando una seguridad completa en su funcionamiento.



Figura 2.11 ROBOTTI LR
Fuente: [20]

Tabla 2.2. Resumen técnico de los productos comerciales.

Características	Dron DJI AGRAS T30 Fuente: [10] 	UGV FARMDROID FD20 Fuente: [19] 	UGV ROBOTTI LR Fuente: [20] 
Descripción	Dron agrícola avanzado con capacidad para rociar y esparcir grandes cargas de fertilizante	Robot agrícola automático para siembra y deshierbe, proporciona control de malezas	Robot agrícola multifuncional para siembra, deshierbe, arado y fumigación
Potencia bruta (kW)	13	1.6	54
Voltaje de la batería	51.8 V	-	12V
Capacidad del tanque	30 L	6 L	-
Velocidad en modo autónomo	-	0.95 km/h	5 km/h
Velocidad máxima	36 km/h	1.1 km/h	10 km/h
Peso en seco	26.3 kg	900 kg	2850 kg
Sistema de conducción	Hélices	Hasta 12 ruedas	4 ruedas motrices
Temperatura de operación	0-45 °C	0-40°C	-
Temperatura de almacenamiento	-30 °C - 30°C	-10-50°C	-
Sensor de posicionamiento	DJI RTK y GPS	Cámara	LiDAR y GPS
Visión artificial	Si	Si	No

Fuente: Elaboración propia

La autonomía limitada emerge como una preocupación clave especialmente en el caso de DJI AGRAS T30. La capacidad de los tanques en FARMDROID FD20 es notablemente menor que en los otros modelos, lo que podría limitar su capacidad de trabajo continuo en el campo. Otro desafío importante es el peso del ROBOTTI LR, siendo significativamente más pesado que los otros dos modelos. Esto podría influir en su maniobrabilidad y eficiencia energética, lo que plantea preocupaciones adicionales en términos de seguridad y consumo de energía. La temperatura de

operación y almacenamiento también es un aspecto a considerar, especialmente para DJI AGRAS T30, que tiene un rango de temperatura más limitado en comparación con los otros modelos, lo que podría restringir su uso en diferentes condiciones climáticas.

En cuanto a características específicas, la inclusión de un escáner LIDAR es una ventaja para DJI AGRAS T30 y ROBOTTI LR, que pueden mejorar la precisión de sus operaciones. Finalmente, la disponibilidad de visión artificial como una opción adicional en ROBOTTI LR puede influir en su capacidad para realizar tareas más avanzadas de detección y reconocimiento de objetos.

2.5 Patentes

En esta sección se presentarán patentes relacionadas con el proyecto de investigación.

2.5.1 AUTOMATIC TARGET RECOGNITION AND MANAGEMENT SYSTEM

La patente US 10701852 B2 consta de un aparato para el control de malezas que se observa en la figura 2.9, que incluye una formación de dientes diseñada para eliminar o perturbar las malezas específicas, y un conjunto de soporte de dientes permite el movimiento en dos direcciones principales: verticalmente, para que los dientes entren en contacto con el suelo y perturben las malezas, y horizontalmente, para ajustar la dirección del movimiento de los dientes.

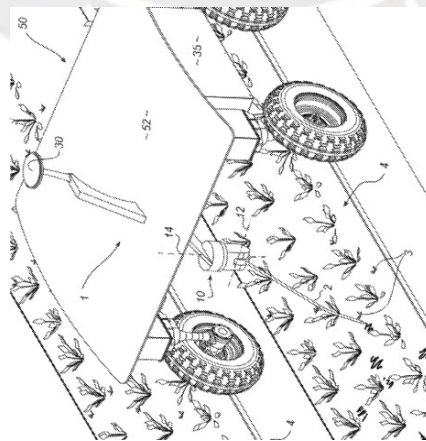


Figura 2.12 Aparato para el control de malezas
Fuente: [21]

El conjunto de soporte de dientes incluye además un primer mecanismo de accionamiento diseñado para efectuar el movimiento del diente alrededor del primer eje de control, y un segundo mecanismo de accionamiento diseñado para efectuar el movimiento del diente alrededor del segundo eje de control. El aparato también incluye un sistema de detección para detectar obstáculos de un entorno y generar datos indicativos de ello, y un sistema de clasificación para identificar malezas objetivo dentro del entorno sobre la base de los datos del sistema de detección. Un sistema de control está diseñado para activar los primeros y segundos mecanismos de accionamiento del conjunto de soporte de dientes de acuerdo con una lógica de control predeterminada, posicionando secuencialmente el diente para el contacto disruptivo con las malezas específicas. Sin embargo, presenta limitaciones en el alcance del sistema de detección en entornos densos, su adaptabilidad a diversos suelos y cultivos, así como la complejidad operativa y posibles costos adicionales de implementación. La necesidad de ajustes manuales ante cambios en las condiciones podría afectar su eficiencia operativa.

2.5.2 Automatic target recognition and dispensing system

La patente AU 2019246795 B2 describe un dispositivo automatizado que dirige un agente de control hacia un objetivo reconocido. Este dispositivo tiene aplicaciones en la agricultura, gestión ambiental y otros campos, como se muestra en la Figura 2.13.

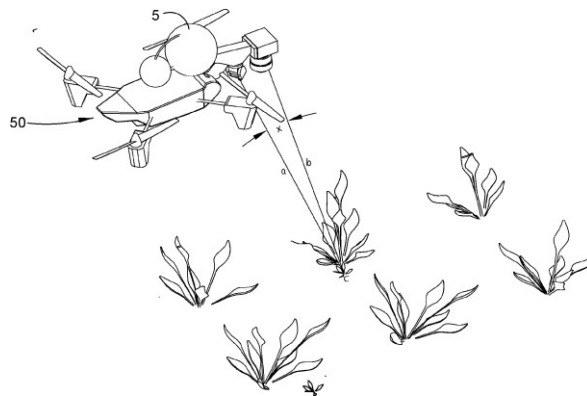


Figura 2.13 Prototipo de la patente
Fuente: [22]

El dispositivo incluye una fuente del agente de control para funciones de control ambiental y una salida con al menos un orificio adaptado para dirigir el agente hacia un objetivo. Un medio de activación es el móvil entre un modo operativo, donde la salida está abierta, y un modo inoperante, donde está cerrada. Se proporciona un mecanismo de orientación con un conjunto de soporte de salida móvil en al menos un eje de control independiente para orientar el orificio de salida y, por ende, el agente de control en el modo operativo. Este mecanismo incluye actuadores para mover el conjunto de soporte de salida en los ejes de control respectivos. Además, hay un primer sistema de detección para percibir aspectos del entorno y un sistema de clasificación para identificar objetivos en base a los datos del sistema de detección. Un sistema de control orienta el orificio hacia los objetivos mediante el mecanismo de orientación y activa el agente de control según una lógica predeterminada, suministrando así dosis a los objetivos identificados para el control ambiental. Sin embargo, la efectividad del dispositivo puede depender de la precisión en la identificación de objetivos, así como también podría requerir ajustes según las condiciones cambiantes del entorno y por último la complejidad del mecanismo de orientación podría afectar la facilidad de mantenimiento y reparación.

2.5.3 SYSTEMS AND METHODS FOR DISPENSING AN INSECTICIDE VIA UNMANNED VEHICLES TO DEFEND A CROP - CONTAINING AREA AGAINST PESTS

La patente US 10577103 B2 presenta un enfoque innovador para proteger áreas de cultivo contra plagas mediante el uso de vehículos no tripulados que dispensan insecticidas. Este sistema versátil y adaptable emplea sensores para detectar plagas y un dispositivo de aplicación de insecticidas que rocía productos específicos según sea necesario. Los datos recolectados por el vehículo son transmitidos a un sistema informático, el cual identifica la plaga y envía instrucciones al vehículo para aplicar el tratamiento adecuado. La Figura 2.14 ilustra la arquitectura del sistema que activa este proceso automatizado. Esta tecnología no solo mejora la eficiencia y precisión en el control de plagas agrícolas, sino que también reduce la dependencia de mano de obra y minimiza la exposición a productos químicos.

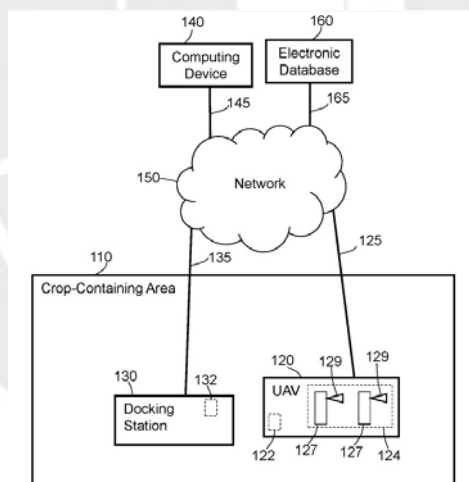


Figura 2.14 Sistema para defender cultivos mediante la dispensación de insecticidas

Fuente: [23]

CAPÍTULO 3: DISEÑO CONCEPTUAL

Esta sección detalla los requerimientos del sistema, se presentan recursos y herramientas visuales para un mejor entendimiento del sistema. Y además se plantean propuestas de solución para solventar las problemáticas presentes.

3.1 Lista de Requerimientos

En esta sección, se proporciona un desglose detallado de los elementos esenciales para asegurar que el proyecto de desarrollo cumpla con los objetivos establecidos. Se detallan los componentes específicos relacionados con la propuesta de solución conceptual basada en la creación de un vehículo autónomo para la aplicación de pesticidas en la agricultura. Estos requisitos se presentan de acuerdo con los siguientes criterios:

(E): Exigencia del Sistema.

(D): Deseo de Implementación.

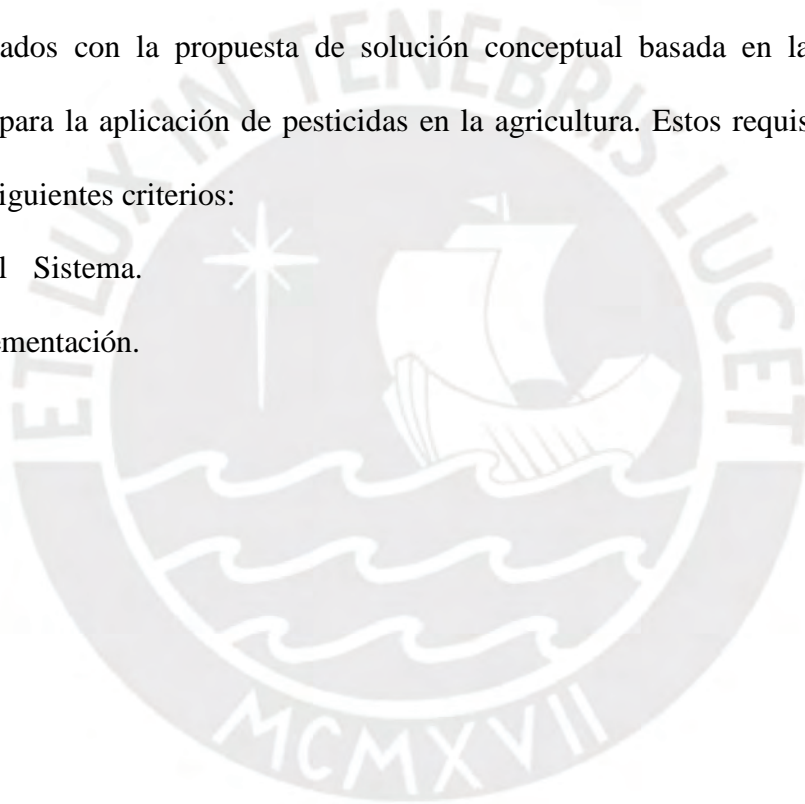


Tabla 3.1. Lista de Requerimientos de productos

Proyecto	Diseño de un vehículo terrestre autónomo para la aplicación eficiente de pesticidas en cultivos agrícolas	
Deseo o Exigencia	Descripción	Peso
	Función Principal	30
Vehículo		
E	Movimiento preciso y controlable para adaptarse a diversas tareas agrícolas, con un error del 10%.	4
E	Velocidad máxima de desplazamiento de 1.5 km/h	3
E	Tiempo de aplicación en cada planta menor a 10 segundos.	3
E	Capacidad de desplazarse de manera autónoma de forma lineal y curvilínea en los terrenos agrícolas	4
Sistema de detección de enfermedades y aspersión de pesticidas		
E	Flujo de material continuo y controlado para garantizar precisión de hasta 80% la aplicación de pesticidas.	6
E	Algoritmo para detección de enfermedades en cultivos con una eficiencia superior al 85%	5
E	Integración de un sistema de visión para aplicar pesticidas en áreas afectadas.	5
Geometría		20
E	Configuración modular para personalización según condiciones de trabajo.	3
D	Peso menor a 20 kg	2
E	Peso máximo 25 kg	3
E	Capacidad de poder ser transportado mediante agarraderas	2
E	Altura máxima de 1 metro	5
E	Ancho y largo menores a 40 cm y disposición que permitan una fácil manipulación y accesibilidad.	5
Fabricación		30
E	Propiedades físicas y químicas de los materiales que cumplan con normativas sobre alimentos y medio ambiente.	5
E	Ventilación con filtro de polvo adecuada para mantener los componentes electrónicos y el tanque de almacenamiento a temperaturas entre 10 °C y 30 °C	4
E	Sistema de protección con el estándar IP65	7
D	Rigidez y estabilidad que minimicen deformaciones bajo condiciones de trabajo extremas (35°C y 5 °C).	4
E	Rigidez y estabilidad que minimicen deformaciones bajo temperaturas menores a 35 °C.	6
E	Baterías con facilidad de intercambio y recargables	4

	Uso	20
E	Información en tiempo real sobre el rendimiento y condiciones del vehículo.	3
E	Uso eficiente de pesticidas para minimizar costos e impacto ambiental.	4
D	Compatibilidad con una variedad de pesticidas disponibles en el mercado	2
E	Tiempo de aprendizaje menor a 7 minutos	2
E	Sistema de delimitación y reconocimiento de áreas fuera del objetivo.	3
E	Botón de emergencia en lugar accesible,	2
D	Indicadores led y parlantes para indicar emergencia	2
E	Hasta 10 horas de autonomía	2

Fuente: Elaboración propia

3.2 Black Box

El BlackBox es una representación gráfica en la que se trata el sistema a desarrollar desde una perspectiva general sin abundar en tantos detalles. Es útil para la comprensión del lector, ya que no presenta especificaciones técnicas o de diseño.

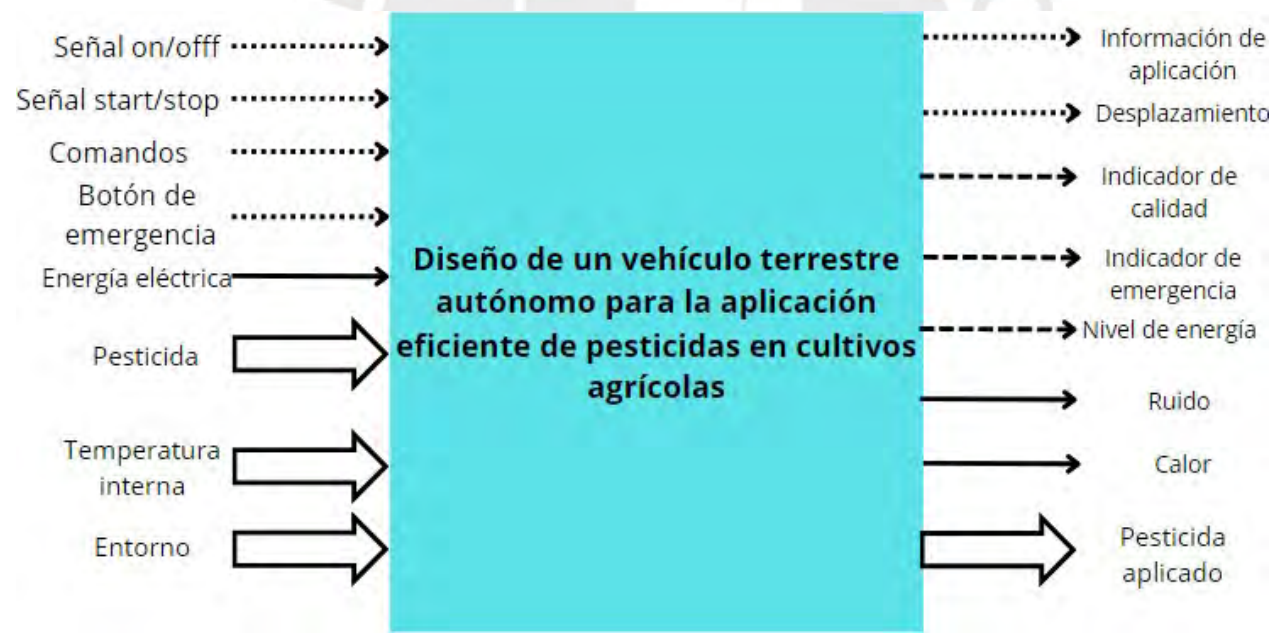


Figura 3.1 . BlackBox.

Fuente: Elaboración propia

3.3 Estructura de Funciones

En este apartado se busca el desarrollo, la descomposición y la organización de las funciones principales del sistema. Es fundamental para el entendimiento del proyecto y del cómo interactúan los subsistemas presentes en este.

La estructura desarrollada detalla todos los procesos presentes en la aplicación precisa de pesticidas mediante un vehículo autónomo.



Estructura de Funciones

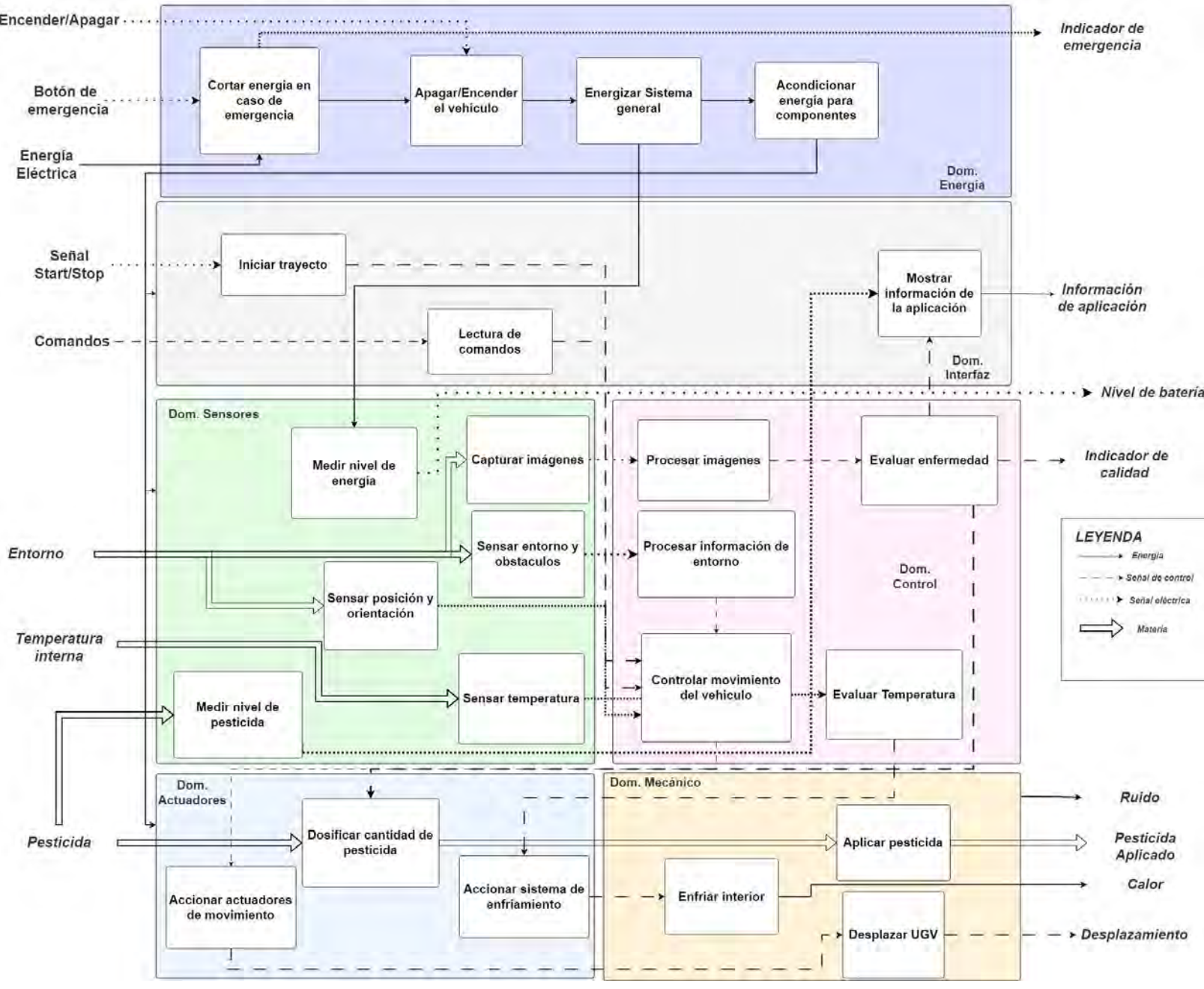


Figura 3.2 . Estructura de funciones del sistema.

Fuente: Elaboración propia

El dominio de interfaz define cómo los usuarios interactúan con el vehículo autónomo (UGV) mediante botones de Start/Stop y comandos específicos. Proporciona actualizaciones sobre los

niveles de pesticidas, la eficacia de su aplicación y el estado del proceso, manteniendo informados a los usuarios.

El dominio de energía analiza y representa las funciones del sistema relacionadas con la energía. Incluye cortar la energía en emergencias para prevenir riesgos, energizar el sistema general, acondicionar la energía para los diferentes componentes electrónicos, y apagar o encender el vehículo según sea necesario.

Este dominio gestiona el comportamiento del vehículo y las relaciones entre los actuadores y la computadora supervisora. Incluye procesar información del entorno para detectar obstáculos y direcciones, controlar el movimiento del vehículo, procesar imágenes para diagnosticar enfermedades, evaluar la cantidad de pesticida a aplicar y monitorear la temperatura interna.

El dominio de actuadores se centra en las interacciones del UGV con la aplicación del pesticida. Incluye accionar los actuadores de movimiento, dosificar la cantidad correcta de pesticida, y accionar el sistema de enfriamiento para mantener la temperatura interna del vehículo dentro de los límites seguros.

Este dominio recopila toda la información necesaria para la operación del UGV. Incluye sensar el entorno y los obstáculos, capturar imágenes para diagnosticar enfermedades, sensar la posición y orientación del vehículo, medir el nivel de energía de la fuente y el nivel de pesticidas disponibles, y monitorear la temperatura interna del vehículo.

El dominio mecánico asegura la movilidad y el control de calidad del UGV. Incluye desplazar el vehículo a lo largo de la trayectoria definida, aplicar la cantidad correcta de pesticida según el

diagnóstico de enfermedades, y enfriar el interior del vehículo para mantener una temperatura óptima de funcionamiento.

3.4 Matriz morfológica

Se presenta la matriz morfológica de cada dominio, destacando tres alternativas de implementación de cada función. De esta manera, se generan conceptos de solución distintos. Las siguientes tablas muestran las alternativas de solución para cada función propuesta en la estructura del proyecto, con el objetivo de encontrar la mejor solución posible.

Tabla 3.2. Matriz Morfológica del Dominio de Interfaz.
Fuente: Imágenes referenciales proporcionadas de internet

Dominio de interfaz			
FUNCIONES	S1	S2	S3
Iniciar trayecto			
Lectura de comandos			
Mostrar información de aplicación			
	Pantalla táctil	Tablet	Dispositivo móvil

Tabla 3.3. Matriz Morfológica del Dominio de Energía.

DOMINIO DE ENERGÍA			
FUNCIONES	S1	S2	S3
Cortar Energía en caso de emergencia			
	Interruptor manual	Interruptor automático	Interruptor manual y automático
Energizar Sistema general			
Acondicionar energía para componentes	Batería recargable	Conexión a suministro 220 VAC	Batería recargable

Tabla 3.4. Matriz Morfológica del Dominio de Control.





Dominio de Control.			
FUNCIONES	S1	S2	S3
Controlar movimiento del vehículo			 
Evaluar temperatura			
Procesar información del entorno			
Procesamiento de imágenes			
Evaluar enfermedad	Microcontrolador	Microcomputador	Microcontrolador y Microcomputador

Tabla 3.5. Matriz Morfológica del Dominio de Actuadores.








Dominio de Actuadores.			
FUNCIONES	S1	S2	S3
Dosificar cantidad de pesticida			
	Bomba atomizadora	Bomba inyectora	Bomba de agua
Accionar actuadores de movimiento			
	Motor DC con escobillas y Servomotor	Motor DC sin escobilla	
Accionar sistema de enfriamiento			
	Actuador corriente alterna	Actuador de corriente continua	

Tabla 3.6. Matriz Morfológica del Dominio de Sensores.

Dominio de sensores			
FUNCIONES	S1	S2	S3
Sensor entorno y obstáculos			
	Sensor infrarrojo	Sensor ultrasónico	Cámara de profundidad
Sensor posición y orientación			
	Giroscopio, acelerómetro y GPS	Sensor de posición de recorrido y angular	LIDAR + IMU
Captura de Imagen			
	Cámara RGB	Cámara multispectral	Mini cámara convencional
Medir nivel de energía			
	Sensor de corriente	Sensor de energía y potencia	Indicador de nivel de batería
Medir nivel de pesticida			
	Sensor de medición líquida	Sensor ultrasónico	Sensor de nivel para recipientes
Sensor temperatura			
	Sensor infrarrojo	Termistor	Sensor de temperatura

Tabla 3.7. Matriz Morfológica del Dominio de Mecánico.

Dominio de Mecánico.			
FUNCIONES	S1	S2	S3
Aplicar pesticida			
	Lanza pulverizadora	Sistema de boquillas pulverizadoras	Lanza pulverizadora con boquillas intercambiable
Desplazar UGV			
	Ruedas convencionales	Ruedas oruga	Ruedas omnidireccionales
Enfriar interior			
	Ventilador	Ventilador con filtro de polvo	

3.6 Evaluación

Se evalúan y comparan los conceptos de solución, fundamentándose en criterios técnicos y económicos para determinar la opción más adecuada. Cada criterio tiene un peso relativo (G), detallado en la Tabla 11, que guía la evaluación.

Tabla 3.8. Pesos relativos.

Valor	Significado
0	Nada importante
1	Poco importante
2	Importante
3	Muy importante

4	Bastante importante
---	---------------------

Además, se establece un valor (P) para la comparación de efectividad entre los criterios de diferentes conceptos de solución, detallado en la Tabla 12, donde se asigna un puntaje de 0 a 4 según la Escala de Valores según VDI 2225.

Tabla 3.9. Efectividad de las soluciones.

Valor	Significado
0	No satisface
1	Aceptable
2	Suficiente
3	Bien
4	Ideal

3.6.1 Criterios técnicos

Se detallan los criterios técnicos seleccionados para la evaluación de cada concepto de solución, considerando las escalas de satisfacción y relevancia en el proyecto. Los criterios técnicos elegidos para comparar los conceptos de solución son:

1. Función Principal:

La función principal del vehículo autónomo es evaluar la salud de las plantas mediante visión artificial y aplicar pesticidas según sea necesario. Esta capacidad es crucial para garantizar la eficiencia en el tratamiento de enfermedades de las plantas y, por lo tanto, se le otorga el mayor peso en la evaluación.

2. Forma y tamaño:

El diseño físico del vehículo es para garantizar su adaptabilidad, ya que estará expuesto a tierra, polvo y agua en áreas agrícolas. Además, debe ser lo suficientemente compacto como para recorrer hileras de al menos 40 cm de ancho y tener una altura máxima de 1 metro.

3. Fabricación:

Los procesos de fabricación son cruciales para garantizar la fiabilidad del vehículo, especialmente considerando su exposición a terrenos hostiles. Una construcción sólida y precisa reduce los costos de mantenimiento.

4. Durabilidad:

El vehículo debe estar construido con materiales que ofrezcan una resistencia superior a las condiciones agrícolas adversas, incluyendo la exposición a la humedad, polvo, y variaciones extremas de temperatura. La combinación adecuada de materiales debe equilibrar la durabilidad, el peso y el costo, garantizando que el vehículo mantenga un rendimiento óptimo a lo largo del tiempo y maximice el retorno de la inversión.

5. Mantenimiento:

Evaluar la facilidad de mantenimiento del vehículo autónomo es importante para minimizar los tiempos de inactividad y los costos de reparación. Aunque relevante, se le asigna un peso menor en la evaluación, ya que no es el factor principal en la toma de decisiones, pero sigue siendo importante para la rentabilidad a largo plazo del equipo.

Tabla 3.10. Tabla de evaluación técnica.

Variantes de concepto/Proyecto			SOL 1		SOL 2		SOL 3	
Nº	Criterio de Evaluación	G	P	GP	P	GP	P	GP
1	Función principal	4	3	12	2	8	3	12
2	Forma y tamaño	4	2	8	2	8	3	12
3	Fabricación	3	2	6	3	9	3	9
5	Durabilidad	3	3	9	2	6	4	12
6	Mantenimiento	2	3	6	2	4	2	4
Puntaje Máximo		64		41		35		49
Valor Técnico Xi			0,64		0,55		0,77	

3.6.2 Criterios económicos

Los siguientes son los criterios económicos que se evaluarán para cada propuesta de solución de manera análoga a los criterios técnicos.

1. Costo de Tecnología:

La inversión en tecnología de alta calidad, como los sistemas de visión artificial y el software de control, es fundamental para garantizar su capacidad de evaluar la enfermedad de las plantas y aplicar pesticidas de manera precisa.

2. Costo de Fabricación:

Es esencial diseñar y fabricar el vehículo de manera eficiente para garantizar su durabilidad y resistencia en entornos agrícolas. La eficacia en la fabricación contribuye directamente a una inversión más rentable y a la capacidad del vehículo para cumplir con sus funciones de manera efectiva.

3. Costo de Mantenimiento:

Se debe tener en cuenta el costo de mantenimiento del vehículo autónomo para asegurar su funcionamiento óptimo a lo largo del tiempo. Esto incluye el mantenimiento regular, la adquisición de repuestos y la contratación de servicios técnicos especializados.

4. Disponibilidad de Materiales:

Asegurar la disponibilidad constante y a precios razonables de los materiales necesarios para la fabricación y mantenimiento del vehículo autónomo es fundamental para controlar los costos y garantizar su operatividad continua. Una gestión efectiva de los recursos materiales contribuye positivamente a la rentabilidad y eficiencia del proyecto agrícola.

Tabla 3.11. Tabla de evaluación económica.

Variantes de concepto/Proyecto		SOL 1			SOL 2		SOL 3	
Nº	Criterio de Evaluación	G	P	GP	P	GP	P	GP
1	Costo de Tecnología	4	4	16	3	12	3	12
2	Costo de Fabricación	3	3	9	3	9	3	9
3	Costo de Mantenimiento	2	3	6	3	6	2	4
4	Disponibilidad de materiales	3	3	9	3	9	2	6
Puntaje Máximo		48		40		36		31
Valor Económico Yi			0,83		0,75		0,65	

3.7 Solución óptima

En función de los criterios técnicos y económicos previamente definidos, se utiliza un gráfico de dispersión que representa el análisis técnico-económico de las soluciones disponibles, para identificar una única alternativa entre las propuestas. Para determinar la solución óptima, se compara cada opción con la línea ideal, y la que se aproxima más a esta, en este caso la solución 3, se considera la solución óptima.

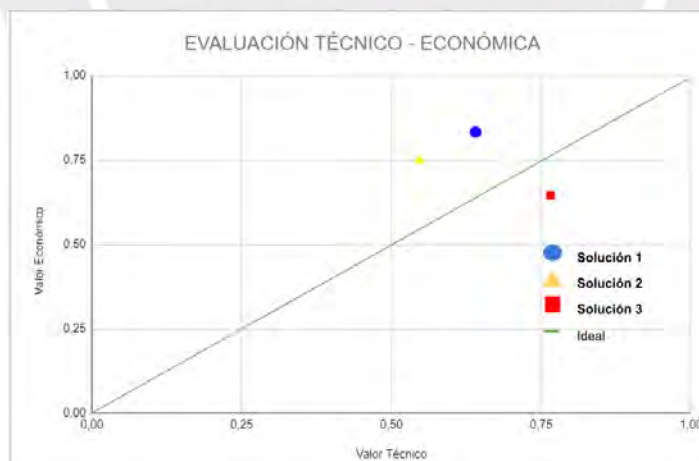


Figura 3.3 Evaluación técnico-económica

La solución óptima se basa en el concepto de la solución 3, con ajustes necesarios para un funcionamiento óptimo en campos agrícolas. El principal cambio radica en las ruedas y el tipo de

direccionamiento: se sustituyen las ruedas omnidireccionales por ruedas todoterreno. Estas ruedas están diseñadas para terrenos abruptos y, según pruebas, las ruedas omnidireccionales no se desempeñan eficientemente en terrenos irregulares o no lisos. En la Figura 3.4 se puede observar con más detalle la solución propuesta.

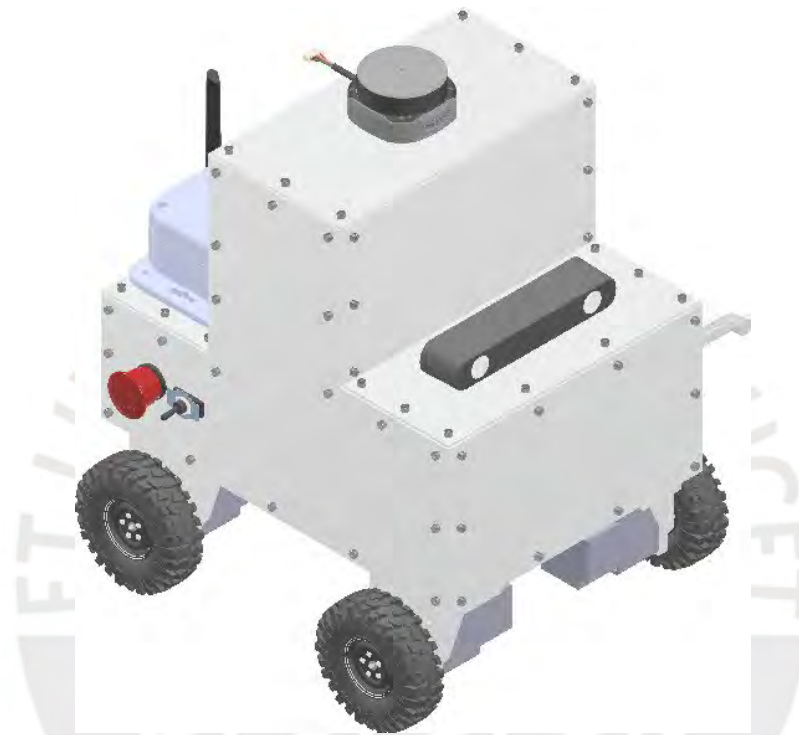


Figura 3.4. Solución óptima

3.7.1 Diagrama de bloques

En la Figura 3.5 se muestra el diagrama de bloques del sistema, que incluye el módulo control, sensores, actuadores y energía actuadores. Los componentes como la cámara de profundidad, IMU, sensor Lidar y la mini cámara se conectan a la micro computadora a través de USB. Para alimentar la computadora, se utilizará un regulador de voltaje de 24V a 20V. Para el microcontrolador, se dispone de un regulador de voltaje de 24V a 6V, que también alimentará la bomba de agua. El regulador de voltaje para la válvula y el ventilador axial es de 24V a 12V. Dos relés de 3.3V de voltaje, compatibles con las salidas digitales del microcontrolador, se utilizan para el accionamiento

de estos actuadores: un relé SPST para el ventilador y un relé DPST para el sistema de aspersión del pesticida. Se eligen estos tipos de relés por su facilidad de trabajo y alta adaptabilidad al sistema. Los motores cuentan con su propio driver del fabricante, que se activará mediante los puertos digitales del microcontrolador.

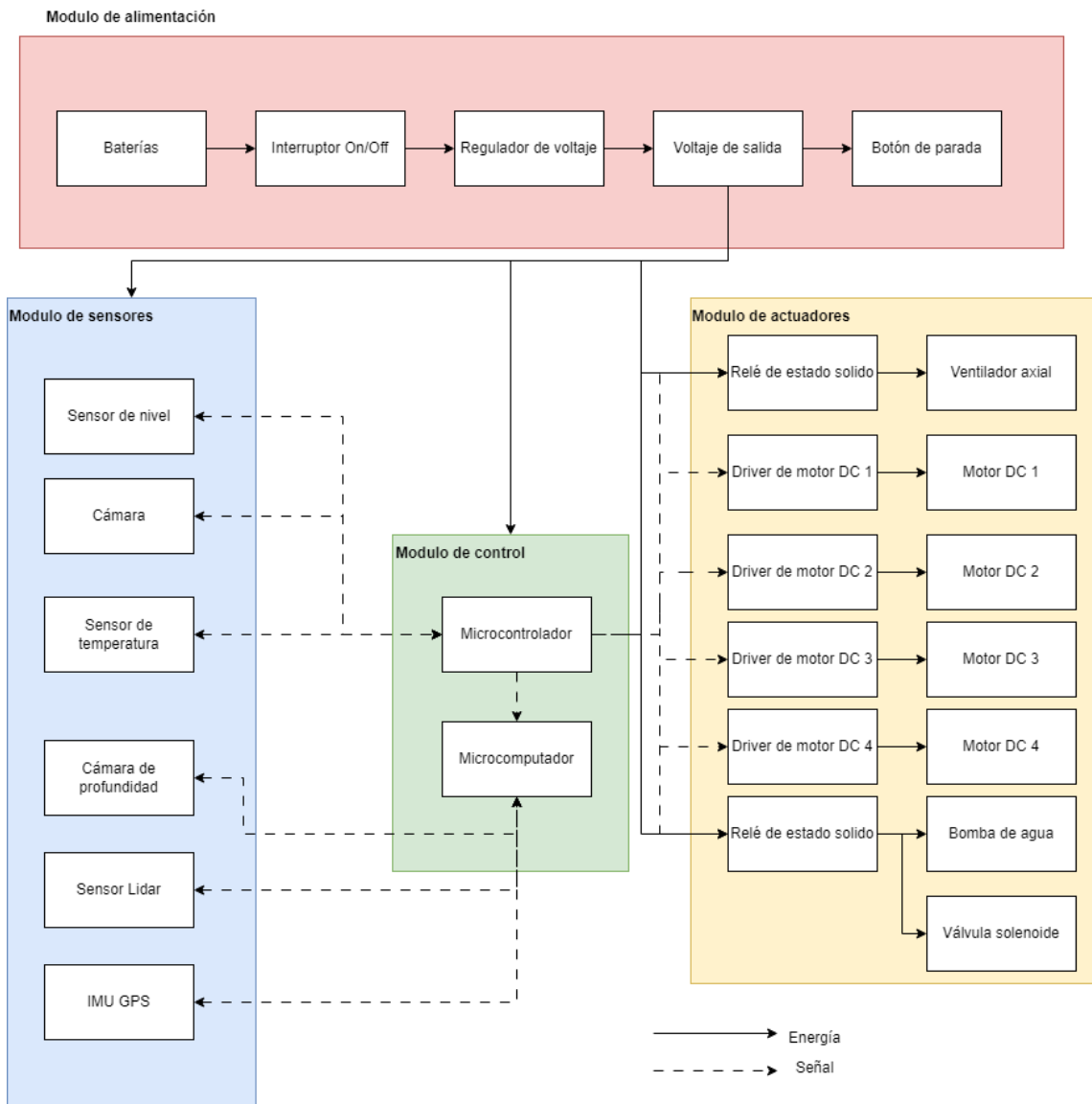


Figura 3.5 Diagrama de bloques

CAPÍTULO 4: DISEÑO MECATRÓNICO

En este capítulo se desarrolla el diseño tanto mecánico como electrónico de los subsistemas del concepto solución óptimo. Se incluyen cálculos mecánicos, selección de materiales y simulaciones mecánicas. También se aborda la selección de componentes electrónicos, cálculos de potencia y la selección del suministro de energía.

4.1 Diseño mecánico

El vehículo contará con el modelo de direccionamiento de ruedas mediante diferencial de velocidades. Este método se basa en variar la velocidad de las ruedas izquierda y derecha para lograr la dirección deseada sin necesidad de un mecanismo de dirección adicional, lo que simplifica el diseño mecánico y aumenta la maniobrabilidad del vehículo.

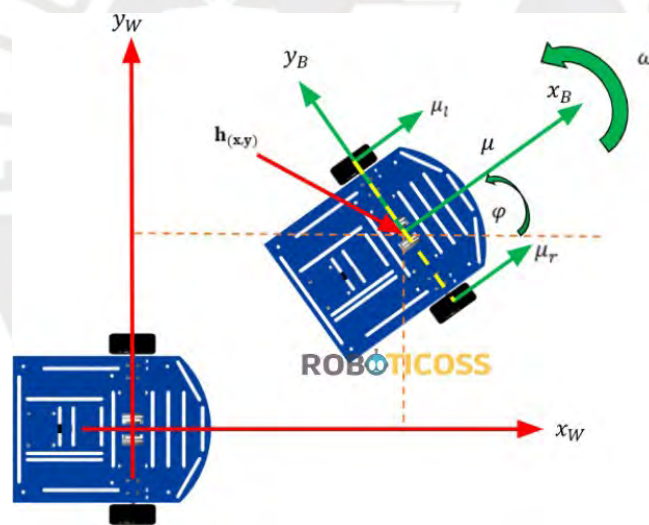


Figura 4.1. Modelo cinemático de un robot diferencial
Fuente: [24]

La velocidad y la dirección del vehículo pueden ser controladas ajustando las velocidades de las ruedas de acuerdo a la siguiente fórmula básica:

$$u = \frac{u_l + u_r}{2}$$

$$w = \frac{u_l - u_r}{d}$$

Donde:

- u es la velocidad lineal del vehículo.
- ω es la velocidad angular del vehículo.
- u_l es la velocidad de las ruedas izquierdas.
- u_r es la velocidad de las ruedas derechas.
- d es la distancia entre las dos ruedas.

En la Tabla 15 se presentan las características técnicas de varios tipos de ruedas, diferenciadas por su diámetro, material, ancho y capacidad de carga. Considerando que el vehículo debe tener un peso máximo de 25 kg, la opción de ruedas todo terreno de 100 mm es la más adecuada. Estas ruedas ofrecen una capacidad de carga de hasta 30 kg y son las más cómodas y de menor ancho, lo cual es ideal para mantener el vehículo dentro de un ancho de menos de 40 cm.

Tabla 4.1. Tabla comparativa de ruedas

MODELO			
Material	Goma y plástico de alta calidad	Goma calificada	Goma blanda
Fabricante	RC STATION	AIMROCK	HOOBYSOUL
Diámetro externo	150 mm	110 mm	100 mm
Ancho	81,3 mm	45 mm	36 mm
Peso	59 g	122 g	102,5 g
Peso de carga	50 kg	25 kg	30 kg
Precio	\$50,00	\$32,00	\$15,00

Una vez seleccionada la rueda adecuada, procedemos al cálculo del torque y la velocidad necesarios para elegir el motor. Se establece una velocidad máxima de 0.4167 m/s, y se asume un tiempo de 2 segundos para que el robot parta desde reposo hasta llegar a la velocidad máxima, resultando en una

aceleración máxima de 0.2083 m/s^2 . Además, se considera un peso máximo de 25 kg, distribuyendo uniformemente en cada rueda 6.25 Kg, según los requisitos establecidos.

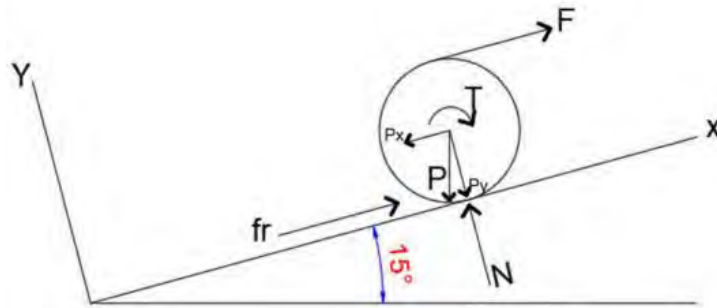


Figura 4.2 Diagrama de cuerpo libre de cada rueda

Por la Segunda Ley de Movimiento de Newton $\sum Fx = m \cdot a$ se puede realizar la descomposición de fuerzas que se observa en la Figura 4.3, se tiene en cuenta un ángulo de 15° por los diferentes desniveles que presentan los campos agrícolas. Se detalla el procedimiento para el cálculo del torque teniendo en cuenta un diámetro de rueda de 100 mm y 6.25 Kg de peso en cada rueda.

$$fr - P \times g \times \text{sen}(15^\circ) = P \times a$$

$$fr = T / R$$

$$T = R \times P \times (a + g \cdot \text{sen}(15^\circ))$$

fr= fuerza de fricción

R= radio de la rueda (mm)

P= Peso en cada rueda (Kg)

a= Aceleración máxima

T= Torque (Nm)

Realizando los cálculos se obtiene un torque de 0.86 N.m, al cual aplicamos un Factor de Seguridad de 2 para garantizar operaciones seguras, obteniendo un torque final de 1.72 N.m. Por otro lado, se

considera el requerimiento de la velocidad máxima de operación del robot para calcular las RPM necesarias con la siguiente ecuación.

$$W = V_{\max}/R$$

$$W = 0.4167 \text{ m/s} / 0.05 \text{ m}$$

$$W = 8.334 \text{ rad/s} \times (\Pi \div 30)$$

W= Velocidad angular del motor (RPM)

Esto nos lleva a estimar una velocidad angular de 79.57 RPM requeridas para el motor.

Tabla 4.2. Tabla comparativa de motores Dc

	GL80 KV30	U8II PRO	BLHM230KC
MODELO			
Fabricante	T-MOTOR	T-MOTOR	Oriental Motors
Torque nominal	1 Nm	-	2,1 Nm
Torque estático	2,9 Nm	2,09 Nm	-
Voltaje nominal	24 V	24 V	24 V
Corriente nominal	2,8 A	1 A	1,9 A
Velocidad nominal	450 rpm	3488 rpm	5-150 rpm
Diametro máximo	80 mm	87,3 mm	60 mm
Ancho	22,8 mm	29,55 mm	76 mm
Peso	315 g	287 g	1000 g
Precio	\$227.90	\$309,99	\$474.00

Para la selección de los motores, se consideran tanto el torque como la velocidad requerida para el desplazamiento. En este contexto, se elige el motor BLHM230KC debido a su compatibilidad, ya que viene equipado con un canal chavetero para la transmisión de torque. Además, este motor cuenta con un soporte adicional, mostrado en la Figura, que facilita su instalación. Este soporte se fijará al motor mediante tornillos M4x55mm, mientras que la parte superior se unirá a la estructura

mediante tornillos M4x30mm. Una ventaja significativa de este motor es su certificación IP68, lo que elimina la necesidad de diseñar una carcasa de protección adicional.

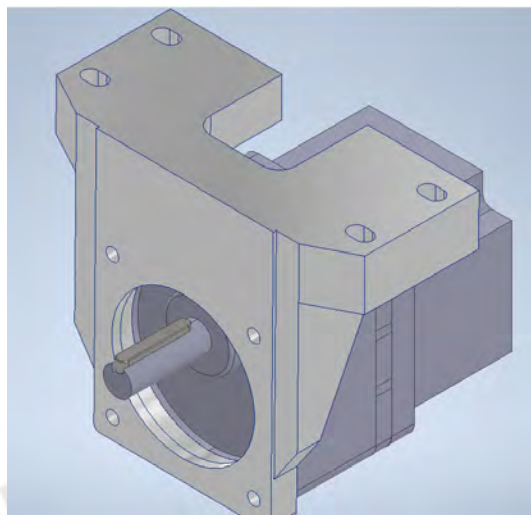


Figura 4.3 Motor con soporte y key

Para la rueda seleccionada se realiza el diseño de un acople que se muestra en la Figura 4.4, este se realizará con acero inoxidable C45 DIN 17200, para asegurar la dureza y resistencia al torque previamente establecido. El acople sigue los estándares del diámetro del rotor del motor seleccionado para la unión con el canal chavetero y un ajuste mediante tornillos prisioneros.



Figura 4.4 Acople Rueda-Motor

Empleando el acople mostrado, en la Figura 4.5 se muestra la unión rueda-motor mediante el canal chavetero y un key para la transmisión de potencia.



Figura 4.5 Motor acoplado a rueda

Luego de seleccionar los componentes se realizan cálculos para verificar la estabilidad del vehículo. Para ello, establecemos un radio de giro de 1 metro, una distancia de separación entre ruedas b de 35 mm y una altura máxima del centro de masa h de 20 mm. Utilizando la siguiente ecuación, determinamos que la velocidad necesaria para volcar el vehículo es de 2.93 m/s. Sin embargo, dado que la velocidad máxima del vehículo es de solo 0.4167 m/s, podemos concluir que el vehículo no se volcará bajo estas condiciones.

$$V_{\text{volcadura}} = \sqrt{\frac{r \cdot b \cdot g}{2 \cdot h}}$$

$$V_{\text{volcadura}} = 2,93 \text{ m/s}$$

r = radio de giro



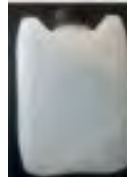

b = distancia entre ruedas

h = altura del centro de masa

Además de las ruedas y los motores, otro elemento para el robot es el tanque de almacenamiento. Es importante que este tanque sea altamente adaptable, con dimensiones menores a 40 cm y una capacidad de almacenamiento mayor a 3L. Por esta razón, se selecciona un tanque de 5 litros, que

además de su capacidad, tiene una forma compacta que permite su fácil integración en cualquier parte del vehículo.

Tabla 4.3. Tabla comparativa de tanques de almacenamiento

MODELO	Tanque 4 LT	Tanque 5 LT		Tanque 10 LT
				
Material	PEAD (polietileno de alta densidad)			
Ancho	1 Nm	13 cm	16 cm	18,5 cm
Largo	17 cm	17 cm	18 cm	22,5 cm
Altura	23 cm	28 cm	23 cm	29,5 cm
Capacidad	4 L	5 L	5 L	10 L
Peso con pesticida incluido	4 kg	5 kg	5 kg	10 kg

Considerando solo el tanque, los motores y las ruedas, el peso total sería de los 10 kg, por lo que es muy importante diseñar una estructura ligera. Se opta por utilizar perfiles V-Slots debido a su alta resistencia, peso ligero, disponibilidad en el mercado local, dimensiones compactas y su resistencia a la oxidación y abrasión. Para la estructura, se emplean perfiles de 20x20 unidos mediante ángulos de 90 grados atornillados entre sí que se muestran en la Figura 4.6.

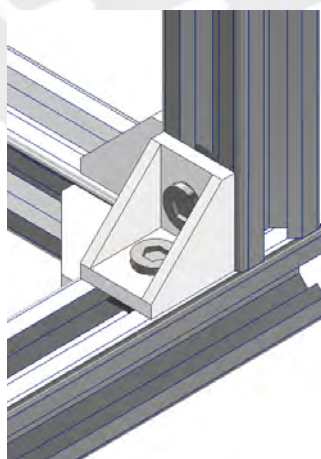


Figura 4.6 Unión de perfiles mediante ángulos de 90

Asimismo, se observa la estructura en la Figura 4.7 la cual cumple con los requisitos al tener un largo de 37 cm y un ancho de 27 cm. Destacando la posición del tanque en el medio del vehículo para evitar posibles volcaduras.

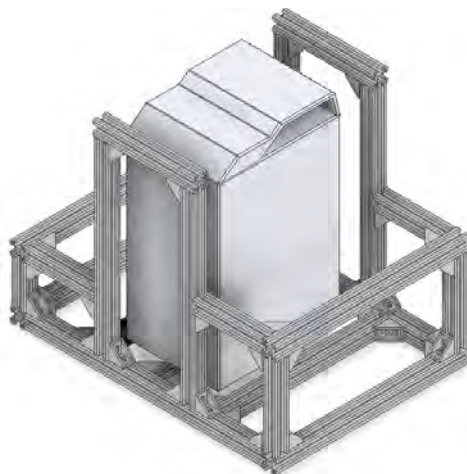


Figura 4.7 Estructura con tanque de almacenamiento




Para el sistema de aspersión, se requieren componentes como la bomba, válvulas y la lanza de aplicación. Dado que la altura de la estructura vehicular es de 300 mm, no se necesita una bomba con gran capacidad de elevación. Se prioriza la protección IP68 de la bomba, así como su bajo consumo energético.

Tabla 4.4. Tabla comparativa de bombas de agua

	ZYW680	AD20P-1230C	Bomba de agua pequeña
MODELO			
Fabricante	ABS		
Caudal máx	800 L/h	240 L/h	280 L/h
Elevación de agua	2.5-5.5m	Hasta 3 m	Hasta 1,8 m
Voltaje	12 V	12V	6 V
Corriente máx	1 A	0,35 A	0,35 A
Temperatura de trabajo	1-70 °C	-	-20°C -60°C
Certificación	IP68	IP67	IP68
Precio	US\$23.99	US\$9	US\$18.99


En cuanto a la lanza pulverizadora, se selecciona una de longitud moderada para prevenir posibles choques con los cultivos durante el desplazamiento. Se prioriza además que cuente con una boquilla ajustable, permitiendo controlar el tamaño de la aspersión según el tipo de cultivo.

Tabla 4.5. Tabla comparativa de lanzas pulverizadora

	ZYW680	MS-0810	BLHM230KC
MODELO			
Fabricante	Kwazar	Monisol	Karcher
Material	Compuesto de fibra de vidrio	Aluminio	Acero inoxidable
Largo	60 cm	25 cm	40 cm
Boquilla ajustable	Si	Si	No
Precio	12,89€	7,83€	A cotizar

Al seleccionar la válvula, consideramos tanto el material como los diferentes flujos que puede soportar, especialmente dado que se trata de productos químicos. Por lo tanto, el acero inoxidable se destaca como una opción ideal para estas aplicaciones.

Tabla 4.6. Tabla comparativa de válvulas

	2W-08K	13640	GRS01
MODELO			
Fabricante	Acarps	Termoval	GRECIA
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable	Plástico
Voltaje	12 V	24 V	12 V
Uso	Óleos minerales, fluidos hidráulicos, GLP, GN, aire y agua.	Óleos minerales, fluidos hidráulicos, GLP, GN, aire y agua.	Agua y flujo con baja viscosidad
Diámetro	1/4"	1/8"	1/2", 1/4", 1/8"
Precio	US\$10,19	A cotizar	US\$7.69

Se busca un sistema de ventilación que cumpla con las especificaciones de los filtros disponibles en el mercado, por lo que se consideran opciones de 80 mm y 40 mm. Sin embargo, se prefiere el de 80 mm debido a su mayor tamaño y capacidad para abarcar más aire.

Tabla 4.7. Tabla comparativa de ventiladores axiales

	KD1208PTB1	EC6010	HDF4020L-05LB
MODELO			
Fabricante	SUNON	EVERCOOL	ELINA FAN
Dimensiones	80x80x25 mm	60x60x10 mm	40x40x20 mm
Voltaje	12 V	12V	5 V
Corriente máx	1 A	0,2 A	0.105A
Peso	30 g	25 g	65 g
Precio	US\$9.28	A cotizar	US\$9.99 al por mayor

En la Figura 4.9 se muestra la ubicación del sistema de aspersion del vehículo. La válvula y la bomba de agua están situadas en la base para aprovechar la gravedad, facilitando así un flujo continuo del pesticida hacia la lanza y reduciendo la dificultad de su traslado. Asimismo, para el transporte de líquidos se seleccionan mangueras de PTFE liso reforzadas con mallas de acero inoxidable debido a su elevada resistencia. Estas mangueras tienen una cubierta interna de teflón liso, que es resistente al fuego e inerte químicamente, y una cubierta externa de malla en acero inoxidable 304. Son adecuadas para transportar productos químicos corrosivos, alimentos y productos farmacéuticos, además cumplen con la normativa FDA para uso alimentario.

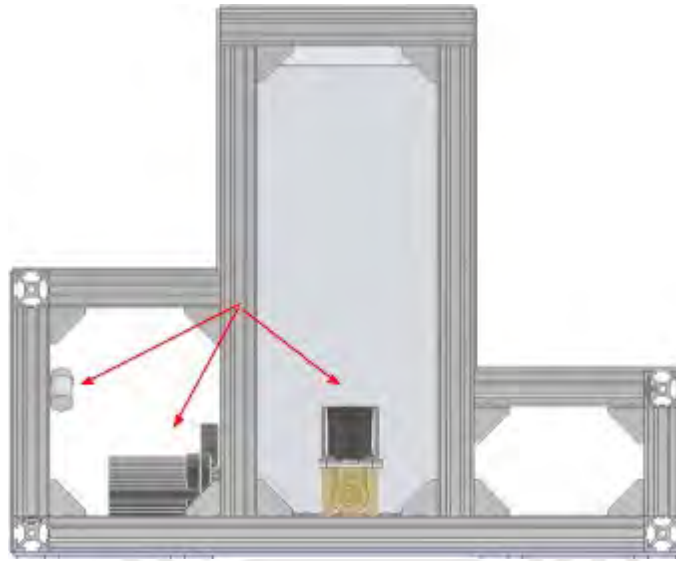


Figura 4.9 Ubicación de sistema de aspersión en el vehículo




4.2 Diseño electrónico

En este subsistema, se considerará el desplazamiento autónomo y todos los componentes requeridos para su implementación, incluida la selección de sensores.

UNIDAD DE CONTROL PRINCIPAL

Para la unidad de control principal, se necesita una unidad potente capaz de procesar algoritmos de visión, así como de contar con la cantidad necesaria de puertos para los componentes requeridos en la navegación. La Jetson Xavier NX se considera una buena opción debido a los requisitos previamente mencionados, además de ofrecer un precio equilibrado en comparación con otras alternativas disponibles.




Tabla 4.8. Tabla comparativa de microcomputadoras

MODELO			
	Jetson Nano	Jetson AGX Orin	Jetson Xavier NX
MARCA	NVIDIA	NVIDIA	NVIDIA
CPU	ARM Cortex-A57 64 bits a 1.43 GHz de cuatro núcleos	12-core Arm® Cortex®-A78AE v8.2 64-bit CPU 3MB L2 + 6MB L3	Nvidia de 6 núcleos Camello ARM v8.2 64 bits, 6 MB L2 +4 MB L3
GPU	128-core nvidia maxwell	2048 NVIDIA® CUDA® cores y 64 Tensor Cores	384-core Nvidia Volta
RAM	4GB LPDDR64 de 4 bits	4GB LPDDR64 de 4 bits	8GB LPDDR128 de 4 bits
Almacenamiento	MicroSD 64G	eMMC 16G 5.1 Disco duro de +64G	eMMC 16G 5.1 Disco duro de +64G
USB	USB3x4	USB 3.2 Tipo C (x2) USB 3.2 Tipo A (x4) USB 2.0 (x2)	USB3.1 × 4
Precio	USD 229.00	1999 USD	US\$ 857.42

UNIDAD DE CONTROL SECUNDARIA

Se requiere un microcontrolador que pueda enviar y recibir señales de los diversos sensores y actuadores del vehículo. En este contexto, el Arduino Mega se presenta como la opción ideal, ya que ofrece 15 pines PWM, conexiones MISO/MOSI y múltiples pines con salida de voltaje de 5V, eliminando así la necesidad de reguladores de voltaje adicionales.




Tabla 4.8. Tabla comparativa de microcontroladores

MODELO			
	Teensy 4.1	Arduino Mega	ESP32
Fabricante	PJRC	Arduino	Espressif Systems
Tensión de alimentación	3,3 V-5V	12V	3.0 V ~ 3.6 V
Frecuencia	16.0-MHz cristal	16 MHz	40 MHz crystal
Corriente de trabajo	0.1 A	0,02A	0,08 A
Puertos I/O	55	54	24
Puertos CAN	3	2	-
Puertos SPI	4	2	4
Precio	US\$31.50	US\$ 52,8	US\$ 12

CÁMARA DE PROFUNDIDAD

La selección de la cámara de profundidad considera varios aspectos importantes. Además de la certificación IP para resistir condiciones climáticas adversas, se evalúa la resolución y, especialmente, el rango de profundidad con el que trabaja. En entornos agrícolas, se requiere un rango amplio de profundidad. La cámara Zed 2i cumple con todos estos requisitos necesarios.




Tabla 4.9. Tabla comparativa de cámaras de profundidad

MODELO			
	ASTRA S	ZED 2i	RealSense D457
MARCA	ORBEC	STEREO LABS	Intel
Voltaje de operación	5 V	5 V	3,3 V
Corriente de operación	0,48 A	0,38 A	0,2 A
Resolución	640 × 480	1280 x 720	1280 × 720
Ángulo de detección RGB	63.1 × 49.4 grados	110° x 120°	90° × 65°
Ángulo de detección de profundidad	58.4 × 45.5 grados	110° x 120°	90° × 65°
Frecuencia de muestreo	30 fps	60 fps	90 fps
Rango de profundidad	0.6-4m	0,2-20 m	0.6 m- 6 m
Interfaz de transferencia de datos	USB2.0 o superior	USB C	USB – C
Protección	-	IP66	IP65
Precio	\$149.99	US\$ 449	\$499.00

SENSOR LIDAR

En la selección del sensor LiDAR, factores como la certificación IP66, el precio, el rango de detección, resolución y precisión son de suma importancia. El RPLIDAR-S2 ofrece un equilibrio entre calidad y precio, lo que lo convierte en una opción óptima.




Tabla 4.10. Tabla comparativa de Sensor Lidar

			
LiDAR LS	N10	RPLIDAR-S2	C16 (3D)
MARCA	Leishen	SLAMTEC	Leishen
Voltaje de operación	5 V	5 V	10V~36VDC
Corriente de operación	0,34 A	0,45-0,6 A	-
Rango de detección	25m	30m	150 m
Frecuencia de escaneo	10Hz	8-15Hz	20Hz
Frecuencia de muestreo	4,500Hz	20,000Hz	240,000Hz
Contenido de salida	Datos angulares, distantes y de intensidad de luz	Datos angulares y distantes	Angular, Distante, Tiempo Stamp y datos de intensidad de luz
Resolución angular	0,8	0,22	1-2
Comunicación	Puerto serial	TTL UART (3.3 V)	Puerto Ethernet
Ángulo de detección	360°	360°	360°
Protección	IPX4	IP65	IP67
Precio	US\$ 101,6	US\$ 366	\$2,187.00

SENSOR INERCIAL

Para elegir el sensor inercial adecuado, es necesario que cuente con un GPS integrado para mejorar la precisión de las tareas en exteriores. Además, la certificación IP es crucial para su desempeño en el trabajo. También se considera el número de grados de libertad que ofrece. En este sentido, el LPMS-IGIP se destaca como la mejor opción.




Tabla 4.11. Tabla comparativa de Sensores Inerciales

MODELO			
	HWT905-RS232	IVS 760	LPMS-IG1P
MARCA	WitMotion	ZITN	Zenshin tecnologia
Voltaje de operación	5 V	5~36 V	5 V ~ 24 V
Corriente de operación	0,48 A	0,38 A	0,04 A
Grados de libertad	6	9	9
Rango de operación del acelerómetro	±16g	±20g	±16 g
Rango de operación del giroscopio	±2000 °/s	±300 °/s	±2000 °/s
Cuenta con GPS	No	No	Si
Precisión de muestreo	0,05 °	<0,2°	< 0. 3°
Protección	IP67		IP67
Comunicación	TTL USB RS232 RS485 CAN	Salida Digital	LPBUS/CANopen/ Sequential CAN
Precio	\$166,29	US\$ 550	US\$ 699

INDICADOR DE BATERÍA

Para elegir el indicador de batería adecuado, es importante considerar la calidad del producto y la claridad del display digital para mostrar el porcentaje de carga de la batería del vehículo. En este sentido, el VooGenzek cumple con nuestras necesidades.



Tabla 4.12. Tabla comparativa de indicadores de batería

MODELO			
	LY6N	VooGenzek	PBD-3S126
MARCA	Heltec Automation	VooGenzek	Bracsan
Voltaje admisible	12V 24V 36V 48V	12V 24V 36V 48V	11.1V – 12.6V
Peso	40g	40g	0,04 A
Dimensiones	5,75 x 2x0,75 cm	10,5 x 7,3 x 1,9 cm	9,45 x 2 x 0,8 cm
Tipo de batería de trabajo	Plomo Ácido y Litio	Plomo Ácido y Litio	Litio
Display	Digital	Digital	LED
Precio	\$4	US\$ 12	US\$ 2,99

MÓDULO DE CÁMARA

Para el módulo de cámara, capaz de procesar y realizar funciones de visión independientemente, para el algoritmo de detección de enfermedades se requiere una solución potente y compatible con el microcontrolador seleccionado. La resolución, la frecuencia de muestreo y el voltaje de operación deben ser óptimos. El módulo CAM H7 Plus destaca en estos aspectos, siendo una elección eficiente.

Tabla 4.13. Tabla comparativa de módulos de cámaras

MODELO		
	CMUCAM	Cam H7 Plus
MARCA	ORBEC	OpenMV
Voltaje de operación	6-15 V	3,7 V
Corriente de operación	0,15 A	0,38 A
Resolución	352x288	640x480
Frecuencia de muestreo	26 fps	60 fps
Interfaz de transferencia de datos	Comunicación serial	Comunicación serial
Precio	\$29.98	US\$ 80

SENSOR DE NIVEL

Para el sensado del nivel del tanque, se emplean sensores mecánicos que operan mediante mediciones de ohmiaje. La selección de estos sensores se fundamenta en el material utilizado, dado que estarán en contacto directo con productos químicos, así como en su longitud, que debe ser compatible con la altura del tanque de 5 litros.




Tabla 4.14. Tabla comparativa de sensores de nivel

MODELO			
	S5-175	ZP2508	HPT604
MARCA	Bluefin	-	HOLYKELL
Material	Acero inoxidable	Plástico	Acero inoxidable
Longitud	120~2500mm	360 mm	5000 m
Tipo de sensor	Mecánico	Mecánico	12~36vdc
Resolución	21mm	-	0,5 mm
Precio	US\$ 35	US\$ 1,33	US\$ 65

SENSOR DE TEMPERATURA

Finalmente, el sensor de temperatura STH31 destaca por su eficiencia energética y su capacidad de integración con los distintos microcontroladores presentes en el sistema.

Tabla 4.15. Tabla comparativa de sensores de nivel

MODELO			
	ATF 2	WTR 190	SHT31
MARCA	THERMASGARD	VooGenzek	Sensirion's CMOSens
Voltaje de trabajo	24 V	24 V	3.3-5V
Corriente de trabajo	-	-	1.5mA
Rango de medición	-50-+90 °C	-50 - +130 °C	- 40 - +125 °C
Protección	IP65	IP 69	-
Precio	\$40	US\$ 12	US\$ 22,99

4.2.1 Cálculos de potencia

Para la fuente de energía, se optará por baterías de litio 18650, recargables y capaces de formar un banco. Cada una proporciona un voltaje de 3.7 V y una capacidad de 6800 mAh. Se dispondrá de

dos bancos de baterías, uno para los sensores y actuadores, y otro para la etapa de control. En la Tabla 4.16, se observa que se necesitará un banco de 22.2, lo que implica 6 baterías en serie, y una capacidad total de 47.60 Ah, equivalentes a 7 filas en paralelo.

Tabla 4.16. Cálculo de potencia para sensores y actuadores

Dispositivo	Corriente (A)	Voltaje (V)	Horas (h)	Unidad	Amperios-hora (Ah)	Potencia (W)
Motor DC	1,25	24	8	4	40	120
Bomba de agua pequeña	0,35	6	4	1	1,4	2,1
Válvula solenoide	0,17	12	4	1	0,67	2
Ventilador axial	1	12	4	1	4	12
Consumo total					46,07	136,1

Para la etapa de control, dispondremos de un banco de baterías con una tensión de 22.2 V y una capacidad de 34.2 Ah, lo que representa un conjunto de 6 filas en paralelo, se observan los cálculos de potencia en la Tabla 4.17.

Tabla 4.17. Cálculos de potencia para el sistema de control

Dispositivo	Corriente (A)	Voltaje (V)	Horas (h)	Unidad	Amperios-hora (Ah)	Potencia (W)
Jetson AGX Orin	3	20	10	1	30	60
Teensy 4.1	0,1	5	10	1	1	0,5
Consumo total					31	60,5

Para proteger los bancos de batería y los componentes electrónicos que no cuentan con certificación IP, se utilizan cajas de la marca Polycase, las cuales ofrecen una amplia variedad de opciones con certificación IP67, tanto en dimensiones estándar como personalizadas según las especificaciones del cliente. En la Figura 4.10 se muestra la disposición de los componentes electrónicos, donde los bancos de batería se encuentran dentro del vehículo, y la unidad de control primaria y secundaria están ubicadas en una caja en el exterior. Asimismo, se describe la carcasa del vehículo, la cual está fabricada con planchas de aluminio de 2 mm de espesor. Estas planchas se encuentran atornilladas a la estructura utilizando tornillos M5 x 8 y las tuercas T correspondientes para los perfiles V-SLOT.

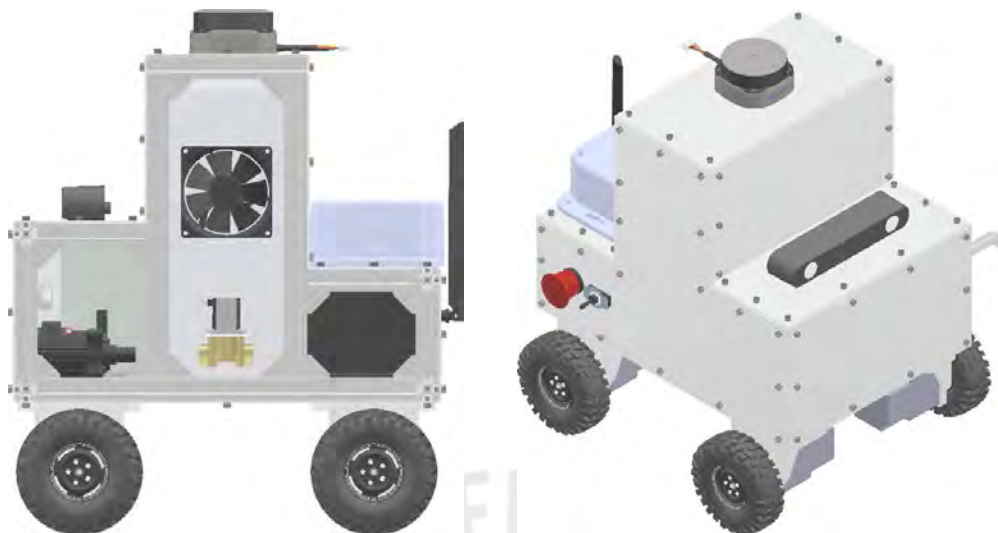


Figura 4.10 Distribución de componentes en el vehículo

Para concluir con el diseño electrónico y mecánico, en la Tabla 33 se detalla el peso total del vehículo según los componentes mecánicos, electrónicos y la estructura. Esta distribución de peso garantiza que el vehículo cumple con el requisito de tener un peso inferior a 25 kg, el cuál es de 21,32 kg.

Tabla 4.18. Peso total del vehículo

Componente	Peso (Kg)
Tanque de almacenamiento	5
Motores	4
Estructura	2,42
Bancos de baterías	2,5
Componentes electrónicos (Aproximado)	2
Planchas de aluminio x m2	5,4
Peso total	21,32

4.2.2 Diagrama de conexiones

La organización de los componentes electrónicos marca la etapa final del diseño del sistema. Para esta sección, se utilizan diagramas que facilitan la comprensión de la conectividad entre dispositivos. Las conexiones de los componentes, conforme a su protocolo de comunicación y sus

líneas de alimentación, se presentan en el diagrama de conexiones de la Figura 4.11. Para los sensores la alimentación viene de parte del microcontrolador y del microprocesador mediante conexión USB.

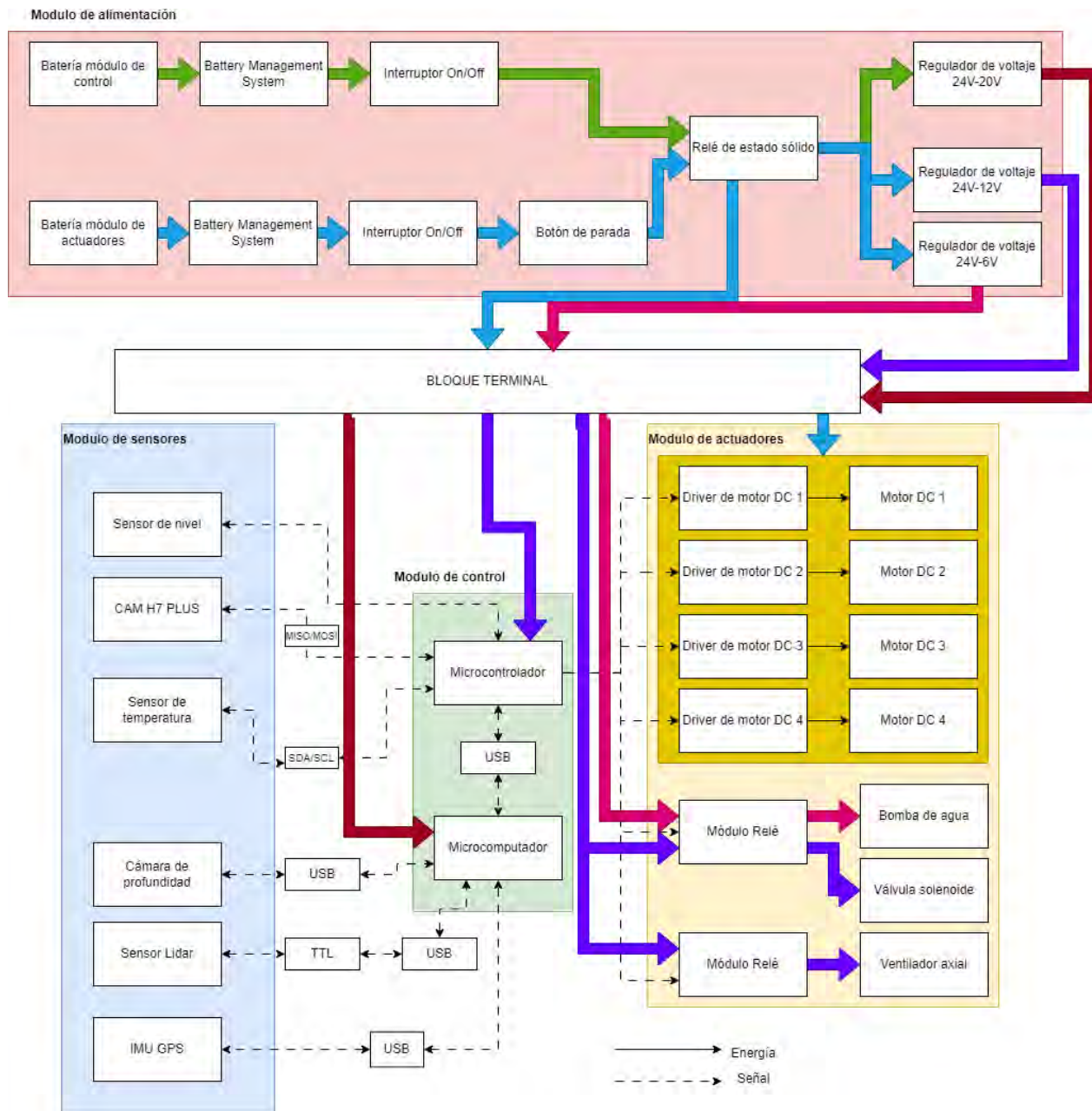


Figura 4.11 Diagrama de conexiones

4.2.3 Diagrama esquemático

En la Figura 4.1 se muestra el plano electrónico del sistema, que incluye la etapa de control y los actuadores que se adaptarán a un PCB. Los componentes como la cámara de profundidad, IMU, sensor Lidar, Arduino Mega y CAM H7 Plus se conectan a la computadora Jetson Xavier a través de USB. Para alimentar la computadora, se utilizará un regulador de voltaje de 24V a 20V. Para el microcontrolador, se dispone de un regulador de voltaje de 24V a 12V, que también alimentará la bomba de agua. El regulador de voltaje para la válvula y el ventilador axial es de 24V a 12V. Para el accionamiento de los actuadores como el ventilador y el sistema de aspersión del pesticida se utilizan tres módulos relé de 5V. Los motores cuentan con su propio driver del fabricante, que se activará mediante los puertos digitales del microcontrolador, para cada driver se tienen 12 pines correspondientes para la conexión mediante el cable del fabricante. El driver recibe señales PWM desde el microcontrolador para la variación de la velocidad. Cada motor tendrá su dirección de giro independiente para permitir un movimiento omnidireccional. Según la Figura 4.12, cuando se requiere un desplazamiento de 45° , suelen estar activados dos motores, dependiendo de la dirección. Por este motivo, las conexiones de activación y de regulación de velocidad se conectan en pares para una mejor organización y evitar el uso desmedido de puertos en el microcontrolador.

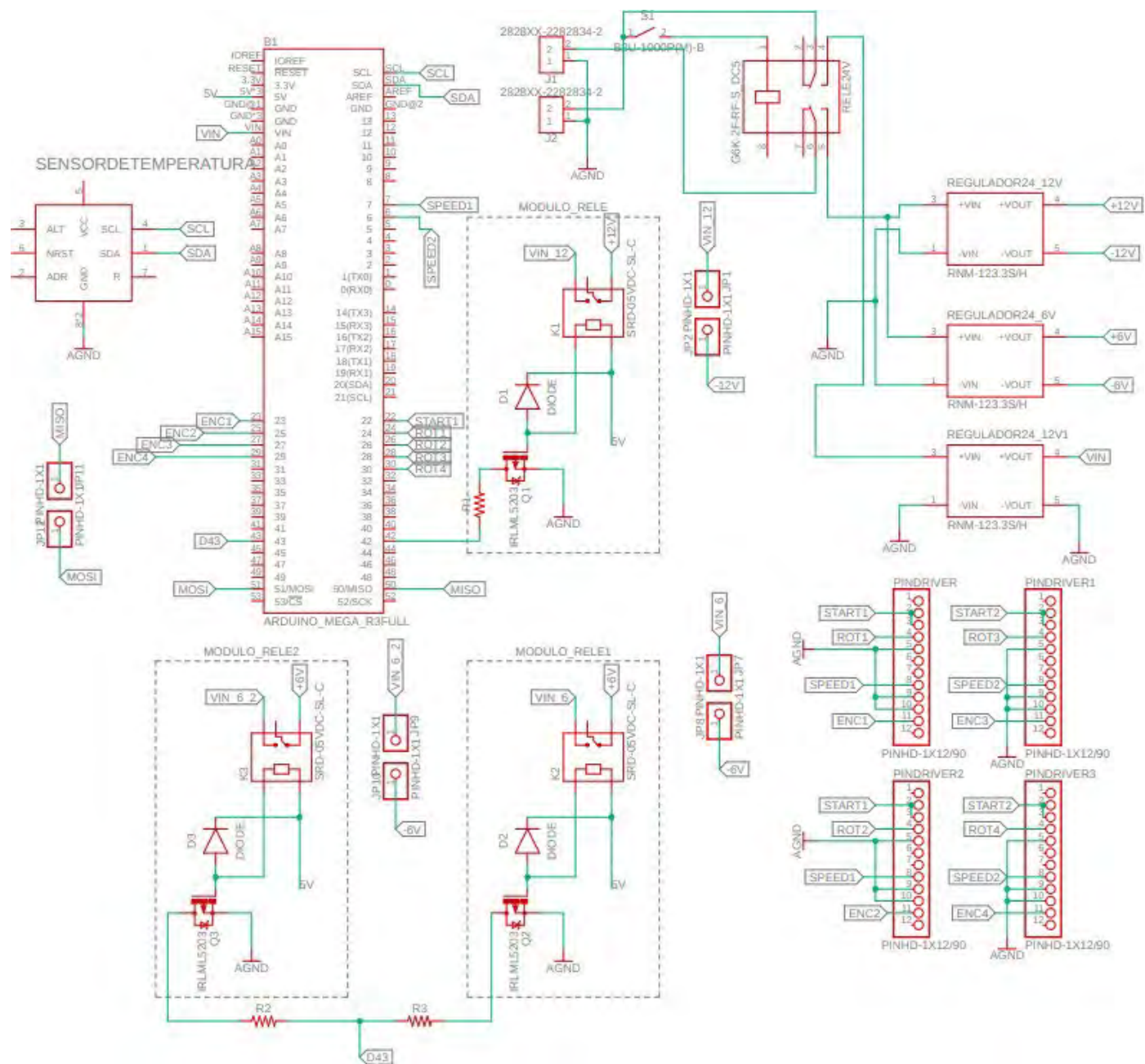


Figura 4.12. Diagrama esquemático

Fuente: Elaboración propia

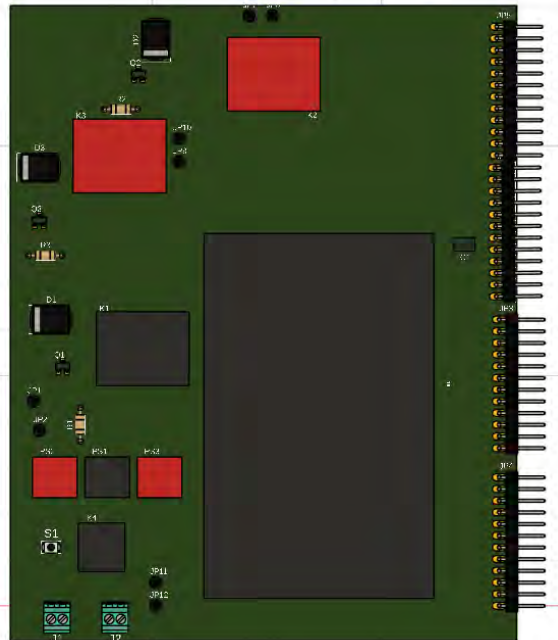


Figura 4.13. Tarjeta electrónica PCB
Fuente: Elaboración propia

4.3 Diseño de control

La etapa de control explica el funcionamiento y la lógica del sistema, desde la inicialización de parámetros hasta los modos de detección y aplicación de pesticidas. Se elaboran los diagramas de flujo correspondientes para cada etapa y subsistema del vehículo.

4.3.1 Diseño de la interfaz del sistema

La interfaz propuesta en la Figura 4.14 brinda al usuario la posibilidad de inicializar parámetros como la velocidad, la elección del cultivo y el modo de operación. Para la selección del cultivo, se ofrece una variedad que se encuentra dentro del rango admisible en el que el vehículo puede desplazarse, lo que implica una distancia entre hileras mayor a 40 cm. En la Tabla 34 se muestran los diferentes tipos disponibles en la interfaz.



Figura 4.14. Interfaz de inicio
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.19. Cultivos disponibles en la interfaz
Fuente: [25]

<i>Cultivo del huerto</i>	<i>Distancia entre hileras (cm)</i>	<i>Distancia entre plantas (cm)</i>
Acelga	40-50	30-40
Apio	50	20-30
Berenjena	80-100	50-60
Brócoli	60-70	60-70
Calabacín	100	50-70
Calabaza	100	150-200
Col repollo	60	40-50
Coliflor	70	70
Endibia	30-40	20
Fresas	40	30
Habas	30-40	30
Judías verdes	50-70	30-40

Lechuga	30-40	20-30
Melón	150	100
Patatas	50	30-40
Pepino	100	50-60
Pimiento	70	40-50
Sandía	150	100
Tomate	60-100	50

Además, en la Figura 4.15 se incluye una opción de personalización para adaptarse a las necesidades específicas de cada campo agrícola. Esta función permite a los usuarios ingresar los valores de distancia entre plantas y entre hileras, de manera que no se vean limitados por los valores predeterminados. Para el monitoreo de la energía y el suministro de pesticidas, la interfaz cuenta con indicadores que muestran el porcentaje de batería y la cantidad de pesticida disponible en el tanque.

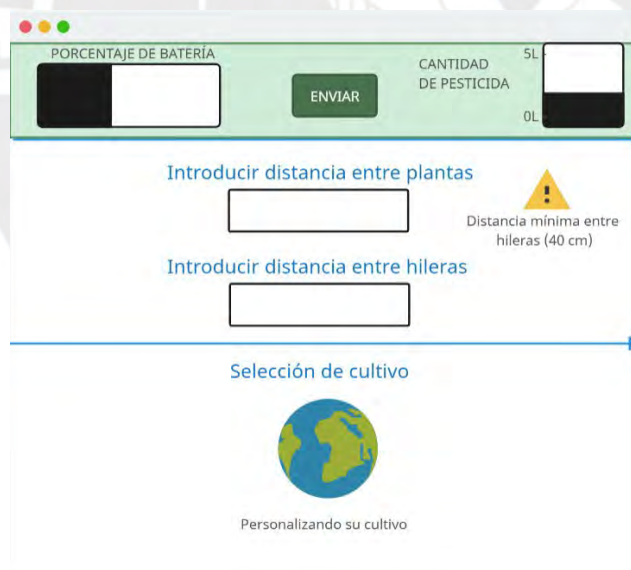


Figura 4.15. Interfaz de personalización
Fuente: Elaboración propia

4.3.2 Diagramas de flujo

Inicialización de variables

Las variables ingresadas de velocidad y distancias son inicializadas por el usuario, asimismo se establece velocidad máxima para que los motores no sufran daños y también la distancia mínima entre hileras para que el vehículo pueda operar en óptima condiciones. Con la introducción de los parámetros de inicio y la selección de cultivos lista, se selecciona el modo de operación para poder enviar todos los datos correspondientes a las unidades de control y así poder iniciar el trayecto. En la Figura 4.16 se detalla el diagrama de flujo de esta etapa.



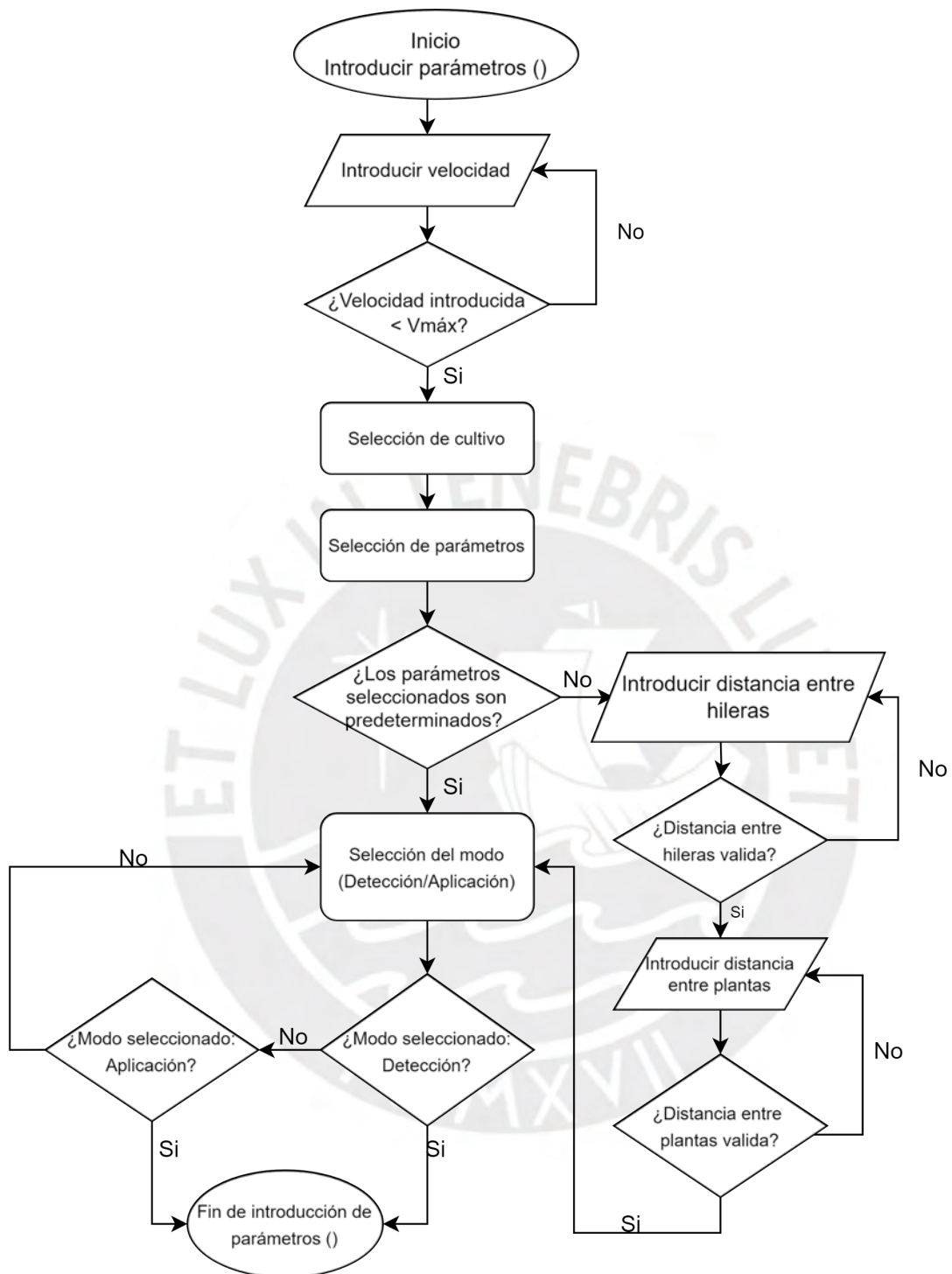


Figura 4.16 Diagrama de flujo de inicialización de parámetros

Algoritmo de detección

El algoritmo de desplazamiento autónomo del vehículo en campos agrícolas comienza con la inicialización de los sensores: Cámara de Profundidad, Encoder, IMU, LIDAR y GPS. Una vez inicializados, se obtienen los datos de todos estos sensores. La Cámara de Profundidad identifica obstáculos y segmenta la imagen en cielo, tierra y cultivos, mientras que el sensor LIDAR mide constantemente la distancia de las hileras. Cuando el umbral de distancia deja de registrar las hileras a los costados, se manda el comando de girar 180° para avanzar a la siguiente hilera.

La IMU proporciona datos de orientación, mientras que el GPS, junto con el LIDAR, ofrece información precisa de posicionamiento. Los encoders en los motores registran el giro para monitorizar la trayectoria del vehículo. Se observa en la Figura 4.17 que con toda esta información recopilada, se calcula la trayectoria óptima para el desplazamiento del vehículo. Luego, se envían los comandos necesarios a los motores para controlar su velocidad y dirección, garantizando así un desplazamiento fluido y seguro.

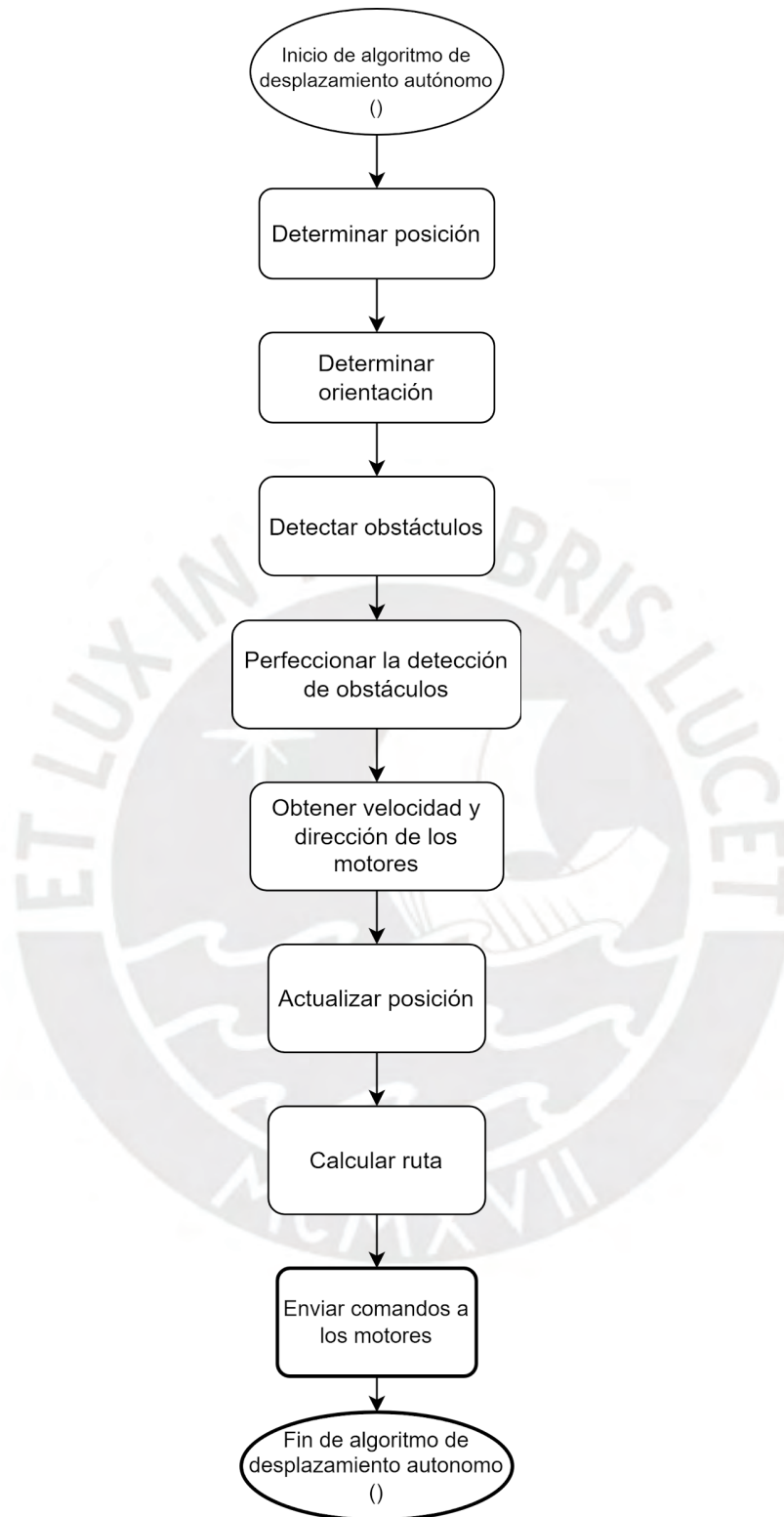


Figura 4.17. Diagrama de flujo del algoritmo de detección

Desplazamiento autónomo

En esta etapa crucial del proceso, el algoritmo de desplazamiento del vehículo agrícola autónomo se encarga de recopilar datos simultáneamente de varios sensores esenciales. El vehículo se desplaza según las instrucciones recibidas del algoritmo. La Figura 4.18 muestra el diagrama de flujo de esta función, destacando cómo se gestionan los comandos de velocidad, giro y activación hacia los controladores de los motores una vez que se completa la detección del entorno.

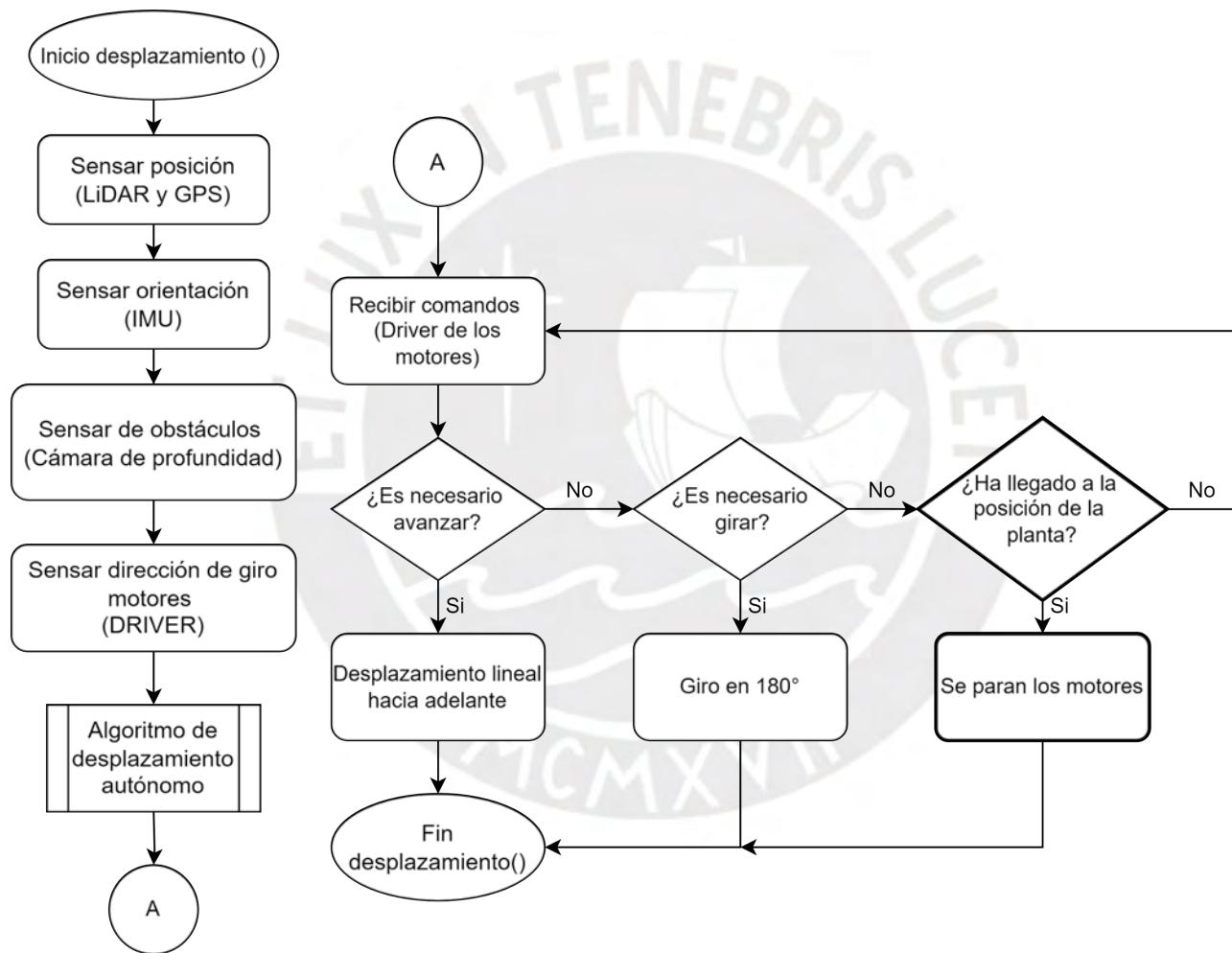


Figura 4.18. Diagrama de flujo de desplazamiento autónomo

Modos de operación

Los modos de operación disponibles para el robot incluyen la Detección de Enfermedades y la Aplicación de Pesticidas. La Figura 4.19 ilustra a través de dos diagramas de flujo cómo estos

procesos pueden diagnosticar enfermedades y determinar la cantidad de pesticida necesaria para las plantas utilizando algoritmos de visión artificial. En el caso de la detección, se envía información sobre el tipo de enfermedad que afecta al cultivo y el herbicida recomendado para combatir la plaga. En cuanto a la aplicación, se realiza mediante el uso de la bomba y la válvula, que rocían el líquido sobre la planta de acuerdo con los cálculos previos del algoritmo. Todo esto implica que primero, el módulo de cámara procesa y envía información a través de los puertos SPI al microcontrolador para la toma de decisiones y la activación de los actuadores.

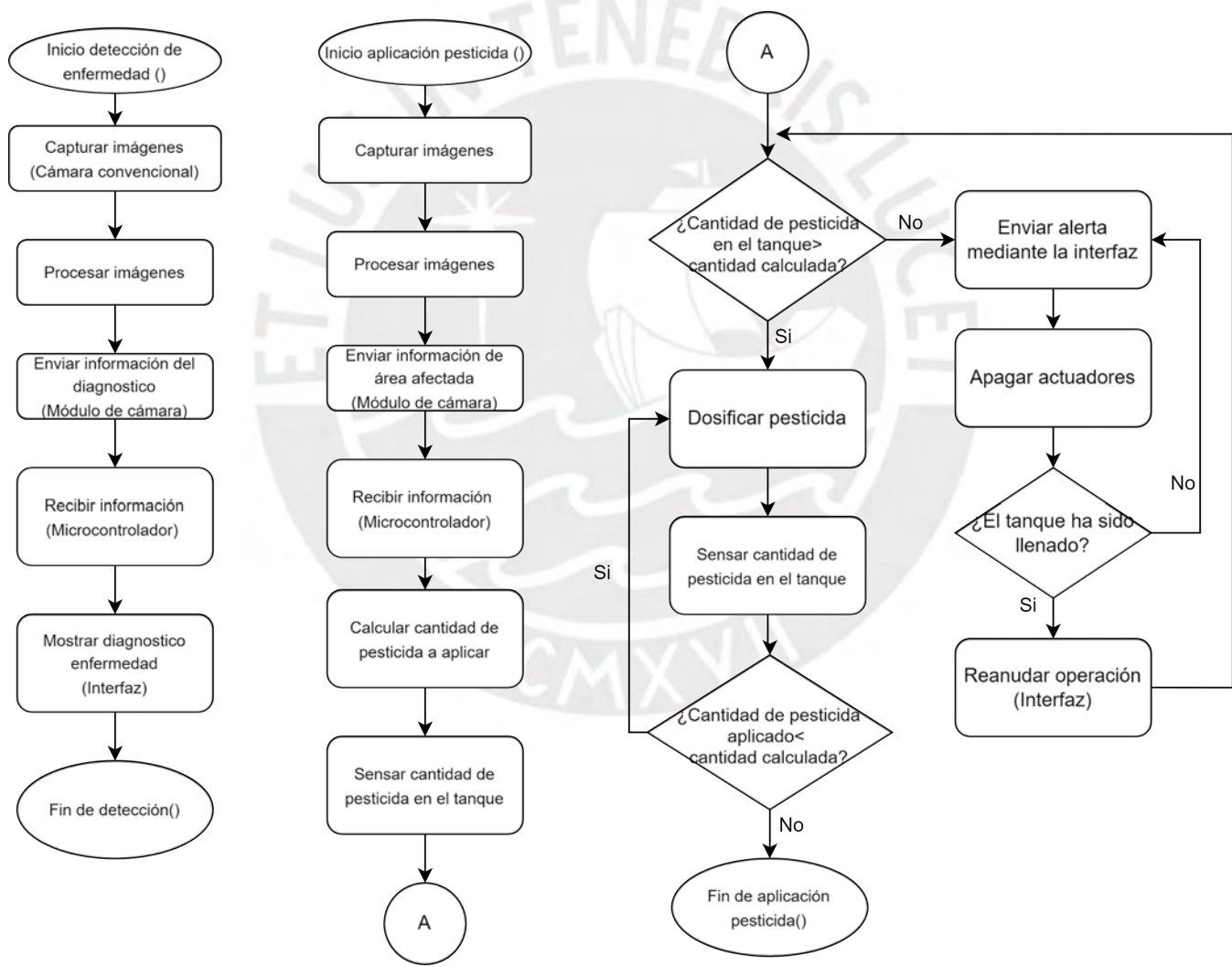


Figura 4.19 Diagrama de flujo de modos de operación

Lógica general del sistema

En la Figura 4.20 se observa el diagrama de flujo que representa la lógica general de todo el sistema. Este diagrama abarca diversas funciones, como la inicialización, el desplazamiento y los modos de operación. En este contexto, la posición del vehículo es crucial, ya que será responsable de detectar o aplicar el pesticida cuando esté en estado de reposo. Por lo tanto, el vehículo estará en constante movimiento hasta llegar a la posición de cada planta. Al finalizar todo el recorrido se procede a apagar el sistema en su totalidad.



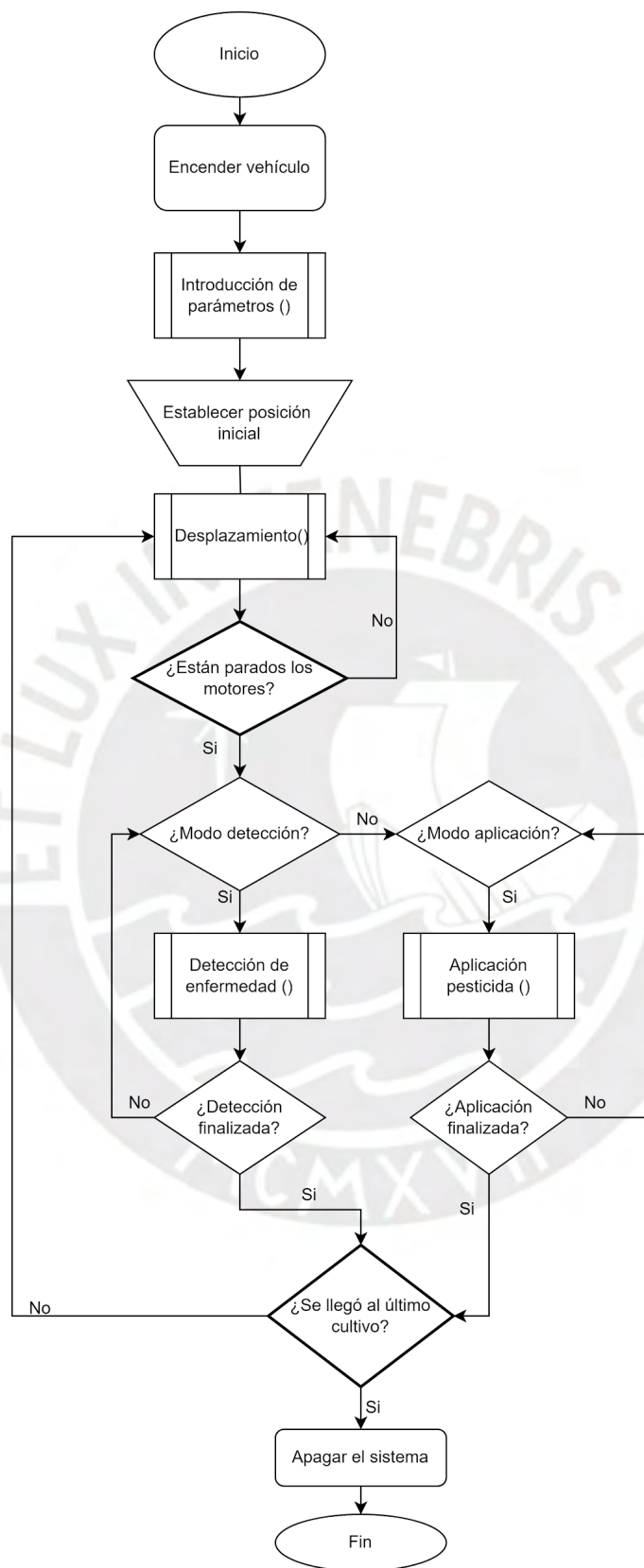


Figura 4.20. Diagrama de flujo general

CAPÍTULO 5: SIMULACIONES Y PRUEBAS DE CONCEPTO

En este capítulo se desarrollan simulaciones para evaluar el diseño mecánico y un modelo para identificar el tipo de enfermedad y el área afectada de la planta.

5.1 Simulaciones

El objetivo principal de las simulaciones es verificar si el diseño puede soportar las cargas máximas a las que el vehículo podría estar expuesto. En la Figura 5.1 se muestra la placa inferior de acero con un espesor de 4 mm, la cual soportará todos los componentes del vehículo. Para determinar el material adecuado para esta placa, se realizaron pruebas con acero inoxidable y aluminio, evaluando diferentes espesores. La simulación indica un desplazamiento máximo de 0.003976 mm, un valor muy bajo que asegura que la placa de acero inoxidable puede soportar los pesos máximos de los componentes. Sin embargo, este material es pesado y costoso en comparación con el aluminio.



Figura 5.1 Desplazamiento placa inferior Acero inoxidable 4mm.

Se optó por realizar pruebas con aluminio, considerando que su resistencia no es equivalente a la del acero. En la Figura 5.2 se muestra la adición de un perfil V Slot en la parte inferior de la estructura para minimizar deformaciones y desplazamientos.

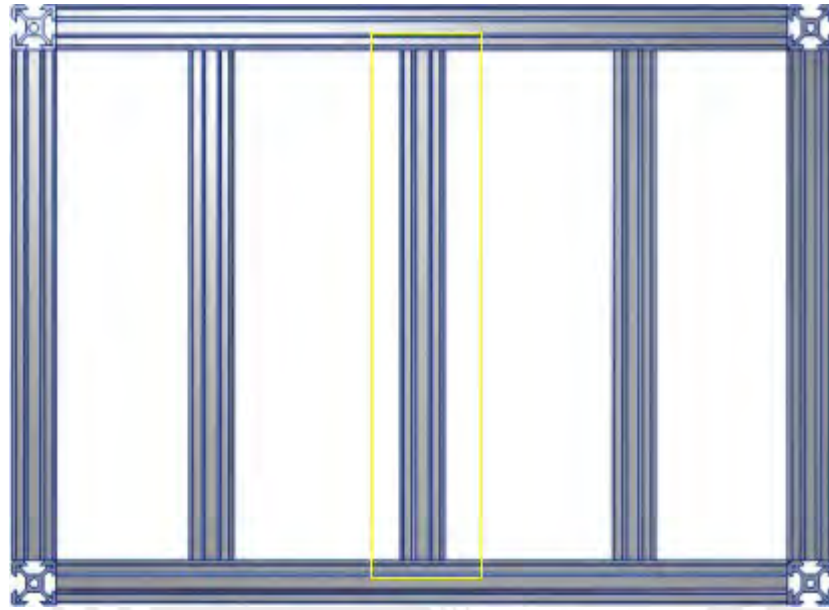


Figura 5.2 Estructura vehículo vista inferior

Con este perfil adicional, los desplazamientos en la placa disminuyen, permitiendo reducir el espesor a 2 mm sin comprometer la integridad estructural. La Figura 5.3 muestra un desplazamiento máximo de 0.00625 mm, indicando que la placa de aluminio de 2 mm es adecuada para soportar la carga.

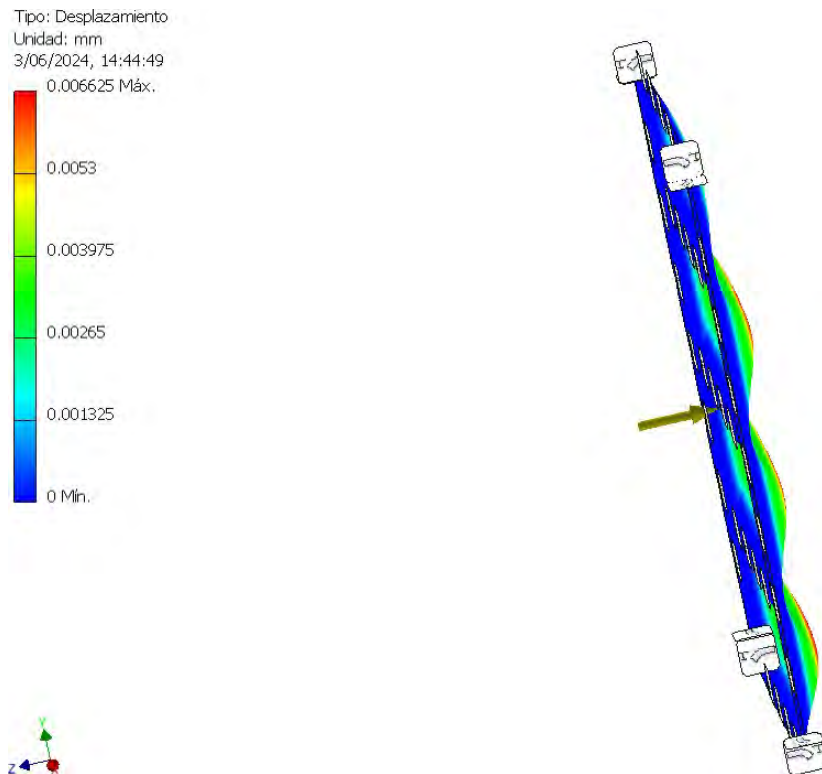


Figura 5.3 Desplazamiento placa inferior Aluminio 2mm

En la Figura 5.4 se observa que los agujeros para los tornillos presentan una tensión de von Mises de 5.482 MPa, inferior a la tensión de fluencia del aluminio (σ fluencia = 275 MPa), lo que indica que el material no fallará bajo esta carga.

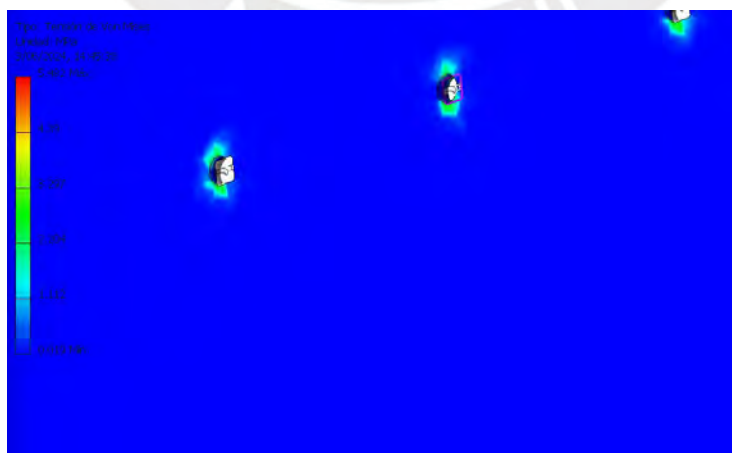


Figura 5.4 Tensión de Von Mises en los agujeros de la placa

La Figura 5.5 muestra un coeficiente de seguridad de 15, lo que significa que el diseño es seguro para esta carga, el diseño soportaría cargas significativamente mayores sin fallar.

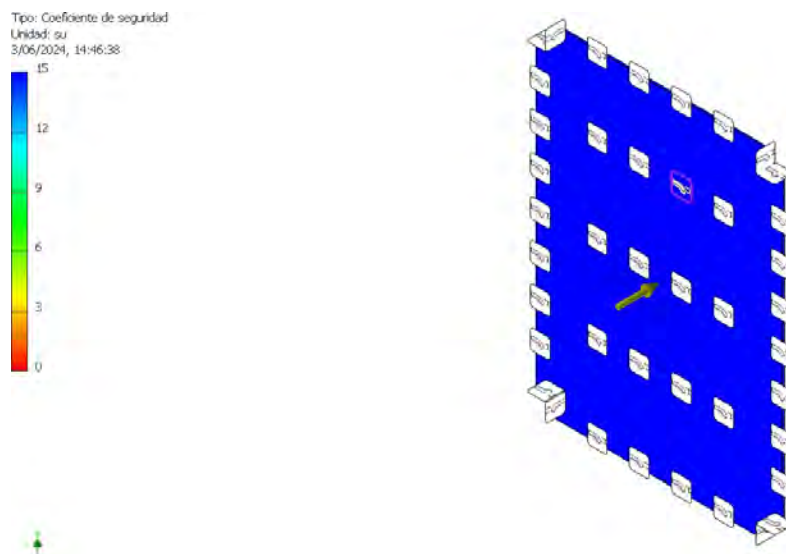


Figura 5.5 Coeficiente de seguridad placa

La estructura del vehículo es crucial para soportar el peso de todos los componentes. La Figura 5.6 muestra el desplazamiento generado en la estructura debido a esta carga, con un desplazamiento máximo de 7.19×10^{-5} mm, indicando que la estructura es segura para el desplazamiento del vehículo.

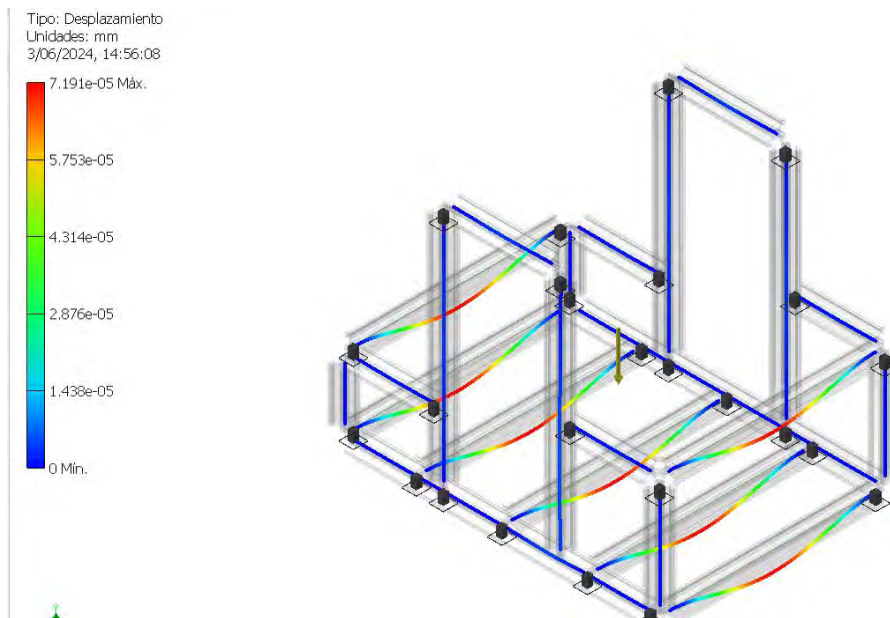


Figura 5.6 Desplazamiento estructura vehículo

Otro componente importante es el soporte de montaje del motor de las ruedas, que soporta las cargas de la estructura, placas y componentes. Al tener cuatro motores, las cargas se distribuyen uniformemente. En la Figura 5.7 se observa que el centro de gravedad del vehículo se encuentra aproximadamente en el medio, facilitando la distribución uniforme de las cargas.

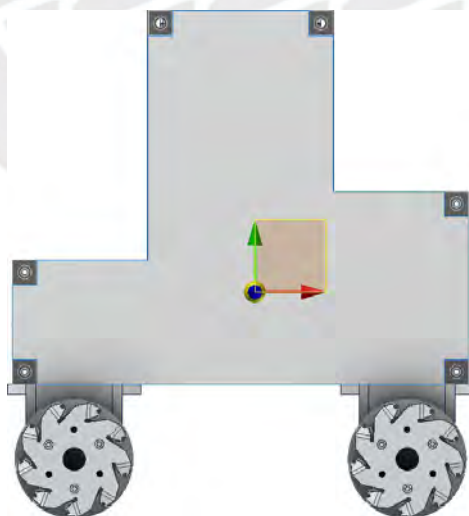


Figura 5.7 Centro de gravedad del vehículo.

Las simulaciones correspondientes muestran un desplazamiento máximo de 5.58×10^{-4} mm en el soporte del motor en la Figura 5.8, indicando una deformación mínima. La Figura 5.9 revela una tensión de von Mises de 0.7181 MPa, demostrando que el soporte no fallará. La Figura 5.10 confirma la seguridad del soporte con un coeficiente de seguridad adecuado.

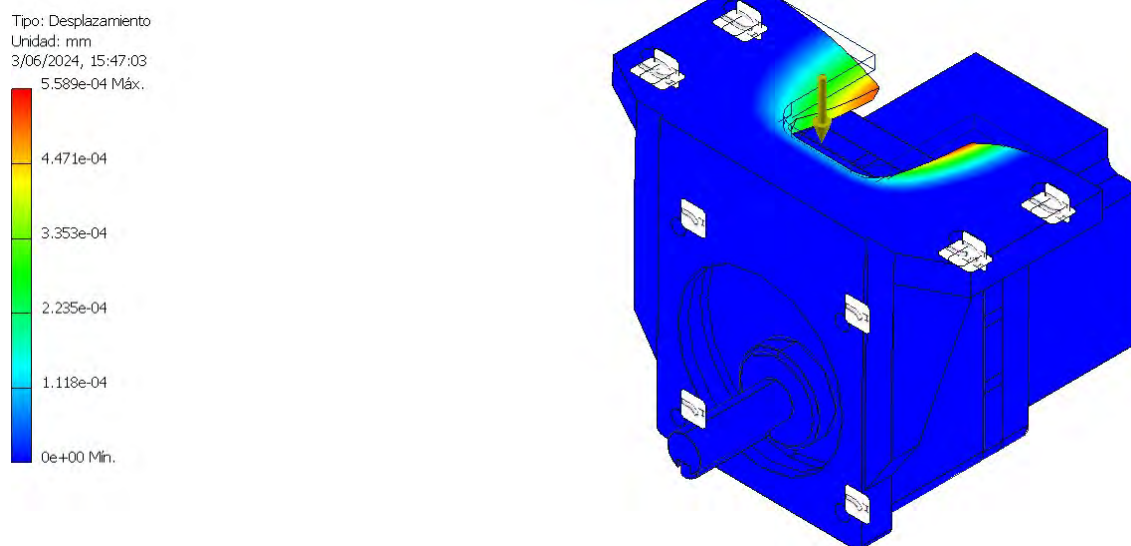


Figura 5.9 Desplazamiento soporte motor

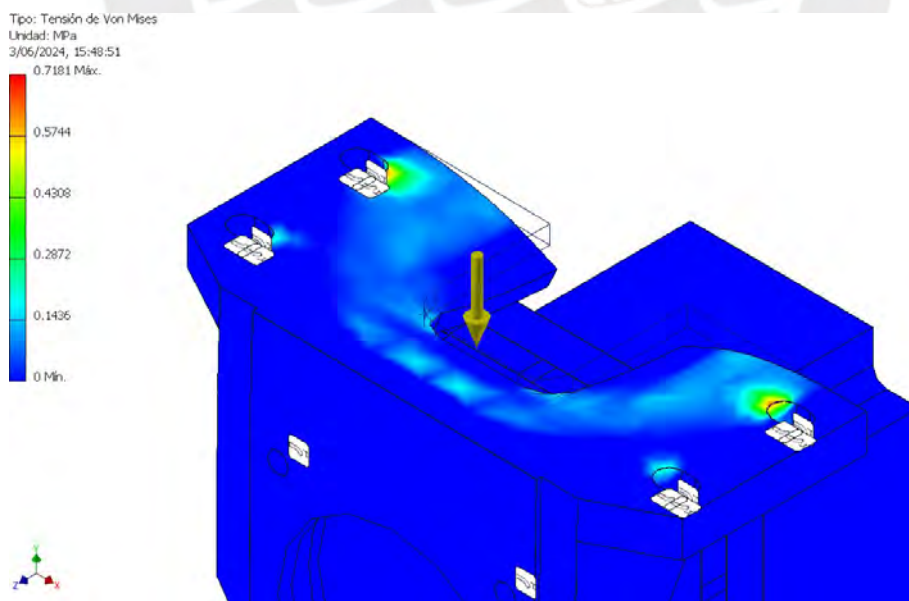


Figura 5.10 Tensi3n Von Mises soporte motor

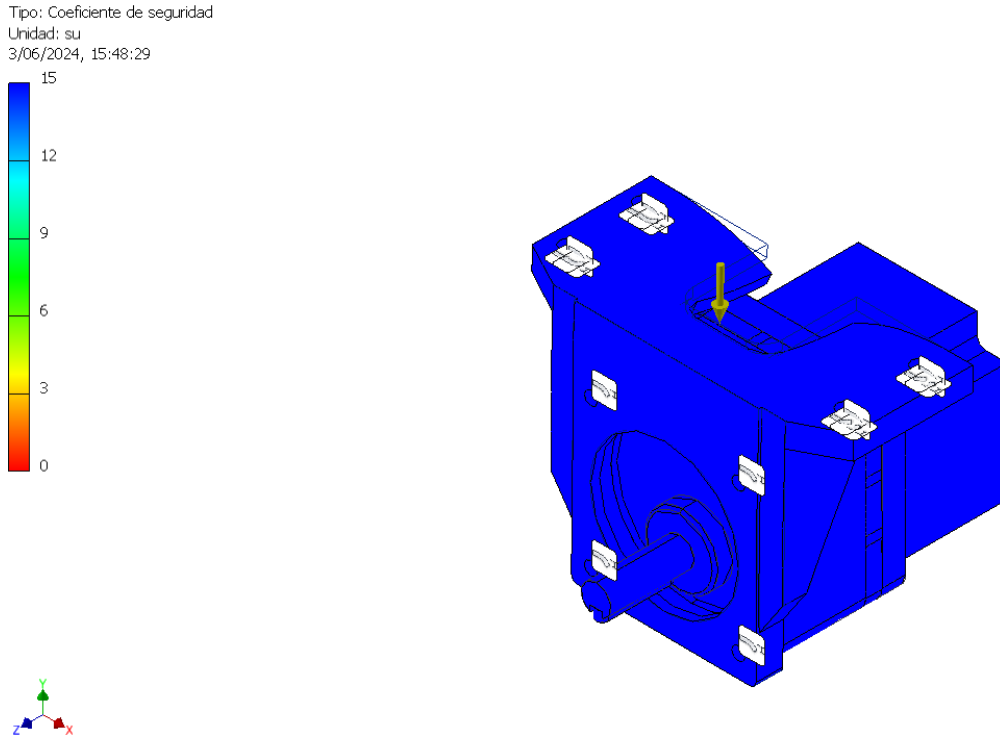


Figura 5.11 Coeficiente de seguridad soporte motor

5.2 Base de datos

El sistema se fundamenta en una base de datos robusta que comprende cinco carpetas organizadas, cada una conteniendo más de veinte imágenes representativas de diferentes tipos de enfermedades y hojas sanas. Esta colección diversa y extensa de imágenes proporciona al algoritmo de aprendizaje automático un conjunto de datos variado para el entrenamiento y la validación de su capacidad predictiva.

Para el entrenamiento del modelo y la evaluación de su precisión, se emplean cuatro tablas estratégicamente diseñadas. Una de estas tablas almacena los etiquetados o labels correspondientes a cada imagen, indicando si la hoja es saludable o afectada por una enfermedad específica. Otra tabla contiene características detalladas extraídas de cada imagen, tales como contraste, correlación, energía, homogeneidad, media y varianza, métricas que permiten diferenciar hojas sanas de aquellas afectadas. Por ejemplo, el contraste ayuda a identificar manchas, la correlación revela patrones

repetitivos, la energía refleja uniformidad en la textura y la homogeneidad mide la similitud entre píxeles. Esta estructura de datos asegura que el sistema esté bien fundamentado en información relevante y precisa para realizar diagnósticos confiables y eficaces sobre la salud de las hojas de las plantas

5.3 Código

El código desarrollado en MATLAB presenta una interfaz gráfica de usuario (GUI) diseñada para detectar y clasificar enfermedades en hojas de plantas. Al iniciar la aplicación, se abre una ventana interactiva que facilita la carga de imágenes de hojas de plantas mediante el botón "Carga de imagen", permitiendo al usuario seleccionar archivos en formatos como BMP, JPG o GIF.

Una vez cargada la imagen, el usuario puede mejorar su contraste al presionar el botón "Sube Contraste", lo cual facilita la visualización de detalles. Posteriormente, al hacer clic en "Segment ROI", se realiza la segmentación de la región de interés (ROI) basada en los colores presentes en la imagen. Esto se logra utilizando el algoritmo de clustering K-Means en el espacio de color $L^*a^*b^*$, dividiendo la imagen en hasta tres clusters diferentes.

Los resultados de la segmentación se muestran en una tercera área gráfica junto con estadísticas detalladas como contraste, correlación, energía, homogeneidad y otras características extraídas de la región de interés. Además, la interfaz proporciona información sobre la clasificación de la hoja como saludable o afectada por alguna de las enfermedades identificadas, como *Alternaria Alternata*, Anthracnose, Bacterial Blight o *Cercospora Leaf Spot*, según el modelo de aprendizaje automático previamente entrenado.

5.4 Interfaz

Se muestra cómo la interfaz carga una imagen desde la base de datos y aplica un aumento de contraste para segmentar la imagen y destacar la parte afectada, como se muestra en la Figura 5.12.

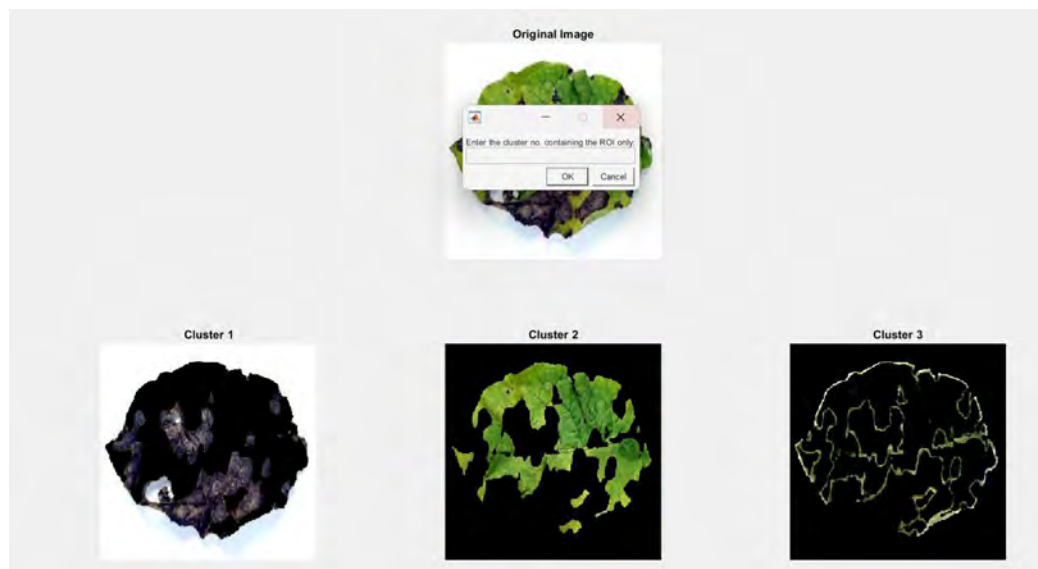


Figura 5.12 Selección y segmentación de la imagen

Después de seleccionar el cluster que muestra con mayor detalle la región afectada, la interfaz extrae diversas características de la imagen, como media, correlación y contraste, junto con métricas adicionales como energía y homogeneidad. Estas características son fundamentales para que el algoritmo determine el tipo de enfermedad presente en la planta, basándose en el conjunto de datos de entrenamiento. Al hacer clic en el botón de diagnóstico de enfermedad, el usuario obtiene el diagnóstico del algoritmo junto con el porcentaje del área afectada, información crucial para la toma de decisiones. Al presionar el botón de precisión, la interfaz realiza hasta 500 iteraciones para evaluar la máxima precisión utilizando los datos de validación disponibles, como se muestra en la Figura 5.13.

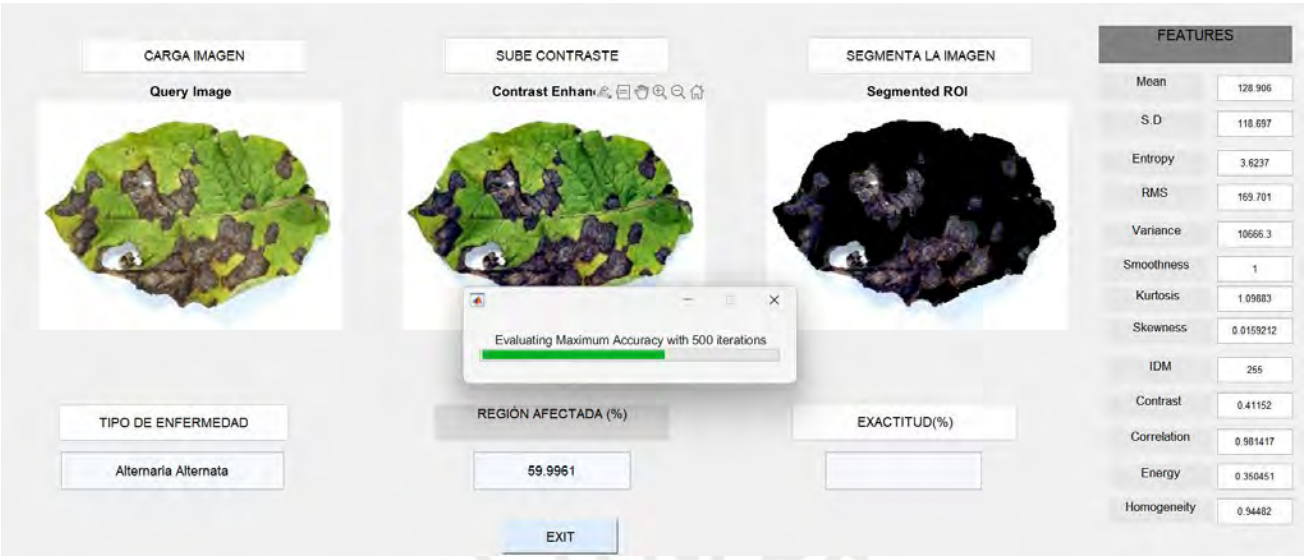


Figura 5.13 Interfaz evaluando exactitud

Finalmente, la Figura 5.14 presenta el resultado final generado por la interfaz, que incluye el tipo de enfermedad detectada, la región afectada y la precisión del modelo. Estos resultados se procesan y envían a la unidad de control secundaria, que activa los actuadores necesarios según el modo de operación del vehículo.

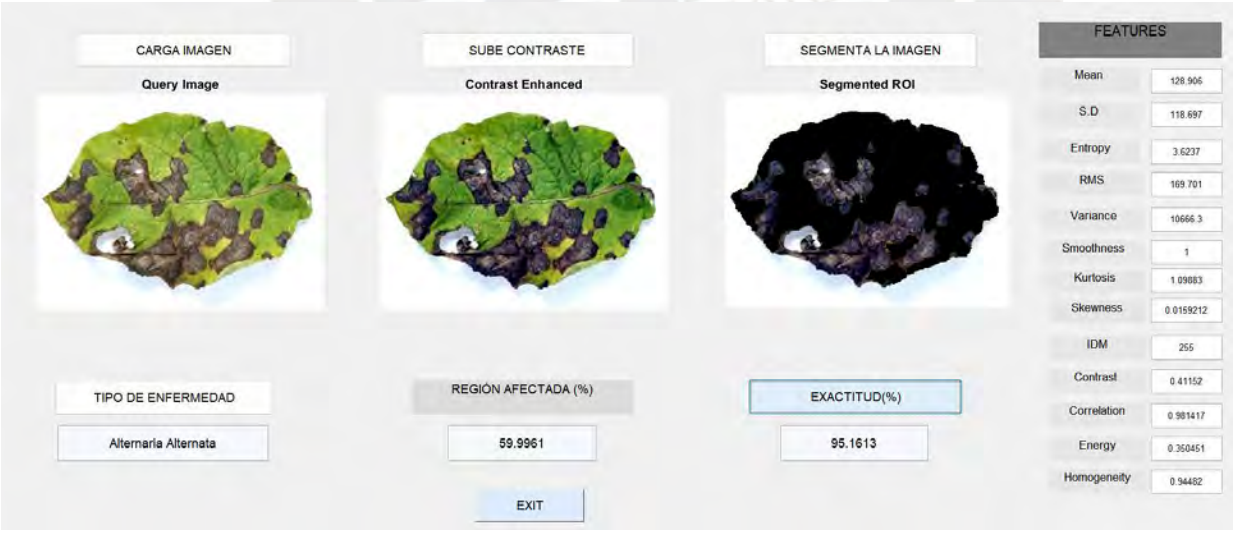


Figura 5.14 Resultado final interfaz

CAPÍTULO 6: PLANOS Y COSTOS

En este capítulo se presentan las tablas correspondientes de los planos mecánicos y los costos del trabajo de investigación.

6.1 Planos mecánicos

En la Tabla 35 se especifican los planos de los elementos mecánicos. La organización en la tabla se realiza según el subsistema al que pertenece el plano de despiece o ensamblaje. Es importante señalar que los planos mecánicos de cada despiece y ensamblaje se encuentran en el Anexo D.

Tabla 5.1. Listado de planos mecánicos

TIPO DE PLANO	TAMAÑO	Nombre del plano	Código
Despiece	A3	V-SLOT 20 x 20 - 260	VG-D01
Despiece	A3	V-SLOT 20 x 20 - 60	VG-D02
Despiece	A3	V-SLOT 20 x 20 - 230	VG-D03
Despiece	A3	V-SLOT 20 x 20 - 330	VG-D04
Despiece	A3	V-SLOT 20 x 20 - 115	VG-D05
Despiece	A3	V-SLOT 20 x 20 - 140	VG-D06
Despiece	A3	V-SLOT 20 x 20 - 95	VG-D07
Despiece	A3	V-SLOT 20 x 20 - 270	VG-D08
Despiece	A3	Placa estructura lateral 1	VG-D09
Despiece	A3	Placa estructura lateral 2	VG-D10
Despiece	A3	Placa estructura base	VG-D11
Despiece	A3	Placa estructura frontal	VG-D12
Despiece	A3	Placa estructura trasera	VG-D13
Despiece	A3	Placa estructura tapa tanque	VG-D14
Despiece	A3	Placa estructura tapa baterías	VG-D15
Despiece	A3	Placa estructura cara frontal	VG-D16
Despiece	A3	Placa estructura cara trasera	VG-D17
Ensamble	A0	Estructura	VG-E01
Ensamble	A0	Vehículo autónomo agrícola	VG-E02

6.2 Análisis de costos

Este capítulo expone los costos asociados con la ejecución del proyecto de tesis. Se clasifican en cuatro categorías: los correspondientes a los componentes mecánicos, componentes electrónicos, y los relacionados con el diseño y la fabricación. Los montos se presentan en soles y dólares, utilizando la tasa de cambio actual de dólares (1 USD = 3.7 PEN).

6.2.1 Costos de los componentes mecánicos

Los componentes mecánicos se clasifican en materias primas para la fabricación de piezas mecánicas y piezas mecánicas ya fabricadas. La Tabla 36 presenta el costo de las materias primas, mientras que la Tabla 37 detalla el costo de las piezas mecánicas.

Tabla 5.2. Costos de materia prima

Materia Prima	Material	Dólares	Soles	Unidad	Total
Plancha 1mx1mx2mm	Aluminio 6061-T6	\$124,00	S/.458,80	1	S/.458,80
Rollo filamento	PLA	-	S/.55,00	1	S/.55,00
Costo total					S/.513,80

Tabla 5.3. Costos de componentes mecánicos

Componentes mecánicos	Norma/Código	Dólares	Soles	Unidad	Total
Tornillos	M5		S/.0,21	180	S/.37,80
Tornillos	M3		S/.0,40	20	S/.8,00
Tuerca T	M5		S/.0,40	180	S/.72,00
Perfiles estructurales	V-Slot 20x20	-	-	23	S/.178,88
Perfiles 90°	-	\$0,89	S/.3,30	44	S/.145,20
Caja protección IP Control		\$26,31	S/.97,35	1	S/.97,35
Caja protección IP batería 1		\$41,17	S/.152,33	1	S/.152,33
Caja protección IP batería 2		\$31,80	S/.117,66	1	S/.117,66
Ruedas		\$25,23	S/.93,33	4	S/.373,33
Costo total					S/.1.182,55

6.2.2 Costos de los componentes electrónicos

Los componentes electrónicos incluyen actuadores, sensores y dispositivos electrónicos necesarios para realizar las tareas agrícolas. La mayoría de estos componentes se obtienen del mercado

internacional, por lo que se añade un 30% al precio de importación para cubrir los costos de desaduanaje e IGV. En la Tabla 38 se detallan los costos de estos componentes electrónicos.

Tabla 5.4. Costos de componentes mecánicos

Componentes electrónicos	Dólares	Soles	Unidad	Total
Motor Dc	\$474,00	S/.1.753,80	4	S/.7.015,20
Bomba	\$18,99	S/.70,26	1	S/.70,26
Lanza pulverizadora	\$8,00	S/.29,60	1	S/.29,60
Valvula solenoide	\$10,19	S/.37,70	1	S/.37,70
Ventilador axial	\$9,28	S/.34,34	1	S/.34,34
Jetson Xavier Nx	\$857,42	S/.3.172,45	1	S/.3.172,45
Arduino Mega	\$52,83	S/.185,00	1	S/.185,00
Cámara de profundidad	\$449,00	S/.1.661,30	1	S/.1.661,30
Sensor Lidar	\$336,00	S/.1.243,20	1	S/.1.243,20
CAM H7 PLUS	\$80,00	S/.296,00	1	S/.296,00
Sensor de nivel	\$35,00	S/.129,50	1	S/.129,50
IMU	\$699,00	S/.2.586,30	1	S/.2.586,30
Indicador de batería	\$12,00	S/.44,40	1	S/.44,40
Sensor de temperatura	\$22,90	S/.84,73	1	S/.84,73
Relé de estado sólido 24V	\$23,40	S/.86,58	1	S/.86,58
Módulo Relé 5V	\$1,62	S/.6,00	3	S/.18,00
Regulador de voltaje 24V-20V	\$8,99	S/.33,26	1	S/.33,26
Regulador de voltaje 24V-12V	\$120,54	S/.446,00	2	S/.892,00
Regulador de voltaje 24V-6V	\$103,39	S/.382,54	1	S/.382,54
Costo Total				S/.18.002,37

6.2.3 Costos de diseño

El desarrollo del sistema integrado abarca todos los pasos conceptuales realizados para lograr el diseño final del vehículo agrícola autónomo. Los costos del diseño se especifican en la Tabla 39. La tarifa utilizada para convertir las horas de trabajo es de 30 PEN/hora. Para el cálculo de horas, se considera un total de 24 días laborales al mes, con una jornada de 8 horas diarias. El diseño conceptual requiere 2 meses de trabajo, mientras que cada uno de los demás capítulos demanda 1 mes de dedicación.

Tabla 5.5. Costos de diseño

Rol de diseño	Horas de trabajo	Total
Conceptual	384	S/.11.520,00
Mecánico	192	S/.5.760,00
Electrónico	192	S/.5.760,00
Control	192	S/.5.760,00
Pruebas	192	S/.5.760,00
Costo Total		S/.34.560,00

6.2.4 Costos de fabricación

Los costos de fabricación incluyen los gastos asociados con la impresión 3D y el corte de las planchas de aluminio. En la Tabla 40 se detallan los precios de manufactura. Es importante destacar que la cantidad de material y el tiempo de impresión han sido estimados utilizando el laminador ULTIMAKER CURA.

Tabla 5.6. Costos de fabricación

Fabricación	SUBTOTAL (PEN)
Corte	S/.200,00
Impresión 3D	S/.40,00
Costo total	S/.240,00

6.2.5 Costo total

La Tabla 41 presenta un resumen de los costos, sumando todos los gastos previamente calculados para determinar el costo total del diseño e implementación del sistema integrado.

Tabla 5.7. Costo total

COSTOS	SUBTOTAL (PEN)
Materia Prima	S/.513,80
Componentes Mecánicos	S/.1.182,55
Componentes Electrónicos	S/.17.962,72
Diseño	S/.34.560,00
Fabricación	S/.240,00
COSTO TOTAL	S/.54.459,07

CONCLUSIONES

- En relación con el diseño conceptual, se logró establecer un modelo mecatrónico viable que integra detección de plagas y aplicación controlada de pesticidas. Este planteamiento responde a la tendencia global de agricultura de precisión y se orienta a reducir pérdidas de cultivos y casos de intoxicación. De esta forma, el diseño constituye la base tecnológica que conecta directamente la problemática con la solución propuesta.
- Los cálculos mecánicos y la selección de materiales permitieron obtener un vehículo compacto, resistente y adaptado a las condiciones del campo peruano. El prototipo cumple con los requisitos de durabilidad y peso, garantizando un desempeño confiable en terrenos difíciles y bajo condiciones climáticas adversas. En definitiva, el diseño mecánico asegura la operatividad continua del sistema en escenarios reales.
- La integración de componentes electrónicos y el cálculo de potencia proporcionaron al vehículo una autonomía de 10 horas y resistencia IP67 frente a condiciones adversas. Este equilibrio entre consumo energético y rendimiento valida la eficiencia del sistema. En conclusión, la configuración electrónica garantiza un funcionamiento sostenido y seguro en entornos agrícolas exigentes.
- El modelo de aprendizaje automático alcanzó una precisión superior al 90% en la detección de enfermedades y en el reconocimiento de cultivos sanos. Este resultado confirma la efectividad de la estrategia de control diseñada y su potencial para optimizar la aplicación focalizada de pesticidas. Por tanto, la propuesta contribuye directamente a reducir intoxicaciones y fortalecer la seguridad alimentaria.
- La elaboración de planos mecánicos y electrónicos permitió estimar con precisión los costos de fabricación y ensamblaje, que ascendieron a S/. 54,459.07. Esta información constituye

una guía práctica para evaluar la viabilidad económica del proyecto y planificar futuras implementaciones. En definitiva, el prototipo demuestra factibilidad técnica y económica para su aplicación en la agricultura peruana.



RECOMENDACIONES

- Para futuras mejoras, se recomienda la incorporación de una cámara con movilidad y seguimiento mediante un sensor, lo que permitiría una detección más precisa y eficiente de enfermedades en las plantas
- Se sugiere el uso de un sistema de suspensión para que el vehículo pueda desplazarse con mayor eficiencia en diversos terrenos agrícolas, mejorando su estabilidad y reduciendo el desgaste de sus componentes.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] El derecho a la alimentación empieza con las plantas. (s/f). Fao.org.
<https://www.fao.org/right-to-food/resources/resources-detail/es/c/1362947/>
- [2] FAO. (2019). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Progresos en la lucha contra la pérdida y el desperdicio de alimentos. Roma.
- [3] 40% DE LA PRODUCCIÓN DE ALIMENTO SE PIERDE POR PLAGAS Y ENFERMEDADES. (2015, Julio 7). Agencia Agraria de Noticias. .
<https://agraria.pe/noticias/40-de-la-produccion-de-alimento-se-pierde-8729>
- [4] Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades – MINSA. (2022). Sala de situación de salud: Vigilancia Epidemiológica del riesgo de exposición e intoxicación por plaguicidas Perú a la SE 28 - 2022.
- [5] Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades – MINSA. (2021). Sala de situación de salud: Vigilancia Epidemiológica del riesgo de exposición e intoxicación por plaguicidas Perú a la SE 52 - 2021.
- [6] Valladares, J. F. P. (2022). Tecnología, la clave para el impulso de la agricultura peruana 4.0.
<https://www.esan.edu.pe/conexion-esan/tecnologia-la-clave-para-el-impulso-de-la-agricultura-peruana-4-0>
- [7] Shahbandeh, M. (2022). Worldwide - agricultural robot market volume forecast 2020-2030. Statista. <https://www.statista.com/statistics/1290013/agricultural-robot-global-market-unit-volume/>
- [8] Jänsch, J. y Birkhofer, H. (2006). The development of the guideline VDI 2221 - The change or direction. Croatia: Design 2006.
- [9] Agricultura 4.0. Nuevas tecnologías en la agricultura. (2021, octubre 5). ATRIA Innovation.
<https://www.atriainnovation.com/agricultura-4-0-nuevas-tecnologias-en-la-agricultura/>

[10] Agras T40.(2024). DJI.

https://dji.pe/agras-t40?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAlcyuBhBnEiwAOGZ2S9AOI2VsCSDtRuWmoXF31sMO8onv99YWaYMEV8TYjndjxujRErDFLxoCkBkOAvD_BwE

[11] Electrónica, M. (2020, diciembre 1). Sensores para Agricultura de Precisión, SENSORS - MAHER. Maher Electrónica.

<https://www.maherelectronica.com/monitorizacion-sensores/sensores-agricultura-precision/>

[12] Cámara Multiespectral Parrot Sequoia +. (s/f). El vuelo del Drone._

<https://elvuelodeldrone.com/repuestos-y-accesorios/repuestos-parrot/camara-multiespectral-parrot-sequoia/>

[13] Observatorio Nacional de Prospectiva CEPLAN. (2023). Incremento de la agricultura 4.0. Gob.pe. https://observatorio.ceplan.gob.pe/ficha/ts_5_agro

[14] Agricultura automatizada y robótica agrícola. (2021, noviembre 12). EDS Robotics._

<https://www.edsrobotics.com/blog/agricultura-automatizada-y-robotica-agricola/>

[15] Robotnik, P. (2022, enero 31). Aplicaciones de la robótica en la agricultura. Robotnik._

<https://robotnik.eu/es/aplicaciones-de-la-robotica-en-la-agricultura/>

[16] Cifuentes Duarte, A. (2019). Diseño de un sistema automático para la aspersión de plaguicidas en rosas cultivadas en invernadero

[17] Jiménez. A., Camargo. D. & García. D. (2020). Intelligent System for Weeds Management in Pineapple Crop with Precision Agriculture Concepts

[18] del Cerro Marco Vieri Gilles Rabatel Benoit Debilde, P. G.-S. A. R. C. F.-Q. F. L.-G. M. B. S.

T. S. P. A. P. G. P. G. K. M. P.-R. C. V. J. (2016). Fleets of robots for environmentally-safe pest control in agriculture.

[19] FarmDroid. (s/f). Farmdroid FD20. <https://farmdroid.com/products/farmdroid-fd20/>

- [20] ROBOTTI LR – agointelli. (n.d.). Agointelli.com. <https://agointelli.com/robotti/lr/>
- [21] Calleija, M., & Sukkarieh, S.. (2020). AUTOMATIC TARGET RECOGNITION AND MANAGEMENT SYSTEM (Patent No. 10,701,852 B2). In US Patent (10,701,852 B2).
- [22] Calleija, M., & Sukkarieh, S. (2021). Automatic target recognition and dispensing system (Patent No. AU:2019246795:B2). In Patent (AU:2019246795:B2).
- [23] Cantrell, R. L., Thompson, J. P., Winkle, D. C., Atchley, M. D., High, D. R., Mattingly, T. D., McHale, B. G., O'Brien, J. J., & Simon, J. F. (2020). Systems and methods for dispensing an insecticide via unmanned vehicles to defend a crop-containing area against pests (Patent No. 10577103). In US Patent (No. 10577103).
- [24] Modelo cinemático y simulación de un robot móvil diferencial. (2022, agosto 15). Roboticoss; edisonsasig.
<https://roboticoss.com/modelo-cinematico-y-simulacion-con-python-robot-movil-diferencial/>
- [25] Muñoz, L. (2019, junio 9). Qué distancia dejar entre las plantas del huerto. AgroHuerto.
<https://www.agrohuerto.com/distancias-de-siembra-plantas-del-huerto-separacion/>

ANEXOS

ANEXO A

Función Principal:

El vehículo terrestre autónomo estará diseñado para realizar movimientos precisos y controlables, adaptándose de manera efectiva a diversas tareas agrícolas. Su función principal se centrará en garantizar un flujo continuo y controlado de material para una aplicación precisa de pesticidas. Además, se integrará un sistema de visión avanzado para la detección temprana de enfermedades en los cultivos. La capacidad de integración con el sistema de control permitirá la aplicación precisa de pesticidas en áreas específicas identificadas por el sistema de visión.

a) Geometría:

En cuanto a la geometría del vehículo, se buscará una configuración modular que permita posibles extensiones y ampliaciones en el futuro. Además, se asegurará de que el ancho y largo del vehículo sean menores a 40 cm, con una disposición que facilite su manipulación y accesibilidad en diversos entornos agrícolas.

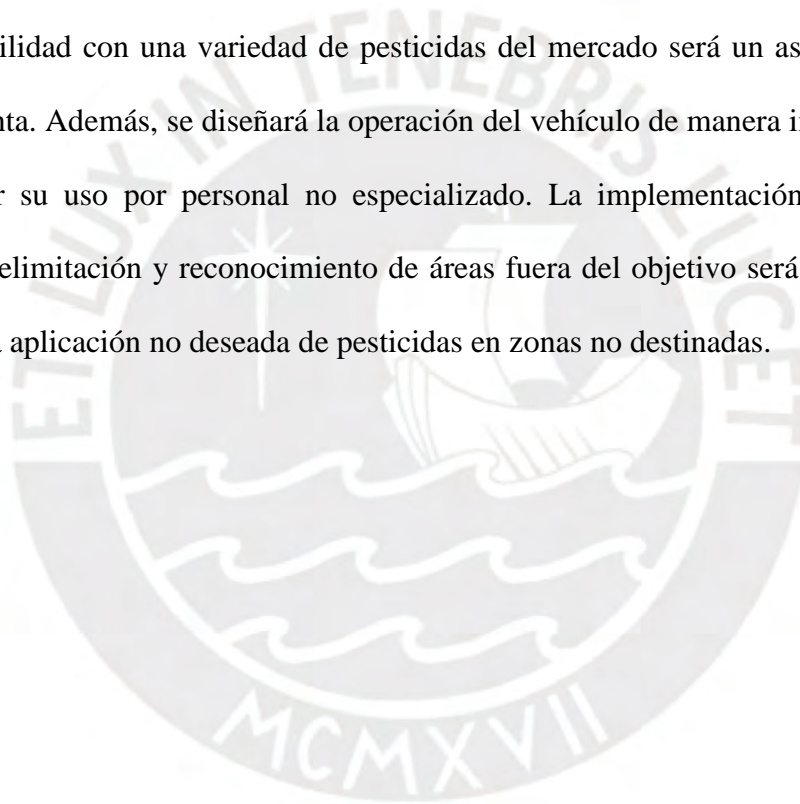
b) Fabricación:

La fabricación del vehículo se enfocará en el uso de materiales que cumplan con las normativas relacionadas con alimentos y medio ambiente. El peso del vehículo estará por debajo de los 20 kg para garantizar su movilidad. Se incorporará un sistema de ventilación adecuado para mantener las temperaturas dentro de límites seguros durante la operación. Además, se implementarán sistemas de protección para resguardar los componentes durante periodos de inactividad. La rigidez y

estabilidad del vehículo serán características clave para minimizar deformaciones bajo condiciones de trabajo extremas. También se considerará un sistema de filtrado de aire para entornos polvorientos.

c) Uso:

La función de uso del vehículo autónomo incluirá la capacidad de proporcionar información en tiempo real sobre su rendimiento y condiciones. Se buscará lograr una aplicación eficiente de pesticidas para minimizar costos e impacto ambiental. La compatibilidad con una variedad de pesticidas del mercado será un aspecto a tener en cuenta. Además, se diseñará la operación del vehículo de manera intuitiva para facilitar su uso por personal no especializado. La implementación de un sistema de delimitación y reconocimiento de áreas fuera del objetivo será crucial para evitar la aplicación no deseada de pesticidas en zonas no destinadas.



ANEXO B

Entradas:

- Botón de On/Off:

El vehículo debe contar con un botón o interruptor que permite activarla.

- Señal Start/Stop:

Esta señal da inicio al proceso y lo detiene en caso sea necesario.

- Pesticidas:

Engloba pesticidas, fertilizantes y cualquier otro elemento necesario para la aplicación efectiva en los cultivos.

- Energía Eléctrica:

Requerida para el funcionamiento de sistemas electrónicos y de control del vehículo.

- Botón de Emergencia:

El vehículo debe contar con un botón el cual pueda detener cualquier acción del vehículo en caso de emergencia.

- Comandos:

Se deben ingresar los comandos y patrones de dirección que el vehículo autónomo irá recopilando para poder desplazarse.

- Entorno:

El entorno permitirá recolectar información de posicionamiento, obstáculos y de las enfermedades.

- Temperatura interna:

El monitoreo de la temperatura interna es esencial para garantizar el funcionamiento óptimo de los componentes del vehículo.

Salidas:

- Información de aplicación:

Brinda la información acerca del porcentaje aplicado de pesticidas, asimismo compartirá la información acerca del nivel de pesticida disponible.

- Indicador de Calidad:

Es necesario incorporar indicadores visuales en el vehículo que representen el correcto funcionamiento del proceso.

- Ruido y Calor:

En procesos electromecánicos, el ruido y calor son salidas naturales. El ruido se refiere a cualquier sonido no deseado o planificado que se da durante el proceso y el calor se produce por la fricción entre partes o solapamiento de energía de los componentes electrónicos.

- Desplazamiento:

Durante la operación, el vehículo se desplaza con precisión coordinando la información captada sobre su posición con los comandos previamente establecidos.

- Pesticida aplicado

Es el porcentaje de pesticida que es expulsado inmediatamente después del análisis de enfermedad del cultivo.

- Nivel de energía:

Se muestra el nivel de batería disponible en el vehículo.

- Indicador de emergencia:

Son las señales encargadas de indicar al usuario que ocurrió alguna falla o emergencia durante el proceso.

ANEXO C

Conceptos de solución

Se presentan los 3 conceptos de solución diseñados para abordar los desafíos específicos del vehículo autónomo. Cada concepto implica una configuración única de componentes electrónicos, sistemas de detección y actuadores para lograr sus respectivas funciones.

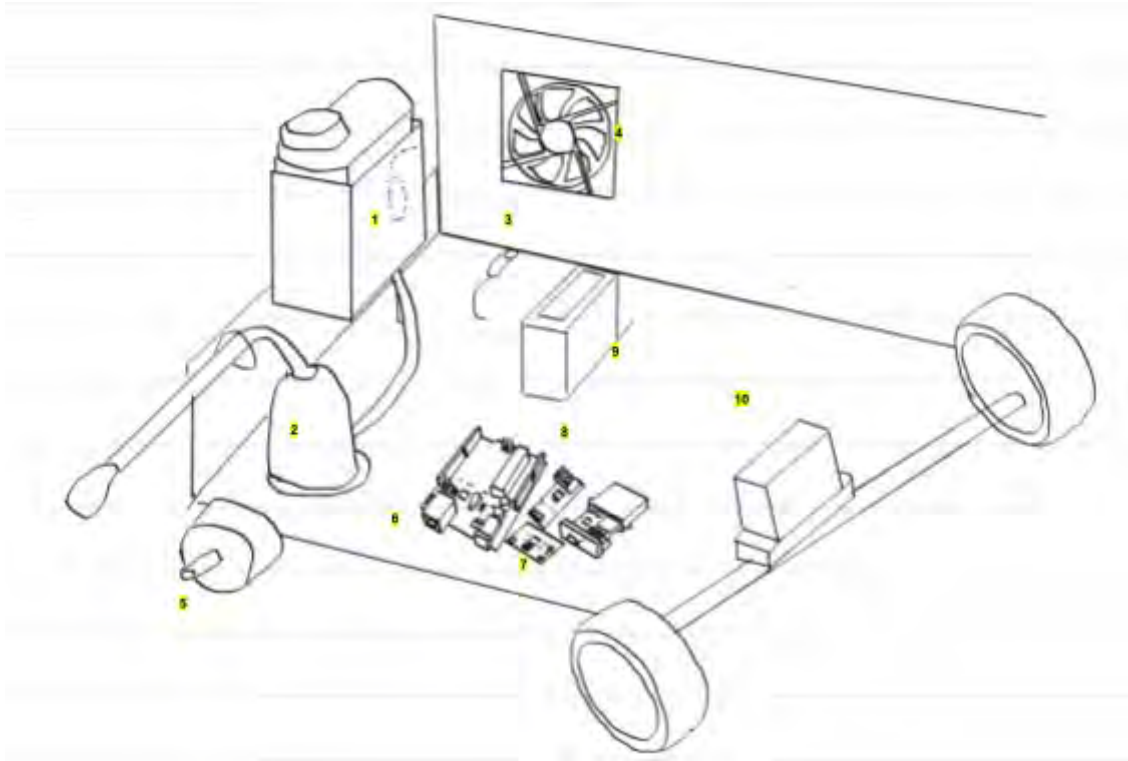
Solución 1:

Para movilizarse ágilmente por los campos agrícolas, la solución 1 cuenta con cuatro ruedas, las ruedas traseras impulsadas con motores DC sin escobillas y las ruedas frontales direccionadas con un servomotor. Incorpora agarraderas para facilitar su transporte, asegurando una operación conveniente. La detección y evaluación del estado de los cultivos se logra a través de una cámara RGB ubicada en el lateral del vehículo, esta cámara se encarga de la captura imágenes precisas de los cultivos y las enfermedades, permitiendo que el algoritmo que determine la enfermedad que presenta el cultivo y la cantidad exacta de pesticida requerida para cada planta. El sistema de aplicación de pesticidas del vehículo está diseñado para garantizar una dosificación precisa y controlada. Una válvula check controlada administra la cantidad adecuada de pesticida del tanque de almacenamiento hacia la bomba, mientras que la lanza pulverizadora garantiza una distribución uniforme del producto sobre la planta. Asimismo, está equipado con sensores de medición líquida y de corriente para monitorear el nivel del tanque de pesticida y gestionar la energía de las baterías, respectivamente. El vehículo está equipado con un microcontrolador que supervisa y controla todas las operaciones del sistema, asegurando un funcionamiento óptimo y eficiente. Las baterías recargables proporcionan la energía necesaria para el funcionamiento del vehículo. Un interruptor de emergencia manual proporciona una opción de control manual en situaciones críticas, mientras que una pantalla táctil incorporada permite una interacción intuitiva entre el vehículo y el operador.

Desde esta pantalla, el operador puede introducir comandos, visualizar la eficiencia de la aplicación de pesticidas y monitorear el nivel de energía de las baterías, lo que facilita la gestión y el control del vehículo durante las operaciones agrícolas. Para garantizar su ubicación precisa en el campo, el vehículo cuenta con un sistema de posicionamiento compuesto por un giroscopio, un acelerómetro y un GPS. Este sistema cuenta con un sensor infrarrojo para que el vehículo pueda navegar de manera efectiva entre los cultivos y evitar obstáculos durante su recorrido.

Componentes listados:

1. Sensor de medición líquida
2. Bomba
3. Sensor infrarrojo
4. Ventilador
5. Motor Dc
6. Microcontrolador
7. Acelerómetro y GPS
8. Sensor de corriente
9. Espacio para batería
10. Servomotor
11. Pulverizador
12. Tanque de pesticida
13. Agarraderas
14. Botón on/off
15. Botón de emergencia
16. Tapa para abrir espacio para batería
17. Leds
18. Pantalla táctil
19. Altavoz
20. Sensor infrarrojo
21. Cámara



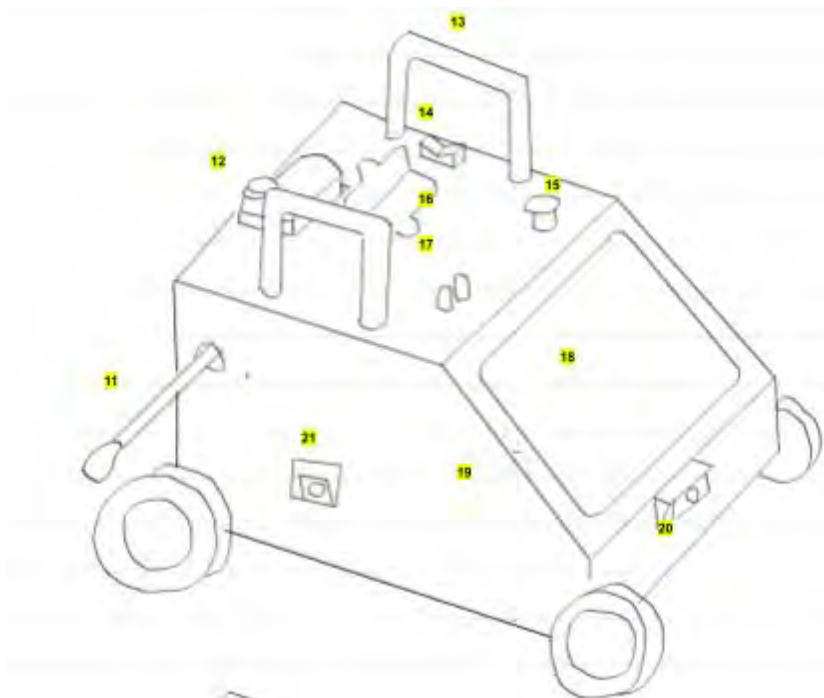


Figura 3.3 Concepto de Solución 1.

Solución 2:

El vehículo está propulsado por motores DC sin escobillas, este motor proporciona la potencia necesaria para desplazarse mediante las ruedas orugas que dispone. Para detectar obstáculos y evitar colisiones durante su recorrido cuenta con un sensor ultrasónico que mide la distancia entre los objetos circundantes. Además, está equipado con un sensor de posición y recorrido angular, que proporciona información precisa sobre la ubicación y el movimiento en el campo. El vehículo está conectado a una fuente de alimentación externa, lo que garantiza un suministro constante de energía a las operaciones agrícolas. Para monitorear el consumo de energía, se ha integrado un sensor de energía y potencia que proporciona información en tiempo real sobre el rendimiento del sistema. Aunque la solución 2 no cuenta con una pantalla táctil incorporada, puede controlarse de manera intuitiva a través de una tablet. Esta interfaz permite al operador supervisar y controlar todas las operaciones del vehículo de manera remota, proporcionando flexibilidad y comodidad durante las

operaciones agrícolas. Asimismo, incorpora LEDs y altavoces integrados en el vehículo proporcionando indicaciones visuales y auditivas en caso de emergencia, garantizando la seguridad del operador y del entorno agrícola.

En el núcleo de esta solución, se encuentra una microcomputadora que, junto con algoritmos, permite realizar la detección precisa de enfermedades de las plantas, determinar la cantidad óptima de pesticida a aplicar y controlar todas las operaciones del vehículo. El proceso de aplicación comienza con la detección de la enfermedad por parte de una cámara multispectral, seguido por el análisis de los datos por el algoritmo de machine learning. Esto permite al operador visualizar en tiempo real el estado de los cultivos y tomar decisiones informadas sobre el tratamiento a aplicar. Una vez que se ha determinado la cantidad necesaria de pesticida, el sistema activa una bomba inyectora equipada con un sistema de boquillas pulverizadoras. Antes de que el pesticida sea dispensado, pasa a través de una válvula check ubicada a la salida del tanque de almacenamiento. Para asegurar la precisión en la aplicación, se utiliza un sensor ultrasónico para medir el nivel de pesticida en el tanque.

Componentes listados:

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| 1. Tanque de pesticida | 6. Bocina |
| 2. Sistema de boquillas | 7. Leds |
| 3. Indicador de batería | 8. Sensor ultrasónico |
| 4. Botón On/Off | 9. Cámara multispectral |
| 5. Botón de emergencia | |

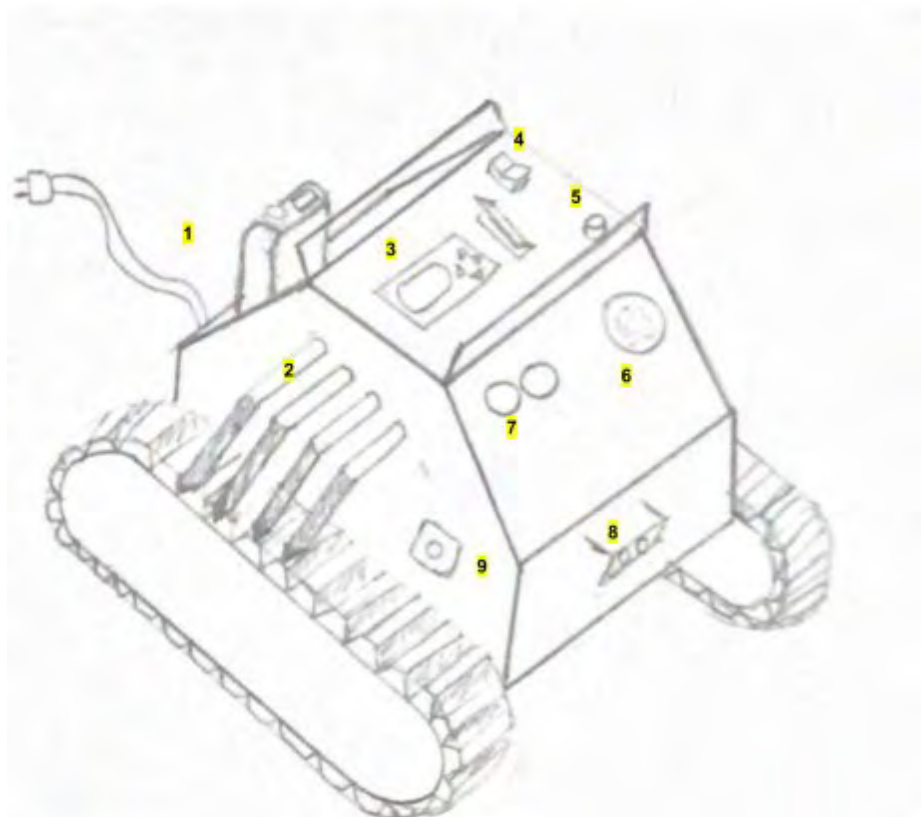


Figura 3.4 Concepto de Solución 2.

Solución 3:

La solución propuesta cuenta con una aplicación para dispositivo móvil que permite monitorear en tiempo real la eficiencia del vehículo y controlar sus funciones. Desde esta aplicación, los usuarios pueden iniciar el trayecto del robot y enviar comandos para la detección de ruta y los modos de operación del vehículo. Además, la solución está equipada con un microcontrolador y una microcomputadora que gestionan diversas funciones, como el control del movimiento del vehículo, la evaluación de la temperatura, el procesamiento de información del entorno y de imágenes, así como la evaluación de la enfermedad de las plantas mediante algoritmos de machine learning.

Para garantizar una mayor autonomía, se incorporan dos bancos de baterías recargables, uno para los dispositivos de control y otro para los actuadores. Además, se ha previsto un botón de corte manual y un sensor de corriente para el corte automático en caso de emergencia. El vehículo

también está equipado con indicadores LED y un altavoz para señalar situaciones de emergencia. En cuanto al monitoreo del entorno y obstáculos, se emplea un sensor LiDAR, mientras que para la determinación de la posición y orientación se utiliza un módulo IMU (Unidad de Medición Inercial) AHRS junto con GPS. Para la captura de imágenes de las enfermedades de las plantas, se dispone de un módulo de cámara ajustable conectado a su propio microprocesador.

Para medir la cantidad de pesticida en el tanque de almacenamiento se integra un sensor de nivel y para garantizar condiciones óptimas de funcionamiento se integra un sensor de temperatura que se encarga de notificar la temperatura exterior para el accionamiento del ventilador de corriente. La aplicación de pesticidas se realiza de manera precisa mediante un algoritmo que determina la cantidad necesaria, esta cantidad se transfiere desde el tanque de almacenamiento mediante una válvula solenoide hacia a la bomba de agua y luego se pulveriza en los cultivos mediante lanzas equipadas con boquillas intercambiables. Finalmente, el vehículo está impulsado por motores DC sin escobillas que proporcionan movimiento omnidireccional.

Componentes listados:

1. Caja para componentes
2. LiDAR
3. Tanque de pesticida
4. Cámara de profundidad
5. Motores DC
6. Mini cámara
7. Lanza pulverizadora

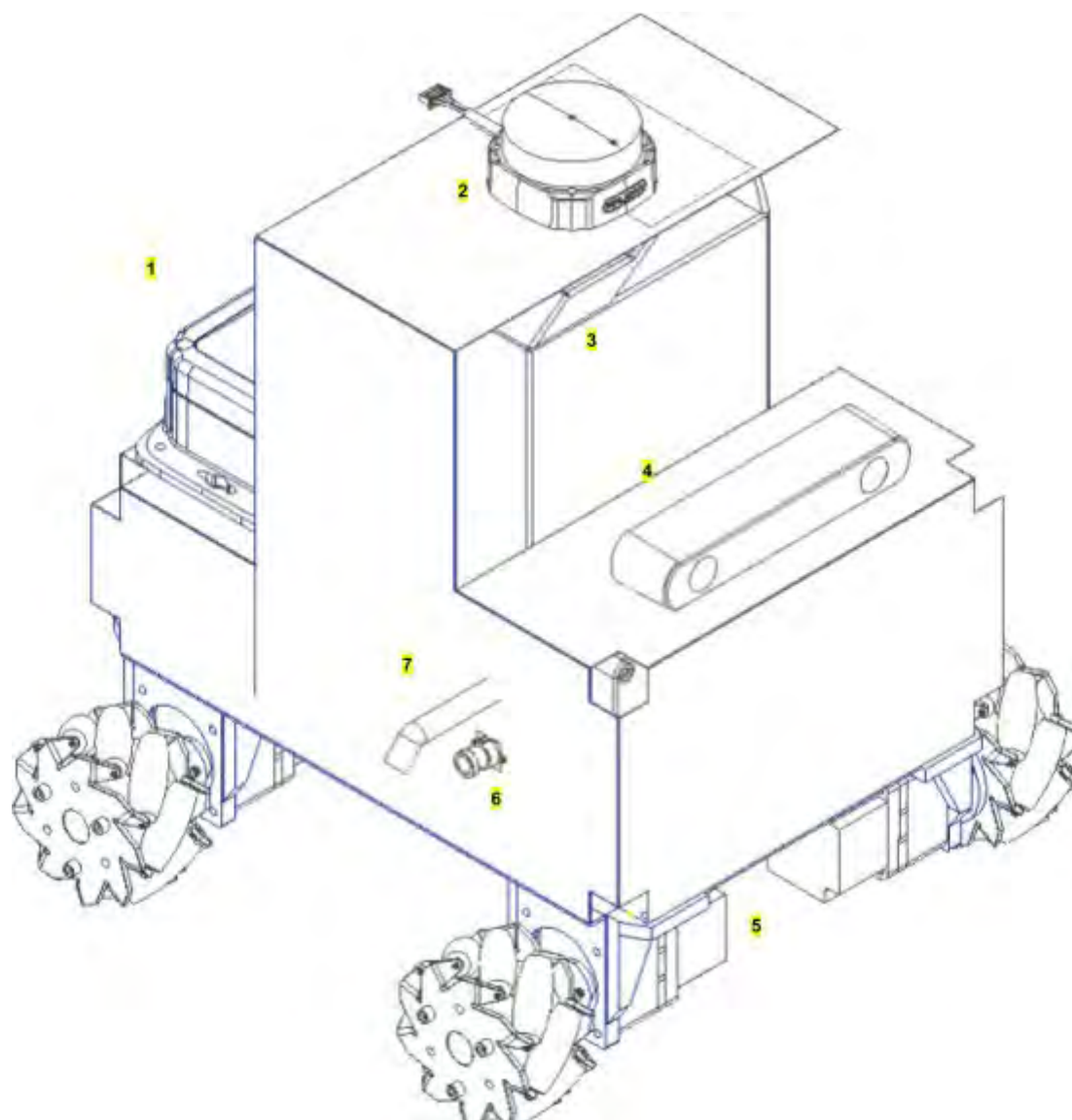
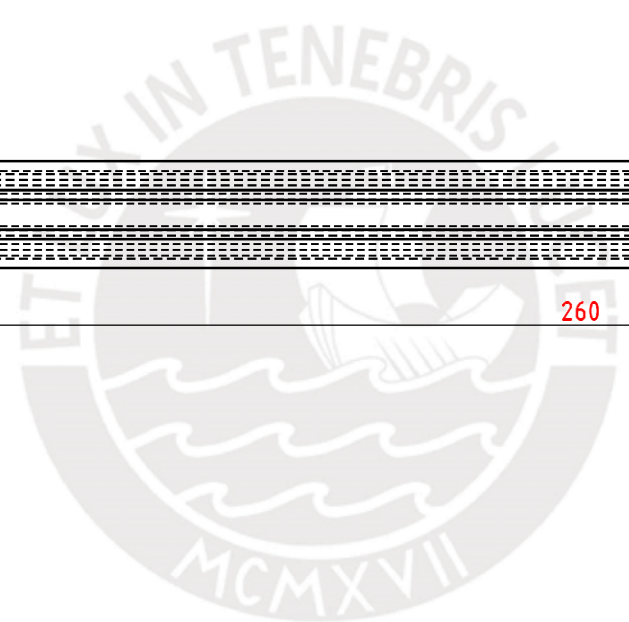
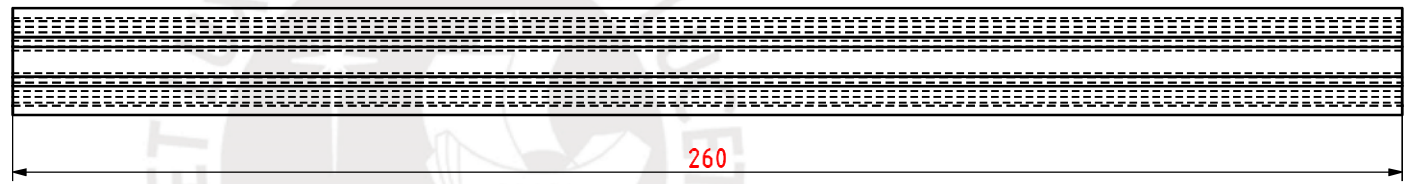
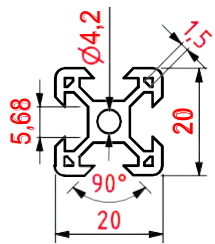
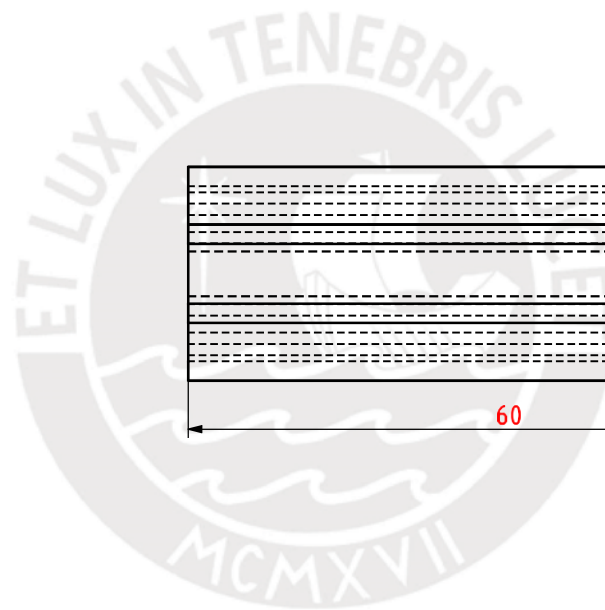
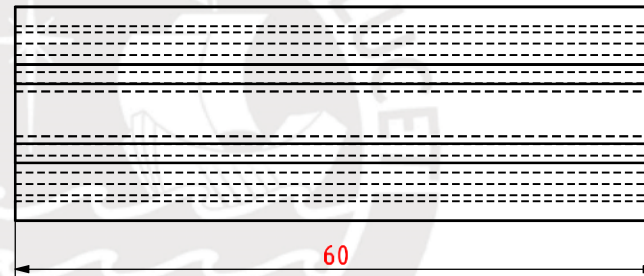
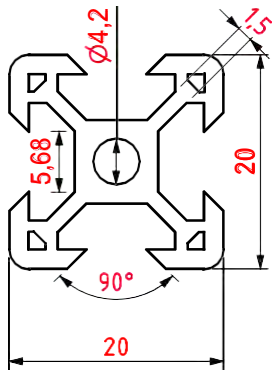


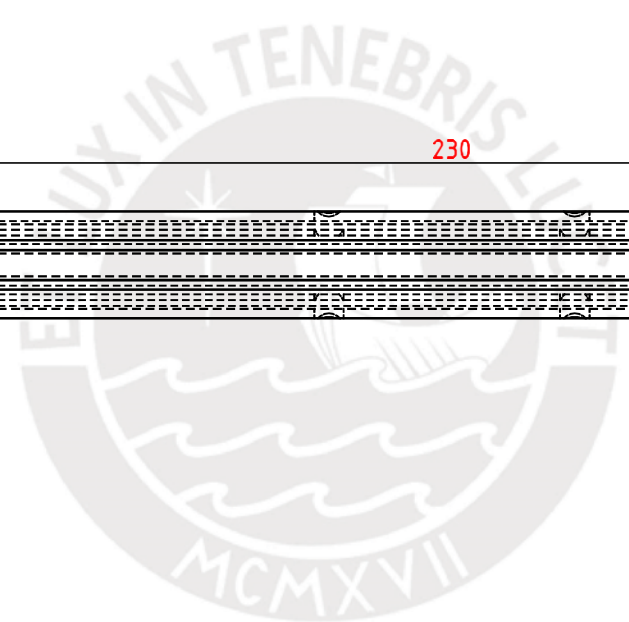
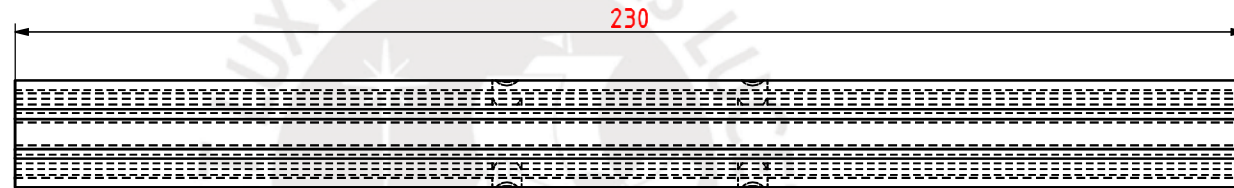
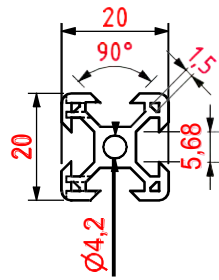
Figura 3.5 Concepto de Solución 3.



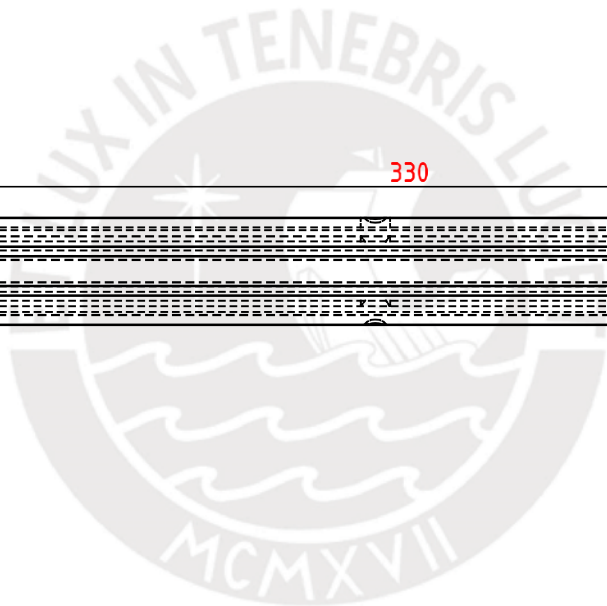
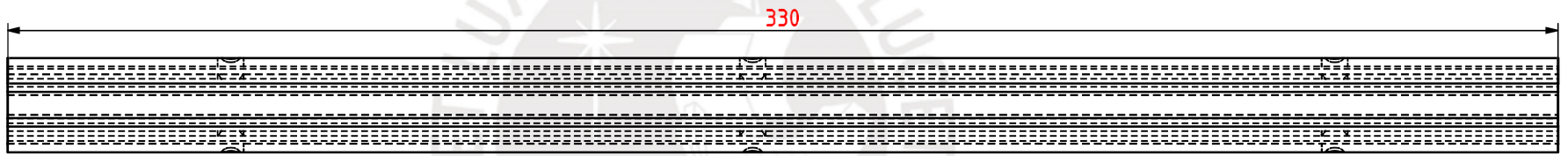
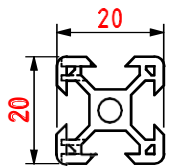
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA -		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	- - HORARIO	ESCALA
		FECHA:
REVISADO POR:		LÁMINA:



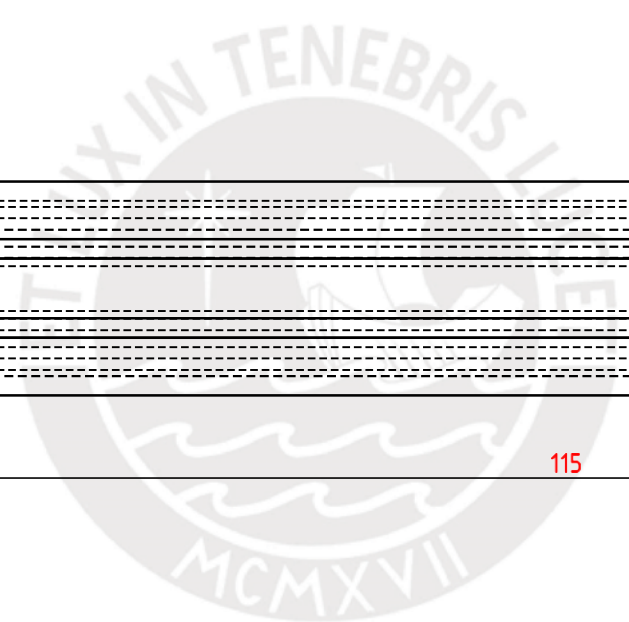
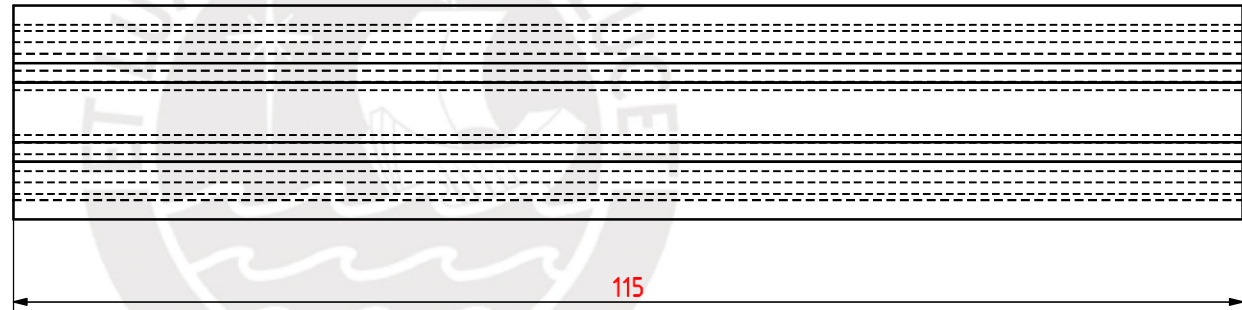
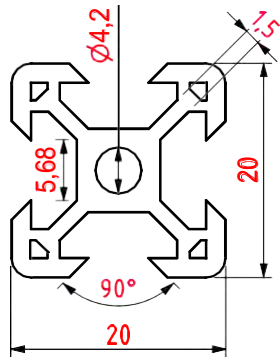
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA -		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	- - HORARIO	ESCALA
		FECHA:
REVISADO POR:		LÁMINA:



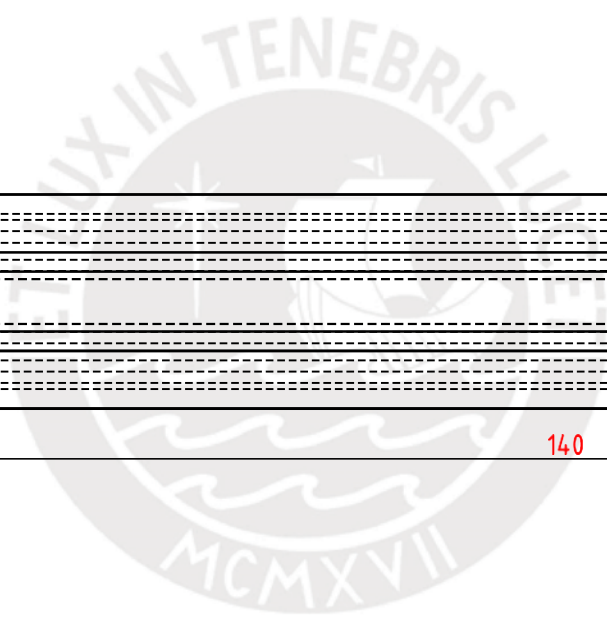
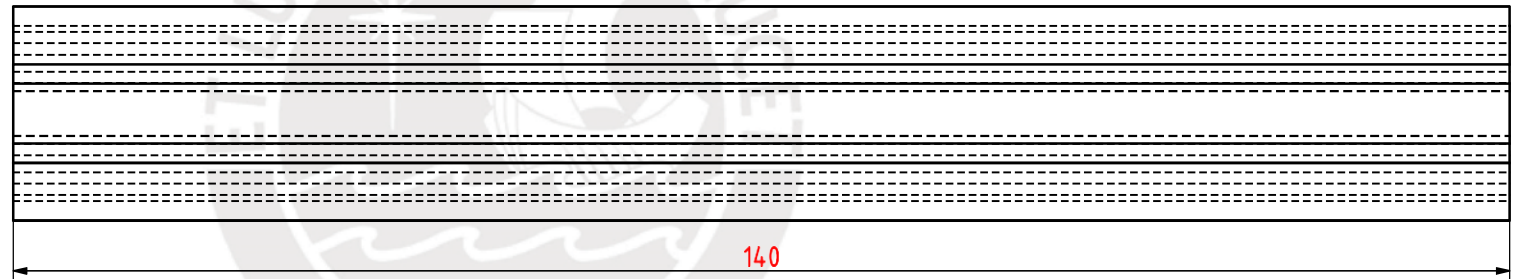
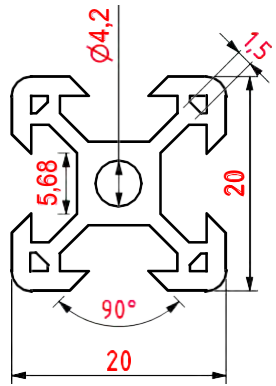
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA -		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	- - HORARIO	ESCALA
		FECHA:
REVISADO POR:		LÁMINA:



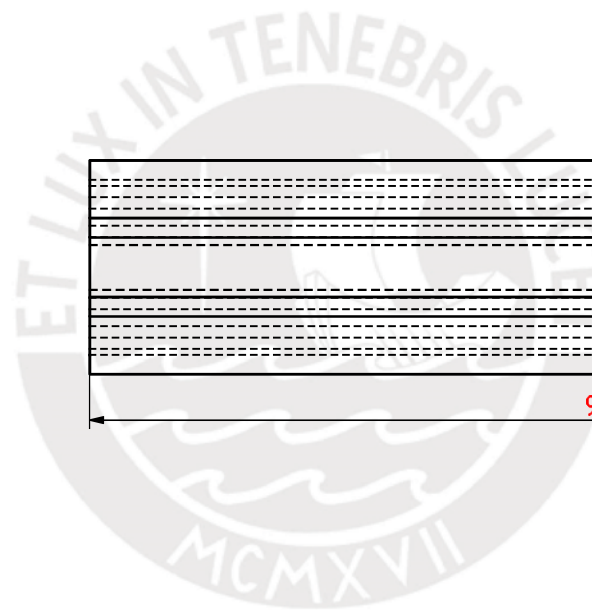
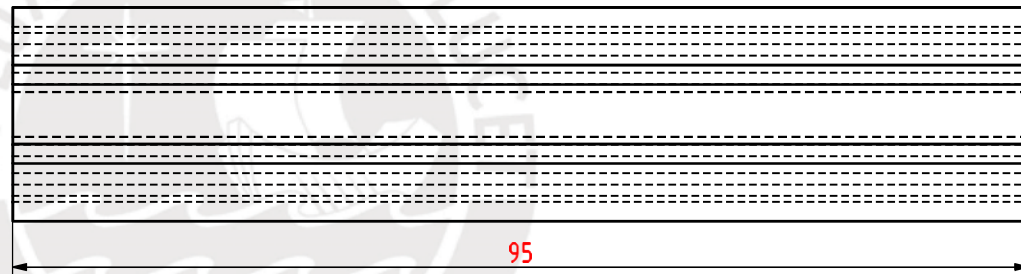
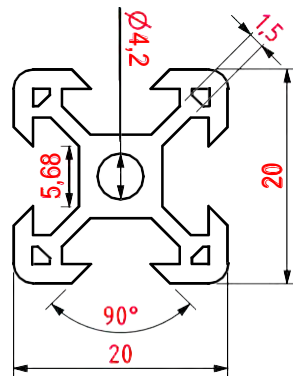
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA -		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	- - HORARIO	ESCALA
		
		FECHA:
REVISADO POR:		LÁMINA:



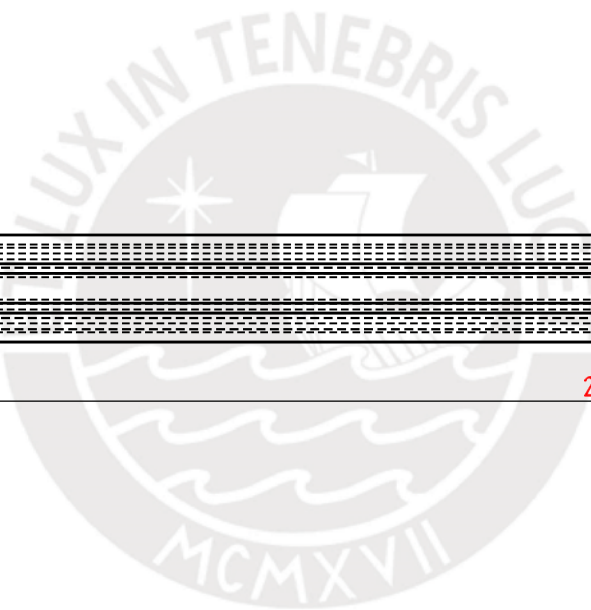
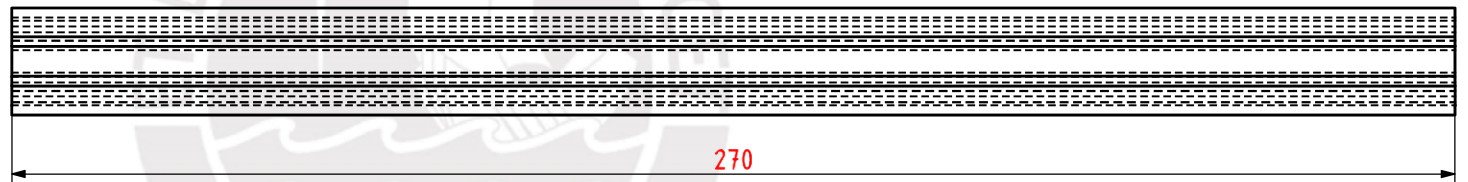
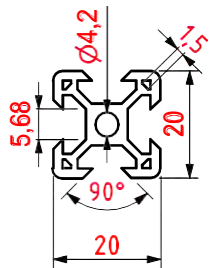
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA -		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	- - HORARIO	ESCALA
		FECHA:
REVISADO POR:		LÁMINA:



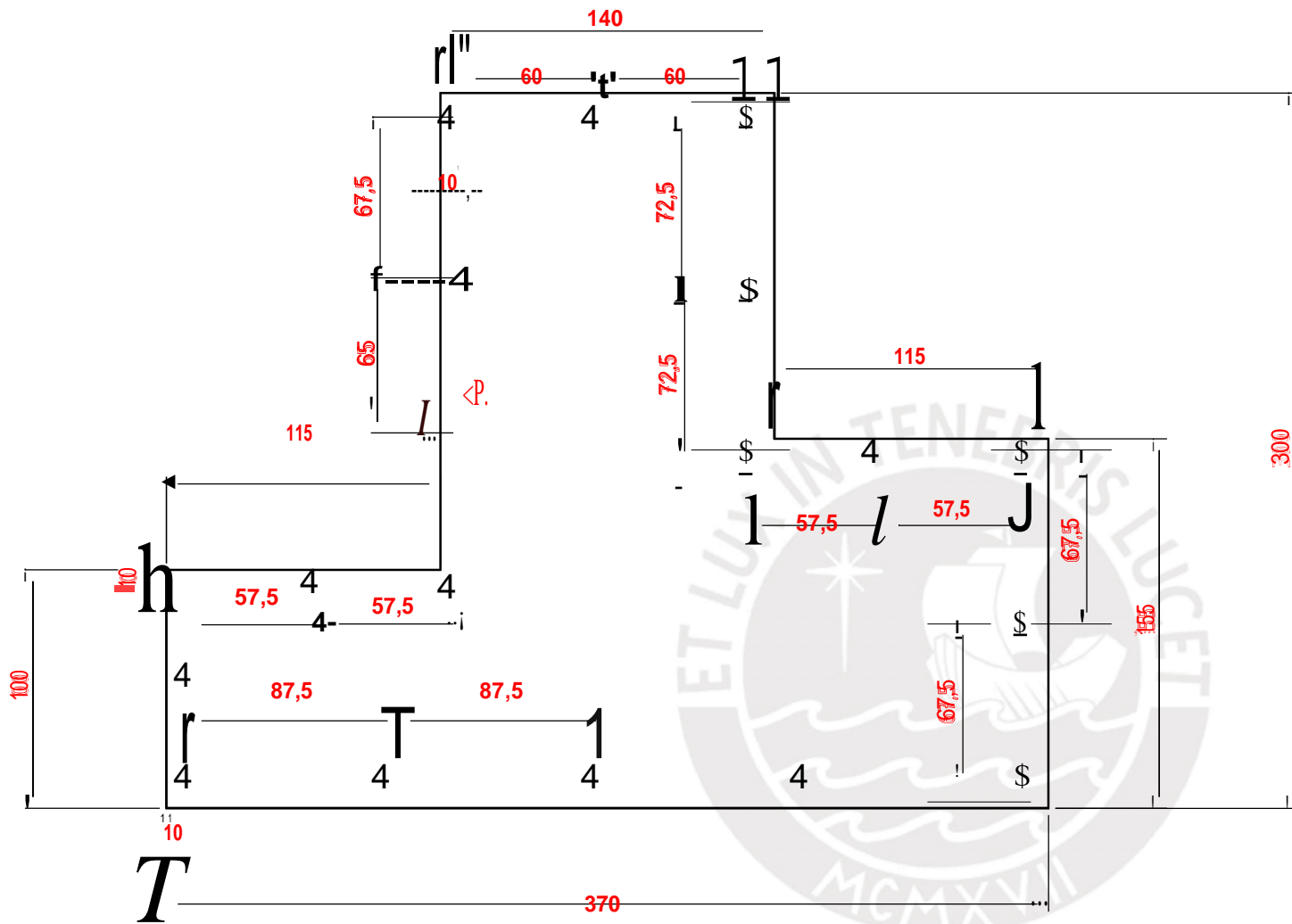
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA -		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	- - HORARIO	ESCALA
		FECHA:
REVISADO POR:		LÁMINA:



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA -		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	- - HORARIO	ESCALA
		FECHA:
REVISADO POR:		LÁMINA:

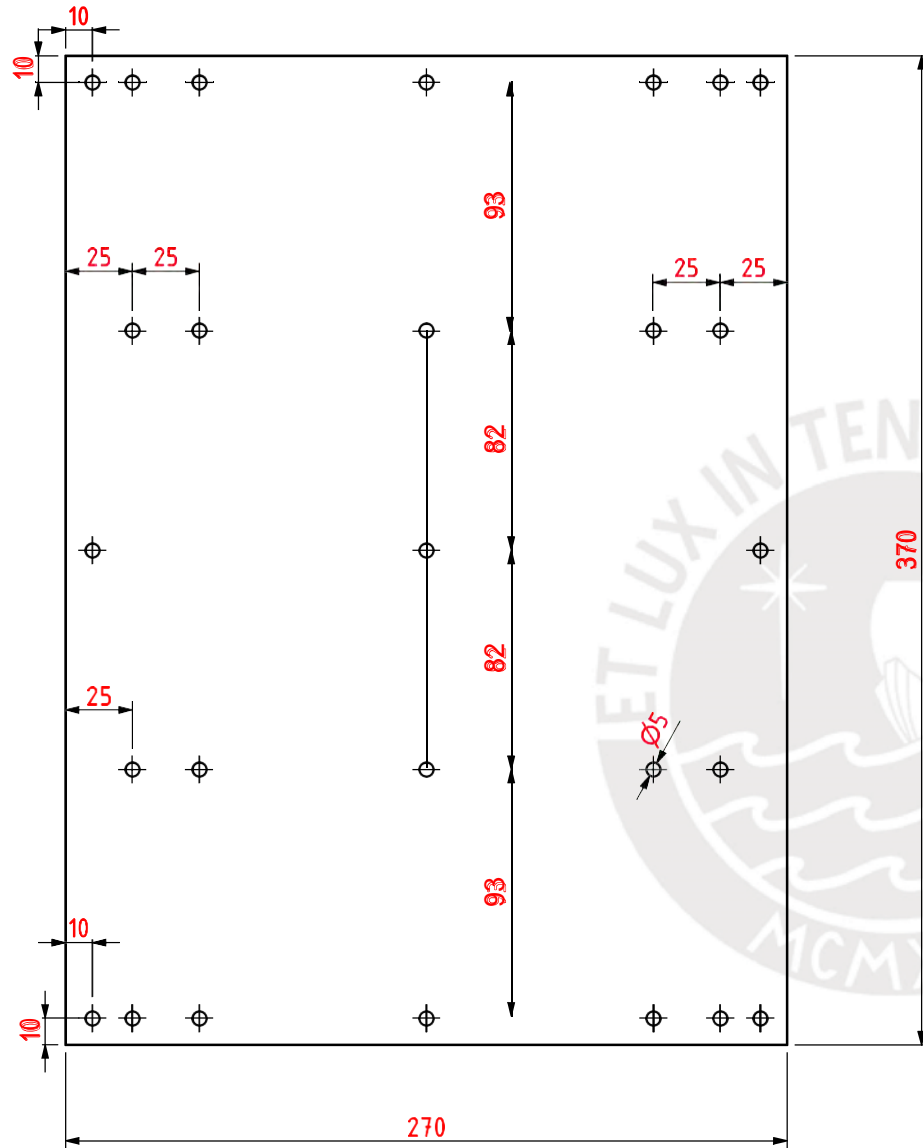


PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA -		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	- - HORARIO	ESCALA
		
		FECHA:
REVISADO POR:		LÁMINA:



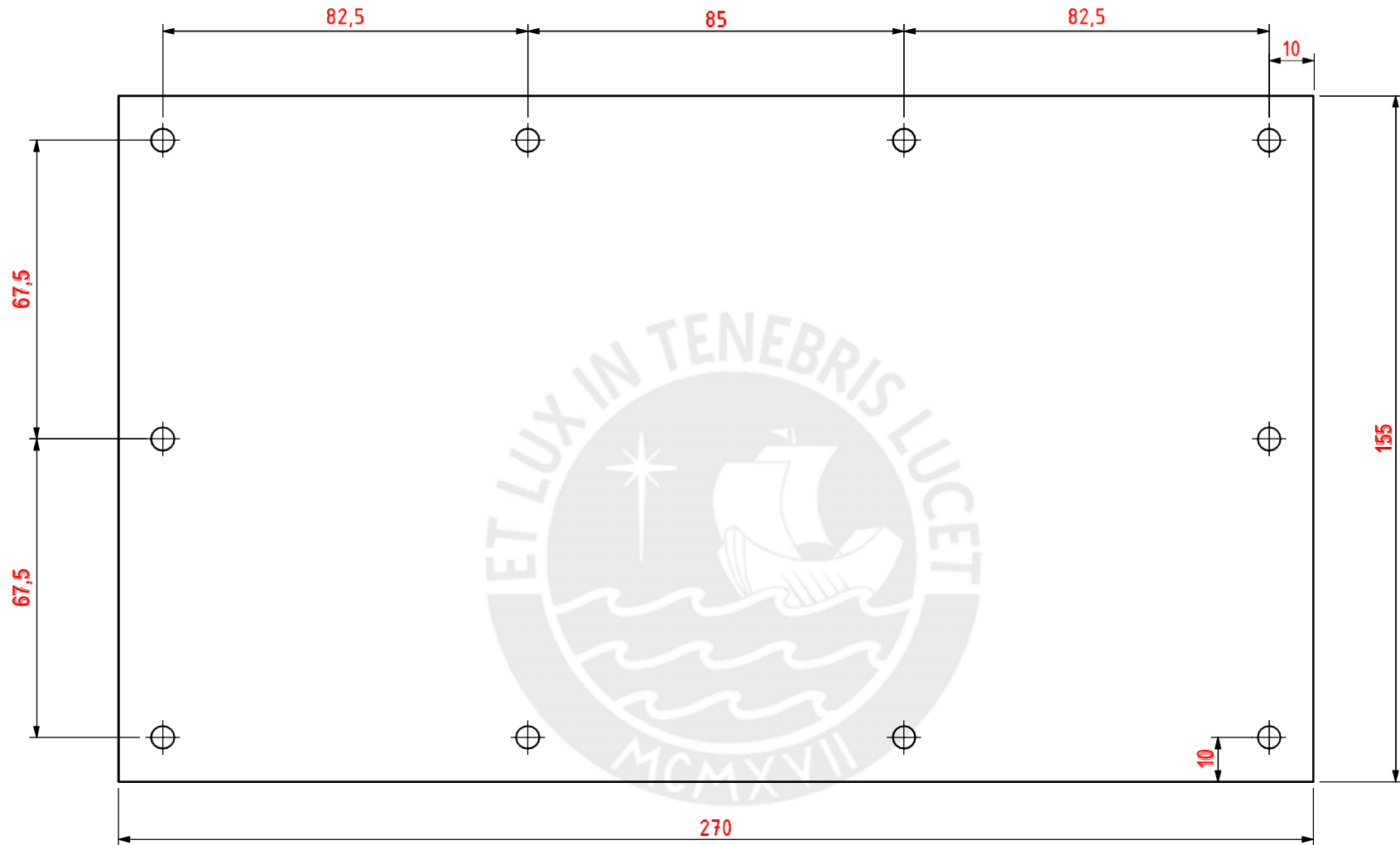
PLANCHA DE ALUMINIO 2MM

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA -		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	- - HORARIO	ESCALA
		FECHA:
REVISADO POR:		LÁMINA:



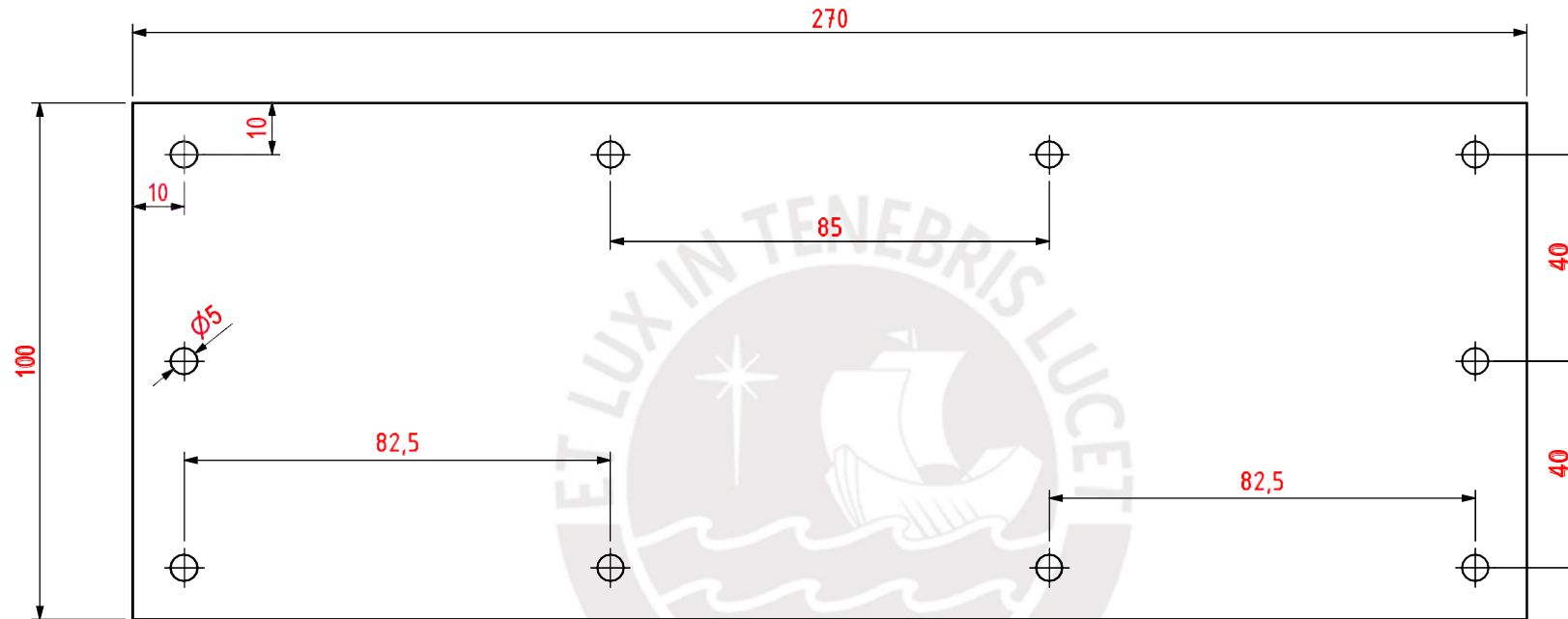
PLANCHA DE ALUMINIO 2MM

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA -		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	- - HORARIO	ESCALA
		FECHA:
REVISADO POR:		LÁMINA:



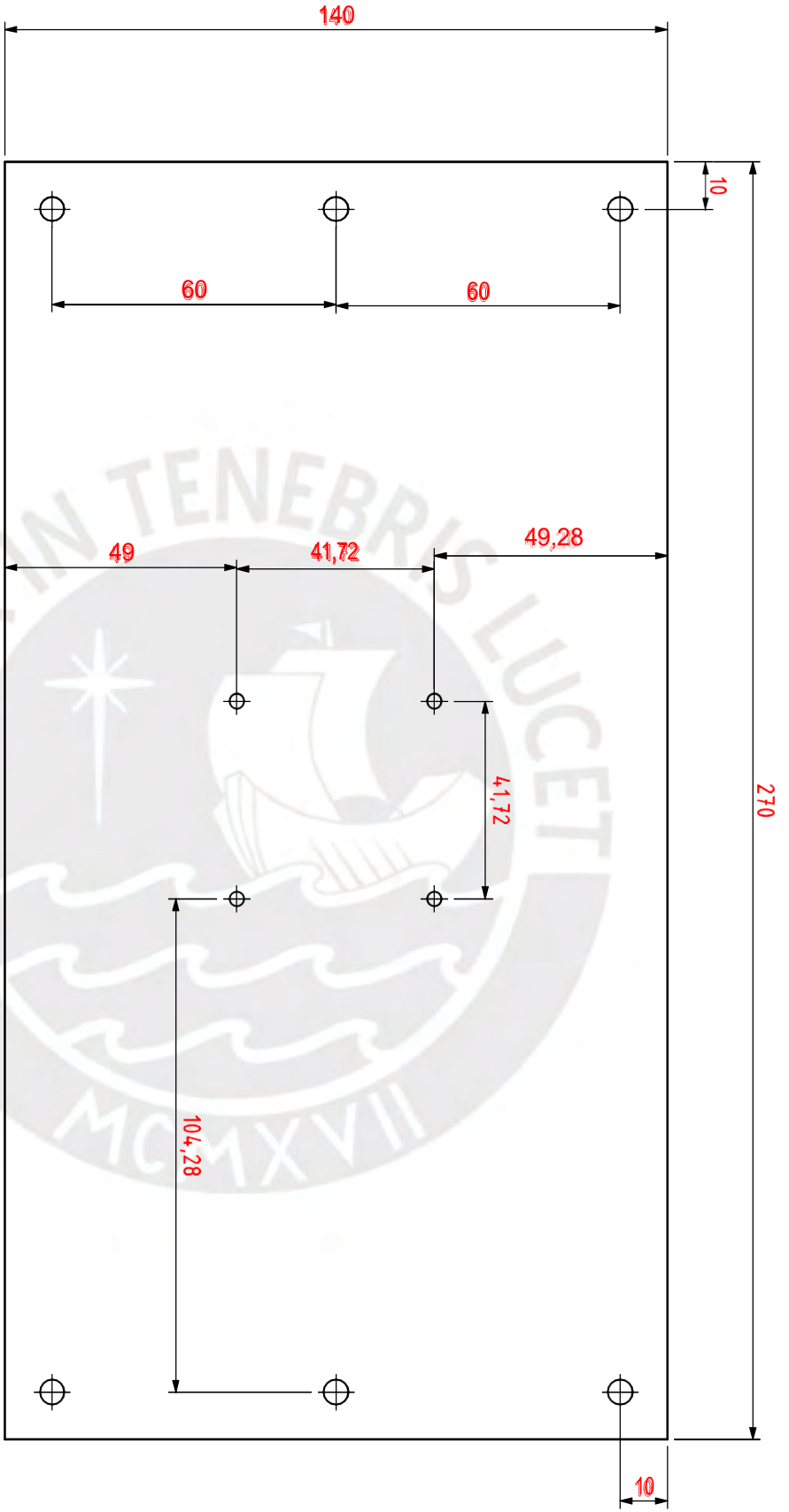
PLANCHA DE ALUMINIO 2MM

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA -		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	- - HORARIO	ESCALA
		FECHA:
REVISADO POR:		LÁMINA:

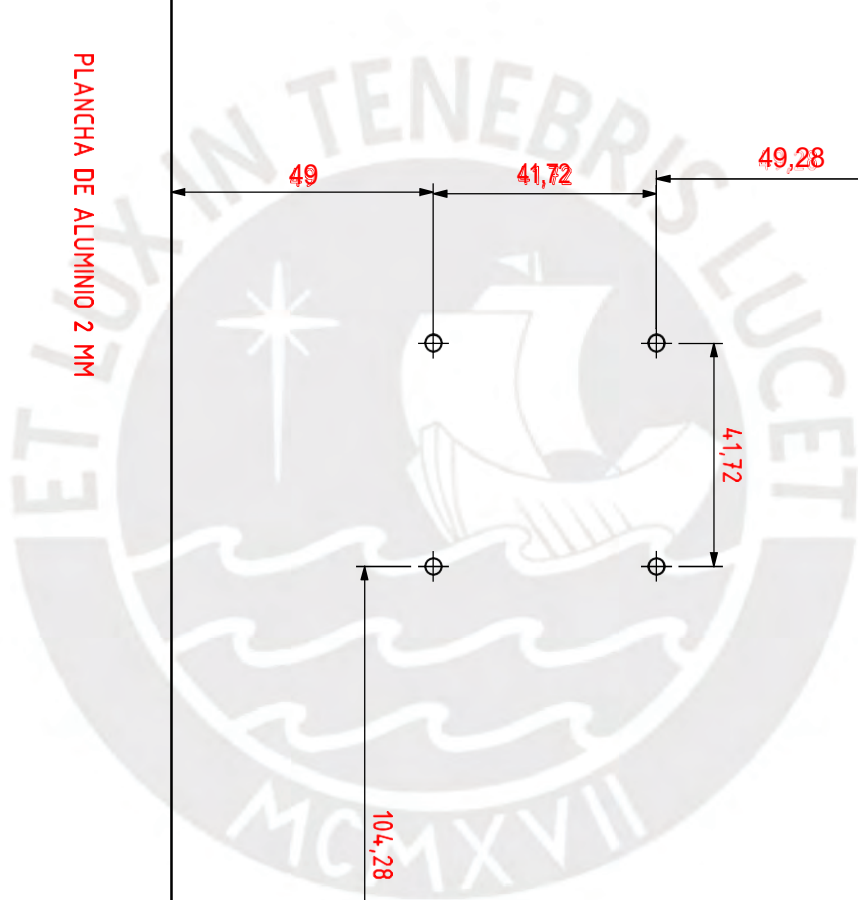



PLANCHA DE ALUMINIO 2MM

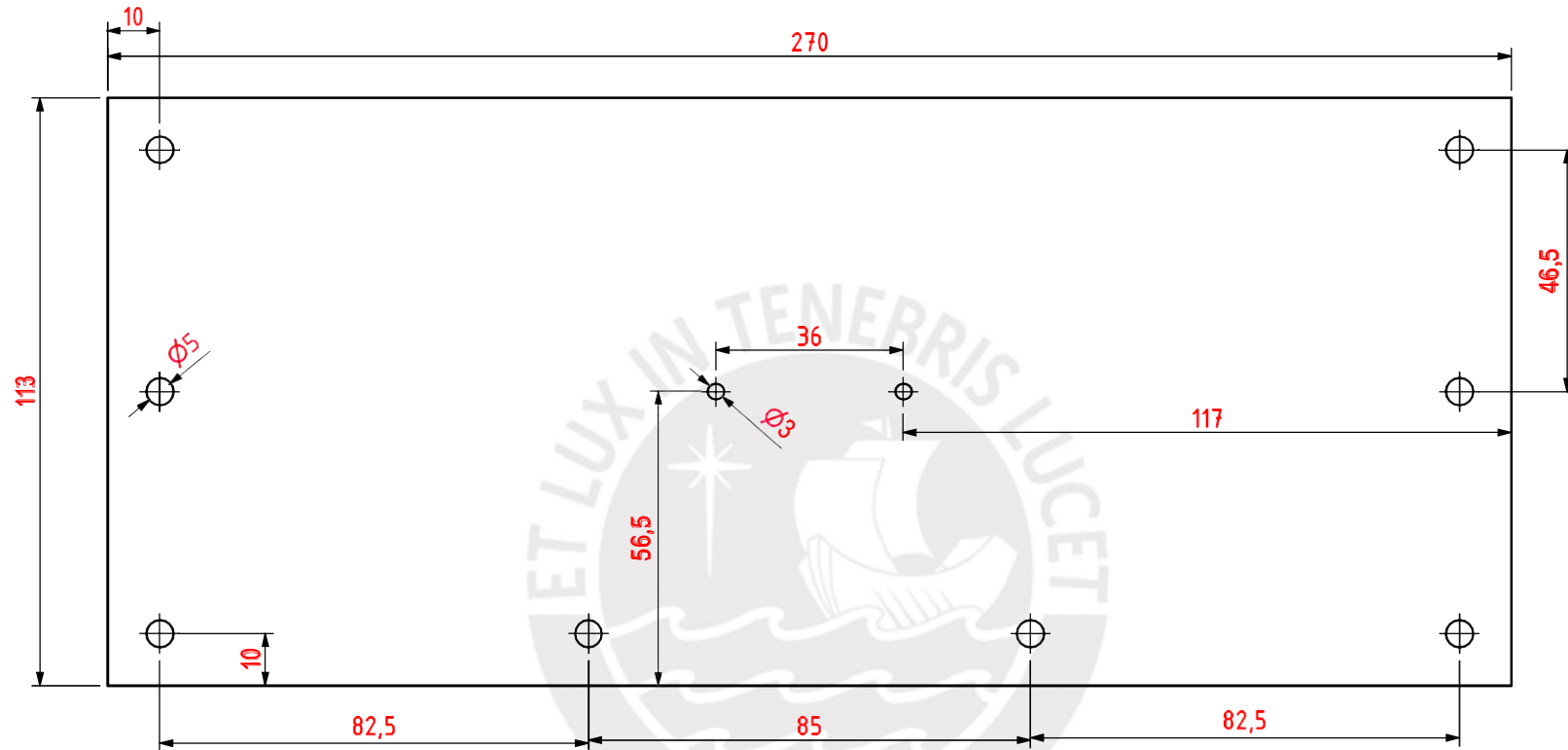
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ		
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA -		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	- - HORARIO	ESCALA
		FECHA:
REVISADO POR:		LÁMINA:



PLANCHA DE ALUMINIO 2 MM

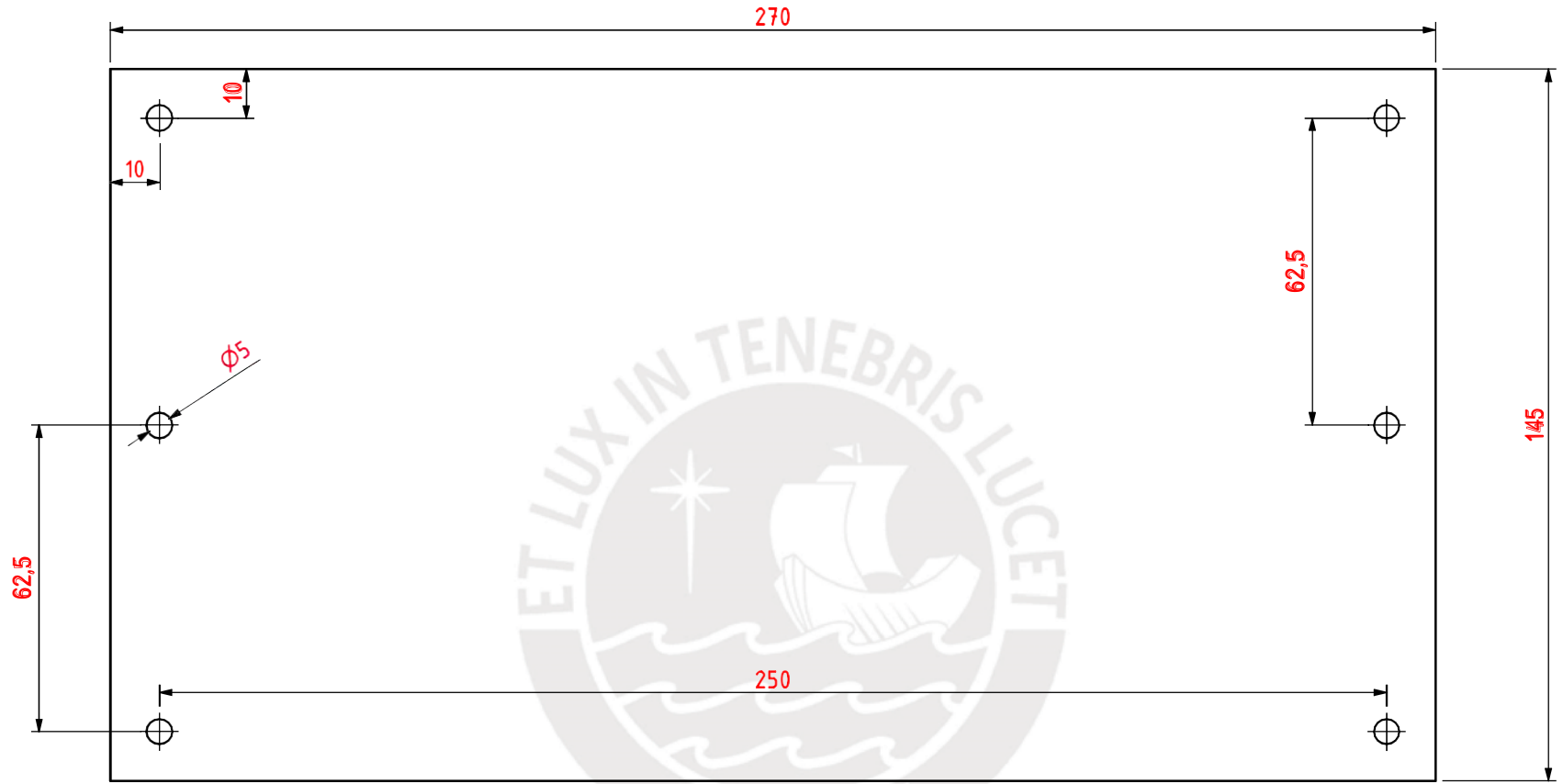


MÉTODO DE PROYECCIÓN 		PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA -	
REVISADO POR:		- HORARIO	
ESCALA		FECHA:	
LÁMINA:		LÁMINA:	



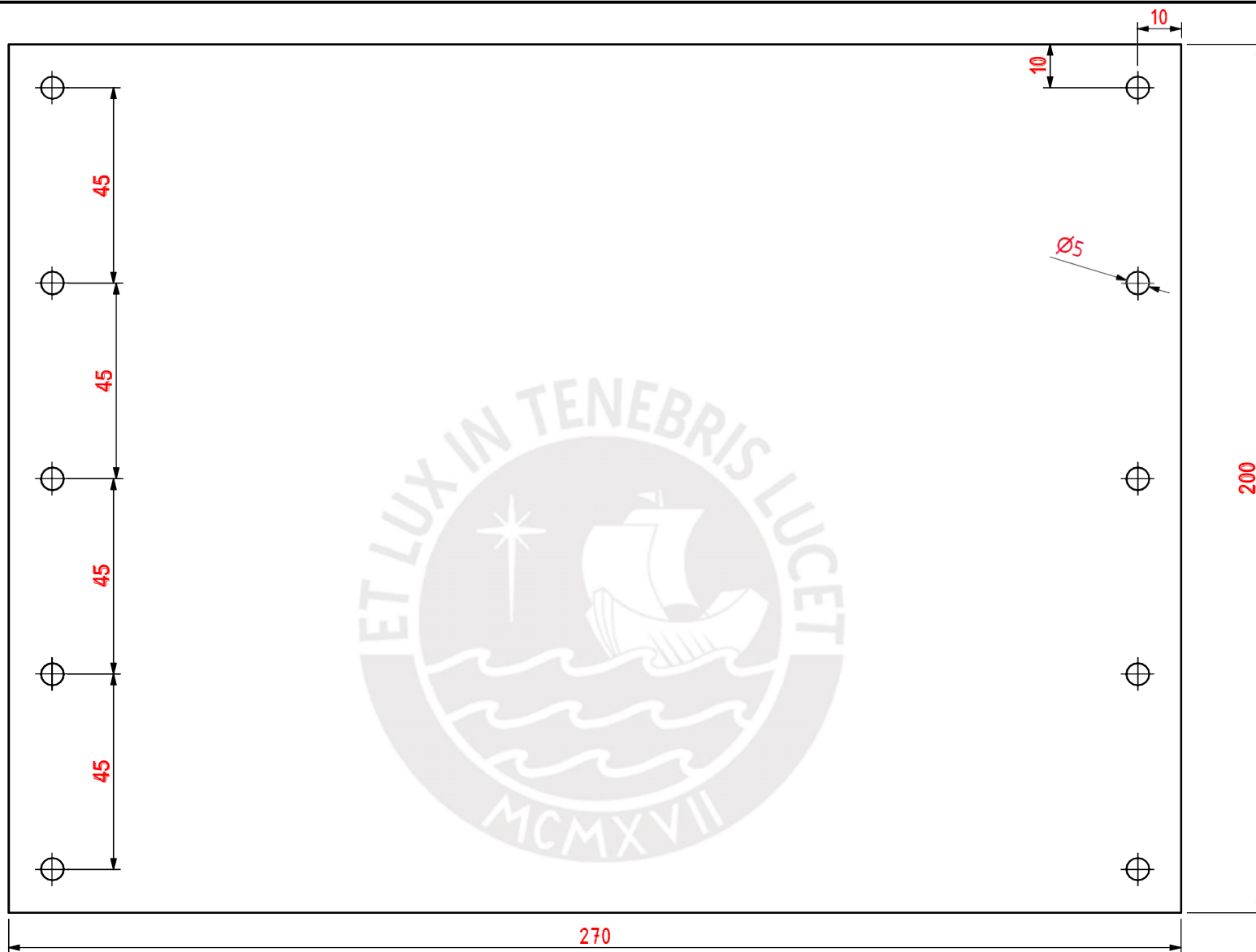
PLANCHA DE ALUMINIO 2MM

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA -		
MÉTODO DE PROYECCIÓN	- - HORARIO	ESCALA
		
		FECHA:
REVISADO POR:		LÁMINA:



PLANCHA DE ALUMINIO 2MM

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA -		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	- - HORARIO	ESCALA
		FECHA:
REVISADO POR:		LÁMINA:



PLANCHA DE ALUMINIO 2MM

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA -		
MÉTODO DE PROYECCIÓN 	- - HORARIO	ESCALA
		FECHA:
REVISADO POR:		LÁMINA:

