

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**VEHÍCULO AUTÓNOMO DE SIEMBRA Y LABRADO PARA LA
AGRICULTURA ANDINA DEL PERÚ**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecatrónico

AUTOR:

Daniel Tomas Menacho Ordoñez

ASESOR:

Diego Eduardo Quiroz Velásquez

Lima, agosto, 2023

Informe de Similitud


Yo, Diego Eduardo Quiroz Velasquez, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado VEHÍCULO AUTÓNOMO DE SIEMBRA Y LABRADO PARA LA AGRICULTURA ANDINA DEL PERÚ del/de la autor(a)/ de los(as) autores(as)

Daniel Tomas Menacho Ordoñez,

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 7%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 13/09/2023.
- 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, 13 de Septiembre 2023

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

RESUMEN

La agricultura es una actividad milenaria realizada por diversas culturas para brindar sustento económico y alimenticio. De la misma manera que la humanidad se ha desarrollado debido a las innovaciones tecnológicas, la agricultura ha formado parte de este crecimiento. Actualmente, las industrias impulsan la agricultura de precisión, la cual emplea los avances tecnológicos para automatizar este proceso artesanal. Con ello se mejora la rentabilidad y precisión de la labor agrícola.

No obstante, este tipo de agricultura está enfocada en campos de cultivo dedicados a la industria. Por ende, la región de la sierra del Perú no emplea avances tecnológicos de esta magnitud, puesto que presenta una geografía abrupta y campos de cultivo reducidos (parcelas). En este trabajo de investigación se propone desarrollar un vehículo agrícola autónomo para actividades de sembrado y labrado en campos de cultivo de la sierra peruana.

El trabajo de investigación emplea la metodología de diseño mecatrónico VDI 2221, para el cual se desarrolló el estudio del estado de las tecnologías. Asimismo, se estableció los requerimientos de la propuesta solución y el diagrama de funciones de este. A partir de lo estudiado se propusieron soluciones para cada función del sistema mediante una matriz morfológica, con lo cual se propusieron tres conceptos solución que fueron contrastados mediante una evaluación técnica económica para determinar el concepto solución óptimo.

El desarrollo del concepto solución óptimo consta del diseño mecánico, electrónico y de control del sistema integrado. El diseño mecánico se compone de una estructura principal; un mecanismo de labrado con una herramienta para la creación de surcos en tierra suelta, un sistema de desplazamiento, dirección y suspensión del vehículo en terrenos con desniveles y pendientes máximas de 30°; y una estructura de almacenamiento de semillas con un mecanismo de siembra directa por grupos. Los mecanismos fueron validados con un factor de seguridad 1.5 como mínimo y un tiempo de recuperación en la suspensión de 3.2 s.

Por una parte, el diseño electrónico se realiza la selección de sensores para la autonomía; actuadores para el impulsar los mecanismos diseñados; sistema de comunicación; periféricos de interacción y seguridad; unidades de control para el procesamiento de algoritmos, y envío y recepción de señales; y fuentes de energía con sus respectivos reguladores. A partir de ello se obtiene un vehículo capaz de tener una autonomía de funcionamiento de 2.5 h con un factor de seguridad de 1.2. Por otra parte, en el diseño de control se desarrolla un algoritmo de autonomía, el cual realiza la labor agrícola en un entorno predeterminado. Los resultados de su funcionamiento se encuentran en validación. Finalmente, la sección de costos estima el valor monetario para la creación del sistema, este valor se mantiene por debajo del costo de los modelos industriales para vehículos autónomos destinados a la agricultura de precisión

Mi documento de tesis está dedicado a mis padres como muestra de agradecimiento a su esfuerzo de toda la vida, su apoyo incondicional y por permitirme soñar. Asimismo, agradezco a mis tíos, primos y mi hermano por siempre hacerme sentir que estoy en casa.

Este documento en su totalidad fue posible gracias a los conocimientos impartidos y la paciencia de mi asesor Diego Quiroz. El capítulo de VLP es el resultado de la experiencia más enriquecedora que he tenido por parte de mi mentor y amigo Miguel Chávez en TU Delft.

Finalmente, agradezco con cariño a las personas que creyeron en mí, que son parte de mi familia y no permitieron que me rinda Sami, Guille, Yerson, Yatz, Mark, Isis, Cynthia y Marchi. Con la misma estima agradezco a mis amigos de la universidad Dari, Luis, Renzo, Enzo, Fio y Diego, por las risas y la coincidencia en querer hacer algo diferente.

INDICE DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	i
INDICE DE TABLAS	vi
INDICE DE FIGURAS.....	viii
INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO 1: IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMÁTICA	16
1.1 Problemática	16
1.2 Propuesta Solución.....	18
1.3 Objetivos.....	19
1.3.1 Objetivo General.....	19
1.3.3 Objetivo Específico del Trabajo de Tesis	19
1.4 Metodología del Trabajo.....	20
1.5 Alcance del Trabajo	20
CAPÍTULO 2: ESTADO DE LAS TECNOLOGIAS	21
2.1 Sistema Integrado de Vehículos Autónomo en Agricultura	21
2.2 Subsistema de Labranza.....	24
2.3 Subsistema Móvil	27
2.4 Subsistema de Siembra	30
CAPÍTULO 3: DISEÑO CONCEPTUAL.....	33
3.1 Lista de Requerimientos	33
3.2. Estructura de Funciones.....	37
3.3 Matriz Morfológica	39
3.4 Concepto Solución Óptimo	43
CAPÍTULO 4: DISEÑO MECÁNICO DEL SISTEMA	46
4.1 Diseño de la estructura de soporte del vehículo.....	46
4.2 Diseño de la estructura de dirección y amortiguación	48
4.2.1 Diseño del acople rueda - motor 1	48
4.2.2 Diseño del acople motor 2 - grado de libertad 1	55
4.2.3 Diseño del mecanismo de suspensión.....	59
4.3 Diseño del distribuidor de semillas.....	65
4.3.1 Diseño de la estructura de almacenamiento de semillas.....	65
4.3.2 Diseño de acople motor - rotor de distribución	67

4.4	Diseño de la herramienta de labrado	70
4.4.1	Diseño del mecanismo de actuación	73
4.5	Listado de planos mecánicos	75
CAPÍTULO 5: DISEÑO ELECTRÓNICO DEL SISTEMA.....		77
5.1	Selección de componentes electrónicos.....	77
5.1.1	Selección de sensores para la navegación autónoma.....	77
5.1.2	Selección de antenas de comunicación	82
5.1.3	Selección de periféricos de interacción y comunicación	84
5.1.4	Selección de unidades de control.....	86
5.1.5	Cálculo del consumo energético y selección de baterías	90
5.2	Distribución de componentes en la carcasa principal	94
5.3	Diagramas esquemáticos.....	97
CAPÍTULO 6: DISEÑO DE LA ETAPA DE CONTROL		99
6.1	Desarrollo de la interfaz.....	99
6.1.1	Inicialización del sistema y lógica ingreso de parámetros.....	100
6.1.2	Protocolo de comunicación.....	101
6.2	Desplazamiento autónomo.....	103
6.2.1	Estimación de la posición con el LiDAR e IMU	104
6.2.2	Estimación de obstáculos y límites del campo agrícola.....	105
6.2.3	Diseño del control de desplazamiento	106
6.3	Diseño del control de la profundidad de perforación.....	108
6.4	Diseño del control del distanciamiento entre semillas.....	110
6.5	Proceso general de la lógica de control del sistema.....	112
CAPITULO 7: IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO		114
7.1	Visible Light Positioning	114
7.2	Transmisor	116
7.3	Receptor	120
7.4	Localización.....	122
CAPITULO 8: ANÁLISIS DE COSTOS		127
8.1	Costo de componentes mecánicos y electrónicos	127
8.2	Costo de diseño y fabricación	129
8.3	Costo total.....	130
CONCLUSIONES		131
BIBLIOGRAFIA		133

ANEXOS 139

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1: Comparación de sistemas integrados actuales	24
Tabla 2.2: Comparación de subsistemas de labranza actuales	27
Tabla 2.3: Comparación de subsistemas de móviles actuales	30
Tabla 2.4: Comparación de subsistemas de siembra actuales	32
Tabla 3.1: Matriz morfológica subsistema móvil	40
Tabla 3.2: Matriz morfológica subsistema labrado	41
Tabla 3.3: Matriz morfológica subsistema sembrado	42
Tabla 3.4: Matriz morfológica sistema general.....	43
Tabla 4.1: Selección de ruedas todoterreno	49
Tabla 4.2: Selección de motor para la rueda	51
Tabla 4.3: Selección de motor para el segundo grado de libertad	55
Tabla 4.4: Selección de motor del distribuidor de semillas	68
Tabla 4.5: Selección del actuador lineal del sistema de labrado	73
Tabla 4.6: Plano de los componentes mecánicos	75
Tabla 5.1: Selección de cámara de profundidad	79
Tabla 5.2: Selección de LiDAR	80
Tabla 5.3: Selección del sensor inercial.....	81
Tabla 5.4: Selección del sensor inercial	84
Tabla 5.5: Selección del puente H RoboClaw	85
Tabla 5.6: Selección de Circulina	86
Tabla 5.7: Selección de MOSFET	86

Tabla 5.8: Selección de la unidad de control principal	88
Tabla 5.9: Selección de la unidad de control secundario	89
Tabla 5.10: Selección de Transceptor	90
Tabla 5.11: Consumo de energía del nivel de control.....	91
Tabla 5.12: Consumo de energía del nivel de actuadores	92
Tabla 5.13: Selección de botones.....	92
Tabla 5.14: Selección de reguladores.....	93
Tabla 5.15: Selección de relé	94
Tabla 7.1: Permutación de los colores para la grilla	119
Tabla7.2: Rendimiento de los algoritmos de clasificación	124
Tabla 8.1: Costos de materia prima.....	128
Tabla 8.2: Costos de componentes mecánicos	128
Tabla 8.3: Costos de componentes electrónicos	129
Tabla 8.4: Costos de diseño 1	129
Tabla 8.5: Costos de fabricación.....	130
Tabla 8.6: Costos total del sistema integrado	130

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1: Porcentaje de empleo agrícola, forestal y pesquero del total de empleos	17
Figura 1.2: Trastornos musculoesqueléticos	18
Figura 1.3: Modelo de tractor autónomo Case IH.....	19
Figura 2.1: Esquema de un actual vehículo autónomo para aplicaciones agrícolas ..	22
Figura 2.2: Modelo de tractor autónomo Case IH.....	22
Figura 2.3: Distribución del hardware utilizado en el SHERPAL HL.....	23
Figura 2.4: Dimensiones de dos variantes de Chaquitacla.....	25
Figura 2.5: Estructura del arado de palo	25
Figura 2.6: Maquinaria con arreglo de discos DUCAT-GOLD.....	26
Figura 2.7: Modelos de herramientas en forma de flecha	26
Figura 2.8: Sistema Akerman para 2 ruedas y 4 ruedas.....	28
Figura 2.9: Movimiento de un robot omnidireccional	28
Figura 2.10: Vista frontal del Rocker-Bogie.....	29
Figura 2.11: Urban II, robot de rescate	29
Figura 2.12: Voleadora manual, Abonadora Sembradora 12 K.....	31
Figura 2.13: Sembradora neumática, izquierda. Sembradora mecánica, derecha.....	31
Figura 3.1: Distribución del campo de cultivo, medidas en cm	34
Figura 3.2: Estructura de funciones	38
Figura 3.3: Diseño del concepto solución óptimo en Inventor: a) Vista isométrica, b) Vista frontal, c) Vista de perfil, d) Vista horizontal.....	44
Figura 3.4: Concepto solución óptimo operando en campos de cultivo del Valle del Mantaro	44

Figura 3.5: Diagrama de bloques de la solución óptima.....	45
Figura 4.1: Dimensiones de la estructura de soporte	47
Figura 4.2: Distribución de grupos generales	48
Figura 4.3: Ensamble del motor M1 al eje de transmisión E1	52
Figura 4.4: Ensamble motor M1 – Eje de transmisión E1 – Rueda.....	52
Figura 4.5: Simulación: A. Esfuerzo equivalente, B. Factor de seguridad, C. Presión de contacto, D. Deformación total	53
Figura 4.6: A. Piezas con chaflanes para la soldadura, B. Eje soldado y pulido	54
Figura 4.7: Ensamble del motor M1 a su carcasa de protección.....	54
Figura 4.8: Vistas isométricas del ensamble rueda-carcasa-motor	54
Figura 4.9: Ensamble de la base del rodamiento	56
Figura 4.10: Simulación de las fuerzas cortantes en las juntas de soldadura: A. Externa, B. Interna.....	56
Figura 4.11: Detalle del ensamble de rodamiento.....	57
Figura 4.12: Vistas isométricas del ensamble hasta el segundo grado de libertad	57
Figura 4.13: Parámetros iniciales de la simulación del acople motor 2 – grado de libertad 1: A. vista superior, B. vista inferior.....	58
Figura 4.14: Resultados de la simulación: A. deformación total, B. esfuerzo equivalente, C. esfuerzo equivalente en C2, D. factor de seguridad.....	59
Figura 4.15: Ensamble segundo grado de libertad – sistema de suspensión.....	60
Figura 4.16: Detalle del ensamble E2-B1-B2-C5	60
Figura 4.17: Detalle del ensamble B1-E4-B2	60
Figura 4.18: Ensamble de las bielas con la estructura principal	61
Figura 4.19: Detalle del ensamble E6-B1-Estructura principal	61
Figura 4.20: Simulación del funcionamiento del amortiguador.....	62

Figura 4.21: Ensamble del mecanismo de suspensión	63
Figura 4.22: Funcionamiento del sistema de suspensión	63
Figura 4.23: Vista isométricas del ensamble de la estructura principal al subsistema móvil	64
Figura 4.24: Resultados de la simulación: A. deformación total, B. factor de seguridad	64
Figura 4.25: Análisis de las frecuencias de resonancia.....	65
Figura 4.26: Vista isométrica, frontal, perfil y superior de la estructura de almacenamiento de semillas.....	66
Figura 4.27: Vista isométrica, frontal, perfil y superior de la estructura de almacenamiento de semillas.....	66
Figura 4.28: Disco difusor de semillas.....	67
Figura 4.29: Ensamble del motor y rotor de distribución de semillas	69
Figura 4.30: Ensamble del subsistema de sembrado a la estructura principal	69
Figura 4.31: Vista isométrica del ensamble del subsistema de sembrado a la estructura principal.....	69
Figura 4.32: Herramienta de labrado	70
Figura 4.33: Ensamble del pivote 1 herramienta de labrado.....	71
Figura 4.34: Ensamble del pivote 2 herramienta de labrado.....	71
Figura 4.35: Vista isométrica de la herramienta de labrado.....	72
Figura 4.36: A. Parámetros de la simulación. Resultados de la simulación: B. deformación total, C. esfuerzo equivalente, D. factor de seguridad	72
Figura 4.37: Ensamble del mecanismo de la herramienta de labrado	74
Figura 4.38: Funcionamiento del mecanismo de labrado	74
Figura 4.39: Vista isométrico del ensamble final de los tres subsistemas	75
Figura 5.1: Patrón de radio frecuencia de la antena AMO-5G13	82

Figura 5.2: Patrón de radio frecuencia de la antena AM-5G16-120	83
Figura 5.3: Patrón de radio frecuencia de la antena AM-5G16-120	83
Figura 5.4: Puente H RoboClaw 2x7A	85
Figura 5.5: Circulina Model FB2PST	86
Figura 5.6: Transceptor CAN MCP2551 de alta velocidad	90
Figura 5.7: Botones 199-HW1F2F10QDG120V	92
Figura 5.8: Reguladores: A. UBEC, B. RED60-48D12W, C. 60DAW4_2415S1.6, D. FED60-24S12W	93
Figura 5.9: Relé G9TA-K1AP DC12.....	94
Figura 5.10: Diagrama de conexiones.....	95
Figura 5.11: Distribución de los componentes electrónicos	96
Figura 5.12: Estructura principal del sistema integrado	96
Figura 5.13: Diagrama esquemático del sistema.....	98
Figura 6.1: Interfaz de envío de datos.....	100
Figura 6.2: Interfaz de visualización de datos.....	100
Figura 6.3: Diagrama de flujo de la función A. Introducir parámetros de inicialización, B. Introducir parámetros de teleoperación	101
Figura 6.4: Diagrama de flujo de la función A. Enviar trama, B. Recibir trama	102
Figura 6.5: Diagrama de flujo de la inicialización del sistema	103
Figura 6.6: Aplicación de filtro de partículas en la agricultura.....	105
Figura 6.7: Procesamiento de imagen para navegación	106
Figura 6.8: Opción de control de los motores seleccionados.....	107
Figura 6.9: Lazo de control del desplazamiento del vehículo.....	107
Figura 6.10: Diagrama de flujo del movimiento autónomo.....	108

Figura 6.11: Lazo de control del subsistema de labrado	109
Figura 6.12: Diagrama de flujo de la función A. Labrado activado, B. Labrado desactivado	110
Figura 6.13: Lazo de control del subsistema de sembrado	111
Figura 6.14: Diagrama de flujo del subsistema de sembrado	112
Figura 6.15: Diagrama de flujo del sistema integrado	113
Figura 7.1: Motivación del uso de <i>visible light positioning</i>	116
Figura 7.2: Orden de los componentes del transmisor	116
Figura 7.3: El comportamiento de la luz.....	118
Figura 7.4: Muestras de las grillas manufacturadas	119
Figura 7.5: Transmisor en funcionamiento	120
Figura 7.6: Disposición de los polarizadores sobre los sensores de color	120
Figura 7.7: Diagrama de conexiones del receptor.....	121
Figura 7.8: Disposición de componentes en el receptor	122
Figura 7.9: Plano HS de los patrones de colores seleccionados	123
Figura 7.10: Variantes de los algoritmos de clasificación KNN y SVM.....	124
Figura 7.11: KNN 6 vecinos, <i>weights = uniform</i>	125
Figura 7.12: Distancia Euclidiana de los centroides de grupos de colores	126
Figura 7.13: Grilla final del sistema.....	126

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia de la humanidad, la agricultura es considerada como una actividad sostenible desarrollada por la gran mayoría de las civilizaciones. En el Perú, la agricultura significó una actividad que impulso el crecimiento económico del país en la década de los 50. A pesar de ello, en actualidad esta labor ha perdido su importancia económica e interés de la población para su ejecución; esto se debe a problemas de salud, sociales, económicos y geográficos. En específico el sector agrícola de la serranía del Perú ha sido la más afectada.

La agricultura de precisión exhibe modelos de robots móviles industriales que realizan las actividades agrícolas de sembrado, labrado, deshierbado y cosecha de manera semiautónoma o autónoma. Sin embargo, esta tecnología es comúnmente orientada para campos de cultivo industriales en regiones extensamente planas. Lo cual no se asemeja a las condiciones geográficas de la agricultura artesanal realizada en la serranía del Perú.

Por tal motivo, se propone el diseño de un vehículo autónomo capaz de realizar las labores agrícolas de labrado y sembrado en campos de cultivo de la serranía del Perú. Para ello, el robot presenta una morfología adecuada para las condiciones geográficas del espacio de trabajo.

El trabajo de investigación realizado se centra en la navegación autónoma del vehículo para desplazarse en campos de cultivo, asimismo, en el dominio de control se enfoca en la ejecución de manera precisa de las tareas de sembrado y labrado. Lo anteriormente mencionado es respaldado por el desarrollo de los dominios de energía,

mecánico y comunicación. La estructuración del trabajo de investigación se divide en capítulos los cuales son ordenados de la siguiente manera:

En el primer capítulo, titulado antecedentes, se expone la problemática relacionada a la agricultura tradicional realizada en la sierra del Perú; esta es abordada en el ámbito social, salud, geográfico, económico y tecnológico. A partir del análisis, se plantean los objetivos para el desarrollo del trabajo de investigación, el alcance de la propuesta y la metodología de trabajo.

El segundo capítulo señalado como estado de las tecnologías, se muestra las herramientas y tecnologías actuales que brindan una solución a las tareas que requiere realizar la propuesta solución. Por tal motivo, este capítulo se subdivide en los subsistemas que requiere el vehículo.

En el tercer capítulo, denominado diseño conceptual, se establecen los requerimientos de la propuesta solución. Asimismo, se lleva a cabo la estructura de funciones mediante los dominios para definir las funciones parciales del robot. Con ello, se plantean soluciones para la matriz morfológica, con lo cual se establecen tres conceptos solución. La elección del concepto solución óptimo es realizado por medio de una evaluación técnica económica.

El cuarto capítulo titulado diseño mecánico se describe el proceso del diseño de los subsistemas de sembrado, labrado y móvil. Para ello, el diseño cuenta con cálculos mecánicos estáticos y dinámicos para determinar los valores de torque de los motores; cálculos de resistencia mecánica para las piezas diseñadas, uniones soldadas, y estructura; y simulaciones de resistencia y de suspensión para validar el funcionamiento del mecanismo de suspensión del móvil. Asimismo, en este capítulo se determina los materiales y procesos de manufactura de las piezas diseñadas juntos con sus planos de despiece y ensamble.

En el quinto capítulo se aborda el diseño electrónico del sistema; donde se seleccionan los sensores de autonomía (cámara de profundidad, LiDAR y sensor inercial); un dispositivo de comunicación conformado por un antena omnidireccional, estación base y FoE; integrados para el control y comunicación con los actuadores, en este caso un

Puente H y un transceptor de CAN; periféricos de interacción tales como botones y circulinas; y bancos de batería para los niveles de control y actuadores acompañado por reguladores de voltaje, relé de estado y BMS. Además, este capítulo se compone del diseño de conexiones del sistema general, y una tarjeta electrónica que agrupa la unidad de control secundaria y los integrados de conectividad. Por último, el diseño electrónico culmina con la selección de estructuras capaces de brindar protección IP65 a los componentes electrónicos y su cableado.

El sexto capítulo nombrado diseño de control se desarrolla los lazos de control de los subsistemas establecidos previamente. En el subsistema móvil se realiza el diseño del algoritmo de autonomía, el cual determina los comandos para accionar los motores encargados del desplazamiento y dirección. El lazo de control del subsistema de sembrado mediante un control proporcional establece la velocidad de rotación del motor de sembrado con la finalidad de conservar la distancia entre semillas. Por otra parte, el subsistema de labrado presenta un lazo abierto de control, en el cual la planta culmina su proceso con el interruptor de fin de carga del actuador lineal. Al finalizar el capítulo se muestra un diagrama de flujo general del sistema.

Finalmente, el séptimo capítulo enfocado en el análisis de costos se desarrolla para determinar la rentabilidad de la propuesta mecatrónica. En este apartado se analiza los costos de fabricación, diseño, y componentes electrónico y mecánicos. El capítulo termina con un resumen del costo total del sistema y el análisis de la rentabilidad.

CAPÍTULO 1

IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMÁTICA

En este capítulo se presenta la descripción de la problemática relacionada al desarrollo de actividades agrícolas. Luego, a partir de esta se plantea una propuesta solución para resolver la problemática descrita. De la misma manera, se formula el objetivo general y específicos para la realización de la propuesta solución. Asimismo, se describe la metodología a seguir y se delimita el alcance del proyecto.

1.1 Problemática

La problemática del presente proyecto es abordada desde diversos enfoques, los cuales son: económico, social y salud ocupacional

Económico

La agricultura es una actividad milenaria que ha permitido el desarrollo de muchas civilizaciones; por ello, esta es considerada como la fuente principal de alimentos en todo el mundo, así como de materias primas para la industria y la medicina (Benos, Tsaopoulos y Bochtis, 2020). Para el Perú, la actividad agrícola significó, hasta 1950, un sector clave para la economía peruana y podría ser descrito como el sector que lideró el crecimiento (Escobal,1993). No obstante, la importancia económica de la agricultura en el Perú ha decrecido notablemente en la última mitad del siglo; por ejemplo, en el 2017, el sector agrícola solo contribuía con el 9% del PBI y representaba el 24,7% de la población económicamente activa (Velazco y Pinilla, 2017).

Asimismo, en las pasadas tres décadas, el número de personas pertenecientes a la agricultura y horticultura han decrecido rápidamente (Fitch *et al.*, 2015). En efecto, esta disminución de trabajadores en el ámbito de la agricultura, silvicultura y pesca se ve reflejada en la estadística mostrada en la Figura 1.1, obtenida por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO); en el año 2000 al 2019 todos los continentes han tenido una reducción en el número de trabajadores en las áreas anteriormente mencionadas respecto al número de empleos en cada región.

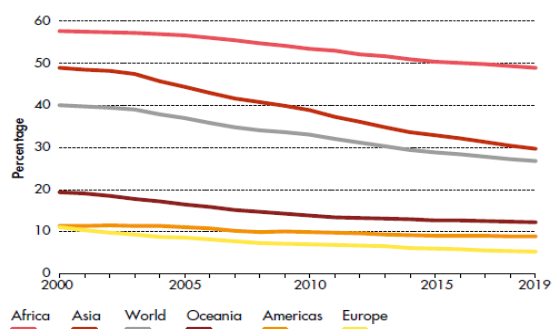


Figura 1.1: Porcentaje de empleo agrícola, forestal y pesquero del total de empleos (FAO, 2020)

En el Perú del 2019, el número de empleos relacionados a la agricultura, pesquería y forestal tiene alrededor de 4 995 000 trabajadores, lo cual representa el 27.4% de empleados del total de trabajadores (FAO, 2020). Sin embargo, en 1960, más de la mitad de la población peruana económicamente activa se dedicaba a la agricultura (Velazco y Pinilla, 2017). Por lo tanto, tener acceso a tierras de cultivo significaba un importante suministro de ingresos económicos, sin embargo, parte de la sociedad peruana tuvo que abandonar la agricultura por conflictos sociales que atravesó el Perú.

Social

Un recuento de los sucesos que afectaron a la agricultura inicia en la década de los 60s. En esta época existieron un gran número de cambios tanto económicos, sociales y políticos; en el cual la agricultura se vio relegada por los combustibles y los productos de manufactura (Velazco y Pinilla, 2017). Las políticas agrícolas, el modelo de industrialización por sustitución de importaciones (1960-1975) y la reforma agraria (1969-1979), fueron extremadamente basados en favor del consumidor urbano. Lo cual significó una insuficiente paga a los agricultores por sus cultivos, frente a esta situación el sector afectado disminuye su intención de siembra de los cultivos para las siguientes campañas (MIDAGRI, 2010). La década de los 80s estuvo marcada por una

contrarreforma que consistió en la desaparición de las formas asociativas de producción; además, esta problemática estuvo acompañada por el inicio del conflicto bélico interno que afectó inicialmente a las áreas rurales (Velazco y Pinilla, 2017). Como resultado un sector de las familias dedicadas a la agricultura del interior del país tuvo que abandonar sus campos de cultivo para dirigirse a las ciudades principales con el fin de tener un mejor resguardo de sus vidas.

Salud Ocupacional

La alta demanda física, posturas incómodas, estar de pie y arrodillado por mucho tiempo, agacharse e inclinarse pueden producir trastornos musculoesqueléticos (*musculoskeletal disorders*, MSD); por ello el dolor lumbar y lesiones en las extremidades superiores es frecuentemente diagnosticado en los agricultores (Naeini *et al.*, 2014). En la Figura 1.2 se muestra la distribución del número de ocurrencias de trastornos musculoesqueléticos en función de la tarea agrícola realizada. Del cual se obtiene que la siembra, excavación y deshierbe representan las actividades con menor porcentaje de obtener una dolencia musculoesquelética con un 3.7% cada una; no obstante, estas actividades son las más comunes en la pequeña agricultura.

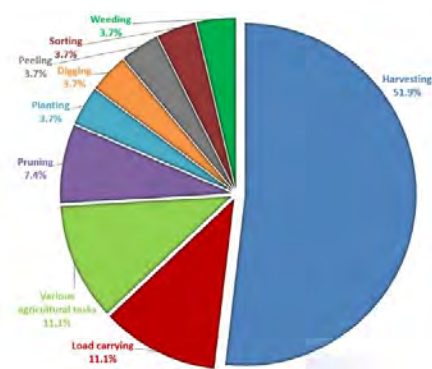


Figura 1.2: Trastornos musculoesqueléticos (Benos, Tsaopoulos y Bochtis, 2020)

1.2 Propuesta Solución

El trabajo de tesis tiene como propuesta solución el desarrollo de un vehículo agricultor que realice las labores agrícolas de sembrado y labrado del suelo, en la Figura 1.3 se muestra un modelo comercial relacionado a la propuesta solución. Este sistema tiene como entorno de trabajo la geografía de los campos de cultivo de la serranía del Perú, con pendientes máximas de 30°. La propuesta solución cuenta con

un sistema de sembrado de semillas de grano fino (quinua), las cuales serán depositadas en los surcos creados por el sistema de labrado; este sistema perfora el suelo a una profundidad máxima de 10 cm. En relación de la automatización del proceso, el uso de esta propuesta de solución brinda los siguientes beneficios: la eficiencia en el proceso de sembrado debido al ahorro de cantidad semillas por metro cuadrado de campo de cultivo, mitiga las enfermedades ocupacionales relacionadas a las actividades de sembrado y labrado en una agricultura artesanal, contribuye en la reducción de costos de mano de obra, e impulsa el desarrollo de la agricultura de precisión en la sierranía del Perú.



Figura 1.3: Modelo de tractor autónomo Case IH (Case IH, 2017)

1.3 Objetivos

El proyecto presenta un objetivo general del cual surgen ocho objetivos específicos para lograr el cumplimiento del objetivo general.

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar un vehículo agrícola autónomo para actividades de sembrado y labrado en campos de cultivo de la sierra peruana.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analizar las tecnologías relacionadas a sistemas de vehículos agrícolas, sembradoras y herramientas generadoras de surcos en un estado del arte.
- Realizar una lista de requerimientos con las exigencias y deseos para el diseño conceptual del sistema.
- Diseñar un vehículo capaz de desplazarse en superficies con pendientes máximas de 30° en la sierra peruana.

- Diseñar la estructura de perforación de suelo suelto para la creación de surcos en tierra de campos de cultivo.
- Diseñar el sistema de sembrado por grupo para semillas de grano fino.
- Diseñar la navegación autónoma para el desplazamiento del vehículo en un entorno conocido de una parcela de cultivo.
- Validar el funcionamiento de los subsistemas mediante la simulación de estos.
- Estimar el costo total del sistema de sembrado y labrado propuesto.

1.4 Metodología de Trabajo

La secuencia de pasos utilizados para la estructura del presente trabajo de tesis es reglamentada por la metodología de diseño mecatrónico VDI 2221 (VDI 2221, 1993). Asimismo, esta es complementada por la metodología VDI 2206, la cual menciona que el proceso de diseño debe ser iterativo (VDI 2206, 2002). La estructura de la metodología es descrita con mayor detalle en el Anexo A

1.5 Alcance del Trabajo

El presente trabajo de tesis tiene como alcance desarrollar un concepto solución de un vehículo agrícola para el sembrado de semillas de quinua y labrado de campos de cultivo en el Valle de Mantaro, Junín; para ello, la investigación de este sistema se basa en el estudio del estado de arte de las tecnologías existentes, previamente realizado. Asimismo, la elección del concepto solución óptimo es justificado mediante un análisis técnico-económico. Por otro lado, el sistema propuesto presenta las siguientes limitaciones: las labores agrícolas serán realizadas por un único vehículo y no una flota de estos; el labrado en tierra suelta sin pedregal; espacio de trabajo en campos de 200 m^2 con una pendiente máxima de 30° ; profundidad máxima de perforación de 10 cm; condiciones del espacio de trabajo ideales para el labrado y sembrado (humedad, temperatura y fertilidad del suelo); sistema de sembrado para semillas de grano fino; y no realizará otra tarea agrícola adicional al sembrado y labrado del suelo. Finalmente, la validación del trabajo de tesis será mediante simulaciones de los subsistemas.

CAPÍTULO 2

ESTADO DE LAS TECNOLOGÍAS

En este capítulo se presenta una revisión de sistemas comerciales y trabajos de investigación relacionados a la realización de labores agrícolas de manera autónoma. Asimismo, se presentan las tecnologías involucradas al subsistema móvil, labrado, sembrado. La información más detallada de las tecnologías se encuentra en Anexo A.

2.1 Sistema Integrado de Vehículos Autónomos en Agricultura

En esta sección se presentan tres sistemas integrados que brindan una solución general a la problemática del proyecto y una comparativa de sus características principales.

RHEA Project

Robotics and associated High-technologies and Equipment for Agriculture and forestry (RHEA) es un proyecto realizado por la Unión Europea. Su principal enfoque es llevar a cabo investigaciones para una nueva generación de vehículos agrícolas, con el fin de reducir la contaminación ambiental, mejorar la calidad y seguridad del cultivo, y reducir el costo de producción (Emmi *et al.*, 2014). Como resultado de las investigaciones, en el 2014, los investigadores presentaron la versión final de un vehículo autónomo para labores agrícolas, el cual fue un tractor CNH Boomer-3050 adaptado para convertirse en un vehículo autónomo. El desarrollo del proyecto se basó en obtener un vehículo modular, es decir, intercambiar accesorios para poder realizar tareas diferentes; esto se debe principalmente por la diversidad de tareas que se deben

realizar en la agricultura. Por ello, el sistema integrado fue dividido en dos partes mostradas en la Figura 2.1, los cuales son: el vehículo autónomo que es la parte mecánica que junto con la información obtenida por sus periféricos se encarga del desplazamiento autónomo del sistema; mientras que el implemento autónomo realiza de manera independiente la labor agrícola como sembrar, deshierbar, fumigar, labrar, cultivar, etc.

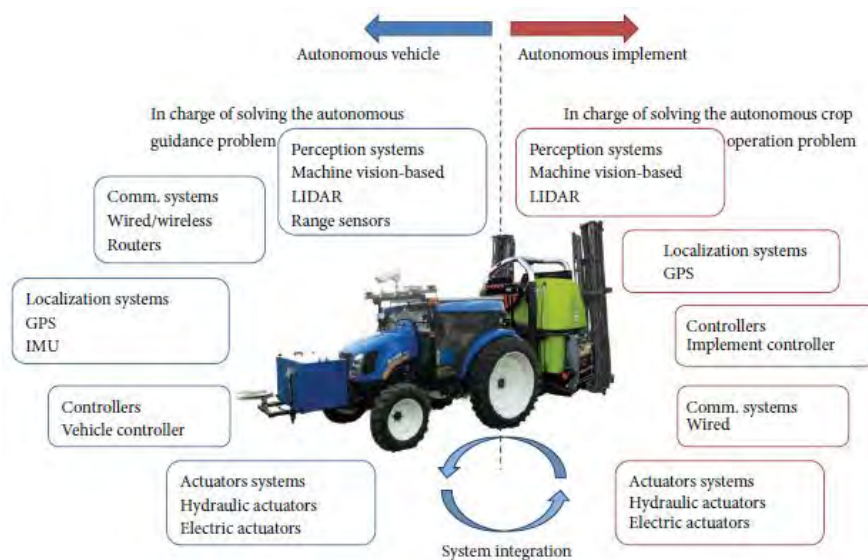


Figura 2.1: Esquema de un actual vehículo autónomo para aplicaciones agrícolas (Emmi *et al.*, 2014)

Autonomous Tractor Concept

Case IH es una empresa dedicada al desarrollo de maquinaria para la agricultura. En su labor de innovar en esta rama; la empresa presentó, en el 2016, su prototipo de un tractor autónomo elaborado en conjunto con la compañía ASI. El vehículo, mostrado en la Figura 2.2, es un tractor existente Case IH Magnum al que le incorporaron tecnología de ASI. Esta tecnología consiste en sensores infrarrojos, detector de metales, radar, Lidar y cámara de video; con la finalidad de detectar obstáculos estacionarios o en movimiento (Case IH, 2017).



Figura 2.2: Modelo de tractor autónomo Case IH (Case IH, 2017)

SHERPA HL

SHERPA HL es un vehículo autónomo con sistema dirección Ackerman, como se muestra en la Figura 2.3. Este fue desarrollado como parte del proyecto PANTHEON que tiene como objetivo desarrollar un sistema de Control de Supervisión y Adquisición de Data (SCADA) para realizar una agricultura de precisión en los huertos. Por tal motivo, el vehículo tiene como finalidad realizar las tareas de detección de frutos y pestes; por lo cual emplea como computadora principal un Intel NUC NF697 con un procesador Intel Core i7-8705G que por medio de leyes de control propuestas se ejecutan las acciones para ser realizadas (Carpio *et al.*, 2020).

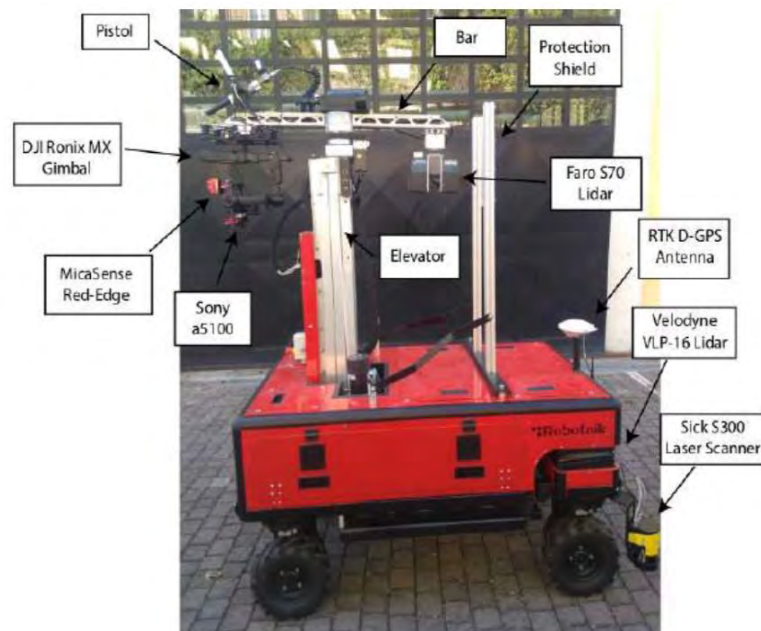





Figura 2.3: Distribución del hardware utilizado en el SHERPAL HL (Lamprecht y Ahlswede, 2020)

Comparativa de tecnologías

Los vehículos autónomos para agricultura revisados en esta sección tienen un nivel autonomía SAE 3 como mínimo. Los sensores más utilizados son el escáner laser, cámara y GPS. Respecto al sistema de dirección del vehículo, los sistemas integrados utilizan Ackerman. A continuación, en la Tabla 2.1 se muestra la comparativa de los sistemas integrados estudiados.

Tabla 2.1: Comparación de sistemas integrados actuales

			
	RHEA Project	Autonomous Tractor Concept	SHERPA HL
Uso	Experimental	Prototipo comercial	Experimental
Sistema de dirección	Ackermann	Ackermann	Ackermann
Vehículo	Tractor CNH Boomer-3050 adaptado	Tractor Case IH Magnum adaptado	Vehículo de 4 ruedas SHERPA HL
Computador	CompactRIO-9082 con FPGA	Quad Core 1.2 GHz con memoria RAM de 2 GB DDR3 de 32 bits	NUC NF697 con procesador Intel Core i7-8705G
Cámaras	1	No precisa	2
GPS	1	1	1
IMU	1	-	1
Escáner laser	1	1	2
Nivel de autonomía SAE	Nivel 4	Nivel 3	Nivel 4
Protocolos de comunicación	RS-232, ISO BUS y Ethernet	RS-232, Ethernet y CAN	-
Entorno de simulación	LabView	-	GAZEBO
Labor agrícola	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicación de herbicida • Aplicación de pesticidas • Eliminación de malezas 	<ul style="list-style-type: none"> • Labranza • Siembra 	<ul style="list-style-type: none"> • Detección de pestes • Detección de frutos

2.2 Subsistema de Labranza

En esta sección se describen cuatro herramientas, entre artesanales e industriales, para la labranza de tierra y una tabla comparativa.

Chaquitacla o Arado de Pie

Esta herramienta es tradicionalmente utilizada en el Perú, en la parte centro y sur de la sierranía, para las labores de labranza, siembra, aporque y cosecha. La Chaquitacla está diseñada para ser empleada en terrenos que presentan una pendiente mayor del 50% y lugares muy remotos (Galindez, 1981).

En la Figura 2.4 se aprecia dos variantes de la Chaquitacla, el cuerpo principal es madero cilíndrico con un mango en la parte superior para que el agricultor empuñe la herramienta, en la sección media baja se encuentra el apoyo de pie (“*taquillpo*”) con

el cual el agricultor ejerce la fuerza necesaria para que la reja o cuchilla pueda penetrar el suelo, 15 a 30 cm de profundidad, y extraer un prisma de tierra (Galindez, 1981).

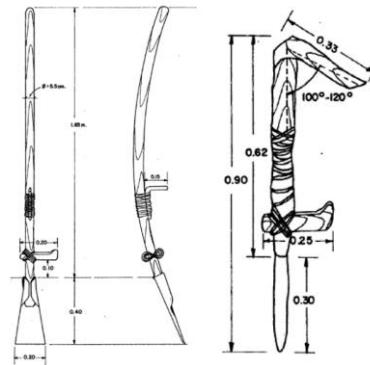


Figura 2.4: Dimensiones de dos variantes de Chaquitacla (Galindez, 1981)

Arado de Palo

El arado de palo es una herramienta que requiere de la tracción de un animal para su funcionamiento. Este implemento está diseñado para realizar labores como la creación de surcos para la siembra, preparación de la tierra, cosecha, etc. El arado de palo es recomendado en terrenos de baja pendiente, máximo 30° a 35° ; donde el acceso de maquinaria agrícola es dificultoso (Galindez, 1981).

La Figura 2.5 muestra la estructura del arado de palo. La clavija que se encuentra en la parte superior del timón se une con la yunta para poder transmitir la fuerza del animal a la parte inferior del arado; en donde se encuentra un manubrio denominado manquera, y la reja metálica que sirve para mover la tierra. El costo de la herramienta es de 1500 soles, el material primordial de la fabricación es madera y solo se usa acero para la reja; sin embargo, esto no impide que la herramienta sea liviana y fácil transportarla (Galindez, 1981).

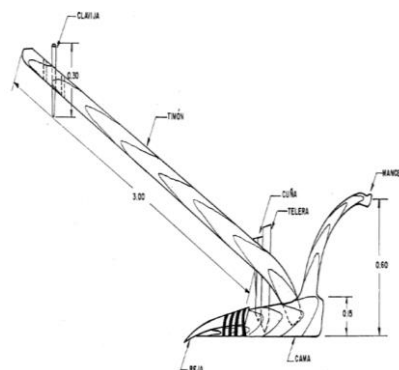


Figura 2.5: Estructura del arado de palo (Galindez, 1981)

Maquinaria Industrial con Discos

La maquinaria industrial en la agricultura está diseñada para trabajar en espacio planos y de fácil acceso. En este caso, mostrado en la Figura 2.6, se utiliza un arreglo de discos compactos para realizar las tareas de cultivo superficial y preparación de la tierra, a una profundidad de 14 cm. Los discos tienen una forma cóncava y están hechos de acero al boro endurecido; estos trabajan con un ángulo de ataque de 20° y entrada al suelo de 12° (Lozova Machinery, 2019); y son adecuados para suelos duros, secos y pedregosos.



Figura 2.6: Maquinaria con arreglo de discos DUCAT-GOLD (Lozova Machinery, 2019)

Maquinaria Industrial con Flechas

La forma de flecha de esta maquinaria, mostrada en la Figura 2.7, se debe a que en la punta se ubica un cincel para la perforación del suelo y en los laterales se ubican dos alas para poder ampliar el ancho del surco. Esta herramienta está hecha de acero al boro con dureza de 88 HRC, para perforar el suelo con una profundidad de 3 a 15 cm (Lozova Machinery, 2019).



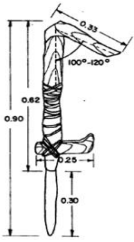
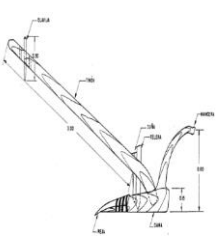


Figura 2.7: Modelos de herramientas en forma de flecha (Lozova Machinery, 2019)

Comparativa de tecnologías

Las tecnologías estudiadas en el subsistema de labranza son comúnmente utilizadas para la creación de surcos en suelos duros. Asimismo, las herramientas para la agricultura artesanal son fabricadas de hierro templado; por otro lado, las tecnologías

para la agricultura industrial emplean acero al boro. A continuación, en la Tabla 2.2 se muestra la comparativa de los subsistemas de labranza analizados.

Tabla 2.2: Comparación de subsistemas de labranza actuales

				
	Chaquitacla	Arado de palo	Maquinaria con discos	Maquinaria con flecha
Tracción	Manual	Animal	Maquinaria agrícola	Maquinaria agrícola
Agricultura	Artesanal	Artesanal	Industrial	Industrial
Geografía	Difícil acceso y pendiente mayor al 50%	Difícil acceso y pendiente máxima de 30° a 35°	Fácil acceso y plano	Fácil acceso y plano
Suelo	Variantes para suave y duro	Duro	Duro	Duro, secos y pedregosos
Material de la cuchilla	Fierro templado o hoja de muelle de suspensión	Fierro templado o hoja de muelle de suspensión	Acero al boro endurecido	Acero al boro 88 HRC
Forma de la cuchilla	Rectangular	Elíptica	Disco	Cinzel con dos alas laterales, flecha
Profundidad de perforación	15 – 30 cm	Mínima, depende del ángulo de succión	14 cm	3 – 15 cm
Angulo de ataque e ingreso al suelo	45° y 120°	Ingreso al suelo ligeramente debajo de 180°	20° y 12°	-
Labores agrícolas	<ul style="list-style-type: none"> • Labranza • Siembra • Cosecha 	<ul style="list-style-type: none"> • Creación de surcos 	<ul style="list-style-type: none"> • Cosecha • Preparación de tierra 	<ul style="list-style-type: none"> • Preparación de tierra

2.3 Subsistema Móvil

La sección del subsistema móvil desarrolla cuatro configuraciones para el direccionamiento y estructura del vehículo; y su tabla comparativa de los conceptos.

Ackerman

El modelo Ackermann surge para solucionar los problemas del tiempo y amplio espacio que ocasionaba girar un vehículo, puesto que ambas ruedas de un mismo eje giraban a la misma velocidad y ángulo (Din *et al.*, 2019). Entonces, el sistema de dirección de Ackermann requiere de 4 o 2 ruedas que giren libremente e independientemente (Qiu *et al.*, 2018); asimismo, el centro de giro de todas ruedas es el mismo, como muestra la Figura 2.8. Esto ocasiona que el desplazamiento, en una

curva, tenga diferentes velocidades y ángulos en cada rueda; por lo cual, la rueda interna recorre un menor camino que la rueda externa.

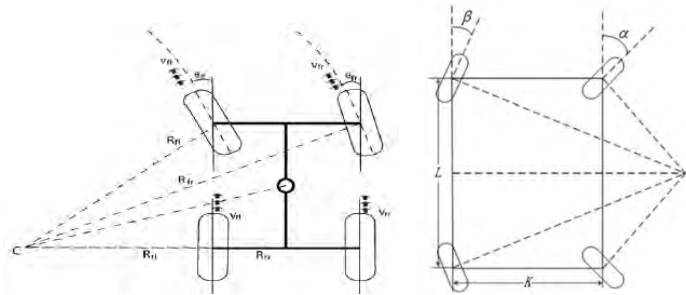


Figura 2.8: Sistema Akerman para 2 ruedas (Qui *et al.*, 2018) y 4 ruedas (Din *et al.*, 2019)

Omnidireccional

El mecanismo consiste en cuatro ruedas con motores independientes para lograr arbitrarias direcciones; para ello, el diseño de sus ruedas tiene a su alrededor pequeños rodillos girados un ángulo de 45° respecto del eje de la rueda (Adamov, 2018). Asimismo, la configuración de las ruedas en el vehículo está orientadas de manera opuesta para cancelar la fuerza de contra balance en estas. Por ejemplo, la rueda delantera derecha y trasera izquierda tienen los rodillos dirigidos hacia el centro generando un vector de fuerza hacia la izquierda; mientras que la rueda delantera izquierda y trasera derecha tienen una orientación contraria a las anteriores (Sonawane, 2015). La Figura 2.9 muestra distintas combinaciones de los giros de las ruedas para obtener todos los movimientos posibles en el plano.

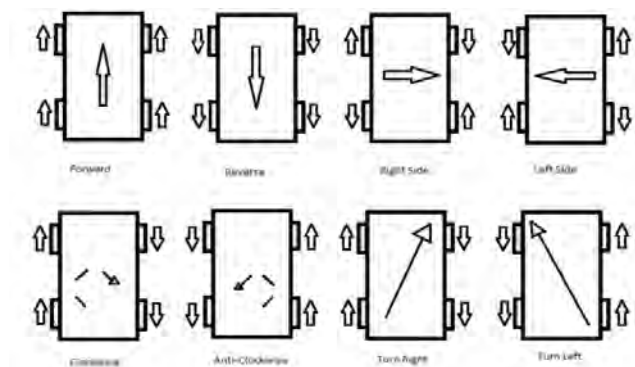


Figura 2.9: Movimiento de un robot omnidireccional (Sonawane, 2015).

Rocker-Bogie

El modelo Rocker Bogie está conformado por seis ruedas, un mecanismo de suspensión a cada lado, un mecanismo diferencial y el cuerpo principal, como muestra

la Figura 2.10. El sistema de suspensión cuenta con un pivote libre, *rocker* y *bogie*. Donde la rueda trasera esta acoplada al extremo del *rocker*, mientras que la rueda media y delantera están conectadas al *bogie*. Además, este último se une al rocker mediante un pivote libre, y este se acopa al cuerpo principal por un pivote diferencial (Dongmok *et al.*, 2012).

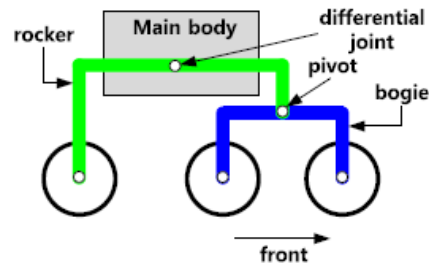


Figura 2.10: Vista frontal del Rocker-Bogie (Dongmok *et al.*, 2012)

La configuración rocker-bogie es una suspensión sin resortes; esto favorece a la subida de pendientes y obstáculos, puesto que las ruedas no pierden fuerza tractora (Ellery, 2016). Asimismo, el mecanismo diferencial permite mantener un equilibrio de fuerzas entre las tres ruedas y minimiza la presión en el suelo, lo cual es importante en terrenos suaves para evitar el hundimiento (Lindemann y Voorhes, 2005).

Oruga

La configuración de la oruga comprende de una banda de rodadura (pista de la oruga), la rueda dentada, la rueda conducida, la suspensión y ruedas de soporte, opcionalmente. La transmisión se puede generar de dos formas; la primera mediante la fricción entre la rueda motriz y la pista interior de la oruga, y la segunda es el engrane entre una rueda dentada y la pista dentada interna de la oruga (Ellery, 2016). La Figura 2.11 muestra un vehículo de rescate con la configuración de oruga, de esta se aparecía la ventaja del uso de este mecanismo, la cual es evitar que la parte inferior y frontal entre en contacto con el obstáculo.

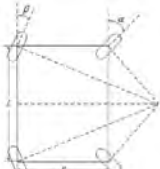

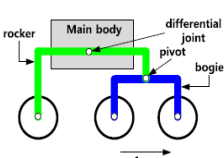



Figura 2.11: Urban II, robot de rescate (Ellery, 2016)

Comparativa de tecnologías

Los modelos analizados en el subsistema móvil presentan como mínimo una configuración de cuatro ruedas y en su mayoría poseen suspensión por resortes. Asimismo, algunas de estas tecnologías pueden desplazarse en ambientes agrícolas. En la Tabla 2.3 se presenta la comparativa de las características de los subsistemas móviles analizados.

Tabla 2.3: Comparación de subsistemas móviles actuales

	 Ackerman	 Omnidireccional	 Rocker – Bogie	 Oruga
Sistema de suspensión	Resortes	Resortes	Rocker, bogie	Resortes
Sistema de estabilidad	4 puntos de equilibrio	4 puntos de equilibrio	Diferencial	Amplia área de contacto
Cantidad de ruedas	4	4	6	4 y varias de apoyo
Terrenos	Todos	Ambientes cerrados	Todos	Accidentados off-road
Supera obstáculos	Todos	-	1.5 diámetro de la rueda	Todos
Inconveniente	-	Vibraciones	Balaceo del cuerpo principal	Baja eficiencia
Beneficios	Menor consumo energético	Versatilidad en el movimiento	Todas las ruedas siempre están contacto con el suelo	Protege la parte delantera e inferior

2.4 Subsistema de Siembra

Los métodos de siembra por ejecución se dividen en dos, los cuales son: sembrío directo y sembrío indirecto. La forma indirecta consiste en sembrar las semillas en un terreno temporal para luego trasplantarlo a un terreno definitivo; en contraste, en la siembra directa, la semilla es sembrada y cosechada en un mismo terreno (Cerna, 2007). Este último método se subdivide en simbra directa al voleo, en línea y en grupo.

Siembra Directo al Voleo

El sembrado al voleo consiste en esparcir las semillas en el terreno de manera uniforme, en forma de abanico; para finalmente cubrirlo ligeramente con la tierra

suelta. Este método es empleado para la siembra de grano finos; los cuales son: cereales, gramíneas y leguminosas; puesto que estos cultivos permiten ser sembrados relativamente juntos (Cerna, 2007). La distribución de las semillas al voleo es realizada por una voleadora manual, bomba de motor con turbina, avionetas o manualmente (Boschini *et al.*, 2015). La Figura 2.12 muestra una voleadora manual. Este implemento almacena las semillas en una tolva superior; luego estas atraviesan una rejilla regulable, de acuerdo al tamaño de la semilla, para llegar al plato difusor; este último es accionado por una palanca externa que mediante la fuerza del trabajador y una reducción permiten su giro; de esta manera, las semillas son esparcidas en un rango de $0^\circ - 120^\circ$.



Figura 2.12: Voleadora manual, Abonadora Sembradora 12 K (LHAURA, s.f.)

Siembra Directo en Línea

El sembrío en línea emplea los surcos como guía para realizar una distribución de las semillas en líneas continuas y paralelas, por ejemplo, la distancia entre surcos para la quinua varía entre 40 – 80 cm (Gómez y Aguilar, 2016). Asimismo, la distancia entre líneas de siembra depende del desarrollo vegetativo de la planta a cultivar, naturaleza del terreno, especie cultivada y el clima (Cerna, 2007). La maquinaria utilizada son sembradoras mecánicas y neumáticas, como se muestra en la Figura 2.13. La sembradora neumática emplea un sistema de succión con lo cual la semilla es adherida a los alveolos de un disco hasta una sección donde la semilla debe caer al suelo. Asimismo, la sembradora mecánica utiliza discos perforados en su contorno, estos agujeros pasan continuamente por un recipiente de semillas en la parte superior, para luego dirigirlos hasta la parte inferior y caer por gravedad al suelo (Ruiz, 1971).

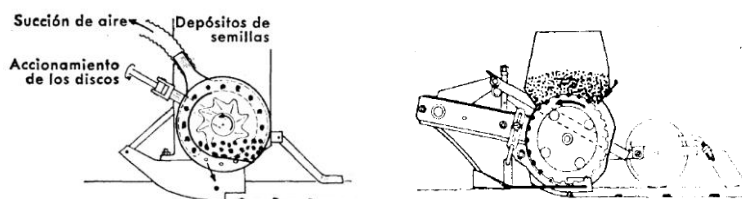


Figura 2.13: Sembradora neumática, izquierda. Sembradora mecánica, derecha. (Ruiz, 1971)


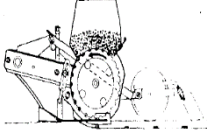

Siembra Directo en Grupos

El sembrío por grupos es casi similar al sembrío en línea, puesto que ubica las semillas en grupos a una cierta distancia respetando la guía del surco. El distanciamiento entre grupos depende del desarrollo vegetativo y tamaño de copa de la planta (Cerna, 2007). Por ejemplo, el algodón se coloca en grupos de 4 – 5 semillas, para tener 10 semillas por metro (Veramendi y Lam, 2011).

Comparativa de tecnologías

Las tecnologías estudiadas de sembrado buscan distribuir uniformemente las semillas en los campos de cultivos, para lograrlo utilizan comúnmente elementos de revolución. La Tabla 2.4 muestra la comparativa y ventajas de los subsistemas de siembra analizados.

Tabla 2.4: Comparación de subsistemas de siembra actuales

	 Sembrado al voleo	 Sembrado en línea	 Sembrado en grupo
Principio	Esparcir las semillas en forma de abanico	Colocar individualmente la semilla en línea	Colocar en grupos, respetando una línea
Mecanismo	Voleadora, la fuerza es aplicada en la manivela que por medio de una reducción gira el disco difusor esparciendo la semillas rango 0° - 120°.	Sembradora mecánica, un disco ranurado externamente gira para extraer las semillas de una tolva y transportarlas al terreno.	Sembradora neumática, mediante la succión de aire grupos de semillas se adhieren a un disco giratorio con ranurada espiral que en la parte inferior pierden la succión.
Parámetros	<ul style="list-style-type: none"> • Rango de dispersión • Cantidad de semilla • Tamaño de la semilla 	<ul style="list-style-type: none"> • Distancia entre semilla • Tamaño de la semilla 	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad de semillas por grupo • Distancia entre grupos
Ventaja	Aprovechamiento del espacio	Uniformidad	Optimización de la cantidad de semillas

CAPÍTULO 3

DISEÑO CONCEPTUAL

En este capítulo se presentan alternativas de conceptos solución, los cuales son propuestos en función de la lista de requerimientos, el diagrama de funciones y la matriz morfológica. Luego, los diseños de concepto solución son calificados por una evaluación técnica-económica; con lo cual se obtiene el concepto de solución óptimo.

3.1 Lista de Requerimientos

La tabla de requerimientos muestra las exigencias y deseos para la realización de la propuesta solución. Esta lista se encuentra en el Anexo A.

- **Función principal**, el vehículo agrícola tiene como función principal la realización de actividades de labrado y sembrado en campos de cultivo de los andes del Perú. De tal manera, de acuerdo al análisis de las herramientas tradicionales de labrado se determina que estas son utilizadas en campos de cultivos de 30° de pendiente como máximo; por ende, el móvil debe ser capaz de desplazarse en este tipo de geografía. Por otro lado, en adición a las labores agrícolas previamente mencionadas se plantea el deseo de que el vehículo pueda detectar y extraer malezas en la etapa temprana del cultivo; asimismo, poder ejecutar todas las actividades mediante la conducción autónoma.
- **Geometría**, La creación del surco delimita parte de las cotas de las dimensiones del vehículo. De acuerdo a la distribución de los surcos del maíz estos se encuentran a

una distancia de 40 cm. En la Figura 3.1 se concluye que la distribución entre ruedas debe ser mínimo de 25 cm.

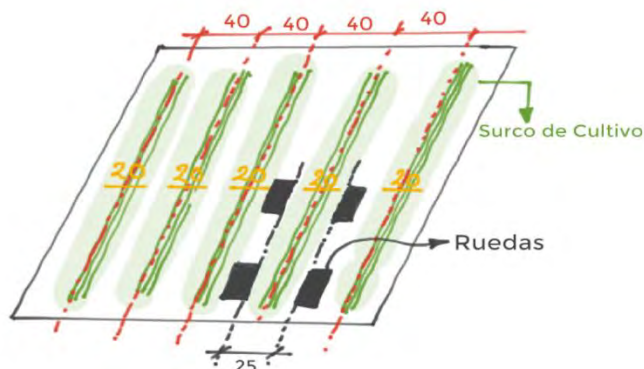


Figura 3.1: Distribución del campo de cultivo, medidas en cm (imagen propia)

Por otro lado, el tamaño de elevación del surco es aproximadamente 5 cm; por lo tanto, el espaciado entre el suelo y la parte inferior de la base debe ser 10 cm como mínimo. Asimismo, este espaciado contribuye al mecanismo de sembrado, puesto que reduce la distancia de caída de la semilla al suelo. Finalmente, se desea que el vehículo tenga como dimensiones máximas 45 cm de largo, 30 cm de ancho y 25 cm de alto.

- **Cinemática**, De acuerdo a la geografía de los campos de cultivo; el vehículo debe poder desplazarse en forma lineal y curvilínea, lo cual le permite maniobrar en superficies accidentadas. Por otro lado, la velocidad máxima de sembrado y labrado es 0.2 m/s; asimismo, esta debe ser constante para evitar que el vehículo se desvíe del carril y dañe los cultivos.
- **Fuerza**, De acuerdo a la siembra al voleo se requiere de 100 kg por hectárea; sin embargo, debido a que el vehículo se plantea para un espacio de trabajo de una parcela de $200 m^2$, el sistema de sembrado deberá llevar una carga de 2 kg de semillas de grano fino. Asimismo, el subsistema de labrado requiere vencer la fuerza requerida para romper una sección del suelo suelto, la cual es 37.19 N. Este valor fue obtenido de forma experimental mediante el procedimiento detallado en el Anexo B. Por último, el peso que debe soportar la estructura del sistema es máximo de 50 kg.
- **Energía**, El sistema requiere de baterías para almacenar energía, puesto que el móvil debe trasladarse junto con su unidad de energía. Asimismo, para la recarga de las baterías se desea emplear paneles solares; puesto que favorecen a la autonomía del vehículo. Por último, el tiempo de autonomía mínima del vehículo es de 2 horas, lo cual es aproximadamente el tiempo necesario para culminar las labores agrícolas.

- **Materia**, La materia transportada son las semillas de grano fino; por ende, estas deben ser almacenadas en un espacio libre de humedad y contaminantes.
- **Señales**, Las señales de entrada son las rutas de desplazamiento del vehículo, distancia entre surcos, distancia entre semillas y profundidad de perforación. Estas son necesarias para ajustar las variables de entrada del controlado. Asimismo, la señal de entrada del método de sembrado es una instrucción para la elección de la herramienta para el sembrado.

Por otro lado, la salida del sistema son la posición y velocidad del vehículo; nivel de semillas; indicador de obstáculos; torque y rpm de los motores; indicador de nivel de batería e indicador de consumo eléctrico. Asimismo, las salidas mostradas en una interfaz. Por último, en la sección de deseos se encuentra la señal de salida que indica la existencia de malezas en el campo de cultivo, la cual es parte del subsistema de deshierbado.

- **Control**, El sistema presenta lazos de control para cada subsistema. El primer sistema de control es para la conducción del vehículo, la cual requiere de una posición y velocidad del vehículo deseada. En segundo lugar, el control para la distribución de las semillas, esto necesita de los parámetros de cantidad de semilla distribuida por espacio desplazado. Finalmente, el control del posicionamiento de la herramienta de labrado; el cual regula la profundidad de perforación a un valor constante a pesar de las perturbaciones presentes.
- **Electrónica**, Respecto al subsistema móvil se requiere de sensores de posicionamiento y sensores de descripción del entorno. Asimismo, el subsistema de sembrado necesita del sensado del nivel de semillas.
- **Software**, Los parámetros de salida del sistema son mostrados en una interfaz. Estas señales de salida son la velocidad y posición del vehículo, profundidad de labrado, indicador de obstáculos, indicador de detección de malezas, nivel de semillas, visualización del entorno, y nivel de baterías.
- **Comunicación**, La comunicación debe ser inalámbrica, puesto que es adecuada para un entorno de trabajo accidentado. Por lo tanto, la comunicación se realiza hasta un rango máximo de 100 m a una frecuencia de trabajo de 2.4 GHz (2412 – 2472 MHz); la cual debe ser reglamentada por la restricción de frecuencias permitida en el Perú.

- **Seguridad**, El botón de emergencia es un requerimiento para brindar seguridad en caso que el vehículo y sus subsistemas se encuentre en una condición peligrosa. Por otra parte, la seguridad de los componentes electrónicos está regulado por el grado de protección IP de acuerdo a la norma DIN en IEC 60529; por ello, el requerimiento es brindar seguridad del grado IP55 para la protección contra el polvo y chorros de agua.
- **Fabricación**, De acuerdo a la dureza y la existencia de piedras en el suelo, la fabricación de la hoja de labrado debe ser de un material que presente un proceso de endurecimiento. Por otro lado, la soldadura, corte lase, mecanizado en CNC e impresión 3D son opciones para la fabricación de la estructura del vehículo y sistema de sembrado.
- **Montaje**, El montaje del vehículo agrícola debe ser previo a la llegada al lugar de trabajo con la finalidad de agilizar la ejecución de las tareas. Además, el montaje en un taller permite asegurar las tolerancias de ensamblaje, puesto que se dispone de instrumentos y herramientas especializados.
- **Transporte**, El transporte del vehículo agrícola se realiza en una caja de madera de dimensiones de 1 m x 1 m x 1 m. Asimismo, el sistema debe ser fijado a la base de la caja mediante cadenas con la finalidad de evitar que el vehículo se dañe al contacto con las paredes del contenedor.
- **Uso**, El espacio de trabajo es el Valle de Mantaro, ubicado en el departamento de Junín (3000 – 3500 msnm). La geografía de los campos de cultivo tiene una pendiente máxima de 30°. Asimismo, el ambiente es seco y las temperaturas se encuentran entre los 4°C – 18°C (IGP, 2005).
- **Mantenimiento**, La exigencia de realizar un mantenimiento preventivo de los componentes y accesorios del sistema integrado luego de la jornada de trabajo se debe al polvo en ambiente generado por el labrado de la tierra. Asimismo, esto favorece a la conservación de los componentes que se encuentran en constante movimiento de revolución.
- **Costos**, El costo del vehículo autónomo agricultor se estima en un máximo de 40000 dólares. Esto se debe principalmente a la precisión de los sensores que se requiere para realizar la navegación autónoma en un ambiente agrícola.
- **Plazos**, La fecha límite de la entrega del diseño de la propuesta solución es el 7 de julio del 2021; de acuerdo al calendario de entregas del curso Trabajo de fin de carrera 1.

3.2 Estructura de funciones

La estructura de funciones es utilizada para describir el seguimiento de las señales de entrada y salida del sistema, para ello muestra a detalle la interacción entre las funciones internas de cada dominio.

En la Figura 3.2 se observa las interconexiones de las funciones parciales del sistema general subdividido en dominios. La organización de las funciones es de acuerdo al dominio que pertenecen y el subsistema que lo ejecuta. Por ello, los bloques de color gris pertenecen al sistema general; los azules, al subsistema de sembrado; los violetas, al subsistema móvil; y los verdes, al subsistema de labrado. Asimismo, los dominios empleados son los siguientes: mecánico, energía, actuadores, sensores, interfaz y comunicación.

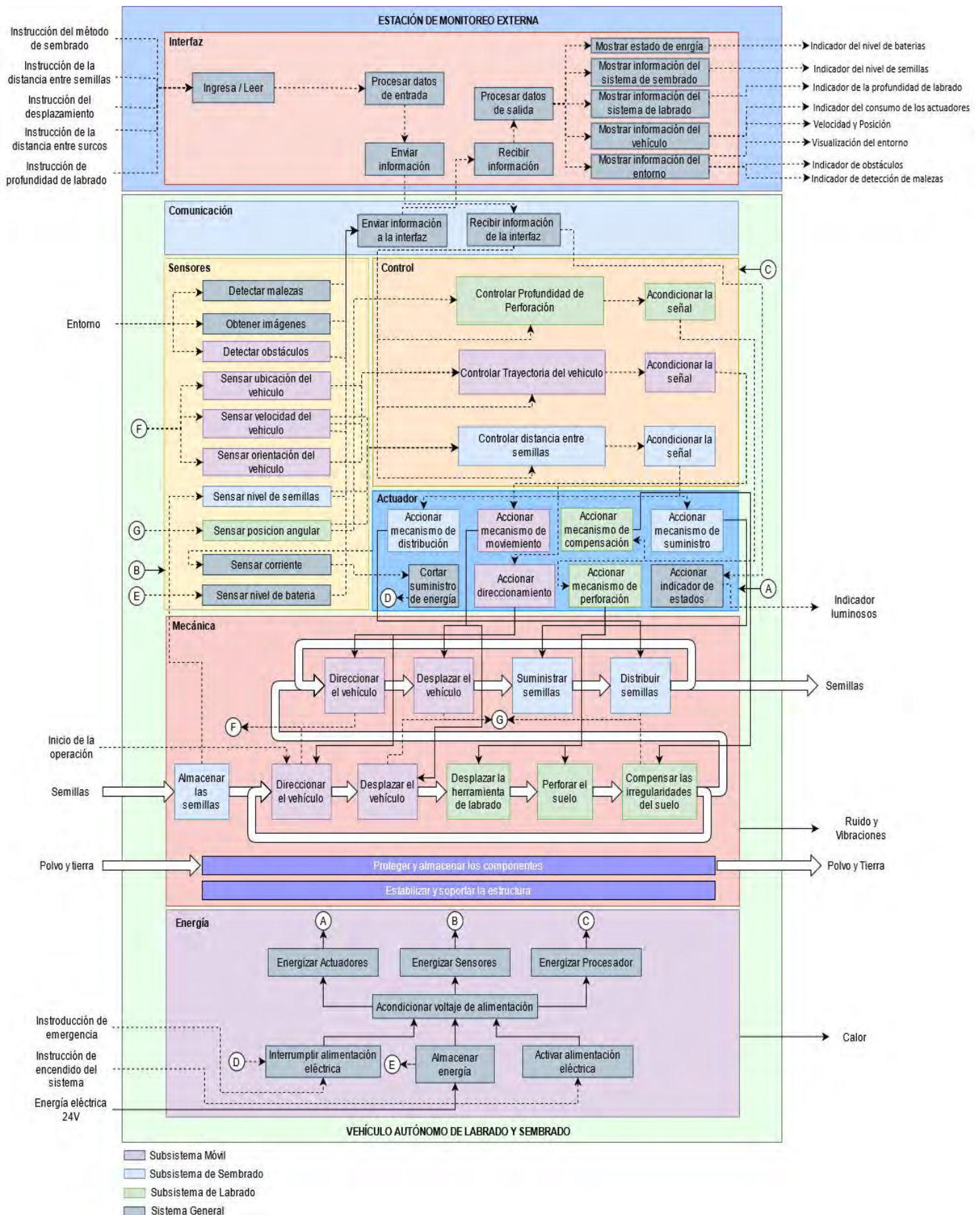


Figura 3.2: Estructura de funciones (imagen propia)

3.3 Matriz Morfológica

La matriz morfológica brinda soluciones para ejecutar las funciones detalladas en la estructura de funciones. En el Anexo C se presenta las figuras de las soluciones para cada función parcial. La organización jerárquica de la matriz morfológica es el subsistema, en primer lugar; luego, el dominio y finalmente la función parcial.

Entonces, los conceptos solución se describen al entrelazar una de las soluciones de cada función interna de todos los dominios. Para ello, el criterio de elección para los conceptos solución son robustez, precisión y accesibilidad.

Matriz Morfológica Subsistema Móvil

La matriz morfológica de Subsistema Móvil presenta como funciones los bloques de color violeta de la estructura de funciones, Figura 3.3. Las soluciones elegidas tienen como finalidad obtener un subsistema móvil capaz de desplazarse en un ambiente agrícola de pendiente máxima de 30°, soportar la carga de 50 kg y proteger los componentes electrónicos. En la Tabla 3.1 se muestra las soluciones elegidas para las funciones del subsistema móvil.

Tabla 3.1: Matriz morfológica subsistema móvil

Subsistema Móvil				
	Función	Conceptos Solución		
		Solución 1 (robusto)	Solución 2 (preciso)	Solución 3 (accesible)
Dominio Mecánico	Direccionar el vehículo	Ackerman	Explicit Steering	Skid Steering
	Desplazar el vehículo	Ruedas de playa	Mud Wheels	Mud Wheels
	Estabilizar la estructura	Suspensión de aire	Amortiguadores con resortes	Suspensión rígida
	Soportar la estructura	Soldadura	Uniones atornilladas	Uniones con acoples
	Proteger los componentes	Filtros metálicos	Filtro ventilador	Plastico a prueba de polvo y agua
Dominio Sensores	Detectar obstáculos	LiDAR	Cámara de profundidad	Ultrasonido
	Describir el entorno	Cámara omnidireccional	Cámara de profundidad	Cámara web
	Sensar ubicación y orientación	RTK – GPS + IMU	LiDAR + IMU	Encoders + IMU
	Sensar posición angular del motor y velocidad del vehículo	Encoder inductivo	Encoder capacitivo	Encoder optico
Dominio de Control	Hardware	Minicomputadora	SBC y GPU	SBC
	Software	Control Difuso	Control pre-view	Control PID
	Acondicionar la señal	Driver Servomotor	Driver Motor Brushless	Driver Motor Brushed
Dominio de Actuadores	Accionar mecanismo de movimiento	Servomotor	Motores Brushless	Motor Brushed

Matriz Morfológica Subsistema Labrado

La elección de soluciones para la matriz morfológica del subsistema de labrado requiere cumplir con los requerimientos de labrar la tierra suelta a una profundidad constante, cabe resaltar que el diseño propuesto no debe perforar un suelo compacto.

Las funciones extraídas para la matriz son los bloques de color verde de la estructura de funciones, Figura 3.2. En la Tabla 3.2 se observan las tres soluciones propuestas para el subsistema de labrado.

Tabla 3.2: Matriz morfológica subsistema labrado

		Subsistema Labrado		
	Función	Conceptos Solución		
		Solución 1 (robusto)	Solución 2 (preciso)	Solución 3 (accesible)
Dominio Mecánico	Perforar el suelo	Hoja circular	Hoja flecha	Arado de palo
	Compensar irregularidades	Amortiguador con resortes	Mecanismo de bisagra	Mecanismo de 4 barras
Dominio de Sensores	Sensar posición angular del motor	Encoder inductivo	Encoder capacitivo	-
Dominio de Control	Hardware	FPGA	SBC	Microcontrolador
	Software	Control LQR	Control LQR	-
	Acondicionar la señal	Driver Servomotor	Driver Motor Brushless	Driver Motor a Paso
Dominio de Actuadores	Accionar mecanismo de perforación	Servomotor	Motores Brushless	Motores a Paso
	Accionar mecanismo de compensación	Resortes	Actuador lineal	Motores a Paso

Matriz Morfológica Subsistema Sembrado

La matriz morfológica del subsistema de sembrado utiliza las funciones de color azul de la estructura de funciones, Figura 3.2, para establecer propuestas de solución que cumplan con la distribución uniforme de las semillas en el campo del cultivo y un adecuado almacenamiento de estas. La Tabla 3.3 muestra en la matriz morfológica las soluciones para las funciones del subsistema de labrado.

Tabla 3.3: Matriz morfológica subsistema sembrado

Subsistema Sembrado				
	Función	Conceptos Solución		
		Solución 1 (robusto)	Solución 2 (preciso)	Solución 3 (accesible)
Dominio Mecánico	Suministrar semillas	Plato dosificador	Disco Acanalado	Embudo de semillas
	Almacenar semillas	Tolva de Acero Galvanizado	Tolva de Plástico	Tolva de Plástico
	Distribuir semillas	Disco ranurado radial	Disco Acanalado	Plato Difusor
Dominio de Sensores	Sensar posición angular del motor	Encoder inductivo	Encoder capacitivo	Encoder optico
	Sensar nivel de semillas	Infrarrojo	Celdas de carga	Ultrasonido
Dominio de Control	Hardware	FPGA	SBC	Microcontrolador
	Software	Control LQR	Control LQR	Control PID
	Acondicionar la señal	Driver Servomotor	Driver Motor Brushless	Driver Motor Brushed
Dominio de Actuadores	Accionar mecanismo de distribución	Servomotor	Motores Brushless	Motor Brushed
	Accionar mecanismo de suministro			-

Matriz Morfológica Sistema General

Las funciones del sistema general, bloques grises de la estructura de funciones, son en su mayoría la electrónica, comunicación e interfaz del sistema. Por ende, las soluciones propuestas deben cumplir con los requerimientos de alimentación eléctrica; envío y recepción de información del vehículo agrícola al interfaz, y viceversa; y brindar protección mediante circuitos eléctricos a los componentes electrónicos. Asimismo, en el sistema general se encuentra incluido el deseo de la realización de un subsistema de deshierbado, por lo cual, la solución a esta función se encuentra incluida en la matriz morfológica. En la Tabla 3.4 se presenta las propuestas de soluciones para las funciones del sistema general.

Tabla 3.4: Matriz morfológica sistema general

Sistema General				
	Función	Conceptos Solución		
		Solución 1 (robusto)	Solución 2 (preciso)	Solución 3 (accesible)
Dominio de Energía	Almacenar Energía	Baterías de Níquel Cadmio	Baterías Li-Po	Batería plomo ácida
	Acondicionar voltaje de alimentación	LDO	Switch Mode Power Supply	Linear Regulator
	Activar alimentación eléctrica	Switch	Switch	Botón
	Interrumpir alimentación eléctrica	Botón de Emergencia	Botón de Emergencia	Botón de Emergencia
Dominio de Sensores	Obtener imágenes	Cámara omnidireccional	Cámara web	Cámara web
	Detectar malezas	Cámara de grises	Cámara web	Cámara estereoscópica
	Sensar corriente	Sensor de Efecto Hall	BMS	Medidor Voltímetro/Amperímetro
	Sensar nivel de batería	Medidor de carga de batería		
Dominio Interfaz	Configurar parámetros iniciales	Módulo de comando	Teclado	Arreglo de potenciómetro
	Procesar datos de entrada	Minicomputadoras	SBC y GPU	SBC
	Procesar datos de salida			
	Mostrar información	Pantalla táctil	Pantalla Oled	Pantalla LCD
	Enviar información	LoRaWAN	RF	Xbee
	Recibir información			
Dominio de Comunicación	Enviar información	LoRaWAN	RF	Xbee
	Recibir información			
Dominio de Actuadores	Indicador de estados	Pantalla LCD	Circulina	Matriz de Leds
	Cortar suministro de energía	Relee Electromecánico	Relee de Estado Solido	Fusible

3.4 Conceptos Solución Óptimo

El concepto solución óptimo toma como base el concepto solución 2, Anexo A, al cual se deben realizar modificaciones en el aspecto económico con el fin de acercar su valoración técnica económica a la recta de referencia. En primer lugar, la cámara de profundidad puede cumplir la función de obtener imágenes del sistema general, reemplazando el uso de una cámara web; de la misma manera, esta imagen puede ser procesada para la detección de malezas. Asimismo, se ubica la cámara de profundidad en un trípode en una posición alta del vehículo apuntando a la parte frontal, puesto que el móvil no requiere retroceder en la ejecución de la labor agrícola. En segundo lugar, se propone el uso de un resorte de torsión que reemplace al motor sin escobillas de la

función accionar mecanismo de perforación, con el fin reducir presupuesto y eliminar la complejidad de sincronizar el motor sin escobillas con el actuador lineal para el accionamiento del mecanismo de labrado. En tercer lugar, la estructura del vehículo está conformada por perfiles de V-slot y uniones atornilladas, los cuales generan ensambles rígidos y son de bajo valor adquisitivo. Finalmente, en la función de almacenar energía se opta por emplear dos baterías, las cuales son utilizadas para alimentar a los actuadores y el control, independientemente. En la Figura 3.3 se muestra las vistas del concepto solución óptimo diseñado en Inventor. Asimismo en la Figura 3.4 se observa el concepto solución óptimo operando en su entorno de trabajo.



Figura 3.3: Diseño del concepto solución óptimo en Inventor: a) Vista isométrica, b) Vista frontal, c) Vista de perfil, d) Vista horizontal (imagen propia)

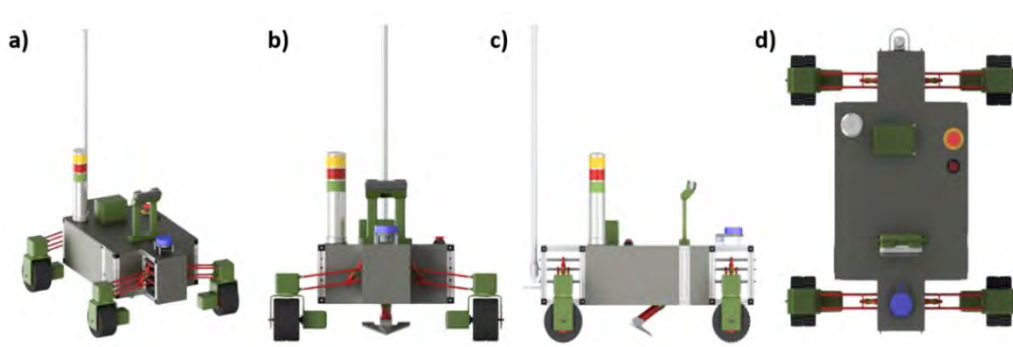


Figura 3.4: Concepto solución óptimo operando en campos de cultivo del Valle del Mantaro (imagen propia)

Diagrama de bloques

El diagrama de bloques presenta las conexiones eléctricas y líneas de comunicación entre los sensores, actuadores, baterías y computadoras, empleados por el concepto solución óptimo. Para ello, el vehículo agrícola se divide en el módulo de energía, potencia y control; asimismo se establece un cuarto bloque para la estación externa.

En la Figura 3.5 se presenta el diagrama de bloques, en el cual la línea amarilla energiza a la unidad de control mientras que la línea verde suministra energía a los actuadores.

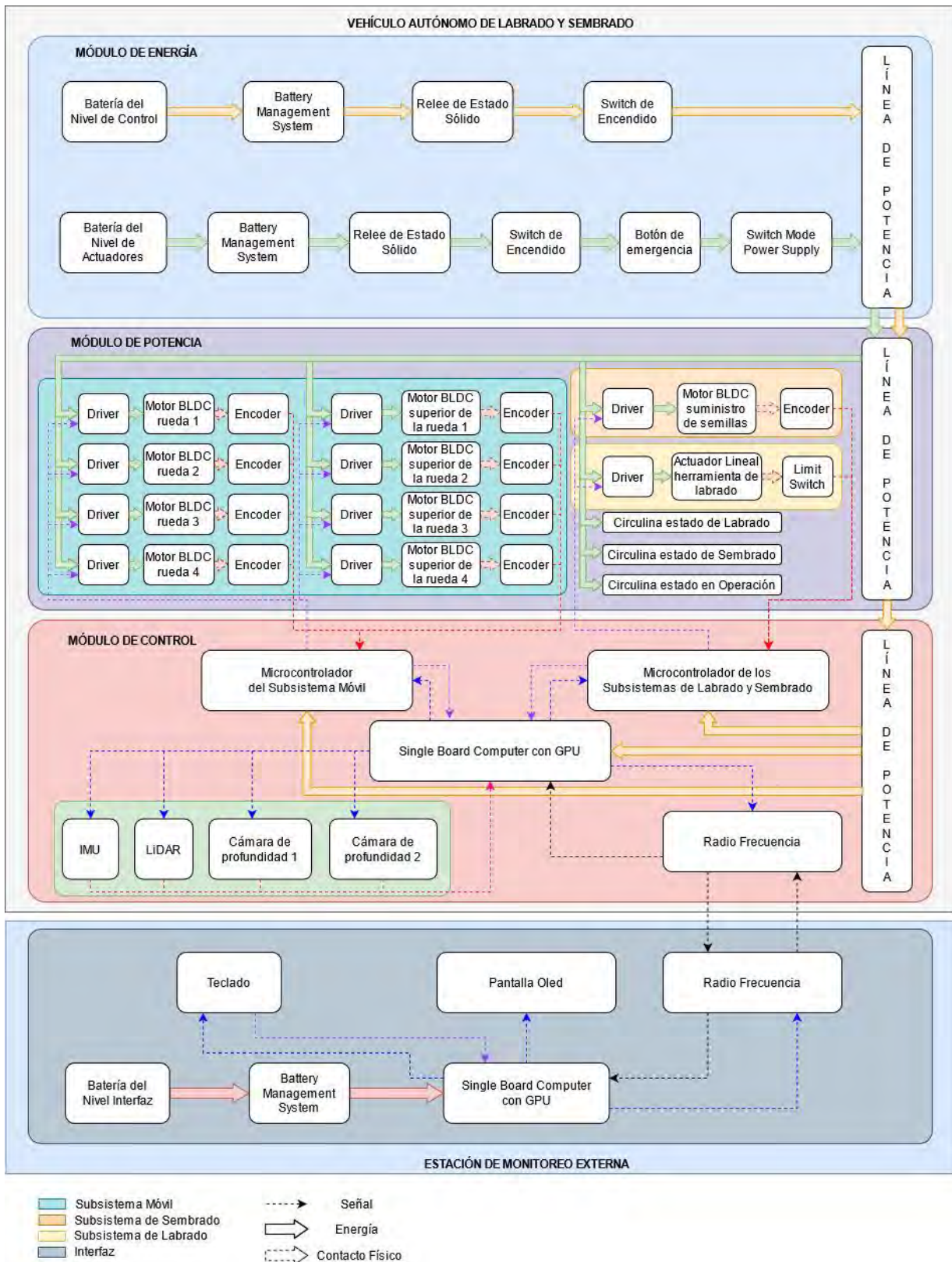


Figura 3.5: Diagrama de bloques de la solución óptima (imagen propia)

CAPÍTULO 4

DISEÑO MECANICO DEL SISTEMA

En este capítulo se desarrolla el diseño mecánico de los subsistemas del concepto solución óptimo. El desarrollo de este capítulo consta de cálculos mecánicos; selección de materiales y tipos de manufactura; simulaciones mecánicas; y planos mecánicos de ensamble y despiece.

4.1 Diseño de estructura de soporte del vehículo

La estructura de soporte del vehículo cumple con la función de proteger los componentes electrónicos y baterías para el funcionamiento de este; asimismo, esta estructura tiene en su interior a los subsistemas de sembrado y labrado. Por ello, el diseño del armazón cumple con las características de una alta rigidez y el correcto dimensionamiento de la estructura; con la finalidad de proteger y distribuir correctamente los componentes y los subsistemas.

El esqueleto de la estructura está constituido por perfiles de V-slot de 20 x 20 y 40 x 20 de diferentes longitudes, los cuales son barras de Aluminio 6063 T-5. La elección de este componente se debe a su versatilidad en el armado en conjunto con sus accesorios (acoples y pernos); su manufactura que requiere únicamente de una sierra de corte; y su disponibilidad en el mercado local. Asimismo, la estructura distribuye las cargas en todos lo V-slots, lo cual asegura que los perfiles no fallen debido cargas ligeras a compresión, en la mayoría de casos. En la Figura 4.1 se muestra el esqueleto

de V-slot del vehículo, donde el armazón principal es un paralelepípedo rectangular de 490 x 390 x 240 mm; en la parte frontal de este se acoplan dos paralelepípedos rectangulares de 200 x 150 x 190 mm, los cuales cumplen la función de acople para las ruedas (subsistema móvil). Las conexiones entre perfiles de V-slot se realizan mediante uniones atornilladas (tornillos de bajo perfil) y acoples comerciales compatibles con la geometría de los perfiles. Las esquinas tienen acoples en forma de cubo, el cual permite atornillar las tres barras de la conexión mediante una rosca interna para tornillos M5 realizada al interior del perfil. Además, para reforzar las conexiones se utilizan tres conectores de 90° en cada esquina atornillados con M5 y ajustados con tuercas en T; de la misma manera se sujetan los perfiles internos de refuerzo.

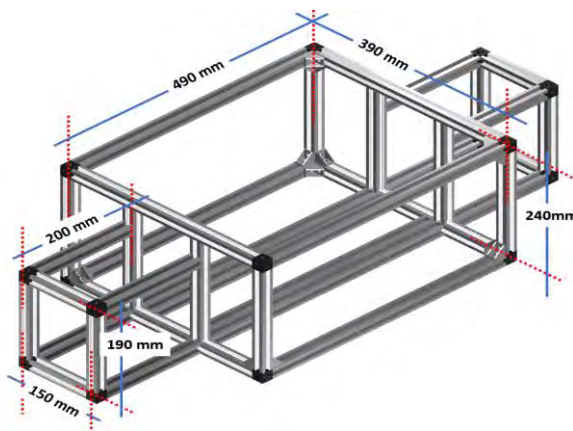


Figura 4.1: Dimensiones de la estructura de soporte (imagen propia)

La distribución de los grupos generales del vehículo se muestra en la Figura 4.2, donde el subsistema de sembrado y labrado se encuentran en la parte media de la estructura del vehículo, puesto que el armazón presenta una sección libre en su parte inferior media para que la herramienta de labrado descienda hasta el contacto con el suelo y las semillas se esparzan en el surco generado por el subsistema de labrado. Por otra parte, las líneas de potencia de los niveles de control y actuadores se encuentran divididos en la estructura por los subsistemas de labrado y sembrado; con la finalidad de aislar las líneas de potencia para evitar confusiones en el ensamble o mantenimiento, asimismo, asegurar la protección de los componentes de control de las altas cargas utilizadas para el funcionamiento de los actuadores. Parte de estos actuadores son los motores que impulsan las cuatro ruedas que se distribuyen en cada esquina del vehículo; además, esta estructura permite elevar el armazón de soporte respecto del suelo. Por último, al interior de las extensiones del esqueleto principal se ubican contrapesos con el propósito de asegurar que el vehículo no tienda al elevarse

cuando la herramienta de labrado entre en contacto con el suelo, asimismo, asegurar que las cuatro ruedas siempre mantengan contacto con el suelo agrícola.

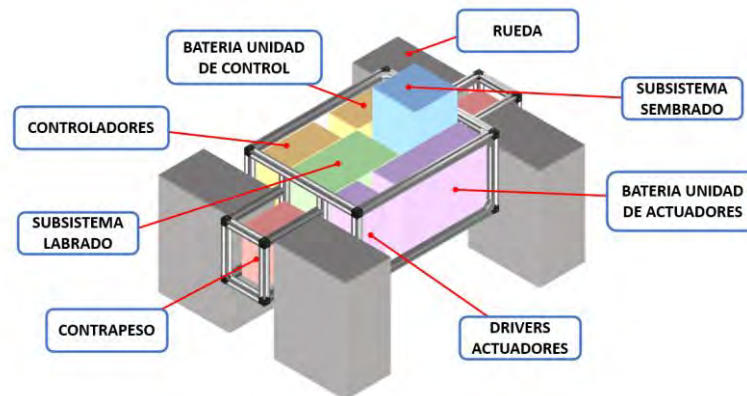


Figura 4.2: Distribución de grupos generales (imagen propia)

4.2 Diseño de la estructura de dirección y amortiguación

El desplazamiento del vehículo es una tarea desafiante en un entorno agreste como los campos de cultivos en la serranía peruana, por lo anteriormente expuesto acerca del entorno. Por lo tanto, el vehículo cuenta con una configuración *explicit steering* (2 grados de libertad por rueda) y un sistema de amortiguación por cada rueda. En esta sección se presenta el diseño mecánico de estas unidades modulares; el cual consta de cálculos mecánicos, justificación de uniones, selección de ruedas y motores, y simulaciones de elementos finitos.

4.2.1 Diseño del acople rueda – motor 1

El diseño inicia con la selección de las ruedas puesto que son las que ofrecen las características tractoras al friccionar con el suelo, por lo cual una de las opciones fiables en el mercado son las *Mud Wheels*; asimismo, los requisitos importantes para su selección son seguidamente detallados. Diámetro externo mayor a 100 mm debido a que el vehículo debe mantenerse separado como mínimo esta distancia respecto del suelo, ello de acuerdo al requerimiento de geometría; el ancho de la rueda debe ser mayor a 30 mm porque se requiere de una mayor área de contacto para brindar estabilidad al vehículo; y presentar características de una rueda de todoterreno que asegure el desplazamiento en superficies con césped o tierra suelta.

En la Tabla 4.1 se observan cinco ruedas comerciales que cumplen con los requerimientos, previamente mencionados. A partir de los cuales se selecciona la *mud wheel* de la marca HOBBYPARK debido a su diámetro externo de 15 mm que asegura el requerimiento de elevación de la estructura principal y mantiene seguro en gran medida a su motor de golpes con obstáculos rígidos del suelo; asimismo, esta presenta un ancho de rueda intermedio lo cual no incrementa el torque del segundo motor requerido para girar la rueda en su eje radial.

Tabla 4.1 Selección de ruedas todoterreno

Modelo	MUD WHEELS				
	Requisitos				
Marca		RC STATION	AIMROCK	HOBBYPARK	DURATRAX
Diámetro externo	> 100 mm	150 mm	110 mm	150 mm	114 mm
Ancho	> 30 mm	81.3 mm	45 mm	77 mm	65 mm
Cubo hexagonal	≥ 12 mm	17 mm	12 mm	17 mm	12 mm
Peso		0.268 kg		0.285 kg	0.249 kg
Precio		50 USD	32 USD	49 USD	29 USD
Características	Rudas todoterreno	-	-	Todoterreno	Todoterreno superior
		Adecuado para el pavimento, hierba seca, suciedad dura, superficies sueltas	Ofrecen un gran agarre en hierba, barro, suciedad y material suelto	Rendimiento superior fuera de carretera en suelos sueltos, pavimento o césped.	Suelo suelto (secas y arcillosas), compactas (secas), pavimento o pistas de hierba
	Material resistente	Goma y plástico de alta calidad	Inserto de espuma, mayor resistencia rueda-neumáticos	Inserciones de espuma	-
		Material de la llanta: ABS	Goma calificada	Ruedas de plástico	Compuesto de neumático C2 suave

La selección del motor del primer grado de libertad tiene como principales requerimientos la dimensión del motor, la cual debe ser menor a 100 mm para evitar colisiones con obstáculo en el suelo, y la eficiencia de este para los torques requeridos al desplazar el vehículo sobre una superficie con pendiente de 30° y 0°. El torque del motor se obtiene mediante el cálculo de la resistencia al movimiento (R_T); la cual unifica la resistencia aerodinámica (R_a), resistencia a la rodadura (R_R) y la resistencia gravitatoria (R_g) en una sola ecuación.

$$R_T = R_a + R_R + R_g$$

$$R_T = \frac{1}{2} \rho C_x A_f v^2 + (f_o + f_v v^2) P + P \sin \theta$$

Donde:

- ρ : Densidad del aire [kg/m^3].
- C_x : Coeficiente de arrastre aerodinámico.
- A_f : Área frontal del vehículo [m^2].
- v : Velocidad de desplazamiento [m/s].
- f_o : Coeficiente de la resistencia a la rodadura para bajas velocidades.
- f_v : Coeficiente adimensional de arreglo.
- P : Peso del vehículo [N].
- θ : Ángulo de inclinación de la superficie.



El procedimiento del cálculo es desarrollado en el Anexo C.1, donde se obtiene un momento de 9.19 Nm para superficies planas y 16.53 Nm para superficies con elevación de 30° , cabe mencionar que ambos cálculos tienen un factor de seguridad de 2. Asimismo, el cálculo del torque se complementa con un análisis de fuerzas enfocado en una rueda, desarrollado en el Anexo C.2; mientras esta se desplaza en un pendiente de 30° con una aceleración de $0.1 \text{ m}/\text{s}^2$ y una velocidad lineal de $0.2 \text{ m}/\text{s}$, de acuerdo a los requerimientos. El resultado del análisis con un factor de seguridad de 2 arroja que se requiere un momento otorgado por el motor de 16.54 Nm para realizar el desplazamiento en pendiente. Por lo tanto, la selección del motor comercial debe cumplir con este requisito.

En la Tabla 4.2 se presentan las opciones de motores sin escobillas comerciales que cumplen con los requerimientos antes mencionados, la elección del motor se realiza visualizando la gráfica eficiencia, corriente, torque, velocidad y potencia del motor. Para ello, algunos valores para las curvas son extraídos de las hojas de datos de estos motores y se construye las gráficas empleando MATLAB, ver Anexo C.3.

Luego del análisis, el motor seleccionado es el RMD-X8 debido a los siguientes motivos. En primer lugar, el motor seleccionado presenta un consumo de corriente de 4.94 A en superficies planas, lo cual significa un bajo consumo de corriente respecto a los otros motores; asimismo, el desplazamiento en superficies planas es lo más frecuentemente realizado por el vehículo, por ende, un bajo consumo de corriente simboliza un mayor tiempo de autonomía del vehículo o un menor número de baterías.

En segundo lugar, el motor elegido tiene una eficiencia moderada de 66.43% en superficie plana, con la cual se asegura la protección del tiempo de vida del motor mientras ejecuta una tarea prolongada. En tercer lugar, para la situación crítica de subir un plano inclinado de 30°, lo cual solo se realiza en un pequeño intervalo de tiempo; el motor seleccionado requiere de 6.21 A para su funcionamiento y tiene una eficiencia del 59.4%, esta es baja en comparación de los otros motores, pero de acuerdo a la frecuencia de esta tarea no significa un daño considerable para el motor.

Tabla 4.2 Selección de motor para la rueda

Modelo	Requisitos	RMD-X8 Pro	RMD-X8	AK70-10	AK80-9
					
Marca		GYEMS	GYEMS	T MOTOR	T MOTOR
Torque nominal		13 Nm	9 Nm	8.3 Nm	9 Nm
Torque estático		35 Nm	21 Nm	24.8 Nm	18 Nm
Voltaje nominal	48 V	48 V	48 V	24/48 V	24V
Corriente nominal		6.5 A	4.9 A	8.8 A	12 A
Corriente mínima		2.95 A	3.33 A	0.1 A	
Corriente estática		12.5 A	7 A	26.1 A	24 A
Velocidad nominal		155 rpm	165 rpm	200/400 rpm	245 rpm
Backlash		5 Arc min	5 Arc min		9 Arc min
Encoder		16 bit magnético	16 bit magnético	12 bit	12 bit
Comunicación	CAN BUS	CAN BUS	CAN BUS	UART/CAN	CAN
Diámetro máximo	≤ 100 mm	98 mm	98 mm	89 mm	98 mm
Diámetro rotor	≤ 80 mm	42 mm	42 mm	30 mm	37 mm
Ancho	-	49 mm	43 mm	50.25 mm	38.5 mm
Precio		\$579.99	\$ 379	\$498.90	\$579.90
Superficies Planas (9.19 Nm)					
Eficiencia		64.45 %	66.43 %	80.72 %	79.89 %
RPM		175.46 rpm	163.33 rpm	195.93/391.86 rpm	244.11 rpm
Corriente		5.46 A	4.94 A	9.74 A	12.27 A
Pendiente 30° (16.54 Nm)					
Eficiencia		65.75%	59.4 %	67.43 %	69.27 %
RPM		136.15 rpm	102.5 rpm	162.95/325.9 rpm	211.67 rpm
Corriente		7.45 A	6.21 A	17.39 A	22 A

Cabe recalcar que el vehículo en ocasiones trabaja en dirección perpendicular a la inclinación; por ende, se realiza un cálculo para evitar la volcadura, el desarrollo de este se encuentra en el Anexo C.4. Los resultados muestran que el vehículo en posición estática puede volcarse en una pendiente de 53.13°, sin embargo, esto es imposible puesto que la máxima pendiente dentro del terreno de operación es de 30°. Asimismo, el cálculo menciona que el vehículo para iniciar una volcadura en una pendiente de

30° debe desplazarse a una velocidad de $9\sqrt{R}$ (R : radio de curvatura [m]), lo cual nunca sucedería puesto que la velocidad máxima de recorrido del vehículo es de 0.2 m/s, la velocidad teórica de acuerdo a los motores es de 1.28 m/s y el radio de curvatura siempre es mayor a 1 m.

Posteriormente a la elección de los componentes se procede al diseño del acople para la transmisión por forma que requiere la rueda seleccionada. Por lo tanto, se diseña un eje E1 (en la Figura 4.3) con base cilíndrica para empernarse a la base del rotor del motor M1 mediante pernos M3 x 10; luego en su parte intermedia presenta un cambio de sección a un prisma hexagonal, el cual encaja por forma con el cubo del aro de la rueda; finalmente el eje culmina en un cilindro con parte roscada, a la cual se coloca una tuerca de seguridad M8 para eliminar el movimiento axial de este. El ensamble del acople entre E1-M1 se observa en la Figura 4.3. Además, en la Figura 4.4 se muestra el ensamble completo entre E1-M1-Rueda.

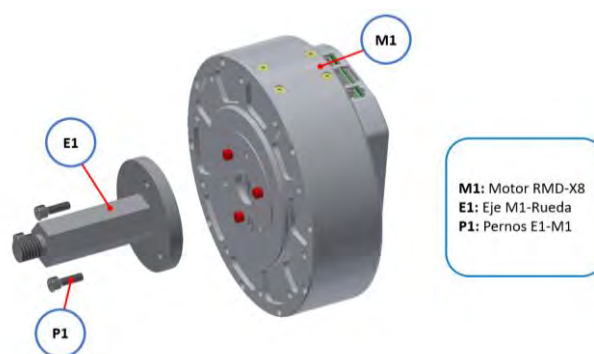


Figura 4.3: Ensamble del motor M1 al eje de transmisión E1 (imagen propia)

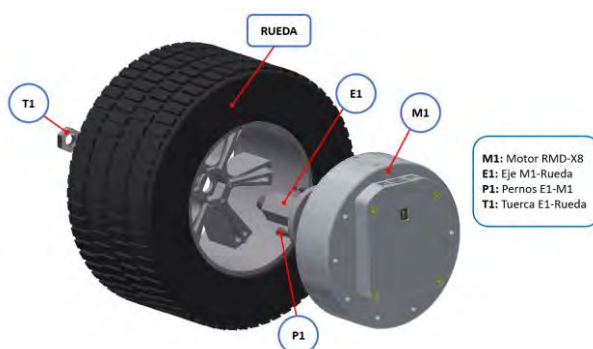


Figura 4.4: Ensamble motor M1 – Eje de transmisión E1 – Rueda (imagen propia)

El análisis de resistencia mecánica del eje E1 diseñado se determina empleando la fórmula de capacidad de transmisión de torque por forma, la cual es detalla líneas más abajo y el procedimiento del cálculo se encuentra en el Anexo C.5. El resultado de este

cálculo es que la pieza tiene una presión admisible de 90.63 MPa; la cual es menor al esfuerzo a la fluencia del acero inoxidable C45 DIN 17200, por lo cual el eje no falla. Asimismo, la Figura 4.5 muestra la simulación mediante ANSYS de E1 en su estado de operación; el computado muestra una presión de 101.55 MPa en la unión, 335 MPa para el eje, F.S. de 1.16 para el ensamble, y deformación despreciable de 0.2 mm. Cabe resaltar que la manufactura del eje se subdivide en dos piezas; la primera es el torneado de la parte cilíndrica a partir de una barra de perfil hexagonal (diagonal de 17 mm) y su respectivo roscado; y la segunda es una placa de 5 mm, la cual mediante una máquina de control numérico computarizado (CNC) se realiza un agujero hexagonal de la misma dimensión que el eje. Ambas piezas tienen un chaflan para permitir una soldadura con depósito de material, finalmente la pieza se pule para obtener una superficie plana que se emperna al rotor del motor, en la Figura 4.6 se muestra el detalle de las piezas y soldadura.

$$M_t = \frac{1}{6} L a^2 \frac{z}{2} p_{ad}$$

Donde:

- M_t : Momento torsor [MPa]
- L : Longitud de contacto [mm]
- a : Lado del polígono de la sección del eje [mm]
- z : Número de lados del polígono de la sección
- p_{ad} : Presión admisible [MPa]

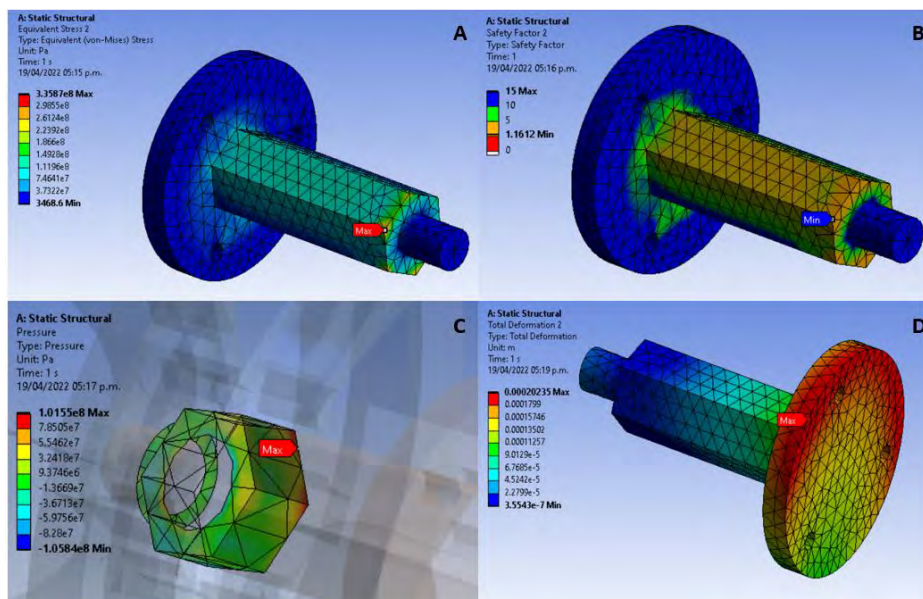


Figura 4.5: Simulación: A. Esfuerzo equivalente, B. Factor de seguridad, C. Presión de contacto, D. Deformación total (imagen propia)

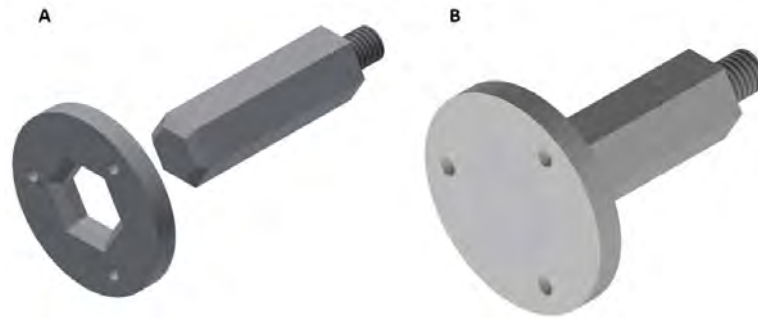


Figura 4.6: A. Piezas con chaflanes para la soldadura, B. Eje soldado y pulido (imagen propia)

La carcasa de protección del motor se encuentra dividida en dos partes C1 y C2, permitiendo su fabricación por medio de CNC sin desperdiciar mucho material. C1 posee el negativo del estator del motor RMD-X8, al cual se ensambla mediante pernos (M3 x 20) para evitar su desalineamiento, asimismo, esta pieza posee unas extensiones para evitar colisiones con obstáculos y pueda ensamblarse mediante pernos (M4 x 12) a la pieza C2. Esta segunda pieza es un semiarco que protege la parte superior del motor y lo fija. En la Figura 4.7 se observa el detalle del ensamble. Ambas piezas son manufacturadas empleando Aluminio 6061-T6 por su flexibilidad. Por último, la Figura 4.8 muestra las vistas isométricas del ensamble del diseño de esta sección.

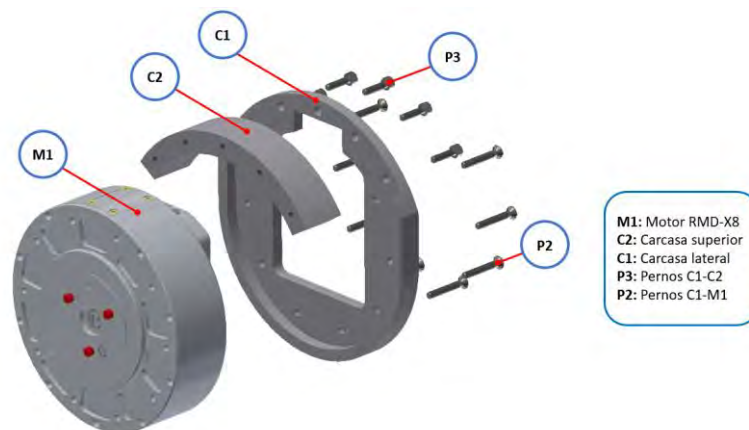


Figura 4.7: Ensamble del motor M1 a su carcasa de protección (imagen propia)






Figura 4.8: Vistas isométricas del ensamble rueda-carcasa-motor (imagen propia)

4.2.2 Diseño del acople motor 2 – grado de libertad 1

La configuración *explicit steering* requiere de dos grados de libertad, por tal motivo esta sección está dirigida al diseño de este segundo grado de libertad. El proceso inicia con la elección del motor para realizar el giro de la rueda sobre su eje radial; para ello, en el Anexo C.6 se desarrolla el cálculo del torque necesario para girar la rueda con un F.S. de 2. El resultado de este análisis es un torque de 3.8 Nm, el cual es un requerimiento para la selección del motor; asimismo, la dimensión del motor es un factor crítico para su elección, puesto que el espacio es reducido y se debe evitar el sobredimensionamiento.

En la Tabla 4.3 se exponen los motores comerciales sin escobillas que cumplen con los requerimientos previamente establecidos. El motor elegido es el AK 60-6 debido principalmente a su diámetro máximo, 76 mm, el cual es menor entre los tres motores. Asimismo, este motor presenta una eficiencia del 63.39%, cabe mencionar que el giro en este grado libertad no es continuo; por lo tanto, el motor no presenta un desgaste luego de varios ciclos de trabajo.

Tabla 4.3 Selección de motor para el segundo grado de libertad

Modelo	Requisitos	AK 80-6	AK 60-6	RMD-L-9015-35T
				
Marca		T MOTOR	T MOTOR	MYACTUATOR
Torque nominal		6 Nm	3 Nm	1.67 Nm
Torque estático		12 Nm	9 Nm	5 Nm
Voltaje nominal	24 V	24 V	24 V	24 V
Corriente nominal		12 A	7.4 A	3.34 A
Corriente mínima		0.8 A	0.1 A	-
Corriente estática		24 A	22 A	11 A
Velocidad nominal		365 rpm	400 rpm	290 rpm
Backlash		9 Arc min	9 Arc min	
Encoder		12 bit magnetico	12 bit magnetico	14 bit
Comunicación	CAN	CAN	CAN	CAN
Diámetro máximo	≤ 100 mm	98 mm	76 mm	89 mm
Diámetro rotor	≤ 80 mm	37 mm	28 mm	44 mm
Ancho		38.5 mm	36.5 mm	42 mm
Giro (3.8 Nm)				
Eficiencia		84.43 %	63.39 %	16 %
RPM		387 rpm	357.33 rpm	110 rpm
Corriente		7.6 A	9.35 A	7.6 A

Luego de la elección del motor se procede a diseñar el acople de este al ensamble de la sección anterior. Tener en cuenta que el acople debe permitir el giro del ensamble de la parte inferior, por ende, se opta por un rodamiento de rodillos cónicos. Este permite que la parte fija se apoye en la pista exterior superior y la sección en movimiento, en la pista exterior inferior. Asimismo, este tipo de rodamiento es ideal para este ensamble puesto que trabaja adecuadamente frente a cargas radiales y axiales, lo cual contrarresta los momentos generados por la extremidad, las cargas por el peso del vehículo, evita el desalineamiento del motor y sirve como protección para este.

Para el ensamble del rodamiento se requiere de una base de apoyo, la cual se muestra en la Figura 4.9. Esta base requiere de dos piezas C3 y C4, las cuales son de Aluminio 6061-T6 y fabricadas mediante CNC. Donde C3 se ensambla mediante pernos (M4 x 16) a C2, asimismo, C3 y C4 se unen mediante soldadura. La validación del funcionamiento de la junta por soldadura se realiza en ANSYS, la Figura 4.10 muestra las fuerzas cortantes en ambas soldaduras, de las cuales ninguna fuerza simboliza una posible falla de la unión soldada; además, el factor de seguridad para ambas juntas es mayor a 15 de acuerdo a la simulación.

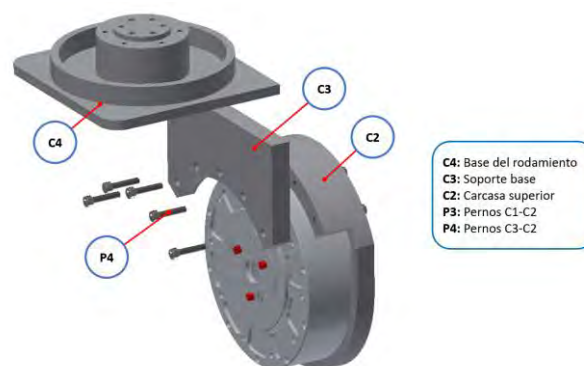


Figura 4.9: Ensamble de la base del rodamiento (imagen propia)

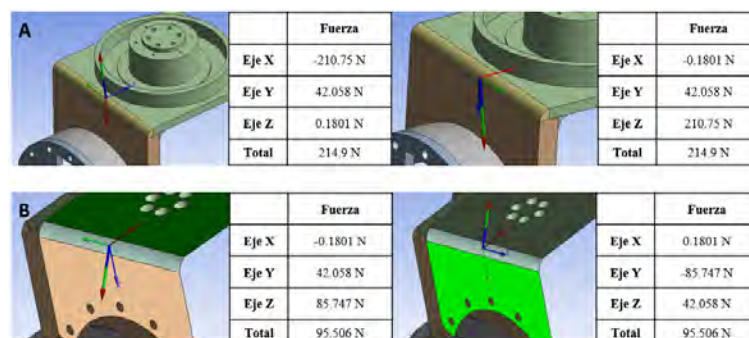


Figura 4.10: Simulación de las fuerzas cortantes en las juntas de soldadura: A. Externa, B. Interna (imagen propia)

La protección del segundo motor requiere de un diseño de una carcasa de dos partes C5 y C6 que se empernan con pernos (M3 x 8) al motor M2 por la parte superior. Además, esta carcasa tiene la función de fijar el rodamiento, puesto que tiene unas abrazaderas (naranja) que permite la sujeción de la pista exterior (verde), esto es un requerimiento de ensamblaje del fabricante del rodamiento, SKF. En la Figura 4.11 se observa un corte de sección del ensamble detallado del segundo grado de libertad. Las partes fijas son el estator del motor M2, ambas carcasas C6 y C5, y la pista externa del rodamiento; mientras que las piezas móviles son el rotor del motor M2, la carcasa para la base del rodamiento C4 (amarillo), la lámina de sujeción C7 (azul) y la pista interna del rodamiento. El acople permite que el rotor del motor M2 mediante los pernos (M4 x 30) transmita el torque necesario para el giro a C4, lo cual se traslada al eje radial de la rueda. Cabe resaltar dos puntos importantes; el primero, la lámina C7 esta empernada por pernos (M3 x 16) a C4, puesto que su función es fijar la pista interna del rodamiento, esto es un requerimiento de fabricante; y el segundo, las carcasas C6 y C5 (naranja) presenta una luz de separación con C4 para evitar la fricción. Por último, la Figura 4.12 muestra las vistas isométricas del ensamble.

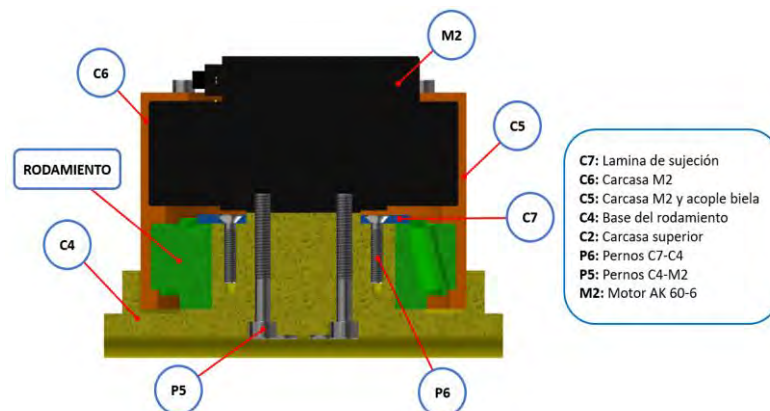


Figura 4.11: Detalle del ensamble de rodamiento (imagen propia)



Figura 4.12: Vistas isométricas del ensamble hasta el segundo grado de libertad (imagen propia)

Finalmente, el ensamble mecánico del acople motor 2 – grado de libertad 1 es simulado en ANSYS, con la finalidad de verificar su correcto funcionamiento. La Figura 4.13 muestra los parámetros iniciales para la simulación. El primer parámetro es la fuerza que proviene de la distribución equitativa del peso del sistema sobre cada rueda ($F = 125\text{ N}$); el segundo es el par que ejerce el motor 2 sobre la pieza ($M_{motor_2} = 37.5\text{ Nm}$); el tercero es el momento generado al interior de la pista interna del rodamiento ($M_{rodamiento} = 3.8\text{ Nm}$); el cuarto y quinto son los soportes fijos al empernar el motor a la pieza y las caras que lo soportan.

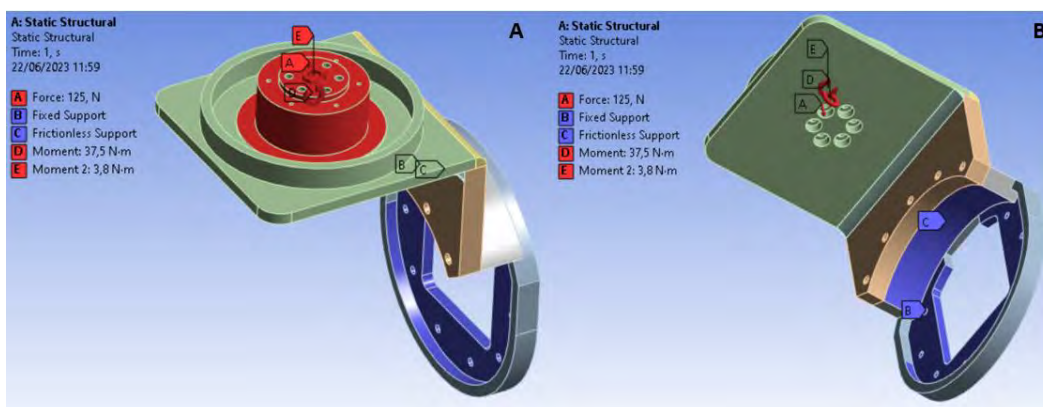


Figura 4.13: Parámetros iniciales de la simulación del acople motor 2 – grado de libertad 1: A. vista superior, B. vista inferior (imagen propia)

La Figura 4.14 muestra los resultados de la simulación en ANSYS. El resultado de la deformación total presenta una deformación máxima de 0.02 mm, la cual no es significativa en relación a las dimensiones del sistema. La simulación de esfuerzo equivalente muestra que el esfuerzo máximo del ensamble es de 56,92 MPa, lo cual ocasiona un factor de seguridad mínimo de 4.55. Este punto crítico se encuentra en la carcasa superior C2, específicamente en los agujeros que sirven para empernar la C2 y C1. Este comportamiento crítico es lo esperado en una unión empernada; sin embargo, el factor de seguridad asegura que la pieza no presentara fallas.

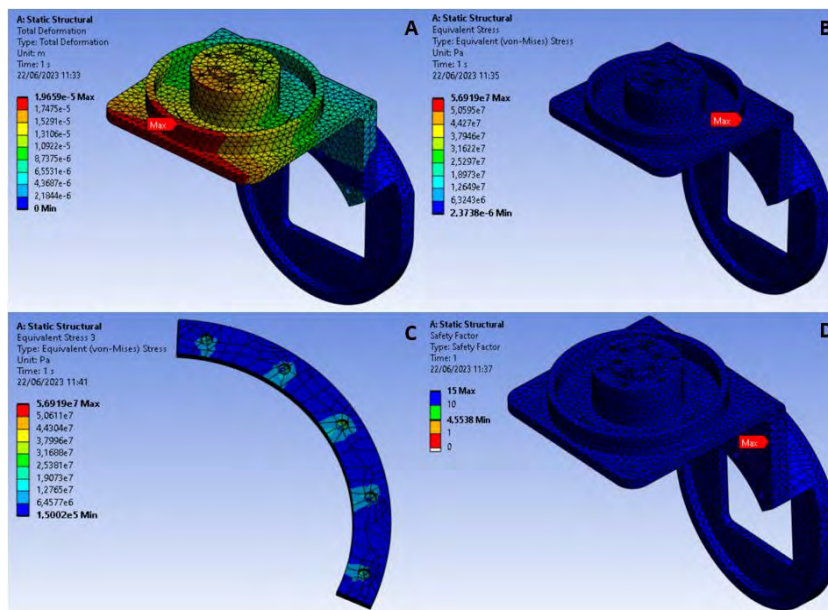


Figura 4.14: Resultados de la simulación: A. deformación total, B. esfuerzo equivalente, C. esfuerzo equivalente en C2, D. factor de seguridad (imagen propia)

4.2.3 Diseño del mecanismo de suspensión

El subsistema móvil culmina su desarrollo mecánico con el diseño del mecanismo de suspensión, el cual es de vital importancia debido a que el suelo del ambiente de trabajo no es uniforme y presenta variaciones que impiden la estabilidad de la estructura principal.

El mecanismo de 4 barras y un amortiguador con resorte es la propuesta para lograr la suspensión de la estructura principal. En la Figura 4.15 se presenta el detalle del acople entre el segundo grado de libertad con el mecanismo de suspensión. La carcasa C5 en su diseño tiene orificios que sirven de pivote (juntas) para las cuatro bielas de aleación de aluminio-silicio EN AW-6060; B1, B2, B3 y B4. Las cuatro barras giran sobre su propia junta de manera paralela entre ellas; cabe mencionar que las bielas se agrupan de a dos, B1-B2 y B3-B4, mediante dos ejes de acero inoxidable C45 DIN 17200, E2 y E3, que se fijan a C5 a través de tuercas de seguridad M5. Asimismo, la configuración de ensamblaje para cada biela a C5 y su respectivo eje está conformada por dos bocinas BC1 y BC2; donde BC1 se acopla entre la carcasa y el eje, mientras que BC2 entre el eje y la biela. El motivo de este acople se debe a la importancia de eliminar zonas de contacto entre elementos fijos y en movimiento, lo cual conserva las

superficies de estos evitando daños por el rozamiento, el detalle de este ensamble se muestra en la Figura 4.16.

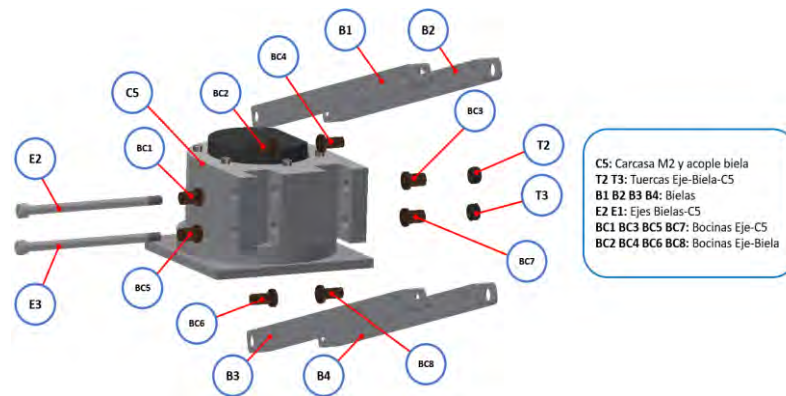


Figura 4.15: Ensamble segundo grado de libertad – sistema de suspensión (imagen propia)

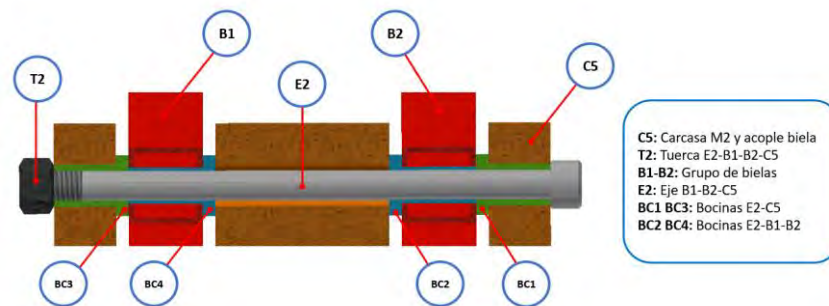


Figura 4.16: Detalle del ensamble E2-B1-B2-C5 (imagen propia)

Por otro lado, con la finalidad de evitar que las bielas se desalineen en su movimiento, estas son aseguradas aproximadamente a 140 mm del pivote con la ayuda de dos ejes de acero inoxidable C45 DIN 17200, E4 y E5, para cada grupo de bielas. La Figura 4.17 explica el ensamble de E4 a las bielas B1-B2; en la cual se observa que el eje presenta dos cambios de sección la cual se fija a las caras internas de B1 y B2, mientras que el eje es asegurado a las caras externas de las bielas empleando dos tuercas de seguridad M6.

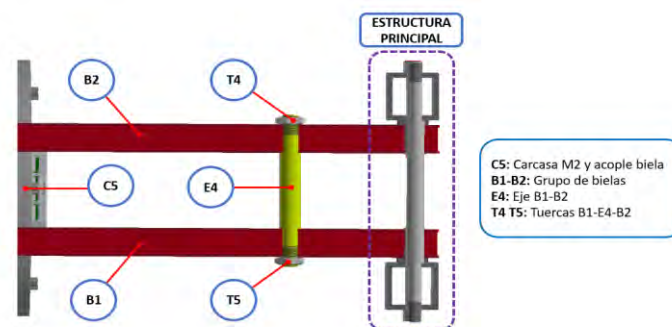


Figura 4.17: Detalle del ensamble B1-E4-B2 (imagen propia)

Además, las bielas en su otro extremo son aseguradas a la estructura principal por medio de un eje (E6, E7, E8 y E9) de acero inoxidable C45 DIN 17200 para cada una de ellas, en la Figura 4.18 se observa el ensamble de esta segunda sección de las bielas. Asimismo, la Figura 4.19 muestra el detalle del ensamble de E6-B1 a la estructura principal, donde el eje presenta un cambio de sección la cual se fija al perfil de la estructura principal y se asegura a B1 con la ayuda de un anillo de retención A1; la separación entre las piezas en movimiento y fijas se efectúa a través de una bocina BC9.

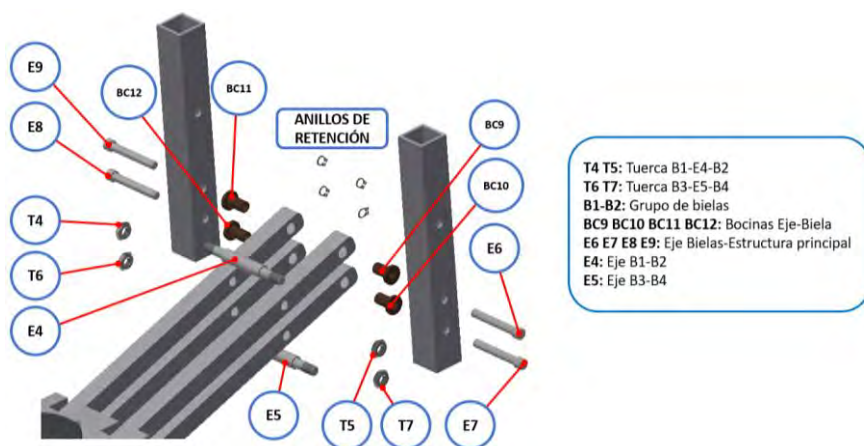


Figura 4.18: Ensamble de las bielas con la estructura principal (imagen propia)

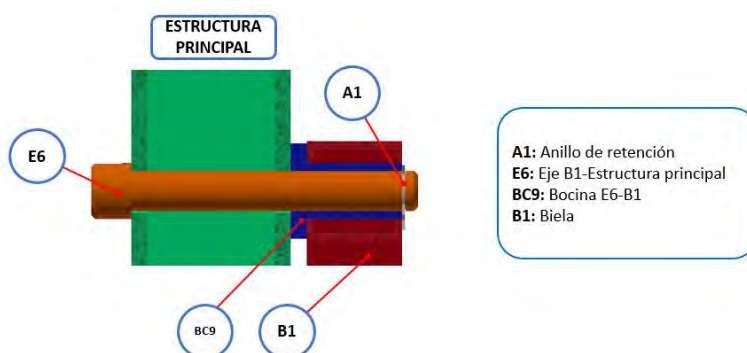


Figura 4.19: Detalle del ensamble E6-B1-Estructura principal (imagen propia)

Las bocinas son Bronce SAE 68B y manufacturadas mediante un torno revolver, validadas mediante un cálculo de resistencia mecánica desarrollado en el Anexo C.8, con cual se demuestra que las bocinas no fallan. De la misma manera, los ejes son manufacturados mediante un torno revolver y la justificación del cálculo de resistencia mecánica se encuentra en el Anexo C.7. Las bielas son manufacturadas a partir de una barra de perfil 12 x 12 x 1 mm, la cual es cortada en secciones de 200 mm con un proceso de suavizado (redondeado) de las esquinas y un mecanizado de agujeros.

El sistema de suspensión es diseñado tomando en cuenta la constante de rigidez del resorte, el coeficiente de amortiguamiento y la dimensiones para su ensamble. El diseño comienza dimensionando el espacio en el cual el amortiguador se ensambla; aproximadamente el resorte puede tener un diámetro máximo de 20 mm y la longitud sin deformación de 60 mm. Además, como parte del diseño se propone un diámetro de alambre de 4 mm, un número de anillos de 11, y el material de Music Wire ASTM A228. Con esta información se ingresa a una calculadora de resortes que ofrecen los proveedores, donde se determina un resorte con constante de rigidez de 56.279 kN/m, detalles de la ficha técnica en el Anexo C.9.

En base al coeficiente de rigidez del resorte se estima el valor de la constante de viscosidad que debe tener el amortiguador. Para ello, se propone una simulación en Simulink donde se describe matemáticamente el efecto de amortiguación frente a un agujero de 100 mm que es sobrepasado en 0.25 s, el desarrollo de la planta se realiza en el Anexo C.9. En la Figura 4.20 se observa el comportamiento del amortiguador en la simulación, la estabilidad de la planta se obtiene con un coeficiente de viscosidad de 30000 N.s/m. Con ello, la superficie superior del vehículo solo decae 40 mm y retorna a su posición inicial gradualmente luego de 3.2s de haber cruzado el agujero, lo cual describe un adecuado funcionamiento del amortiguador puesto que no crea oscilación en la estructura principal o un pico elevación.



Figura 4.20: Simulación del funcionamiento del amortiguador (imagen propia)

El ensamble de la amortiguación se realiza entre la estructura principal y el ensamble previamente armado. El amortiguador AM1 se ubica entre los ejes E5 y E10 de acero inoxidable C45 DIN 17200, los cuales se ajustan por medio de tuercas a las bielas y a la estructura principal, respectivamente. Asimismo, en el ensamblaje se insertan separadores entre los perfiles y los soportes del amortiguador, con el propósito de evitar el movimiento lateral de estos. Finalmente, la estructura es asegurada mediante dos placas de Aluminio 6061-T6 (PL1 y PL2); las cuales son fijados con pernos M5 y tuercas en T a los perfiles de V-slot, mientras que para fijarlos a los perfiles de 20 x 20 x 2 mm se emplean pernos M5 y tuercas de seguridad M5. En la Figura 4.21 se muestra el ensamble del mecanismo de suspensión.

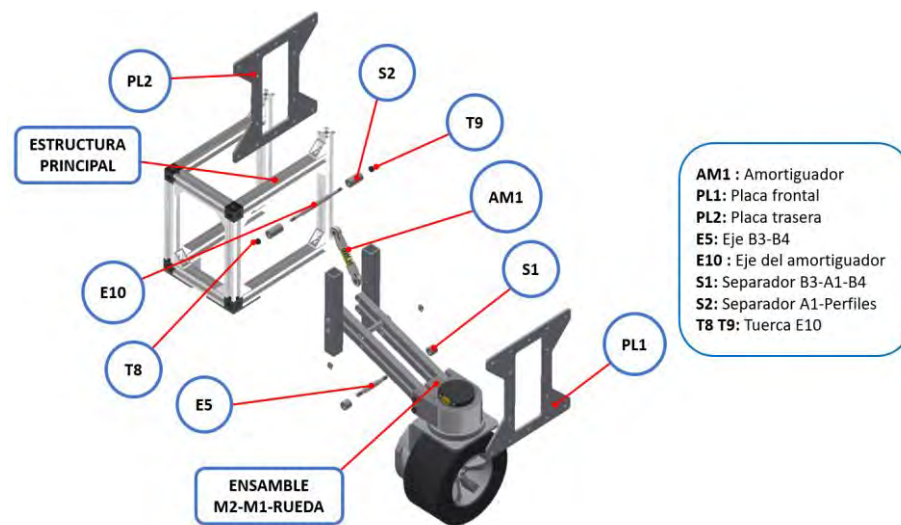


Figura 4.21: Ensamble del mecanismo de suspensión (imagen propia)

Finalmente, en la Figura 4.22 se observa el funcionamiento del mecanismo con una vista frontal de la estructura del vehículo, en la cual se aprecia como el resorte permite el pivoteo de las bielas que se impulsan por la geografía del suelo. Asimismo, en la Figura 4.23 se presenta las vistas isométricas del ensamble final del diseño del subsistema móvil a la carcasa principal.

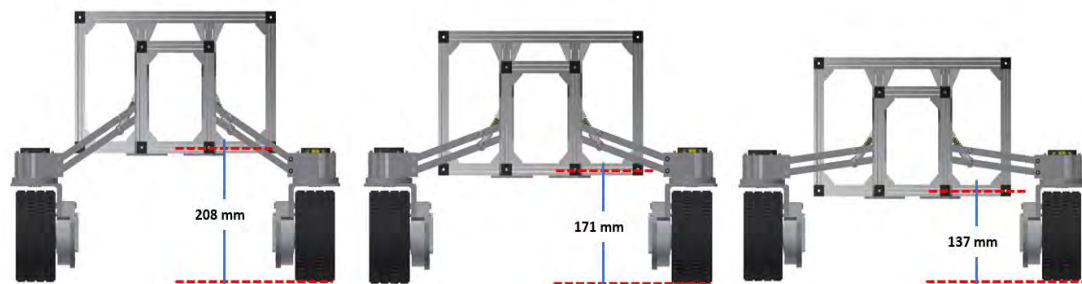


Figura 4.22: Funcionamiento del sistema de suspensión (imagen propia)

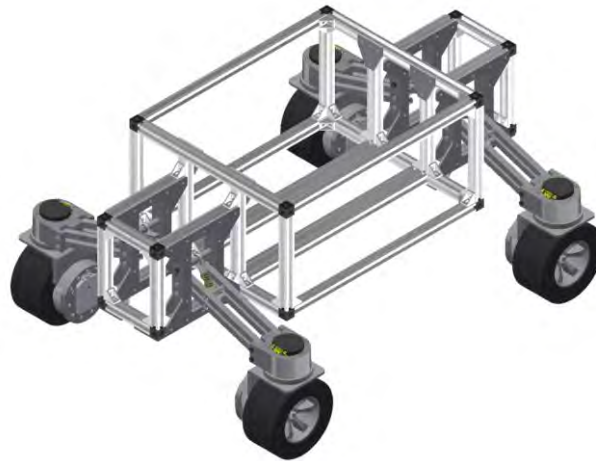


Figura 4.23: Vista isométricas del ensamblaje de la estructura principal al subsistema móvil (imagen propia)

Finalmente, el diseño del mecanismo de suspensión es simulado en ANSYS con el objetivo de verificar la deformación máxima del sistema y el factor de seguridad. La Figura 4.24 muestra los resultados de la simulación. Por un lado, la deformación máxima es de 0.89 mm en su estado estático, lo cual es representado por una ligera deformación en la parte superior de la estructura; por otro lado, el factor de seguridad mínimo es de 1.11, lo cual es crítico, este valor se encuentra en el agujero de la biela. Este último resultado podría implicar una posible falla; sin embargo, este perfil es fácilmente reemplazable puesto que solo requiere de corte en su manufactura.

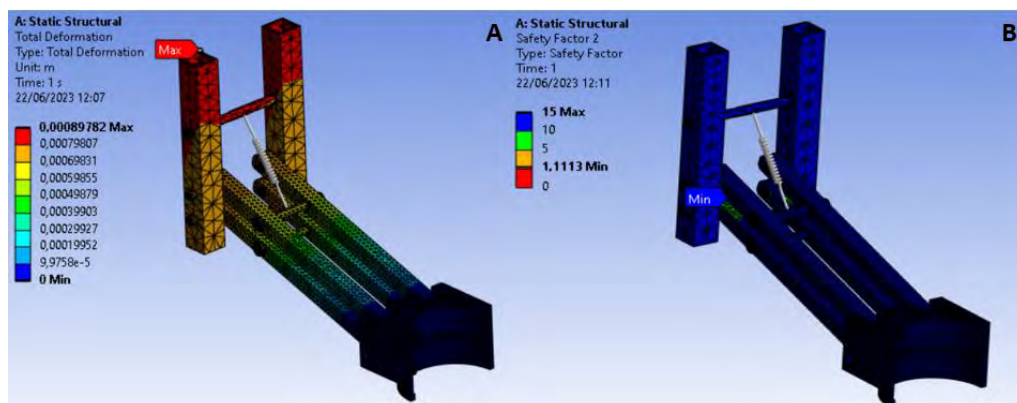


Figura 4.24: Resultados de la simulación: A. deformación total, B. factor de seguridad (imagen propia)

La simulación de mecanismo también presenta un análisis modal para determinar la frecuencia de resonancia del sistema; esto es importante puesto que el sistema de amortiguación se encuentra en constante oscilación. Las frecuencias de resonancia de cada modal (1-10) se muestran en la parte inferior derecha de la Figura 4.25.

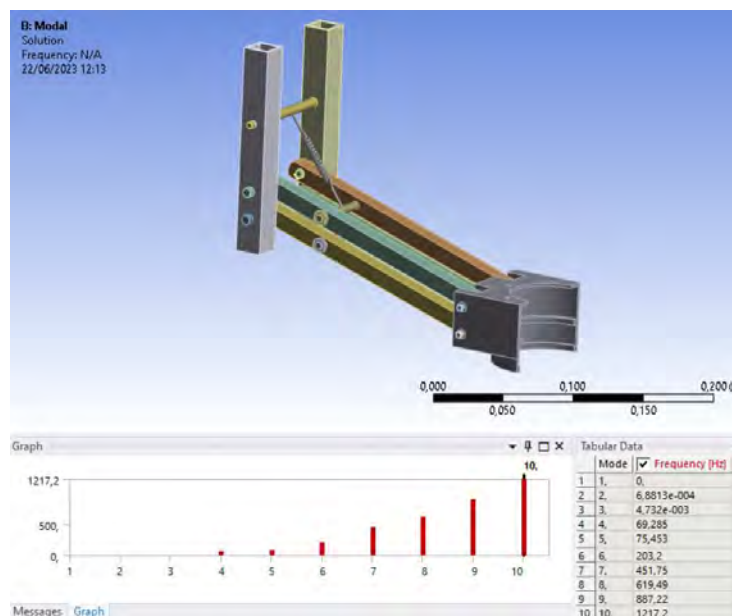


Figura 4.25: Análisis de las frecuencias de resonancia (imagen propia)

4.3 Diseño del distribuidor de semillas

El subsistema de sembrado presenta en su diseño tres partes importantes; la estructura de almacenamiento de semillas, el disco distribuidor de sembrado, y el motor con su acople para impulsar a este último. En esta sección se realiza el diseño y justificación del subsistema de sembrado.

4.3.1 Diseño de la estructura de almacenamiento de semillas

La estructura de almacenamiento de las semillas de quinua lleva en su interior como máximo 2 kg de estas, cabe mencionar que la densidad de la semilla es $928 - 1188 \text{ kg m}^{-3}$ (Vilche *et al*, 2003). Por lo tanto, el volumen mínimo que debe tener en su interior la estructura de almacenamiento es de aproximadamente 1.68 L. Asimismo, la carcasa debe tener un espacio para ubicar los sensores que realizan la estimación de la cantidad de semillas.

En la Figura 4.26 se observa la estructura impresa en PLA propuesta para el almacenamiento de las semillas. La carcasa presenta una forma de embudo para que las semillas caigan por gravedad por un mismo orificio; asimismo el volumen interno es de aproximadamente 2.48 L, mayor al requerido. Por otro lado, la estructura posee una esquina donde ubicar los sensores infrarrojos aislándolos de las semillas, y en las

caras externas presentan orificios para asegurar el sensor y el cableado para extraer las mediciones.

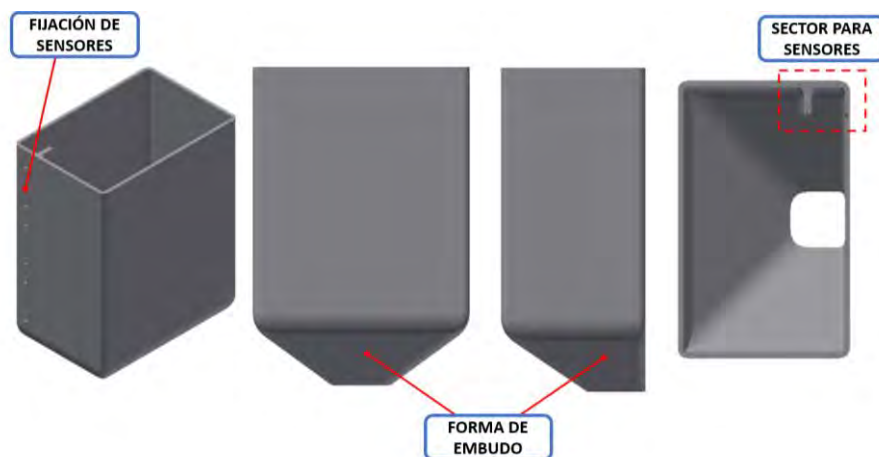


Figura 4.26: Vista isométrica, frontal, perfil y superior de la estructura de almacenamiento de semillas (imagen propia)

La segunda parte de esta estructura es un soporte de disco de distribución que permite asegurar que el disco de distribución transporte a las semillas hasta la parte inferior y caigan por la gravedad. La pieza es fabricada por impresión 3D en PLA puesto que se realiza una soldadura en frío entre esta pieza y la estructura de almacenamiento empleando cloroformo. Asimismo, la carcasa es cubierta por medio de una tapa impresa en PLA que lleva el negativo de la estructura de almacenamiento, esta genera un ajuste de apriete con la estructura y de fácil desmontado, En la Figura 4.27 se muestra el ensamble de la estructura de almacenamiento de semillas.

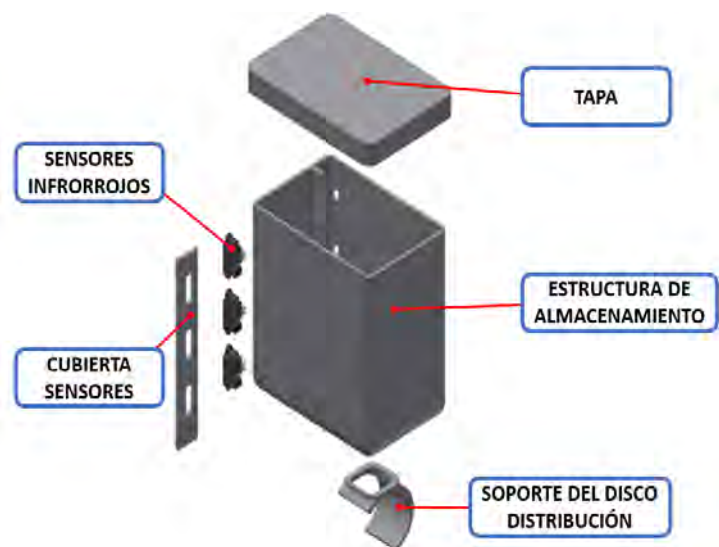


Figura 4.27: Vista isométrica, frontal, perfil y superior de la estructura de almacenamiento de semillas (imagen propia)

4.3.2 Diseño de acople motor – rotor de distribución

El diseño del rotor de distribución consiste en un disco que almacene porciones pequeñas de semillas que descenden la carcasa de alimentación, este debe tener un radio reducido para no incrementar la carga de torque en el motor. Asimismo, el espaciado entre orificios debe ser el mayor posible para evitar revoluciones por minuto muy pequeños, lo cual puede traducirse en daños en el motor puesto que a bajas RPM el motor constantemente está tratando de vencer su inercia sin carga.

La propuesta de diseño se observa en la Figura 4.28. El rotor de distribución presenta dos tiras de agujeros de 8 x 6 x 4 mm, lo cuales están separados cada 90°. En estos agujeros ingresa 0.23 g de semillas, con lo cual en cada revolución caen 1.84 g de semillas por gravedad. A partir de ello, en el Anexo C.10 se calcula las RPM necesarias que requiere el motor para lograr un sembrado cada 20 cm, el resultado es de aproximadamente 15 RPM.

Por otro lado, la pieza diseñada obtiene el torque para girar por medio de un orificio cilíndrico con un agujero para un prisionero. Cabe resaltar que la pieza es fabricada por impresión 3D con ABS, puesto que este material presenta altas propiedades mecánicas en comparación a los otros materiales; esto es necesario debido a que la pieza está sometida a cargas de compresión por el peso de las semillas y la torsión generado por el motor.






Figura 4.28: Disco difusor de semillas (imagen propia)

Tomando en consideración el diámetro del rotor de distribución de semillas se obtiene el cálculo del torque que se requiere para mover el mecanismo cuando la estructura de almacenamiento tenga 2 kg de semillas en su interior. En el Anexo C.10 se detalla el cálculo del torque del motor, el cual resulta ser 0.24 Nm. Asimismo, el criterio de

selección incluye dimensiones máximas de 100 mm de diámetro externo del motor debido al espacio reducido para el ensamble.

En la Tabla 4.4 se muestra los motores comerciales con las especificaciones técnicas previamente mencionadas. El motor seleccionado es el modelo RMD-L-5015-35T debido a que presenta una eficiencia de 68%, lo cual muestra un bajo desgaste del motor para un funcionamiento constante en la labor de sembrado; además, el motor tiene un consumo de corriente moderado de 1.1 A, dimensiones geométricas compactas y el precio más accesible en comparación a los otros modelos.

Tabla 4.4 Selección de motor del distribuidor de semillas

Modelo	Requisitos	G60	RMD-L-5015-35T	RMD-L-7010-45T
				
Marca		T MOTOR	MYACTUATOR	MYACTUATOR
Torque nominal		0.6 Nm	0.36 Nm	0.63 Nm
Torque estático		1.75 Nm	0.82 Nm	2.1 Nm
Voltaje nominal	24 V	24 V	16 V	24V
Corriente nominal		3.1 A	1.57 A	1.75 A
Corriente mínima		0.25A	0.125 A	0.125 A
Corriente estática		9.5 A	3.62 A	6.1 A
Velocidad nominal		850 rpm	350 rpm	400 rpm
Encoder			14 bit	14 bit
Comunicación	CAN	CAN BUS	RS-485/CAN	RS-485/CAN
Diámetro máximo	≤ 100 mm	77 mm	49 mm	69 mm
Diámetro rotor	≤ 40 mm	35 mm	8.1 mm	12.7 mm
Ancho		38.1 mm	33.9 mm	28.9 mm
Precio		\$108.99	\$102	\$129
Peso de 2 kg (0.24 Nm)				
Eficiencia		85 %	68 %	72.6 %
RPM		1000 rpm	40 rpm	510 rpm
Corriente		1.6 A	1.1 A	0.75 A

El acople que permite la conexión entre motor seleccionado y el disco difusor de semillas debe ser una unión flexible, puesto que el ensamblaje de todas las piezas siempre presenta una pequeña desviación. Por ende, el uso de acople flexible tipo ciruela en la transmisión de potencia permite que el eje de acero inoxidable C45 DIN 17200 pueda transmitir adecuadamente el toque del motor al difusor de semillas. En la Figura 4.29 se muestra a detalle el acople entre el motor y el rotor de distribución de semillas.

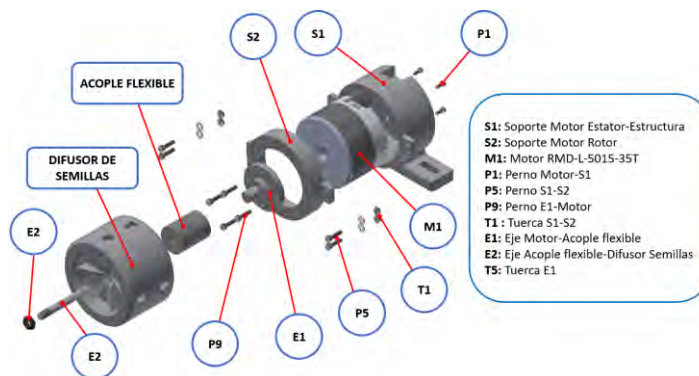


Figura 4.29: Ensamble del motor y rotor de distribución de semillas (imagen propia)

El ensamblaje del subsistema de sembrado a la estructura principal del vehículo consta de dos partes; en primer lugar, la carcasa de almacenamiento de semillas se acopla por medio de tornillos M5 y tuercas en T a dos perfiles de V-slot. En segundo lugar, el motor es fijado al perfil de V-slot de 40 x 20 mm mediante un soporte impreso en ABS con agujeros ranurados, donde se asegura con pernos M5 y tuercas en T. Finalmente estos dos ensambles deben ser alineados hasta que el disco difusor fijo al motor encaje en la salida de la estructura de almacenamiento. La Figura 4.30 evidencia el subsistema de sembrado acoplado a la estructura principal. Además, en la Figura 4.31 se muestra la vista isométrica del ensamble del vehículo.

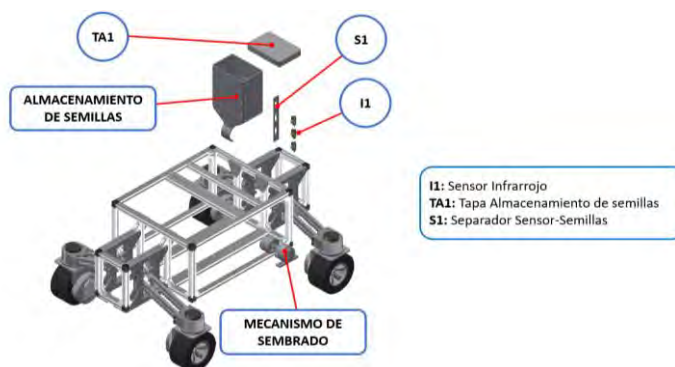


Figura 4.30: Ensamble del subsistema de sembrado a la estructura principal (imagen propia)

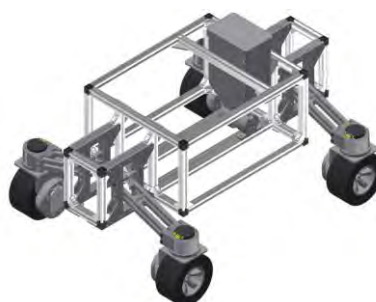


Figura 4.31: Vista isométrica del ensamble del subsistema de sembrado a la estructura principal (imagen propia)

4.4 Diseño de la herramienta de labrado

La herramienta de labrado debe ser diseñada para lograr la creación del surco en tierra suelta; para ello, el mecanismo debe permitir generar una fuerza constante sobre el suelo manteniendo uniformemente la profundidad de perforación. El diseño está basado en el mecanismo de bisagra, este consta de tres partes: la herramienta de perforación, el actuador del mecanismo y el punto de apoyo.

La herramienta de perforación es diseñada de acuerdo a la bibliografía revisada. Esta debe presentar un ángulo de ataque mayor de 60° ; la geometría de la pieza es compleja por lo cual se manufactura mediante fundición y forja. El material para su fabricación es un acero fundido GS-52 DIN 1681, puesto que es adecuado para piezas sometidas a altas sollicitaciones y cargas de impacto; asimismo, este material es apto para realizar los procesos de forja, fundición y soldado. Este último proceso de manufactura se emplea para unir la herramienta en forma de flecha a un perfil cuadrado de acero de 20x20x2 mm; para ello, la pieza tiene chaflanes en su cubo para facilitar el ingreso del perfil de acero y realizar una soldadura por depósito de material en las fronteras. En la Figura 4.32 se muestra la unión entre la herramienta de perforación y el perfil cuadrado de acero.



Figura 4.32: Herramienta de labrado (imagen propia)

El perfil de acero es el mango de la herramienta de labrado; por lo tanto, la fuerza para mantener la herramienta de perforación es ejercida sobre este perfil realizando un brazo de palanca. El mecanismo de bisagra presenta tres puntos de pivote uno de ellos se encuentra en la herramienta de labrado, con la finalidad de permitir el movimiento circular a partir del centro de pivote. Entonces, el perfil presenta dos agujeros, el más lejano es para el pivote de la herramienta, mientras que el intermedio es la unión con el actuador lineal.

El pivote de la herramienta de labrado es un eje de 10 mm de acero inoxidable C45 DIN 17200, asimismo, la unión tiene una bocina de Bronce SAE 68B para evitar el desgaste entre el eje y el perfil de acero que se encuentra en movimiento relativo. Por otro lado, con la finalidad de evitar el movimiento axial de la herramienta de labrado se imprimen separadores de ABS. En la Figura 4.33 se observa el ensamble del pivote de la herramienta de labrado.

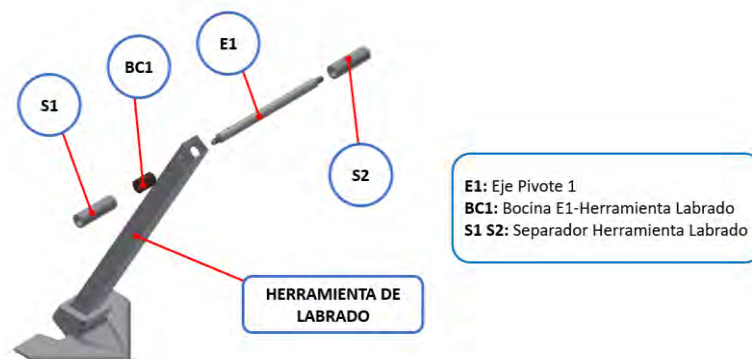


Figura 4.33: Ensamble del pivote 1 herramienta de labrado (imagen propia)

La unión entre la herramienta de labrado y el actuador lineal se realiza mediante una pieza de acero de cementación C15 DIN 17210, el cual tiene buenas características de homogeneidad y acabado superficial. Estas características son esenciales para esta pieza; puesto que requiere encajar en el perfil de acero, permitir el pivote entre la herramienta de labrado y el actuador lineal, y transmitir la carga ejercida por el actuador lineal. La Figura 4.34 detalla el ensamble entre esta unión y la herramienta de labrado. Este ensamble requiere de un perno M5, una arandela de presión y una tuerca M5 para fijar la unión al perfil cuadrado de acero; asimismo, en la parte superior de la unión se ubican dos bocinas de Bronce SAE 68B para prevenir daños en la unión debido al giro relativo entre esta y el actuador lineal. La vista isométrica del ensamble de la herramienta de labrado se muestra en la Figura 4.35.

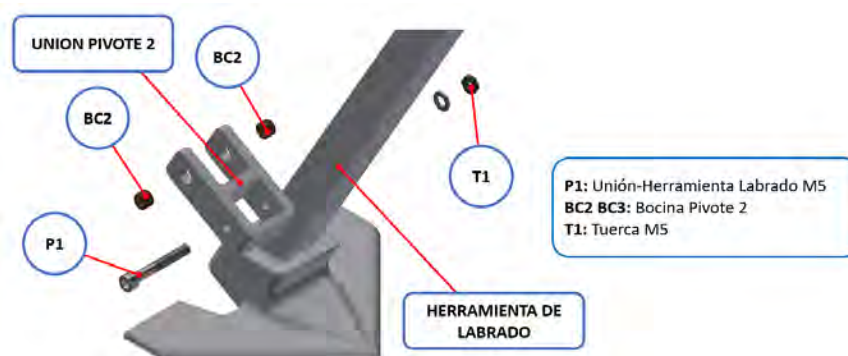


Figura 4.34: Ensamble del pivote 2 herramienta de labrado (imagen propia)



Figura 4.35: Vista isométrica de la herramienta de labrado (imagen propia)

Finalmente, la herramienta de labrado es sometida a una simulación en ANSYS para validar su funcionamiento. En la Figura 4.36.A se muestran la configuración de los parámetros para la simulación. Estos parámetros son la fuerza que ejerce el actuador lineal y parte del peso del vehículo ($F = 150\text{ N}$), la fuerza requerida para perforar el suelo ($F = 40\text{ N}$), el soporte fijo de la herramienta, y la condición de desplazamiento 0 en el eje Z puesto que siempre se mantiene en contacto con el suelo. Respecto a los resultados de la simulación, la deformación máxima es 0.04 mm , la cual no es significativa respecto a las dimensiones de la herramienta de labrado. El análisis de esfuerzo equivalente de von-Mises muestra un esfuerzo máximo de 4.01 MPa , lo cual genera un factor de seguridad mínimo de 6.23 . Estos resultados verifican el adecuado funcionamiento del ensamblaje.

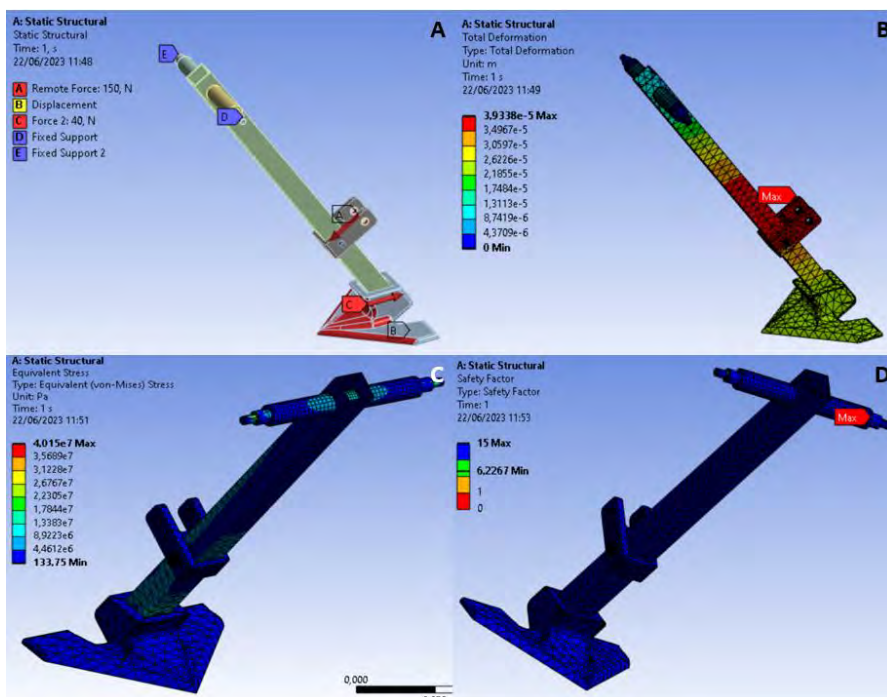





Figura 4.36: A. Parámetros de la simulación. Resultados de la simulación: B. deformación total, C. esfuerzo equivalente, D. factor de seguridad (imagen propia)

4.4.1 Diseño del mecanismo de actuación

El tercer punto de pivote se encuentra en el actuador lineal, el cual se extiende ejerciendo una carga para movilizar la herramienta de labrado y mantener la posición de esta en el suelo. Asimismo, la actuación de este dispositivo influye en la dinámica del mecanismo de 3 grados de libertad. El diseño del mecanismo tiene como factor principal la selección del actuador lineal, por ende, este componente mecánico debe cumplir con el requerimiento de ejercer una fuerza de compensación de aproximadamente 50 N; además, la extensión del actuador lineal debe permitir que la herramienta de labrado logre una perforación mínima de 45 mm. Por otro parte, el actuador no debe tener un consumo mayor a 24 V para evitar el incremento de voltaje del sistema.

El actuador lineal seleccionado es FA-240-S-12-4 de la marca FIRGELLI. La selección del componente se debe a su bajo voltaje de funcionamiento de 12 V; asimismo, la carga de empuje es suficiente en base a los requerimientos de fuerzas y la longitud de extensión de carrera permite que la herramienta pueda generar el surco en el suelo. Cabe resaltar que el actuador lineal seleccionado es el de menor precio. En la Tabla 4.5 se muestran las características de los actuadores lineales para su elección.

Tabla 4.5 Selección del actuador lineal del sistema de labrado

Modelo	Requisitos	EasyE-60	FA-240-S-12-4	U7B
				
Marca		BANSBACH	FIRGELLI	TOMMU
Dimensiones		335 x 60 mm	216 x 76 x 40 mm	108 x 77.4 x 45 mm
Carga de empuje	50 N	2200 N	900 N	1500 N
Carga de retracción		2200 N	1815 N	1500 N
Voltaje nominal	12/24 V	24 V	12 V	24V
Corriente sin carga		-	-	1 A
Corriente con carga		10 A	5 A	3 A
Velocidad sin carga		-	-	10.2 mm/s
Velocidad con carga		14 mm/s	12.7 mm/s	9 mm/s
Carrera de extensión		200 mm	101.6 mm	40 mm
Protección		-	IP 54	IP 65
Precio		\$ 639.97	\$ 119.99	-

El ensamble del mecanismo de actuación inicia fijando el primer punto de pivote a la estructura; para ello, el eje de pivote de la herramienta de labrado es anclado con tuercas M6 a la estructura principal mediante bridas, estas últimas son empernadas con M5 a los perfiles de V-slot a una altura aproximada de 58 mm de la base. El segundo punto de pivote se encuentra entre el actuador lineal y la herramienta de labrado. Para ello, en la sección anterior, la herramienta de labrado tiene una unión a la cual se acopla el vástago del actuador; esto se asegura mediante un eje de 6 mm de acero inoxidable C45 DIN 17200 ajustado con una tuerca M6. Por otro lado, el montaje superior del actuador lineal se fija a la estructura de V-slot mediante un acople de acero de cementación C15 DIN 17120 manufacturado en una CNC. El ensamble tiene dos bocinas de Bronce SAE 68B ubicadas en los orificios del acople, todo se conecta mediante un eje de 6 mm de acero inoxidable C45 DIN 17200 ajustado con una tuerca M6. En la Figura 4.37 se observa detalladamente el ensamble del mecanismo de actuación.

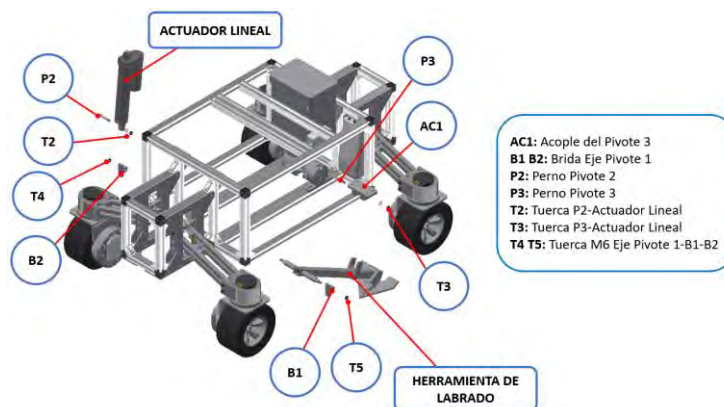


Figura 4.37: Ensamble del mecanismo de la herramienta de labrado (imagen propia)

Finalmente, en la Figura 4.38 se muestra el funcionamiento del mecanismo de actuación de la herramienta de labrado, ubicándolo en diferentes posiciones y validando la profundidad de perforación de aproximadamente 45 mm. Asimismo, la Figura 4.39 exhibe el ensamble final de la estructura del vehículo y sus tres subsistemas (móvil, sembrado y labrado).



Figura 4.38: Funcionamiento del mecanismo de labrado (imagen propia)

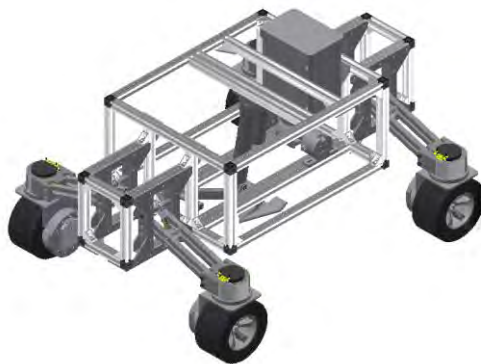


Figura 4.39: Vista isométrico del ensamblaje final de los tres subsistemas (imagen propia)

4.5 Listado de planos mecánicos

La lista de planos mecánicos resume las piezas de cada subsistema diseñado en la sección mecánica del proyecto. En la Tabla 4.6 se detallan los planos de los componentes mecánicos. La división en la tabla es a partir del subsistema al cual le pertenece el plano de despiece o ensamble. Cabe mencionar que los planos mecánicos de cada despiece y ensamble se encuentran en el Anexo E.

Tabla 4.6 Plano de los componentes mecánicos

Subsistema	Tipo Plano	Tamaño	Nombre Plano	Código
ESTRUCTURA	Despiece	A3	Placa caja superior	E-D01-A3
	Despiece	A3	Placa caja frontal	E-D02-A3
	Despiece	A3	Placa estructura principal frontal 1	E-D03-A3
	Despiece	A3	Placa estructura principal frontal 2	E-D04-A3
	Despiece	A3	Placa estructura principal superior	E-D05-A3
	Despiece	A3	Placa estructura principal lateral	E-D06-A3
	Despiece	A3	Placa estructura principal inferior	E-D07-A3
	Despiece	A3	Placa separadora labrado-sembrado 1	E-D08-A3
	Despiece	A3	Placa separadora labrado-sembrado 2	E-D09-A3
	Despiece	A3	Plancha estructura principal-rueda	E-D10-A3
	Ensamble	A1	Estructura principal	E-E11-A1
SUBSISTEMA MÓVIL	Despiece	A4	Perfil 20x20x2 150 mm	SM-D01-A4
	Despiece	A4	Soporte eje superior resorte	SM-D02-A4
	Despiece	A4	Soporte eje inferior resorte	SM-D03-A4
	Despiece	A4	Eje superior resorte	SM-D04-A4
	Despiece	A4	Eje biela-vehículo	SM-D05-A4
	Despiece	A4	Bocina biela-vehículo	SM-D06-A4
	Despiece	A4	Eje biela	SM-D07-A4
	Despiece	A4	Eje biela-motor	SM-D08-A4
	Despiece	A4	Bocina biela-motor-1	SM-D09-A4
	Despiece	A4	Bocina biela-motor-2	SM-D10-A4
	Despiece	A4	Perfil 12x12x1 200 mm	SM-D11-A4

	Despiece	A4	Soporte fijo motor2-1	SM-D12-A4
	Despiece	A4	Soporte fijo motor2-2	SM-D13-A4
	Despiece	A4	Ajuste de rodamiento	SM-D14-A4
	Despiece	A3	Soporte móvil motor 2	SM-D15-A3
	Despiece	A4	Soporte motor2-motor1	SM-D16-A4
	Despiece	A4	Soporte fijo motro1-1	SM-D17-A4
	Despiece	A4	Soporte fijo motro1-2	SM-D18-A4
	Despiece	A4	Eje rueda 1	SM-D19-A4
	Despiece	A4	Eje rueda 2	SM-D20-A4
	Ensamble	A4	Estructura Motores	SM-E01-A4
	Ensamble	A1	Estructura - Rueda y Suspensión	SM-E02-A1
SUBSISTEMA LABRADO	Despiece	A4	Herramienta flecha	SL-D01-A4
	Despiece	A4	Perfil 20x20x2 340 mm	SL-D02-A4
	Despiece	A4	Bocina soporte	SL-D03-A4
	Despiece	A4	Eje soporte	SL-D04-A4
	Despiece	A4	Separador soporte	SL-D05-A4
	Despiece	A4	Sujetador actuador-herramienta	SL-D06-A4
	Despiece	A4	Bocina actuador-herramienta	SL-D07-A4
	Ensamble	A3	Herramienta Labrado	SL-E01-A3
	Despiece	A4	Sujetador actuador	SL-D08-A4
	Despiece	A4	Bocina actuador-sujetador	SL-D09-A4
	Despiece	A4	Chumacera eje soporte	SL-D10-A4
	Despiece	A4	Eje actuador-herramienta	SL-D11-A4
	Despiece	A4	Eje actuador	SL-D12-A4
SUBSISTEMA SEMBRADO	Despiece	A3	Soporte motor sembrado 1	SS-D01-A3
	Despiece	A4	Soporte motor sembrado 2	SS-D02-A4
	Despiece	A4	Difusor de semillas	SS-D03-A4
	Despiece	A4	Eje motor	SS-D04-A4
	Despiece	A4	Eje acople-distribuidor	SS-D05-A4
	Ensamble	A3	Mecanismo Sembradora	SS-E01-A3
	Despiece	A4	Tapa recipiente	SS-D06-A4
	Despiece	A3	Recipiente de semillas	SS-D07-A3
	Despiece	A4	Compuerta de salida de semillas	SS-D08-A4
Ensamble	A3	Recipiente Sembradora	SS-E02-A3	
FINAL	Ensamble	A0	Vehículo agrícola	SI-E01-A0

CAPÍTULO 5

DISEÑO ELECTRÓNICO DEL SISTEMA

En este capítulo se desarrolla el diseño electrónico de los subsistemas del concepto solución óptimo. Este capítulo presenta la selección de los componentes electrónicos necesarios para el funcionamiento del sistema. Asimismo, se establece la distribución final de los componentes en la carcasa principal del vehículo

5.1 Selección de componentes electrónicos

El vehículo de agricultura realiza tres tareas (labrado, sembrado y desplazamiento), por los cuales se requiere de componentes electrónicos para su funcionamiento. Estos componentes son divididos en cuatro grupos de acuerdo a su propósito, los cuales son: sensores para la navegación autónoma, dispositivos de comunicación, periféricos para la interacción con el usuario y seguridad del sistema, y unidades de control y energéticas. Por último, los componentes seleccionados son distribuidos en su mayoría en la carcasa principal y otros, exteriormente.

5.1.1 Selección de sensores para la navegación autónoma

La navegación autónoma requiere de componentes que son capaces de describir el entorno que los rodea. Estos dispositivos son los siguientes: cámara de profundidad, LiDAR y sensor inercial. En esta sección se justifica la selección de estos.




Cámara de profundidad

Las cámaras de profundidad son empleadas para obtener información de la distancia de los objetos que se encuentran en su campo de visión, el funcionamiento radica en la toma de imágenes mediante una visión estereoscópica. La información de los píxeles de las imágenes es combinada con lo sensado por un láser infrarrojo, esto le otorga a la imagen la información de posición de cada objeto en la imagen. Con esta información, el sistema es capaz de determinar obstáculos que se encuentren en el entorno de trabajo.

Las características para la selección de una cámara de profundidad radican en los siguientes factores: bajo consumo energético, puesto que es un componente que está en funcionamiento desde el inicio hasta la culminación la labor agrícola; un rango de operación mayor o igual a 5 m, debido a que el campo de cultivo es de 200 m^2 y con esta distancia mínima se obtiene información aproximadamente de la quinta parte del entorno; amplio campo de visión, lo cual permite detectar obstáculos estáticos o dinámicos que provengan de manera lateral al vehículo; tener un sensor inercial en su encapsulado, esto es importante para confirmar la orientación de la cámara en todo momento, obtener la posición del obstáculo tridimensionalmente y comparar la información con la obtenida por el sensor inercial del sistema; finalmente, la protección IP, en razón del que dispositivo debe estar protegido frente al polvo, agua y humedad del entorno agrícola.

En la Tabla 5.1 se muestra la comparación entre los distintas cámaras de profundidad en el mercado. La cámara de profundidad seleccionada es la ZED 2i puesto que cumple con todos los requerimientos previamente mencionados. Además, este dispositivo tiene un rango de operación de 20 m, lo cual describe casi la mitad del entorno de trabajo y muestra la precisión de muestreo basado en la distancia que se encuentra los objetos detectados; un consumo de potencia considerablemente bajo de 1.9 W; y un campo de visión de 120° , el cual es mayor a las otras cámaras comerciales. Por otro lado, la cámara elegida está diseñada para ser utilizada en un entorno agrícola, puesto que presenta una protección IP66 y un filtro polarizado que reduce los reflejos por la luz solar y mejora la calidad de los colores.

Tabla 5.1 Selección de cámara de profundidad

Modelo		ZED 2i	AZURE KINECT DK	REALSENSE D455
Requisitos				
Marca		STEREO LABS	MICROSOFT	INTEL
Dimensiones		175.25x 30.25x 43.1 mm	126 x 103 x 39 mm	124 x 26 x 29 mm
Voltaje de operación	5V	5 V	5 V	3.3 V
Corriente de operación		380 mA	1.2 A	0.2 A
Rango de operación	≥ 5 m	20 m	5.46 m	6 m
Mínimo rango de operación		0.2 m	0.25 m	0.52 m
Campo de visión		110° x 120°	120° x 120°	87° x 58°
Frecuencia de muestreo		60 FPS	30 FPS	90 FPS
Resolución		1280 x 720	1024 x 1024	1280 x 720
Precisión de muestreo		<1% at 3 m <5% at 15 m		<2% at 4 m
Sensores extras	IMU	Cámara RGB Barómetro Magnetómetro IMU	Cámara RGB 2160p Micrófono 360° IMU	Cámara RGB 1280p IMU
Comunicación		USB – C	USB – C	USB – C
Protección	IP55	IP66	-	-
Precio		449 USD	399 USD	466.95 USD




LiDAR

El sensor LiDAR es uno de los dispositivos que tiene la capacidad de realizar las tareas de mapeo y localización para robot autónomos. El sensor se basa en un láser infrarrojo el cual gira a altas velocidades, con lo cual logra construir una nube de puntos de los objetos a su alrededor.

La selección del LiDAR 2D se fundamenta de acuerdo a los siguientes requerimientos. Angulo de rotación entre 270° - 360° debido a que la información de la parte delantera del vehículo es suficiente para realizar el desplazamiento autónomo. Rango de operación mayor a 20 m; esto se debe a que el algoritmo de navegación autónoma tiene un mapa previo del entorno de trabajo, por ello, con el sensado de 20 metros a la redonda se describe la mitad del terreno facilitando la localización del vehículo. Protección IP 55 puesto que el dispositivo se ubica en la parte exterior de la carcasa, lo cual implica que el sensor este contacto con el polvo, agua y humedad del entorno.

El LiDAR seleccionado es de la marca SLAMTEC con su versión RPLIDAR-S2. Este dispositivo tiene un bajo consumo de potencia, aproximadamente de 3 W; ello es adecuado puesto que el sensor está trabajando en toda la labor agrícola. Asimismo, el dispositivo elegido tiene una alta frecuencia de muestreo de 32 kHz, con lo cual se puede obtener una nube de puntos que describa con mayor precisión el entorno. Por último, el precio del RPLIDAR-S2 es el más económico respecto al resto. En la Tabla 5.2 se detalla la comparación entre los LiDAR 2D del mercado que cumplen con los requerimientos.

Tabla 5.2 Selección de LiDAR

		RPLIDAR-S2	YDLIDAR TG30	TIM 351
Modelo				
Requisitos				
Marca		SLAMTEC	YDLIDAR	SICK
Dimensiones		80.6 x 38.85 mm	75.8 x 34.7 mm	60 x 60 x 86 mm
Voltaje de operación		5 V	4.8 – 5.2 V Micro USB	9 – 28 V
Corriente de operación		450 – 600 mA	340 – 480 mA	143 - 444 mA
Rango de operación	≥ 20 m	30 m	30 m	10 m
Mínimo rango de operación		0.05 m	0.05 m	0.05 m
Angulo de rotación	270° - 360°	360°	360°	270°
Frecuencia de escaneo		8 - 15 Hz	5 – 12 Hz	15 Hz
Frecuencia de muestreo		32 kHz	20 kHz	-
Precisión de muestreo		50 mm	≤±60 mm (0.05 – 5 m) ≤±40 mm (5 – 20 m) ≤±100 mm (20 – 30 m)	60 mm
Resolución del ángulo		0.12°	0.09° (5 Hz) 0.13° (7 Hz) 0.22° (12 HZ)	
Comunicación		TTL UART (3.3 V)	USB - C	Micro USB
Protección	IP 55	IP65	IP 65	IP67
Precio		366 USD	500 USD	€ 2.389.20




Sensor Inercial

El sensor inercial trabaja en conjunto con el LiDAR para la localización del vehículo, para ello, el dispositivo tiene la capacidad de describir el comportamiento del sistema respecto a sus grados de libertad. El sensor inercial consiste en una combinación de sensores tales como el giroscopio, acelerómetro, magnetómetro y barómetro.

Los requerimientos para la selección del sensor inercial se basan en la cantidad de grados de libertad, sensores extras y consumo energético. El requerimiento establece tener un mínimo de seis grados de libertad otorgados por el giroscopio y acelerómetro, los cuales son suficientes para determinar la orientación y desplazamiento del vehículo. Esta información puede ser reforzada con sensores extras como el magnetómetro y barómetro. Por último, el consumo de potencia debe ser mínimo a causa de que este dispositivo está siempre en constante funcionamiento.

En la Tabla 5.3 se observa la comparación entre los sensores inerciales comerciales. El sensor Multi-Band GNSS Rugged es el seleccionado debido a su moderado consumo de potencia (6 W); la inclusión de un GPS en su encapsulado, puesto que aporta más información para la localización del vehículo; y presenta la configuración *Altitude Heading Reference System* (AHRS), lo cual transforma la data obtenida por el sensor a valores comúnmente empleados en los algoritmos de navegación autónoma.

Tabla 5.3 Selección del sensor inercial

Modelo	Requisitos	Multi-Band GNSS	TARS Series	VN 100 Rugged
				
Marca		INERTIALSENSE	HONEYWELL	VECTORNAV
Dimensiones		25.4 x 25.4 x 20 mm	55 x 40.18 x 35 mm	36 x 33 x 9 mm
Grados de libertad	≥ 6	10	6	9
Voltaje de operación		4 - 20 V	5 - 36 V	4.5 - 5.5 V
Corriente de operación		300 mA	100 mA	40 mA
Rango de operación del giroscopio		± 2000 °/s	± 245 °/s	± 2000 °/s
Rango de operación del acelerómetro		± 16 g	± 78.48 m/s ²	± 16 g
Frecuencia de muestreo del giroscopio		8 kHz	10 kHz	0.256 kHz
Frecuencia de muestreo del acelerómetro		4 kHz	10 kHz	0.260 kHz
Precisión de muestreo		0.05°	-	0.5°
Comunicación		TTL USB RS232 RS485 CAN	CAN	TTL RS232
Sensores extras	Magnetómetro Barómetro	GPS Magnetómetro Barómetro	-	Magnetómetro Barómetro
Altitude Heading Reference System (AHRS)		Cuaterniones, Euler, DCM	-	Filtro de Kalman extendido
Protección		-	IP67 IP69K	-
Precio		2749 USD	574.2 USD	1200 USD

5.1.2 Selección de dispositivos de comunicación

La comunicación en las tareas agrícolas involucra enviar información del estado del vehículo en todo instante a la estación de control, para ello, el sistema requiere de dispositivos de comunicación que permitan la transmisión fluida de datos. En su mayoría estos dispositivos se subdividen en antenas y una estación base (*base station*). Donde este último genera el protocolo de comunicación y la frecuencia de operación, mientras que la antena se encarga de amplificar la señal de transmisión y crear el área de la red local (omnidireccional o vectorial).

El requerimiento para la selección del dispositivo de comunicación es un rango de operación de 20 metros, lo cual abarca cuatro campos de cultivo en área de trabajo. Esto permite que el vehículo agricultor pueda desplazarse por más entornos de cultivo. La seguridad de comunicación debe ser la estandarizada por WPA2. Asimismo, de acuerdo a las regulaciones del estado peruano se permite emplear frecuencias de operación de 5 GHz para las comunicaciones, ello debe ser coincidente con la frecuencia de trabajo de las antenas.

La antena seleccionada es la AMO-5G13, de tipo omnidireccional; puesto que presenta un amplio patrón de radiofrecuencia (RF) lo cual permite abarcar más campos agrícolas. En la Figura 5.1 se muestra su patrón RF vertical y horizontal de Azimuth. Por otro lado, en comparación a la antena sectorial de la misma marca de UBIQUITI, AM-5G16-120; la antena seleccionada presenta un patrón RF superior a la antena sectorial, en la Figura 5.2 se muestra el patrón RF de la antena AM-5G16-120.

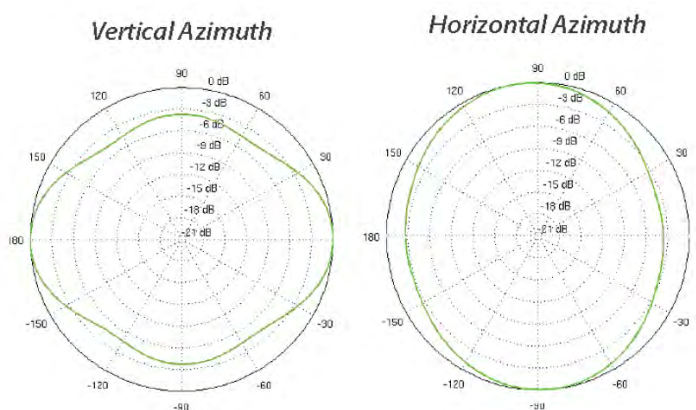


Figura 5.1: Patrón de radio frecuencia de la antena AMO-5G13 (imagen propia)

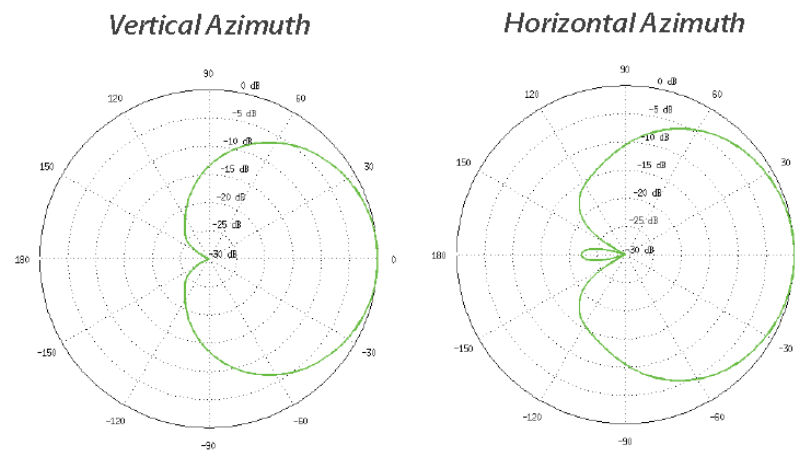


Figura 5.2: Patrón de radio frecuencia de la antenna AM-5G16-120 (imagen propia)

Por otro lado, en la Figura 5.3 se observa la comparación entre las gráficas de pérdida de retorno de ambas antenas, donde la AMO-5G13 presenta valores por debajo a -16 dB, en comparación a la antenna AM-5G16-120 que tiene valores más altos; por ende, la transmisión de data por medio de la antenna seleccionada asegura que esta no sufra grandes pérdidas.

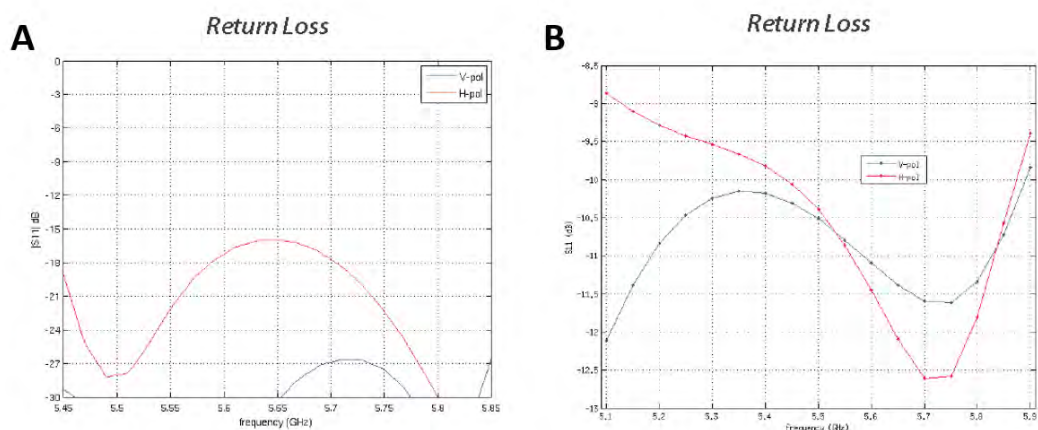





Figura 5.3: Pérdida de retorno: A. AMO-5G13. B. AM-5G16-120 (imagen propia)

La estación base de la antenna seleccionada LTU-Rocket-US es compatible con esta de acuerdo al proveedor. El motivo de su selección es su tecnología LTU, desarrollada por la marca UBIQUITI, la cual permite realizar configuraciones independientes para los canales TX y RX. Esta presenta una velocidad de transmisión de paquetes de 2 000,000 pps (paquetes por segundo) con alto rendimiento y mitigación de interferencias. Además, la opción RP-5AC-US con tecnología AIRMAX, presenta un mejor rendimiento respecto a las interferencias y un mayor rango de transmisión; sin

embargo, las actualizaciones de LTU mejoraran estas limitaciones. En la Tabla 5.4 se desarrolla la selección del dispositivo de comunicación.

Tabla 5.4 Selección del sensor inercial

Modelo	Requisitos	AM-5G16-120 / RP-5AC-US	AMO-5G13 / LTU-Rocket-US	Archer C20
				
Marca		UBIQUITI	UBIQUITI	TP-LINK
Dimensiones Antena		367 x 63 x 41 mm	799 x 90 x 65 mm	230 × 144 × 35 mm
Dimensiones Estación Base		88 x 40 x 230 mm	244 x 82 x 48 mm	
Suministro de energía		24V, 1A	24V, 1A	9 V, 0.6 A
Rango de operación	20 m	100+ km	100+ km	20 m
Frecuencia de operación	5 GHz	5150 - 5875 MHz	5150 - 5875 MHz	2.4 – 5 GHz
Gestión radiofónica		2412 - 2472 MHz	-	-
Seguridad	WPA2	WPA2 AES	WPA2-PSK (AES)	WPA2
Tipo de Antena		Sectorial	Omnidireccional	Omnidireccional
Ganancia de Antena		15.0 - 16.0 dBi	13 dBi	-
Rango de frecuencia de la Antena	5 GHz	5.10 - 5.85 GHz	5.45 - 5.85 GHz	5 GHz
Supervivencia al viento		200 km/h	200 km/h	-
Protección		-	IP67	-
Precio		79 / 249 USD	165 / 399 USD	S/.169

5.1.3 Selección de periféricos de interacción y comunicación

En esta sección se realiza la selección de los componentes extras que involucran cuestiones visuales o conectividad entre componentes. En las siguientes líneas se presenta la selección de este tipo de periféricos.

Puente H

Los actuadores seleccionados en su mayoría presentan su driver de control en su interior; sin embargo, los actuadores lineales no presentan un driver interior que

permita el control del dispositivo. Por ello, los puentes H cumple la función de brindar un control de la dirección de giro del vástago del actuador lineal, con lo cual se puede indicar el avance o retroceso del dispositivo. La elección del dispositivo es en función de la corriente y voltaje de funcionamiento del actuador lineal (5 A y 12 V); por ende, se selecciona el puente H de la marca RoboClaw que suministra continuamente hasta 7.5 A por canal y opera hasta 34 V, además, la comunicación es por medio de USB y TTL serial, analógico. En la Figura 5.4 se observa el puente H seleccionado, asimismo, en la Tabla 5.5 se muestran las características del componente.



Figura 5.4: Puente H RoboClaw 2x7A (Fuente: www.pololu.com)

Tabla 5.5 Selección del puente H RoboClaw

Modelo	Corriente continua	Corriente pico	Voltaje	Comunicación	Precio
Puente H RoboClaw 2x7A	7.5 A	15 A	6 – 34 V	USB y TTL	\$ 114.95

Circulina y MOSFET

El estado de funcionamiento del vehículo puede ser visualizado al exterior mediante periféricos visuales, en este caso se opta por circulinas de diferentes colores. La variedad de colores se determina en función de la cantidad de estados que se desean mostrar. El color verde señala el encendido del sistema; el color rojo, el accionamiento del subsistema de sembrado; y el color amarillo, el funcionamiento del subsistema de labrado. En la Figura 5.5 se observa las circulinas seleccionadas y en la Tabla 5.6 se mencionan sus características. La activación de estos dispositivos se realiza mediante un MOSFET, para ello se debe tomar en consideración que el voltaje de activación es

de 3.3 V, y la circulina funciona a 0.7 A y 12 V. Por ende, el MOSFET seleccionado es el 512-FDC6401N, el cual cumple con los requisitos establecidos, en la Tabla 5.7 detalla las características del MOSFET.



Figura 5.5: Circulina Model FB2PST (Fuente: www.mcsuministros.com)

Tabla 5.6 Selección de Circulina

Modelo	Voltaje de operación	Corriente de operación	Vida de la lámpara	Protección	Precio
Circulina FB2PST-012	12 V	0.7 A	10000 h	IP 66	S/. 1905.33

Tabla 5.7 Selección de MOSFET

Modelo	Polaridad	Corriente drenaje I_d	Voltaje puerta y fuente $V_{gs(th)}$	Voltaje drenaje y fuente V_{ds}	Precio
MOSFET 512-FDC6401N	Canal N	3 A	500 mV	20 V	S/. 2.81

5.1.4 Selección de unidades de control

La unidad de control actúa como el cerebro del sistema; en este lugar es donde todos los actuadores se conectan para recibir órdenes y los sensores brindan información con la cual se realiza un lazo de control retroalimentado o para la ejecución de algoritmos de navegación autónoma. Este sistema se subdivide en dos unidades de control de acuerdo a su complejidad. La unidad de control primario es la encargada de la navegación autónoma y la toma de decisiones de todo el sistema; mientras que la unidad de control secundario ejecuta ordenes hacia los actuadores del sistema debido a sus diversos protocolos de comunicación.


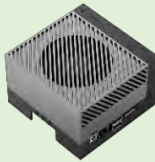
Unidad de control primaria

La navegación autónoma requiere de un intercambio de data de varios sensores y procesamiento de algoritmos, los cuales deben tener una alta tasa de actualización para la toma de decisiones. Entonces, el sistema requiere de una unidad de control capaz de poder aliviar y procesar la alta cantidad de data.

Los otros requerimientos para la selección de la unidad de control primario los definen los sensores para la autonomía del vehículo. En este caso, la cámara de profundidad, sensor LiDAR y sensor inercial usan conectividad mediante USB o una adaptación de TTL-USB; por ende, este dispositivo debe poseer como mínimo 3 entradas USB 3.0, este tipo de USB permite una transferencia de data mucho más veloz que versiones anteriores. Por otro lado, respecto a la transferencia de data, inicialmente transferida a la estación base para luego enviarla por medio de antena omnidireccional hacia al exterior; el componente de control debe poseer como mínimo una entrada tipo Ethernet. Finalmente, en caso se requiera tener un respaldo para la comunicación con los actuadores, la unidad de control principal debe poseer pines para ejecutar el protocolo de comunicación CAN y UART.

La unidad seleccionada es la Jetson AGX Orin de la empresa NVIDIA. Este presenta un procesador ARM Cortex capaz de realizar el procesamiento de la data recibida por la cámara de profundidad y LiDAR. Respecto a la memoria, la unidad seleccionada tiene una memoria de 64 GB, la cual es mayor en comparación de la Jetson AGX Xavier. Además, esta tiene sistema operativo Ubuntu, el cual es comúnmente usada para emplear ROS. Por otro lado, el dispositivo seleccionado posee 8 puertos USB, de los cuales 6 de ellos son de la versión USB 3.2; asimismo, el componente seleccionado presenta un puerto Gigabit Ethernet para realiza la conectividad a la estación base, esta versión de puerto Ethernet permite enviar 1000 megabit en un segundo. Por último, las dimensiones de la Jetson AGX Orin son más compactas que el microcomputador NUC11PAQi70QA, lo cual facilita ubicarlo dentro de una caja de protección para evitar el ingreso de polvo y agua. En la Tabla 5.8 se muestran los criterios y las características de los dispositivos comerciales que cumplen con los requisitos para la selección de la unidad control.

Tabla 5.8 Selección de la unidad de control principal

Modelo		Jetson AGX Xavier	Jetson AGX Orin	NUC11PAQi70QA
	Requisitos			
Marca		NVIDIA	NVIDIA	INTEL
Dimensiones		105 x 105 x 65 mm	110 x 110 x 71.65 mm	117 x 112 x 56mm
Voltaje		5V, 9 – 20 V	-	19 V
Potencia		10 – 30 W	15 – 60 W	40 W
Sistema operativo		Ubuntu	Ubuntu	Windows 11, 10
CPU		8-core ARM v8.2 64-bit CPU, 8MB L2 + 4MB L3	12-core Arm® Cortex®-A78AE v8.2 64-bit CPU 3MB L2 + 6MB L3	Intel Core i7-1165G7
GPU		512-core Volta GPU con Tensor Cores	2048 NVIDIA® CUDA® cores y 64 Tensor Cores	Intel® Core™ de 11ª Generación
Display		HDMI 2.0	DisplayPort 1.4a	HDMI 2.0 a
USB	USB 3.0 (x3)	USB 3.1 (x3) USB 2.0 (x4)	USB 3.2 Tipo C (x2) USB 3.2 Tipo A (x4) USB 2.0 (x2)	USB 3.2 Tipo C (x2) USB 3.2 Tipo A (x3) USB 2.0 USB 3.1
Tipo de conectividad a internet	Ethernet	Gigabit Ethernet	Gigabit Ethernet	Ethernet
Protocolos de comunicación	CAN UART	UART, SPI, CAN, I²C, I²S, DMIC, GPIOs	I²C, GPIO, SPI, CAN, I²C, UART, DMIC	-
Memoria		32 GB 256-Bit LPDDR4x 137GB/s	64GB 256-bit LPDDR5 204.8 GB/s	2 x 64 GB DDR4- 3200 1.2V SO-DIMM 51.2 GB/s
Precio		699 USD	1999 USD	-




Unidad de control secundaria

La unidad de control secundario es la encargada de enviar comandos a los actuadores y recibir información de los sensores del sistema, en su mayoría es data sin un alto nivel de procesamiento; para ello, este componente debe poseer una variedad de protocolos de comunicación y pines para conectar los actuadores. La elección del dispositivo de control secundario depende de los actuadores a conectar. El subsistema móvil y el de sembrado requiere entre 1 a 2 líneas de comunicación CAN para el funcionamiento de los motores; asimismo, los sensores infrarrojos del sistema de sembrado requieren de 3 pines I/O. Por otro lado, el sistema de labrado requiere de un puente H para permitir el giro del motor DC del actuador lineal, para lo cual el

integrado requiere de un puerto USB o TTL para la comunicación. Finalmente, las circuninas de los periféricos requieren de 3 pines digitales para encenderlos.

La unidad de control secundario seleccionado es la Teensy 4.1, la cual cumple con los requerimientos previamente mencionados. Además, este presenta las dimensiones más pequeñas en comparación a los otros dispositivos. Por otra parte, la arquitectura del núcleo del microcontrolador es una versión superior de ARM con 600 MHz; relacionado a ello se encuentra la frecuencia del clock interno de 24 MHz que presenta el Teensy 4.1, lo cual lo convierte en un componente más preciso. En la Tabla 5.9 se muestran los microcontroladores que cumplen con los requisitos previamente establecidos.

Tabla 5.9 Selección de la unidad de control secundario

		EK-TM4C123GXL Tiva C	Teensy 4.1	STM32 NUCLEO F446ZE
Modelo	Requisitos			
Marca		TEXAS INSTRUMENTS	PJRC	ST
Dimensiones		50 x 57.15 x 10.8 mm	17.78 x 60.96 x 1.57 mm	-
Núcleo		32-bit ARM® Cortex™-M4 80-MHz	32-bit ARM Cortex M7 600 MHz	32-bit Cortex®-M4 180 MHz
Voltaje lógico		3.3 V (300 mA) 5.0 V (23 – 323 mA)	3.3 V	1.7 – 3.6 V
Voltaje de alimentación	USB	4.75 – 5.25 V (micro B cable)	3.6 - 5.5 V	5.5 V
Frecuencia del clock		16.0-MHz cristal (interno) 32.768-KHz cristal (externo)	24 MHz cristal (interno) 32.768 kHz cristal para Real Time Clock (RTC)	16 MHz cristal (interno) 32.768 kHz cristal
CAN	2	2	3	2
I2C		4	3	4
SPI		4	3	4
UART		8		4
PWM	3	8	35	4
I/O	7	43	55	114
Precio		16.99 USD	26.85 USD	19 USD

Transceptor de CAN

Los motores seleccionados para los subsistemas de sembrado y móvil se caracterizan por presentar una comunicación CAN; por lo tanto, la unidad de control secundario

encargado de control presenta este tipo de protocolo de comunicación. Sin embargo, los pines en el microcontrolador presentan una ligera diferencia, puesto que estos son CAN_RX y CAN_TX; mientras que el motor presenta los pines CAN_H y CAN_L. Por ende, un integrado transceptor del protocolo CAN es necesario para establecer la comunicación entre los motores y la unidad de control secundario. Cabe mencionar que la topología empleada para el protocolo CAN es de tipo bus. El integrado seleccionado es el transceptor CAN MCP2551 de alta velocidad puesto que puede conectar hasta 112 nodos y es adecuado para sistemas de 24 V, en la Figura 5.6 se observa el integrado. La Tabla 5.10 detalla las características de este.

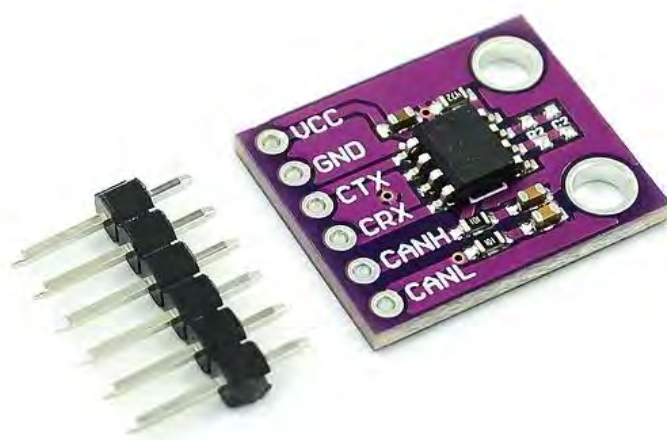


Figura 5.6: Transceptor CAN MCP2551 de alta velocidad (Fuente: www.mactronica.com.co)

Tabla 5.10 Selección de Transceptor

Modelo	Voltaje del sistema	Nodos	Velocidad de ejecución	Precio
CAN MCP2551	12-24 V	112 nodos	1 MB/s	S/. 10

5.1.5 Cálculo del consumo energético y selección de baterías

El consumo energético del sistema se realiza luego de haber seleccionado todos los componentes electrónicos; la propuesta de diseño divide en dos grupos la distribución de las baterías en el nivel de control y de actuadores. Por tal motivo, el cálculo para la selección de las baterías se estima extrayendo los valores de corriente y voltaje de los dispositivos electrónicos descritas en sus hojas de datos. Cabe mencionar que la prioridad de tipo de batería son las de iones de Litio, por ello, la batería seleccionada es Li-Ion 18650 de voltaje nominal 3.7 V y capacidad nominal de 3000 mAh.

Batería del Nivel de Control

Los componentes electrónicos del nivel de control delimitan el diseño del banco de baterías. En la Tabla 5.11 se detalla el consumo energético de cada componente del nivel de control, donde la antena presenta el mayor consumo de voltaje. Por ende, se selecciona una batería de 22.2 V, el cual es múltiplo de 3.7 V ofrecido por la batería elegida; asimismo, para las 2 horas y media de funcionamiento se requiere de 12.04 Ah, el cálculo de la batería se detalla en anexo C.10. El arreglo de baterías consta de 6 baterías en serie para lograr el pico de voltaje requerido y luego 4 filas de este arreglo, con lo cual se obtiene la cantidad de corriente necesaria. Toda esta matriz de baterías se puede adquirir en el mercado local, con la posibilidad de añadir un BMS, una protección plastificada y un cargador para realizar la carga de la batería.

Tabla 5.11 Consumo de energía del nivel de control

DISPOSITIVO	CORRIENTE INDIVIDUAL [A]	VOLTAJE ALIMENTACIÓN [VDC]	POTENCIA [W]	UNIDAD	POTENCIA TOTAL [W]
Jetson AGX Orin	3	20	60	1	60
Teensy 4.1	0.1	5	0.5	1	0.5
ZED 2i	0.380	5	1.9	1	1.9
RPLIDAR S-2	0.6	5	1.2	1	1.2
Multi-Band GNSS	0.3	5	1.5	1	1.5
AMO-5G13 / LTU-Rocket-US	1	24	24	1	24
Consumo total del nivel de control					89.1

Batería del Nivel de Actuadores

El nivel de actuadores contiene a los componentes con mayor demanda energética; por ello, la división con el nivel de control, puesto que evita posibles picos de voltaje que puedan dañar a la electrónica de control. En la Tabla 5.12 se detalla el resumen del consumo de energía de los motores, actuador lineal y periféricos de interacción. La batería seleccionada es 22.2 V con 193.22 Ah para cumplir con los requerimientos de tiempo de autonomía, el cálculo se desarrolla en el anexo C.10. De la misma manera que la batería del nivel de control, el diseño de la batería se obtiene en el mercado local.

Tabla 5.12 Consumo de energía del nivel de actuadores

DISPOSITIVO	CORRIENTE INDIVIDUAL [A]	VOLTAJE ALIMENTACIÓN [VDC]	POTENCIA [W]	UNIDAD	POTENCIA TOTAL [W]
RMD – X8	6.21	24	149.04	4	596.16
AK 60-6	7.6	24	182.4	4	729.6
RMD-L-5015-35T	1.57	12	18.84	1	18.84
FA-150-S-12-4	5	12	60	1	60
FB2PST-012-024	0.7	12	8.4	3	25.2
Consumo total del nivel de actuadores					1429.8

Botón de encendido y seguridad

Los periféricos para el encendido, apagado y parada de emergencia son importantes para determinar la lógica del funcionamiento del sistema; puesto que representan el inicio y final de la marcha del sistema. Este tipo de pulsadores, switch o botones son seleccionados en función de cuenta corriente y voltaje pueden tolerar en su interior. La selección de los botones está en función de los 24 V de la batería de alimentación del nivel de control y 4 A de los componentes que se conectan directamente a la batería. La Figura 5.7 muestra el kit de botones elegidos y en la Tabla 5.13 detalla las características del dispositivo.



Figura 5.7: Botones 199-HW1F2F10QDG120V (Fuente: www.mouser.pe)

Tabla 5.13 Selección de botones

Modelo	Régimen de voltaje CC	Régimen de voltaje CA	Protección	Precio
199-HW1F2F10QDG120V	24 V	440 VAC	IP 65	S/. 161.28

Regulador de voltaje

La mayoría de los componente y actuadores no comparten el mismo voltaje de alimentación para su funcionamiento. Por ende, la red de alimentación requiere de

reguladores de voltaje para entregar el suministro necesario para el funcionamiento de los dispositivos. El primer regulador de la unidad de control es el encargado de alimentar al Teensy 4.1, el cual transforma de 23 V a 5 V; para el cual se seleccionó un UBEC. El segundo regulador de la unidad de control alimenta con 15 V a la Orin a partir de una batería de 22.2 V, se elige el regulador 60DAW4_2415S1.6. Finalmente, la unidad de actuadores tiene un convertidor de 22.2 V a 12 V para el funcionamiento del motor de la unidad de sembrado y circulinas, para ello se selecciona el regulador RED60-48D12W con una corriente máximas de 2.5 A; asimismo, el regulador FED60-24S12W es elegido para el actuador lineal puesto que brinda una corriente máxima de 5 A. En la Figura 5.8 se observa los reguladores seleccionados y en la Tabla 5.14 se detallan sus características.

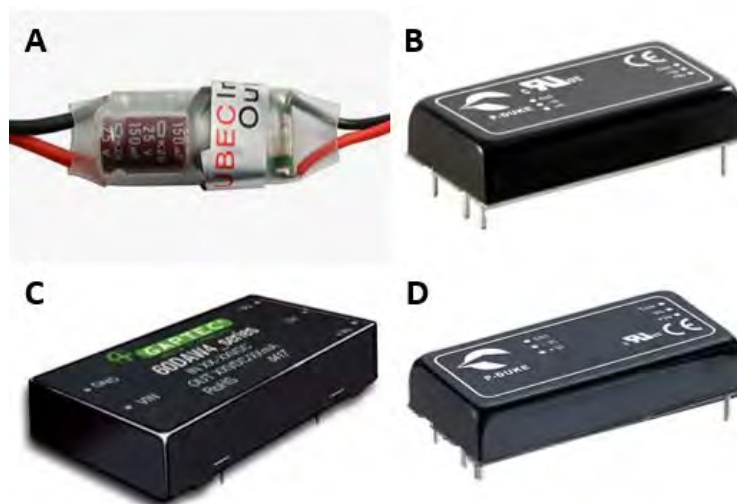


Figura 5.8: Reguladores: A. UBEC, B. RED60-48D12W, C. 60DAW4_2415S1.6, D. FED60-24S12W. (Fuente: www.mouser.pe)

Tabla 5.14 Selección de reguladores

Modelo	Voltaje Entrada	Voltaje Salida	Corriente max	Potencia	Precio
UBEC	5,5 – 23 V	5 V	3 A	15 W	\$ 8.99
RED60-48D12W	18 – 75 V	12 V	2.5 A	28 W	\$ 120.54
60DAW4_2415S1.6	9 – 36 V	15 V	4 A	60 W	\$ 103.39
FED60-24S12W	9 - 36 V	12 V	5 A	60 W	\$ 88.26

Relé de estado

Los Relés de estado son empleados para crear circuitos de fuente switching. En este sistema son usados para habilitar la alimentación de la línea de actuadores, la conmutación para el funcionamiento del Relé es logrado con las baterías del nivel de

control. El relé seleccionado es de tipo DPDT-NO (2 Form A) para conmutar las líneas de alimentación de control y actuadores; el código del dispositivo es 510H-P-2A-C 24VDC 54A y sus características son un voltaje de entrada de 24 V y régimen de corriente de 54 A, lo cual cumple con los requerimientos. En la Figura 5.9 se muestra el relé de estado y la Tabla 5.15.



Figura 5.9: Relé G9TA-K1AP DC12. (Fuente: www.ebay.com)

Tabla 5.15 Selección de relé

Modelo	Tipo	Voltaje de la bobina	Corriente Contacto	Precio
Relé 510H-P-2A-F-C 24VDC 54A	2 Form A (DPDT-NO)	24 VDC	54 A	\$ 23.40

5.2 Distribución de componentes en la carcasa principal

La distribución de los componentes electrónicos representa la parte final del diseño electrónico del sistema. Para el desarrollo de esta sección se emplean diagramas que puedan facilitar la comprensión de la conectividad entre dispositivos. Las conexiones de los componentes de acuerdo a su protocolo de comunicación y sus líneas de alimentación se muestran en el diagrama de conexiones de la Figura 5.10. Asimismo, en la Figura 5.11 se detalla el diagrama esquemático del sistema, en donde se detallan los puertos que se emplearan de la Jetson AGX Orin y la Teensy 4.1; también, se ejemplifica los circuitos de activación de las circulinas, las líneas de alimentación a través de botones de encendido y de seguridad, la fuente switching con el relé de estado sólido y las conexiones de los reguladores de voltaje.

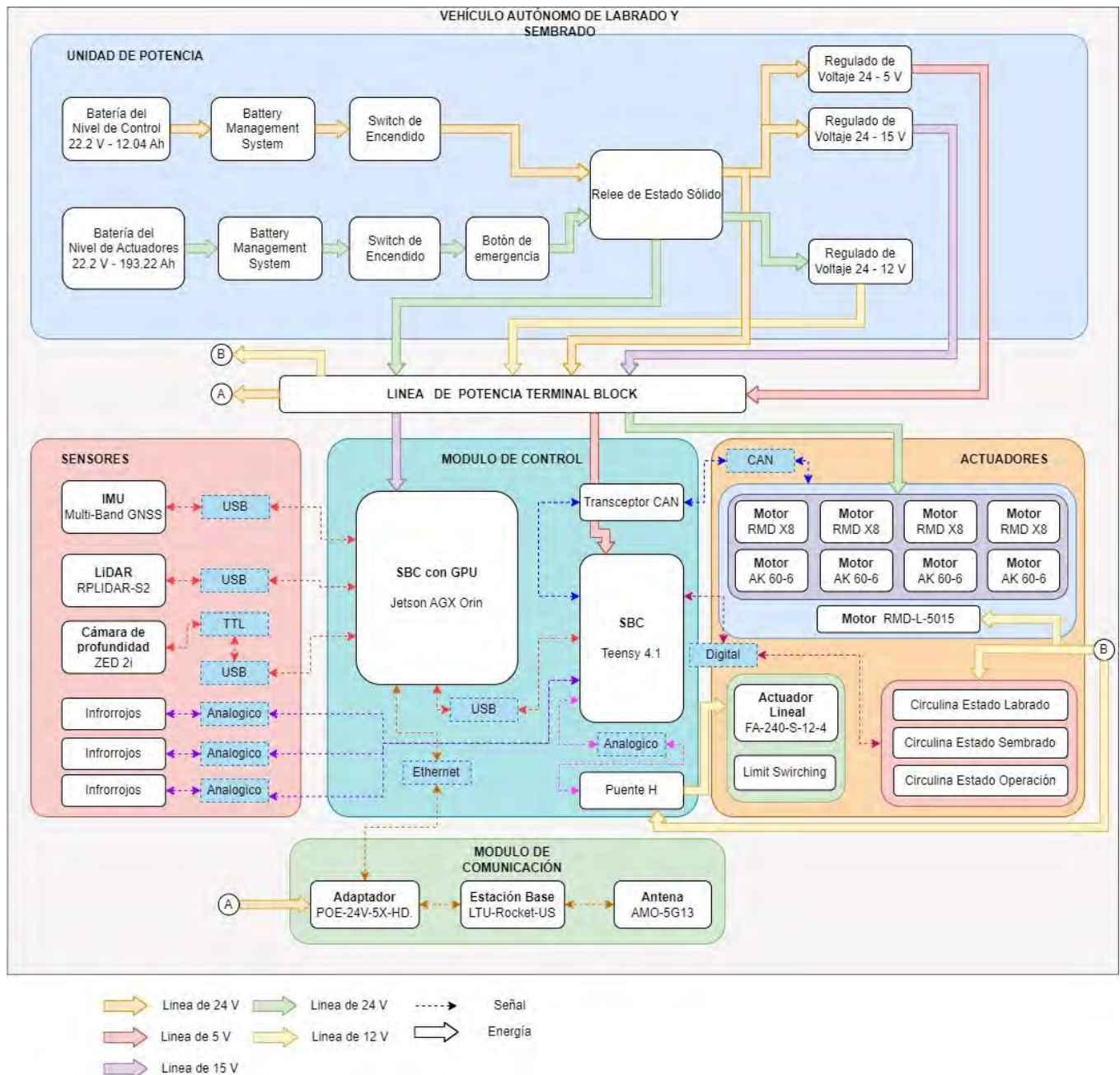


Figura 5.10: Diagrama de conexiones (imagen propia)

Finalmente, la distribución de componentes de manera física en el robot se subdivide en dos partes. La parte de energía, que en su mayoría son los bancos de baterías con BMS y reguladores de voltaje, empleados para la alimentación del nivel de control y actuadores se encuentran en la parte interior de la estructura principal en específico en las cavidades laterales. Asimismo, la mitad de la cavidad izquierda de la estructura principal se ubican los conectores de la antena que tiene protección IP 65. Cabe mencionar que para el almacenamiento de los dispositivos y baterías que no presentan una protección IP 65 se ha empleado cajas de protección para ambientes abiertos de la

marca Polycase. Esta misma caja es utilizada en la parte superior del vehículo para almacenar la unidad de control primaria, unidad de control secundaria, IMU, placa electrónica y un terminal block (organización del cableado); para conservar la caja electrónica hermética se emplean conectores tipo prensaestopas para permitir la salida de los cables. Por último, la cámara de profundidad en conjunto con el LiDAR se encuentra en la parte frontal del vehículo. En la Figura 5.11 se observa la distribución final de los componentes electrónicos en la estructura principal y la Figura 5.12 muestra el isométrico del sistema integrado.

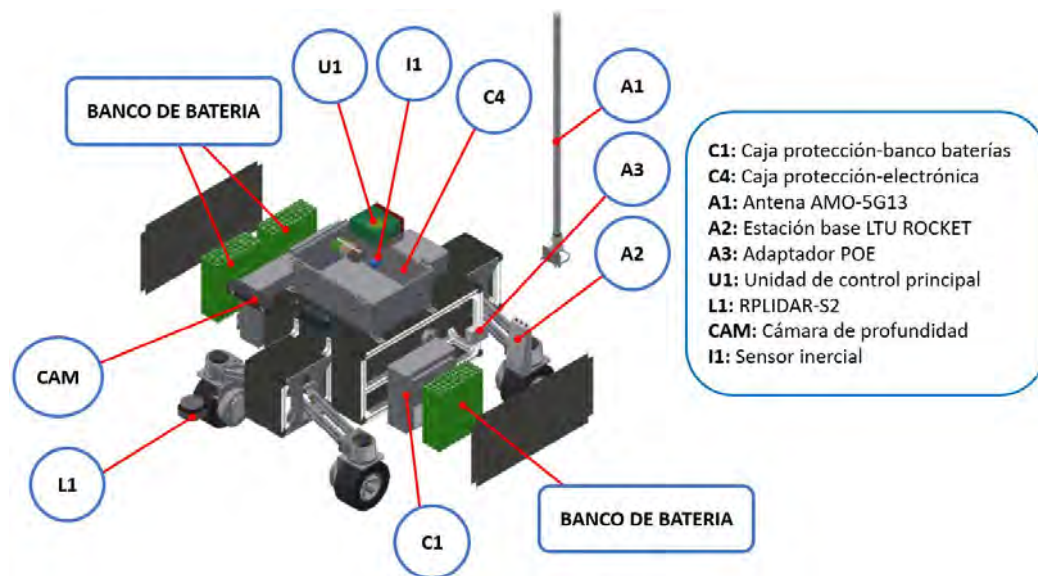


Figura 5.11: Distribución de los componentes electrónicos (imagen propia)

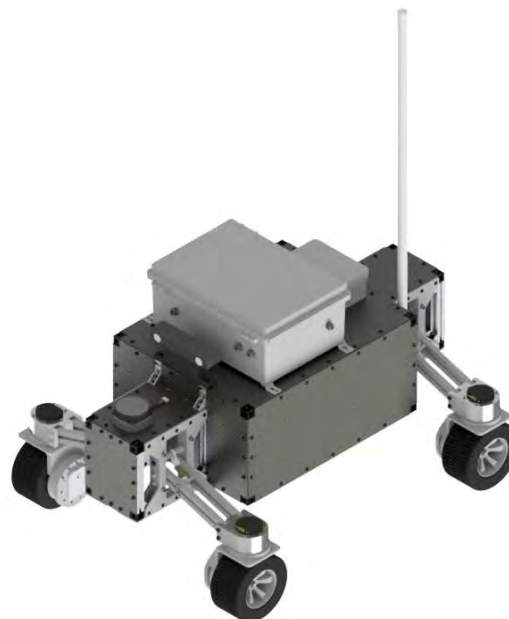


Figura 5.12: Estructura principal del sistema integrado (imagen propia)

5.3 Diagrama esquemático

El capítulo electrónico culmina con la elaboración de los diagramas esquemáticos de los circuitos diseñados para asegurar el funcionamiento del sistema. La Figura 5.13 muestra un plano electrónico con el resumen de los diagramas esquemáticos, el cual está conformada por los diagramas del microcontrolador, reguladores, distribución de la comunicación CAN, control de la circulina y conexión del computador. El esquemático de los reguladores muestra las líneas de potencia de control y actuadores; las salidas de este circuito son los voltajes de alimentación para el resto de los componentes (5V, 12V, 15V), cabe resaltar que estas líneas de voltaje se dirigen a un terminal block antes de alimentarlos. Asimismo, la línea de voltaje de 24 V que alimenta a los motores del subsistema móvil se dirige directamente al terminal block, puesto que su alto requerimiento de corriente imposibilita distribuirlo por una PCB. En la sección de control se tiene dos esquemáticos que representan las conexiones del microcontrolador y el computador; este último presenta conexiones mediante USB, mientras que el esquemático del microcontrolador emplea conexiones Molex para conectarse con el resto de componentes y bornera para la fuente de alimentación. Una de las salidas del microcontrolador se dirige al módulo CAN, el cual se encuentra en el esquemático de la distribución CAN. Este diagrama se encarga de traducir la señal CAN y distribuirlo en una topología estrella entre los motores delanteros y traseros del subsistema móvil, y el motor de sembrado. La otra salida del microcontrolador que requiere un esquemático es el control de las circulinas, puesto que unir este control con la PCB del microcontrolador genera ruido o una posible fuga de alta corriente que dañaría la etapa de control. Por último, las PCBs se muestran en el Anexo D, las cuales son representadas con sus capas de *top* y *bottom*; cabe mencionar que los anchos de pista fueron calculados con un espesor de 2 oz/ft^2 y empleado la una calculadora virtual (<https://www.4pcb.com>).

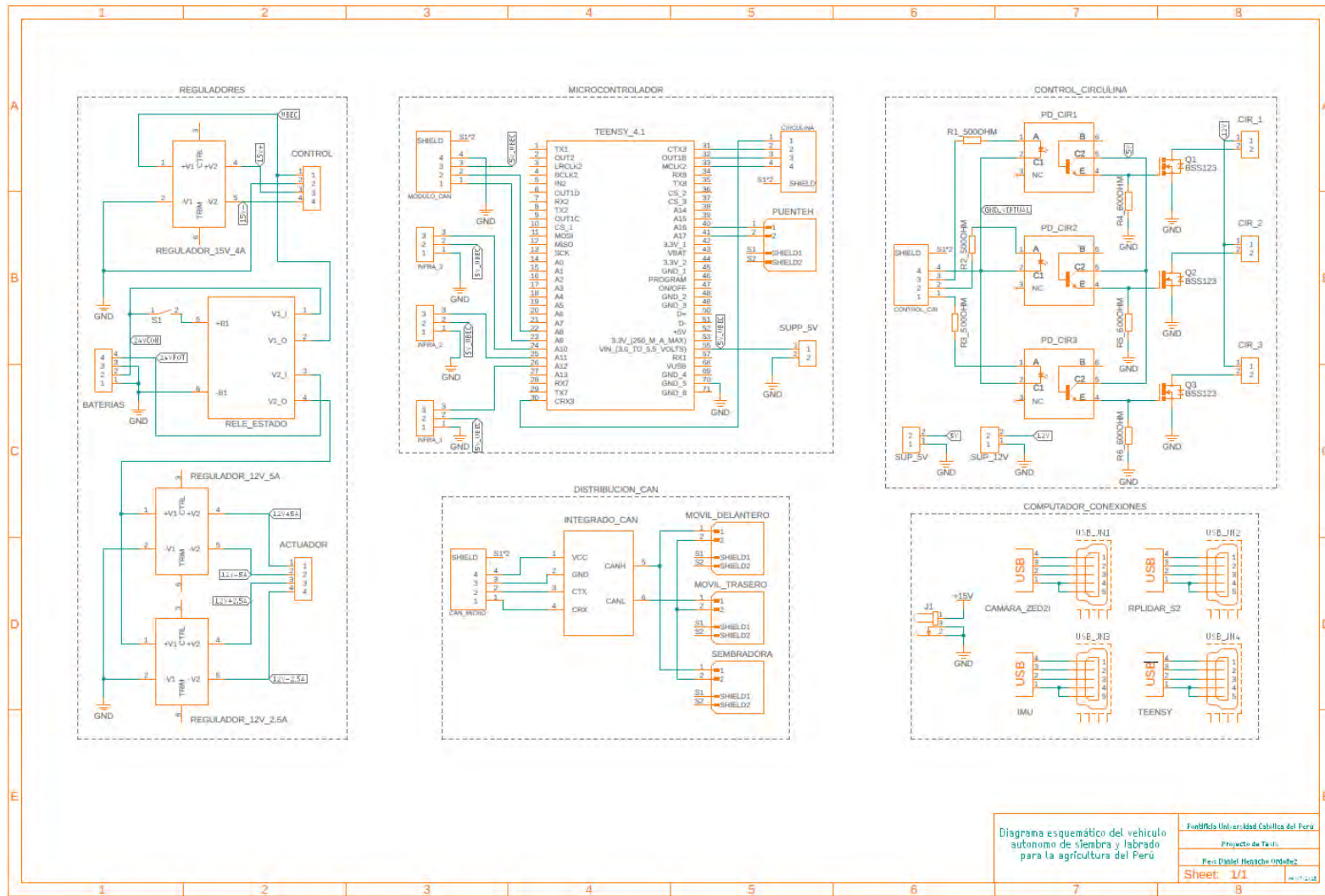


Figura 5.13: Diagrama esquemático del sistema (imagen propia)

CAPÍTULO 6

DISEÑO DE LA ETAPA DE CONTROL

El capítulo de la etapa de control describe la lógica de funcionamiento del sistema integrado, desde la inicialización de los parámetros para la labor agrícola y la culminación de la ejecución de estas. Por ello, esta sección de control desarrolla los diagramas de flujo que describen detalladamente la marcha de los algoritmos de cada subsistema, al culminar esta capítulo se obtiene un diagrama de flujo general de todo el sistema y los subsistemas de este.

6.1 Desarrollo de la interfaz

La interfaz propuesta brinda opciones para ingresar los parámetros iniciales de funcionamiento del vehículo. Estos son la velocidad constante de desplazamiento, el mapa de la parcela a trabajar, la distancia entre surcos y la distancia entre semillas. Asimismo, con la finalidad de verificar el funcionamiento del vehículo se procede a realizar un modo de testeo o teleoperación para validar la comunicación y el accionamiento de los subsistemas. Por otro lado, la segunda pantalla de la interfaz de interacción el operario muestra el desplazamiento del vehículo en un mapa 2D (velocidad y posición), el nivel de semillas, indicador de obstáculos y la visualización del entorno. En la Figura 6.1 se observa el diseño gráfico de la pantalla de envío de datos, además, en la Figura 6.2 se describe la segunda pantalla encargada de recibir la data.

Figura 6.1: Interfaz de envío de datos (imagen propia)

Figura 6.2: Interfaz de visualización de datos (imagen propia)

6.1.1 Inicialización del sistema y lógica ingreso de parámetros

Las variables son inicializadas en la interfaz gráfica del operario ubicado en la estación base. La lógica de la introducción de los parámetros para la inicialización del sistema consta de insertar manualmente el valor de la velocidad del vehículo, la cual no debe sobrepasar 1.28 m/s puesto que pueden dañar a los motores y su rendimiento; la distancia entre surco es validada mediante el tipo de cultivo que se desea sembrar; y el valor de la distancia entre semillas no debe superar los 20 cm. Luego de validar los parámetros introducidos se procede a seleccionar el mapa de la parcela de trabajo, para ello se tiene una lista de campos predeterminados. Por otro lado, el modo de testeo de funcionamiento tiene una lógica para introducir los parámetros para la teleoperación. Por ello, el sistema tiene un conjunto de comandos agrupado en protocolos predeterminados para validar el funcionamiento de cada subsistema; solo se puede enviar un protocolo de cualquiera de los tres subsistemas para ser probados. La Figura 6.3 detalla el diagrama de flujo de las funciones de introducción de parámetros de inicialización y teleoperación.

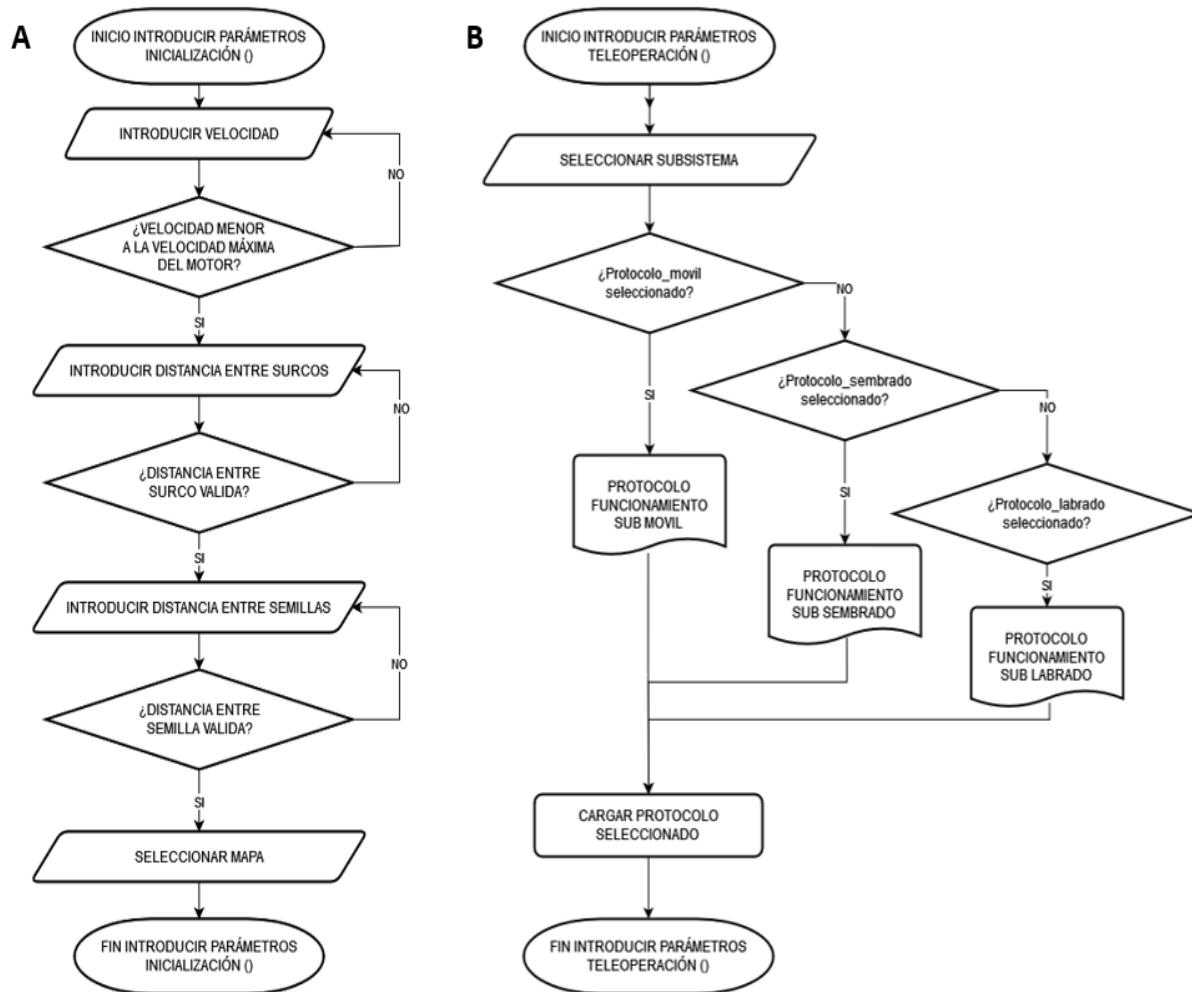


Figura 6.3: Diagrama de flujo de la función A. Introducir parámetros de inicialización, B. Introducir parámetros de teleoperación (imagen propia)

6.1.2 Protocolo de comunicación

La comunicación entre antenas de acuerdo al fabricante inicia con la configuración de los ciclos de trabajo, ancho de banda y frecuencia de sus estaciones base. La tecnología *LTU-Rocket* mediante las antenas aplican el modo Punto a Multipunto para detectar otras estaciones bases mientras se hayan configurado los mismos anchos de banda de canal y nombre de enlace (Ubiquiti.INC). Cabe mencionar que la estación host es configurada mediante una IP estática para crear la red de comunicación, a la cual la estación base y antena del vehículo se conecta. En la Figura 6.4 se detalla la lógica de las funciones de enviar y recibir trama de los dispositivos de comunicación. La función enviar trama concatena los valores ingresados en la interfaz, los cuales se trasladan a la estación base mediante ethernet. La trama en la estación base se codifica para

enviarlo a la antena mediante ethernet y distribuirla por ondas de radio frecuencia. Por otro lado, la función recibir trama capta la data codificada mediante una antena receptora, la cual envía a la estación base para ser decodificada. Finalmente, la data decodificada es enviada a la unidad de control primario.

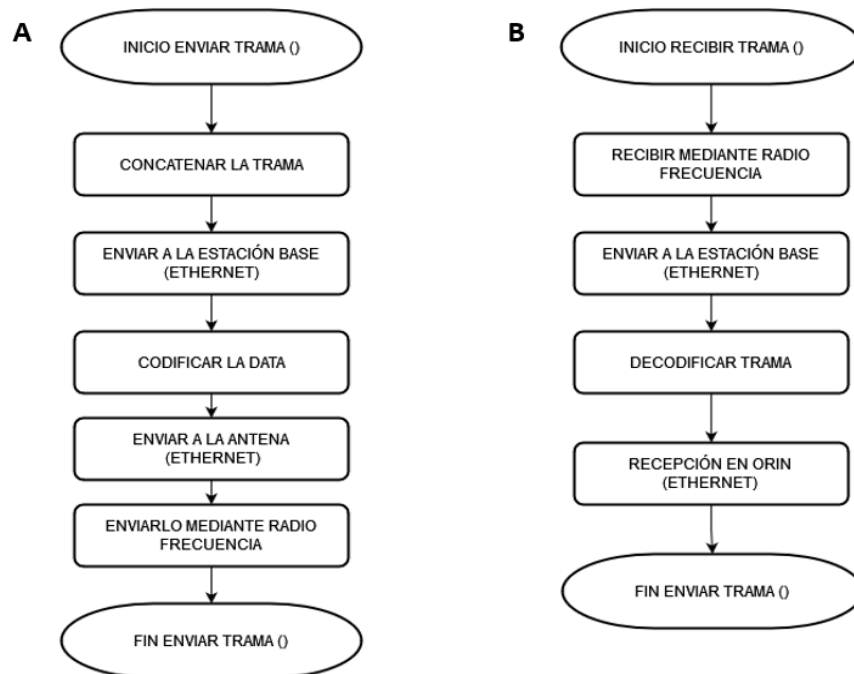


Figura 6.4: Diagrama de flujo de la función A. Enviar trama, B. Recibir trama (imagen propia)

Las funciones previamente descritas son empleadas para establecer la lógica del funcionamiento de la inicialización del sistema. El proceso inicia con el encendido del botón del nivel de control, el cual alimenta a la unidad de control primaria y paralelamente enciende la circulina de estado (verde). Posteriormente en la interfaz se elige el modo de envío de datos los cuales pueden ser parámetros de inicialización o testeo (teleoperación). Esa data personalizada en la interfaz es enviada de la estación del operario recibida por el vehículo mediante antenas. Finalmente, con el objetivo de confirmar la recepción de la data, la circulina de estado parpadea manteniendo el color verde. La Figura 6.5 muestra el diagrama de flujo de la parte inicial del sistema.

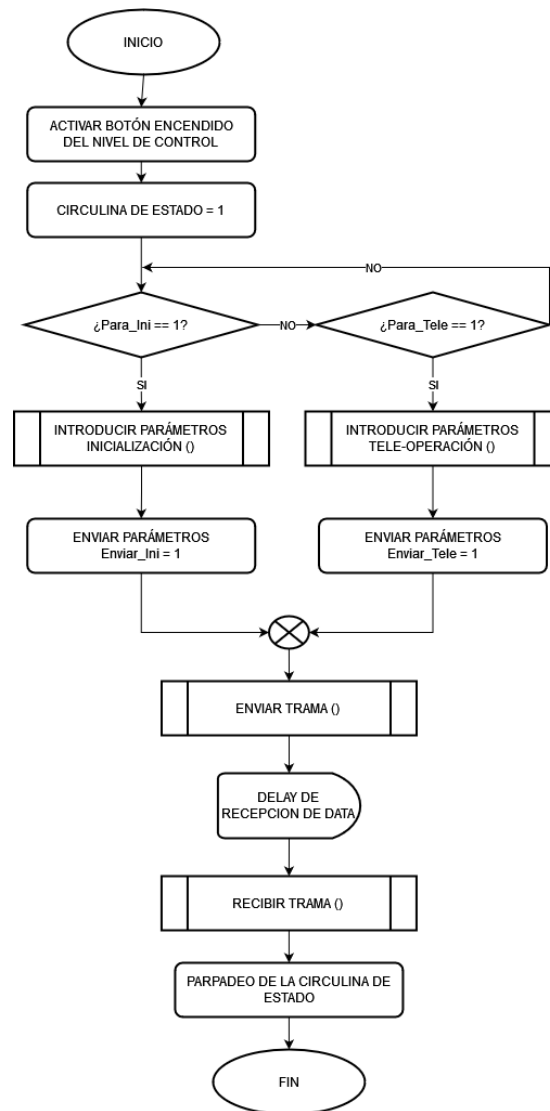


Figura 6.5: Diagrama de flujo de la inicialización del sistema (imagen propia)

6.2 Desplazamiento autónomo

En la navegación autónoma, la localización y el mapeo son procesos interdependientes, puesto que la precisión en la ejecución de uno favorece al otro; por ende, estos procesos deben realizarse de manera iterativa y simultánea. En relación a los campos de cultivo, SLAM es una técnica comúnmente utilizada en este tipo de entornos, puesto que el ambiente es desconocido (Shalal *et al.*, 2013). Por otra parte, la generación de trayectorias es utilizada para la evasión de obstáculos, para ello requiere de una adecuada localización y conocimiento del mapa.

La condición principal para la navegación autónoma en este sistema es el conocimiento previo del entorno; es decir, el algoritmo de autonomía tiene precargado los límites de los campos de cultivo. Esto es posible con una reconstrucción manual del ambiente mediante el uso de un LiDAR. Por otro lado, los obstáculos son objetos estáticos en este tipo de entorno de trabajo; por ello, esto no restringe el tiempo de reacción del vehículo.

6.2.1 Estimación de la posición con el LiDAR e IMU

Esta sección desarrolla el análisis de los algoritmos para el desplazamiento autónomo.

Filtros de Kalman

El filtro de Kalman es un potente algoritmo de procesamiento de datos recursivos, con lo cual puede reducir el error de la data de entrada (Mousazadeh, 2013). Asimismo, el algoritmo provee un robusto método matemático para procesar data de múltiples sensores en tiempo real, por ello, este método puede estimar el estado previo, presente y futuro del sistema (Shalal *et al.*, 2013). Por tal motivo, el filtro de Kalman es utilizado en la navegación autónoma de vehículos terrestres, sin embargo, la cinemática de este tipo de sistemas puede presentar no linealidades; por lo tanto, el filtro de Kalman extendido es una modificación para resolver sistemas no lineales (Hague *et al.*, 2000).

En la agricultura el filtro de Kalman es utilizado para la localización de vehículos autónomos en campos cultivo. Para ello, el algoritmo trabaja en conjunto con sensores LiDAR, IMU, odómetro, encoder o RTK-GPS. Por otro lado, la implementación del filtro de Kalman extendido en espacios agrícolas tiene desventajas respecto al tiempo de procesamiento y requerimientos computacionales (Shalal *et al.*, 2013).

Filtro de partículas

El filtro de partículas es utilizado para la estimación de la localización del vehículo; asimismo, este algoritmo no es restringido a proceso Gaussianos en comparación a los filtros de Kalman (Shalal *et al.*, 2013). Por otro lado, el algoritmo es capaz de resolver

las no linealidades del proceso, sin embargo, su implementación en tiempo real es limitada (Shalal *et al.*, 2013).

El funcionamiento del algoritmo consiste en estimar la posición del robot mediante dos pasos repetitivos: predicción y actualización. Por ejemplo, en la agricultura, el algoritmo de filtro de partículas es desarrollado para estimar la posición del robot respecto de las hileras de árboles (Blok *et al.*, 2019). En la Figura 6.6 se muestra esta aplicación. En primer lugar, el algoritmo es inicializado con 125 partículas con posición y dirección aleatoria, simulando al robot en el entorno. Luego, el paso de predicción traslada las partículas de acuerdo a los datos del IMU y encoder de las ruedas. Con ello, el paso de actualización verifica las nuevas posiciones y orientaciones de las partículas para otórgales un valor, la actualización de mediciones se obtiene de un LiDAR 2D. Finalmente, las partículas son organizadas de acuerdo a su peso para realizar un nuevo muestreo.

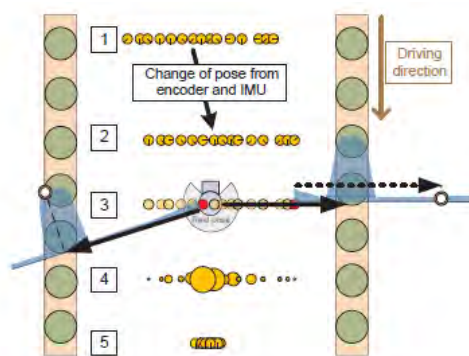


Figura 6.6: Aplicación de filtro de partículas en la agricultura (Blok *et al.*, 2019)

6.2.2 Estimación de obstáculos y límites del campo agrícola

La sección muestra las características de los algoritmos de visión por computadora para estimar la posición de los obstáculos y los límites de los campos agrícolas.

Visión por Computadora

Los sensores de visión son ampliamente utilizados en vehículos autónomos debido a su bajo costo económico y la amplia información que brindan, sin embargo, su funcionamiento queda limitado por la variación luminosa del ambiente (Shalal *et al.*,

2013). Asimismo, estos sensores son autosuficientes para realizar la navegación del vehículo, puesto que permiten la localización, mapeo y generación de trayectorias.

En los campos agrícolas, esta técnica utiliza la distribución lineal de los cultivos para generar las trayectorias de desplazamiento del móvil. El proceso inicia con la captura de la imagen RGB para ser agrupada utilizando una función de Kernel no paramétrica; luego, la imagen es segmentada en 3 regiones (cielo, tierra y arboles). De esta manera, mediante la transformada de Hough se extrae los bordes entre de la región tierra y los árboles. Finalmente, a partir de los bordes se obtiene la línea central la cual determina la trayectoria del robot (Sharifi y Chen, 2015). En la Figura 6.7 se muestra el procesamiento de la imagen. Asimismo, otra alternativa es el uso de redes neurales.



Figura 6.7: Procesamiento de imagen para navegación (Blok *et al.*, 2019)

6.2.3 Diseño del control de desplazamiento

Las salidas del algoritmo de navegación autónoma previamente explicado son enviados de la unidad de control primaria hacia la unidad de control secundaria para accionar los mecanismos capaces de realiza el desplazamiento del vehículo. El movimiento del vehículo se divide en dos grados de libertad. El primer grado de libertad consta de las ruedas motrices, las cuales reciben como *setpoint* la RPM por medio del canal CAN; la coordinación de los giros de los motores causa el desplazamiento del vehículo (avanzar o retroceder). Asimismo, el segundo grado de libertad encargado de la dirección del vehículo (giro izquierda o derecha) recibe el *setpoint* de posición para rotar las ruedas al ángulo de giro del vehículo. Cabe resaltar que este tipo de motores presentan un control interno; el cual permite personalizar los

valores de K_p , K_i y K_d para una planta de control que regule la posición, velocidad o torque. En la Figura 6.8 se muestra la opción “MIT Control” para el control de los motores. Por otro lado, el lazo de control general del desplazamiento del vehículo se detalla en la Figura 6.9. El algoritmo de autonomía se ejecuta en la unidad de control primaria; para ello, este algoritmo requiere de la información de posición del LiDAR, la orientación y posición del sensor inercial, y la detección de obstáculos de la cámara de profundidad. Cabe mencionar que toda esta información también es empleada como retroalimentación del lazo de control. Luego, la información de salida del algoritmo se envía a la unidad de control secundaria para comunicarse con los motores de los dos grados de libertad, con la finalidad de enviar los comandos de RPM y posición.



Figura 6.8: Opción de control de los motores seleccionados (imagen propia)

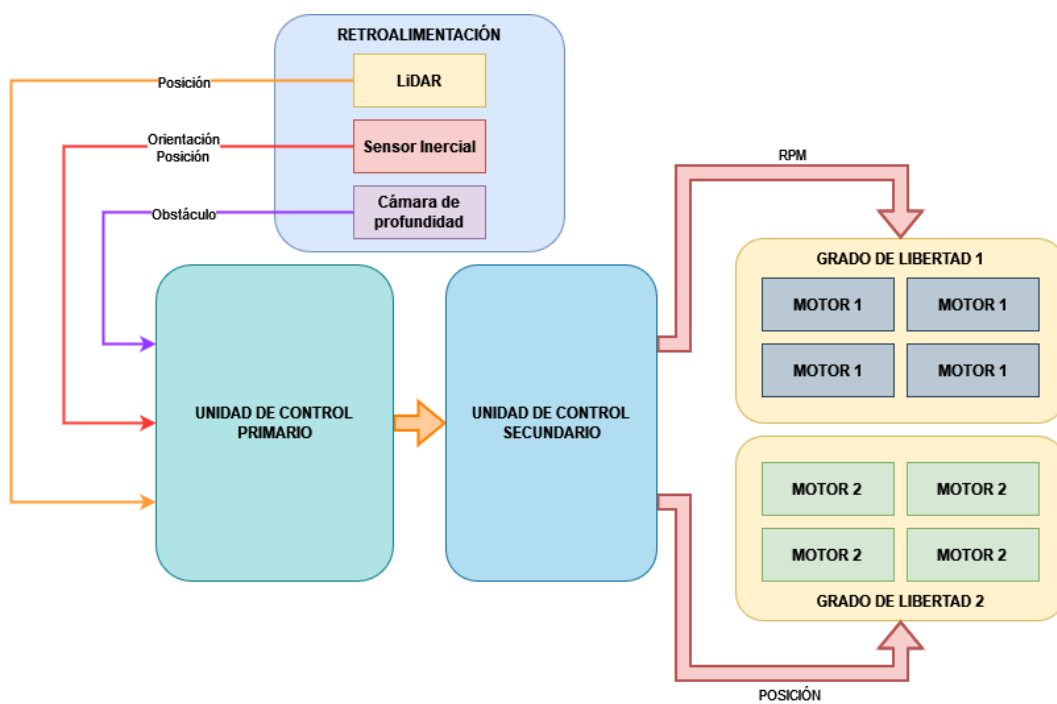


Figura 6.9: Lazo de control del desplazamiento del vehículo (imagen propia)

Asimismo, en la Figura 6.10 se describe el diagrama de flujo de la función movimiento autónomo, la cual se ejecuta iterativamente para mover el vehículo en el entorno de trabajo. En esta función se emplea la función del algoritmo de autonomía previamente descrita y muestra la diferencia de comandos para los dos grados de libertad.

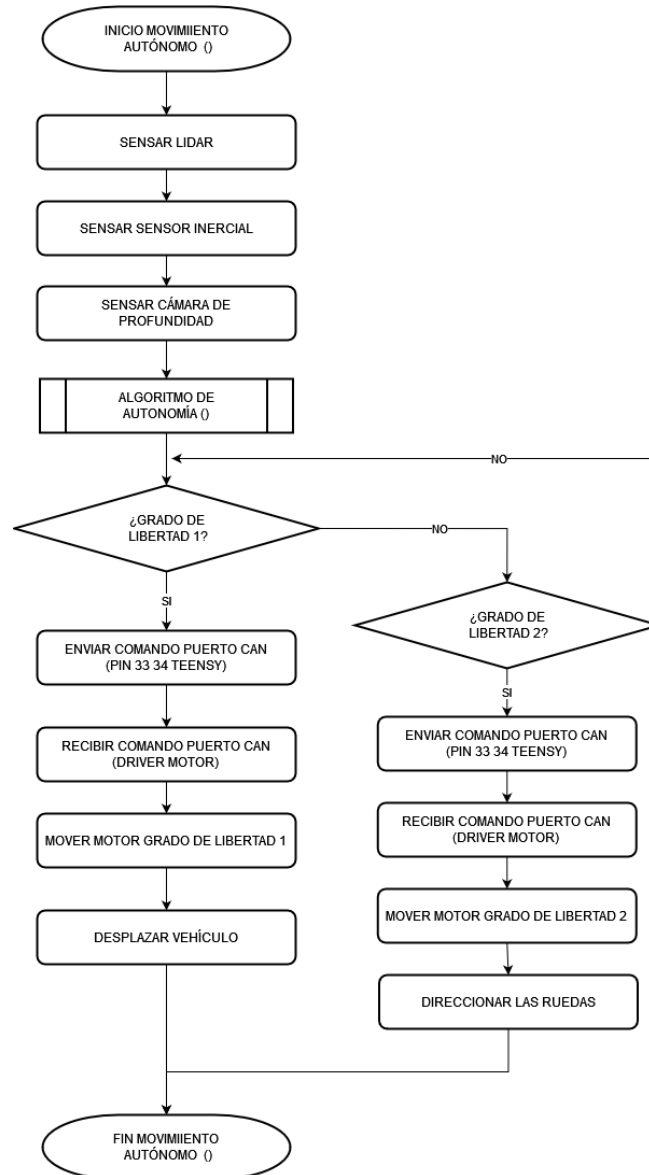


Figura 6.10: Diagrama de flujo del movimiento autónomo (imagen propia)

6.3 Diseño del control de la profundidad de perforación

El subsistema de labrado ejecuta la tarea de perforación en un lazo de control abierto. La herramienta de labrado fue diseñada para lograr en su máxima extensión la profundidad deseada para la labor agrícola, por ende, el lazo de control no requiere de

una retroalimentación. En la Figura 6.11 se observa el control del subsistema de labrado; la activación del subsistema inicia en la unidad de control primario, el cual envía la orden de activar el actuador lineal por medio de la unidad de control secundario. El actuador termina de extenderse cuando entra en contacto con el interruptor de fin de carrera interno del actuador.



Figura 6.11: Lazo de control del subsistema de labrado (imagen propia)

El funcionamiento del subsistema de labrado en nivel de algoritmo posee dos partes. En primer lugar, la función de activación del subsistema de labrado inicia con el cambio de estado de su variable en la unidad de control primario; lo cual envía un comando de activación de la circulina de labrado por parte de la unidad secundaria. Asimismo, el sentido del giro de actuador es controlado por el Puente H, quien recibe la instrucción de sentido horario para el avance del vástago por parte de la Teensy 4.1. El actuador lineal frena internamente el giro del vástago con la activación del interruptor de fin de carrera; de manera similar sucede con la función de desactivación, donde la variable de labrado se pone en baja, lo que genera que el actuador lineal gire en sentido antihorario (reversa). El proceso termina cuando el vástago entra en contacto con el interruptor de fin de carrera de la parte inferior del actuador. En la Figura 6.12 se detalla el diagrama de flujo de las funciones de labora de labrado activado y desactivado.

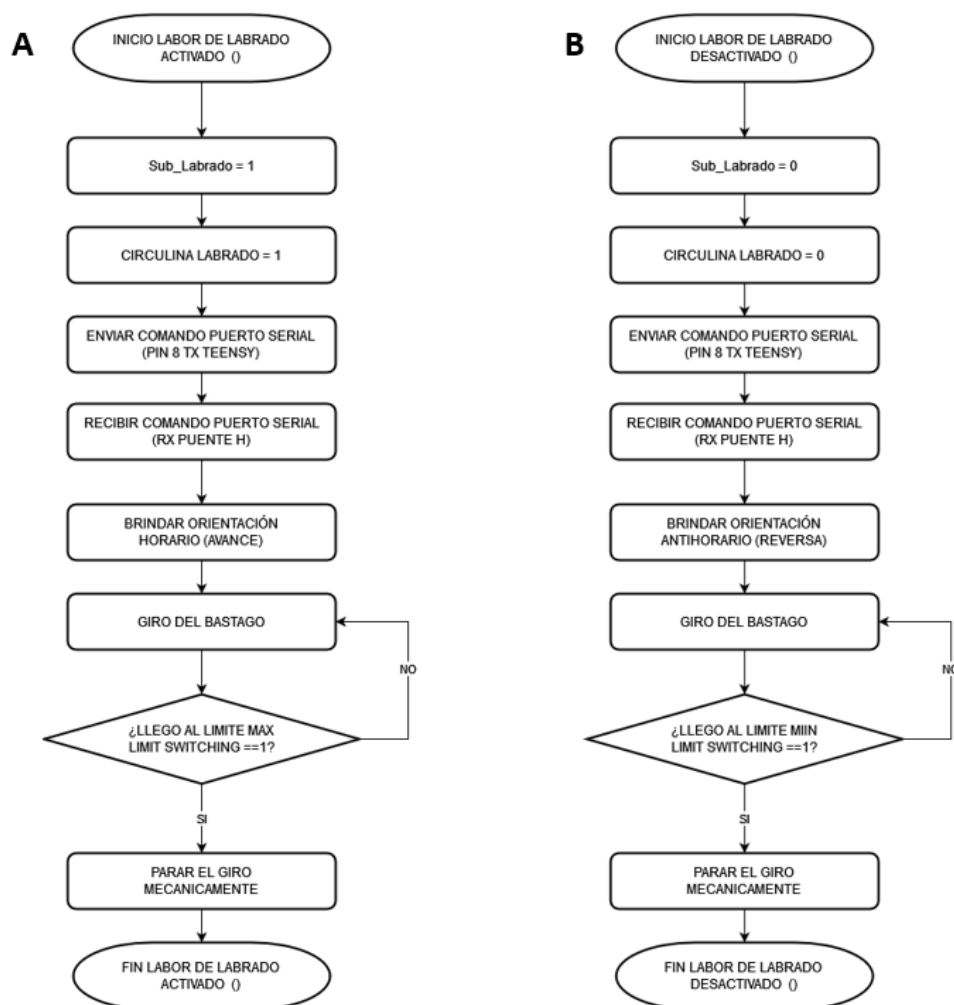


Figura 6.12: Diagrama de flujo de la función A. Labrado activado, B. Labrado desactivado (imagen propia)

6.4 Diseño del control del distanciamiento entre semillas

El subsistema encargado de distribuir las semillas presenta un lazo de control que tiene retroalimentación a partir de tres sensores. El primero parámetro es el nivel de semillas, el cual es sentido por los infrarrojos al interior del envase de semillas. Asimismo, la velocidad del vehículo es estimada mediante la velocidad lineal que se extrae del sensor inercial y la velocidad angular de los motores del primer grado de libertad. Estos parámetros ingresan a la unidad de control primario, en el cual se determina la RPM que es enviada por la unidad de control secundaria al motor del subsistema de sembrado. Cabe detallar que este motor tiene su propia planta de control de la misma manera que los motores del subsistema móvil. La Figura 6.13 muestra el lazo de control del subsistema de sembrado.

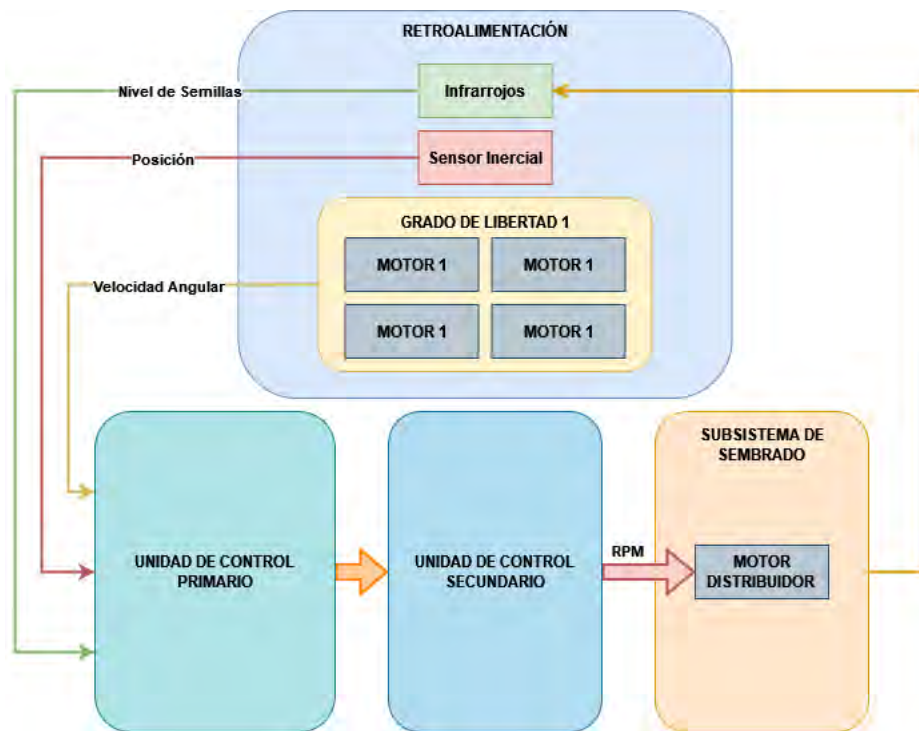


Figura 6.13: Lazo de control del subsistema de sembrado (imagen propia)

La función de sembrado es la encargada de ejecutar el algoritmo de accionamiento de la herramienta de sembrado. El proceso inicia con el cambio de estado de la variable de sembrado en la unidad de control primario, lo cual enciende la circulina de sembrado. Luego, el algoritmo procede a sensar si el vehículo ha logrado llegar a la posición final de la labor de sembrado; en el caso negativo se ejecuta el sensado del nivel de semillas. Si este no presenta un nivel bajo se extraen los valores de velocidad del sensor inercial y encoder de los motores para estimar la velocidad del vehículo, con lo cual mediante un control proporción se obtiene el factor de proporcionalidad que varía la RPM del motor. La variación del giro del motor permite conservar de manera constante la distancia entre semillas. En los diferentes casos no mencionados; el resultado es la culminación de la labor de sembrado, ello implica el apagado del motor y la circulina de sembrado. En la Figura 6.14 se observa el diagrama de flujo del funcionamiento del subsistema de sembrado.

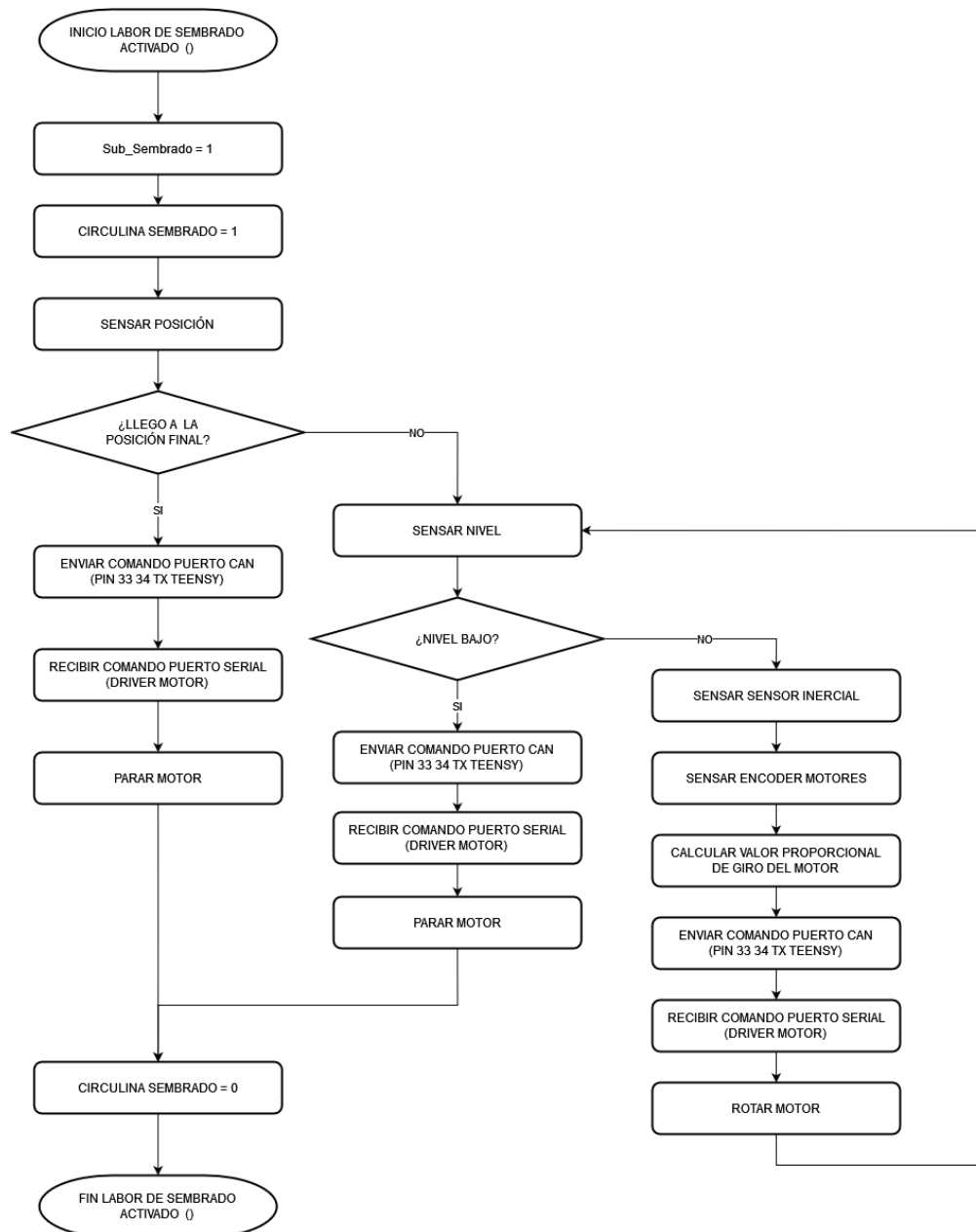


Figura 6.14: Diagrama de flujo del subsistema de sembrado (imagen propia)

6.5 Proceso general de la lógica de control del sistema

La lógica general del sistema se presenta en la Figura 6.15, donde se emplean las funciones desarrolladas a lo largo del capítulo acerca de los subsistemas del vehículo. Por lo tanto, el diagrama de flujo general empieza con la inicialización de los parámetros para la realización de la labor agrícola, en la parte intermedia se encuentran las funciones de los subsistemas móviles, labrado y sembrado. Finalmente, el sistema termina cuando este culmina las labores agrícolas y retorna a su posición de inicio.

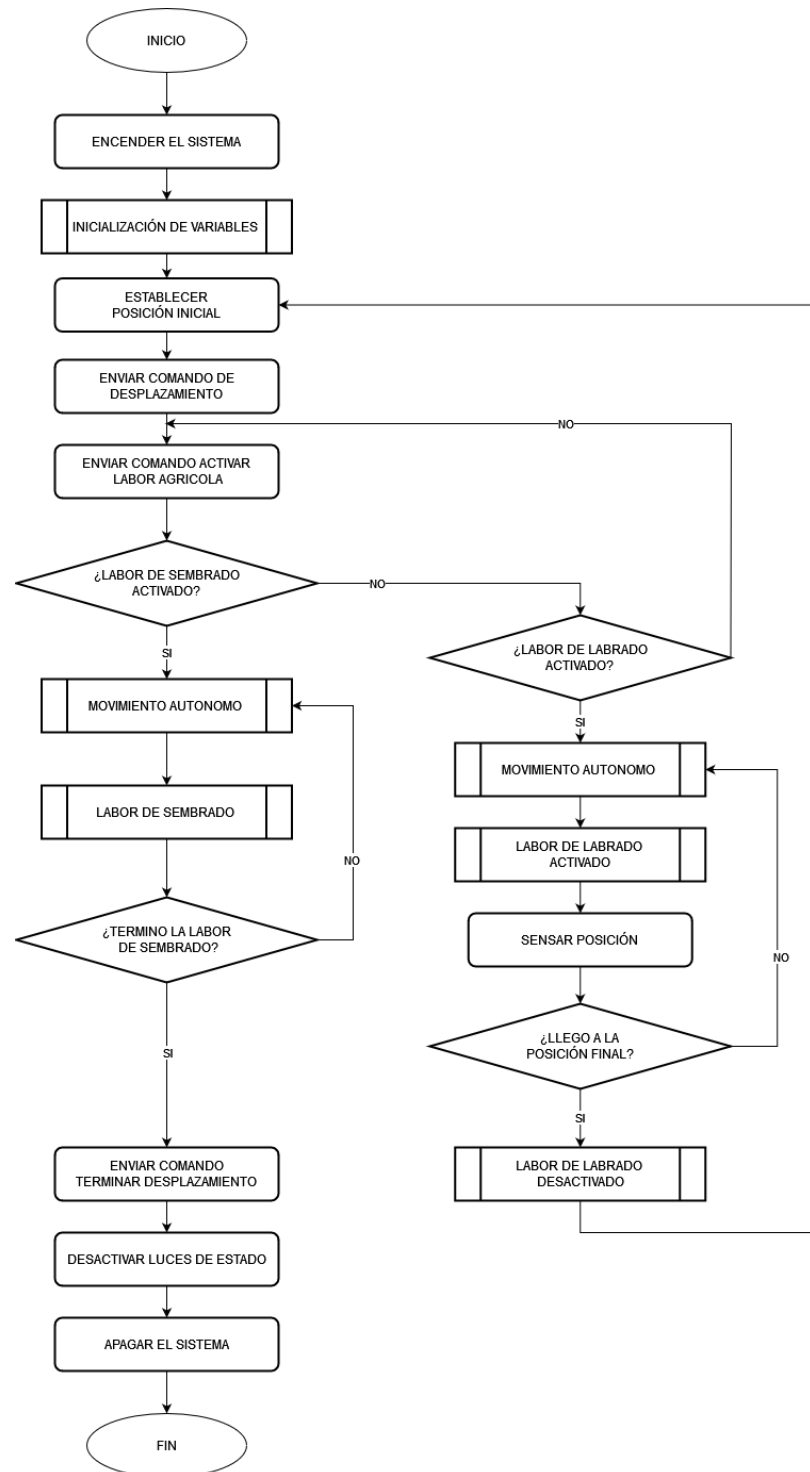


Figura 6.15: Diagrama de flujo del sistema integrado (imagen propia)

CAPÍTULO 7

IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

En este capítulo se presenta la implementación de un prototipo que valida experimentalmente la tarea de localización del vehículo. Para ello, el prototipo emplea *visible light positioning*, lo cual será definido en la primera sección del capítulo. Luego, la sección dos y tres explica a detalle la implementación del transmisor y receptor, respectivamente. El capítulo culmina con la presentación de los resultados experimentales. Cabe resaltar que esta sección es un complemento al trabajo de investigación y su desarrollo se realiza en conjunto con la Technische Universiteit Delft.

7.1 Visible Light Positioning (VLP)

Las tecnologías IoT (*internet of things*) presentan un consumo de energía significativo en sus subsistemas de comunicación; por ende, el desarrollo de comunicaciones inalámbricas con eficiencia energética es un campo activamente estudiado (Xu *et al.*, 2017). Las comunicaciones inalámbricas empleadas por décadas se han concentrado en el espectro de las radios frecuencias (WiFi, celular, BLE), las cuales se encuentran sobrecargadas actualmente (Bloom *et al.*, 2019). Esta problemática ha llevado a los investigadores a buscar opciones en el espectro de la luz visible.

Visible Light Communication (VLC) es un tipo de comunicación inalámbrica que modula la luz artificial a alta velocidad; este método puede transmitir información sin perturbar la iluminación observada por las personas, evitando el efecto de parpadeo.

Asimismo, esta propuesta tiene un consumo energético reducido; el costo de energía se concentra en el costo de iluminación del LED (pocos Watts [W]) y el costo de modulación que es el 20% del costo de iluminación (pocos cientos de mW) (Bloom *et al.*, 2019). Sin embargo, el uso de VLC requiere de componentes ópticos y una estructura de posicionamiento preciso, algunos costosos; puesto que la luz es altamente direccional y la comunicación requiere de dos terminales (transmisor y receptor) correctamente alineados (Xu *et al.*, 2017).

Visible Light Positioning, es una técnica de posicionamiento que transmite la posición a partir de *Visible Light Communication* (Yang *et al.*, 2015). La propuesta consiste en modular varios LED para generar un identificador LED-ID (*landmarks*), los cuales deben ser identificados para mapear y estimar la posición. Esta tecnología provee alta precisión para posicionamiento basado en las fuentes de luz que se encuentran en diversos edificios, especialmente en interiores (Guan *et al.*, 2021). Asimismo, los sistemas con VLP han demostrado un mejor rendimiento que los sistemas basados en radio frecuencias (RF); puesto que el posicionamiento con Wi-Fi u otra RF se encuentra en los metros mientras que el uso de VLP alcanza los centímetros (Yang *et al.*, 2015) (Kuo *et al.*, 2104).

El objetivo de usar *Visible Light Positioning* para la localización de un vehículo se basa en un artículo de investigación titulado: “*Augmenting Indoor Inertial Tracking with Polarized Light*” (Tian *et al.*, 2018). El propósito del artículo es proyectar una grilla sobre el suelo que se genera *landmarks* de colores, mediante materiales ópticos y laminas birrefringentes, para facilitar la localización del vehículo; sin embargo, estos *landmarks* no son percibidos por la vista humana puesto que se requiere de un segundo polarizador para captar los colores. En la Figura 7.1 se muestra la ejemplificación del propósito del artículo científico, donde se utiliza una fuente de luz que atraviesa algunos componentes ópticos para proyectar una grilla de colores sobre el suelo en el que se desplaza un vehículo.

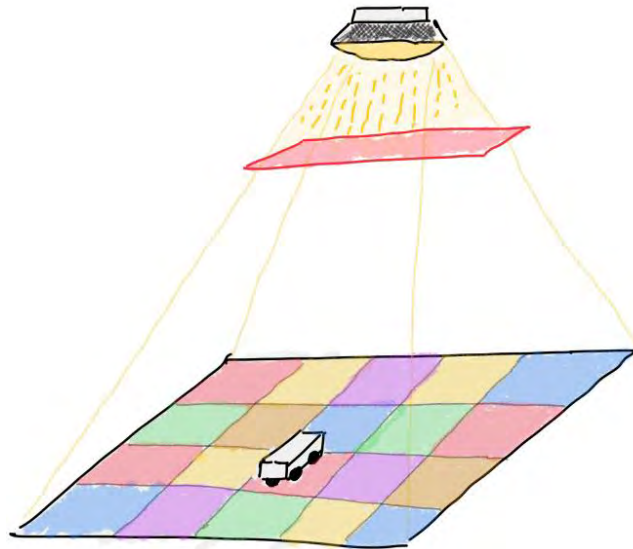


Figura 7.1: Motivación del uso de *visible light positioning* (imagen propia)

7.2 Transmisor

El propósito del transmisor es crear una grilla de colores en el suelo para facilitar la ubicación del vehículo. Para lograr este propósito el transmisor está constituido por componentes ópticos y una fuente de luz. El orden de los componentes es el siguiente: *flash light*, primer lente Fresnel, difusor, polarizador, material birrefringente y segundo lente Fresnel. La estructura de distribución de los componentes se muestra en la Figura 7.2, la cual presenta una estructura de sujeción ajustable conformada por piezas impresas en PLA y tornillos.

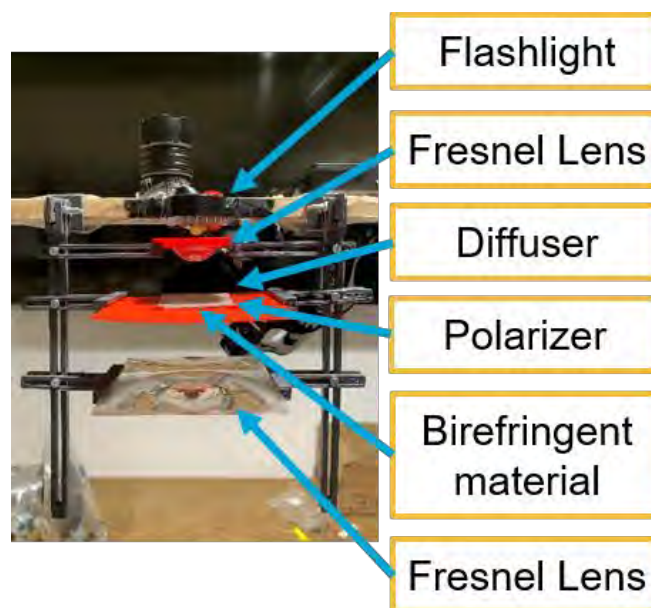


Figura 7.2: Orden de los componentes del transmisor (imagen propia)

Flash Light

El *flash light* es el recurso de luz que tiene el transmisor, esta fuente de luz es un LED (*light emitting diode*) que forma parte de una linterna Garberiel Faro XHP90. El LED tiene una forma cuadrangular que emite 12000 lúmenes; asimismo, este *flash light* tiene una alimentación de 11.1 V a 2 A, por lo cual requiere de un disipador para evitar el sobrecalentamiento del componente y sus conexiones.

Lente Fresnel

El lente Fresnel tiene la propiedad de expandir la luz y poder mostrar una imagen enfocada dependiendo de la distancia focal del lente. En la estructura del transmisor, el primer lente en forma de domo permite direccionar la luz que pasa por su apertura hacia la grilla (lámina roja Figura 7.3); mientras que el segundo lente se encuentra separado de la grilla por la distancia focal del lente Fresnel. Asimismo, este último es un lente plano y tiene la tarea proyectar la grilla en el piso de manera nítida.

Difusor

El difusor es requerido para homogeneizar la distribución de la luz sobre la grilla, este es la lámina blanca que se ubica en la parte superior de la lámina roja. El resultado de la grilla proyectada en el suelo empleando un difusor presenta una mejor distribución de los colores en las esquinas y bordes alejados; este es un problema que presenta el paper en el que se basa esta propuesta. Esto es importante debido a que mantiene homogéneo las características de los colores en todas las celdas, asegura el adecuado funcionamiento del algoritmo de detección de colores e incrementa el área de localización (no solo las celdas centrales).

Polarizadores

El polarizador tiene la función de permitir el paso de una dirección de ondas de luz; lo cual es necesario debido a que la luz emitida por el LED tiene direcciones aleatorias. Asimismo, el material birrefringente que es la capa subsiguiente requiere que la onda

de luz se encuentre en una sola dirección. La Figura 7.3 muestra el efecto del polarizador en el sistema.

Material Birrefringente

El material birrefringente tiene la propiedad de otorgar a las longitudes de onda (colores) del espectro visible una orientación específica, esta propiedad se ejemplifica en la Figura 7.4. Donde a la entrada del material birrefringente se tiene luz blanca en una dirección; mientras que a su salida presenta en conjunto luz blanca, puesto que está conformado por todas las longitudes de onda del espectro visible en diferentes orientaciones. En esta etapa se observa en la Figura 7.3 que la onda del color rojo es horizontal y del color verde es vertical. Para lograr visualizar el efecto del material birrefringente se requiere de un segundo polarizador, el cual en función de su orientación permite observar un color. Por ejemplo, el polarizador en horizontal muestra el color rojo, mientras que el polarizador en vertical proyecta el color verde; en caso no se use el segundo polarizador y solo se utilicen los ojos del ser humano, la grilla proyectada es luz blanca. Esto último es necesario para aplicar VLP, puesto que el escenario donde interactúa el ser humano no debe verse afectado por el sistema propuesto.

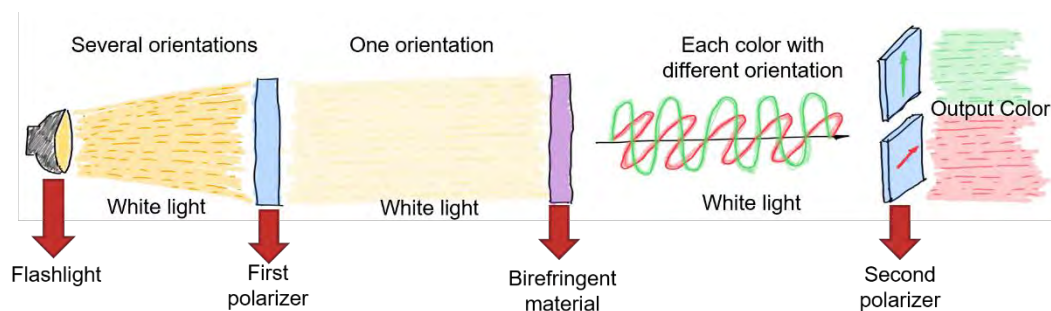


Figura 7.3: El comportamiento de la luz (imagen propia)

La manufactura de la grilla está conformada por celdas de material birrefringente, este material se encuentra en la cinta *scotch*. Para su manipulación se debe realizar con sumo cuidado sin ensuciar la cinta con la yema de los dedos, por ello, se recomienda emplear cuchillas y pinzas. La grilla tiene 49 celdas en una matriz de 7×7 . Asimismo, los diferentes colores que se logra en cada celda dependen del grosor del material birrefringente, es decir un arreglo de tres capas de cinta *scotch* resulta en un color

diferente al usar dos capas de cinta *scotch*. En la Tabla 7.1 se muestran las posibles permutaciones, asimismo, en la Figura 7.4 se muestran las grillas manufacturadas.

Tabla 7.1 Permutación de los colores para la grilla

Permutación de color	Polarizador 0°	Polarizador 90°	Manufactura
Azul – Amarillo	Azul	Amarillo	1 horizontal
Verde – Magenta	Verde	Magenta	4 horizontal
Verde Claro – Magenta	Verde Claro	Magenta	1 horizontal, 1 orientación de 45°, 2 horizontal
Magenta – Verde	Magenta	Verde	3 horizontal
Morado – Verde Claro	Morado	Verde Claro	1 horizontal, 1 orientación de 45°, 3 horizontal
Amarillo - Azul	Amarillo	Azul	2 horizontal

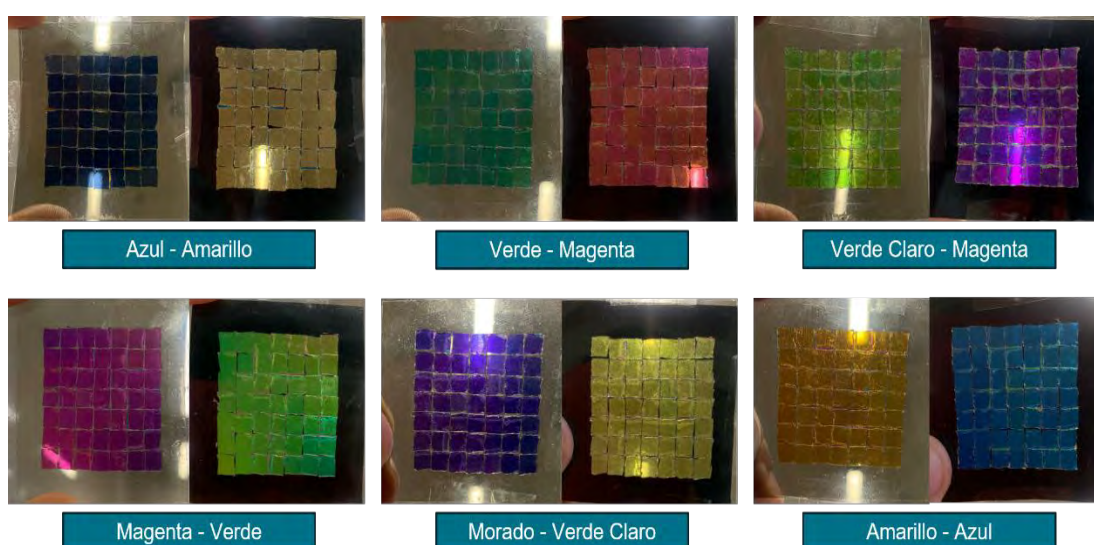


Figura 7.4: Muestras de las grillas manufacturadas (imagen propia)

Transmisor Instalado

El transmisor en funcionamiento es ubicado sobre dos trípodes para elevarlo del suelo, asimismo, la alimentación de este requiere de tres baterías de ion-litio de 3.7V con 2000 mA-h. La Figura 7.5 muestra el transmisor en funcionamiento, al lado izquierdo se muestra como el LED junto con primer lente Fresnel enfoca la luz sobre el difusor, polarizador y la grilla hecha de material birrefringente. La imagen del lado derecho muestra como el segundo lente Fresnel proyecta la grilla sobre el suelo, por lo cual en el piso se observa una grilla de colores. En este caso se observan los colores en el suelo, puesto que se ubicó el segundo polarizador solo para ejemplificar como se ve la grilla proyectada.

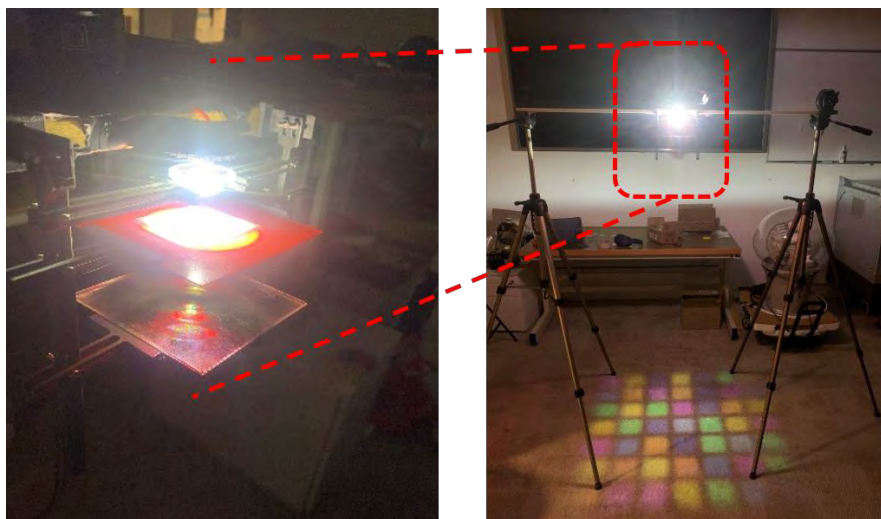


Figura 7.5: Transmisor en funcionamiento (imagen propia)

7.3 Receptor

El receptor es instalado sobre el vehículo con dirección hacia arriba. La tarea del receptor es captar los colores de la grilla, para ello requiere emplear un segundo polarizador. Sin embargo, la detección de color puede verse afectado por la luz ambiental, puesto que un porcentaje de esta tiene la misma orientación que el primer polarizador. El ingreso de esta fracción de luz ambiental generar ruido en la mediación e interferencia en el sentido especialmente si la luz ambiental es coloreada (Tian *et al.*, 2018). Asimismo, el comportamiento de la luz ambiental varía espacialmente y temporalmente, por lo cual recalibrar las mediciones en todo instante es una tarea exhaustiva (Tian *et al.*, 2018). Por ende, los investigadores recomiendan emplear dos polarizadores con una diferencia de 90° en su orientación, puesto que este ángulo permite un mayor contraste en la descripción de colores (Tian *et al.*, 2018). La diferencia de los valores de colores sentidos por los dos sensores de color elimina la interferencia de la luz ambiental. En la Figura 7.6 se observa la configuración de los polarizadores, los cuales se ubican sobre dos sensores de color TCS34725.

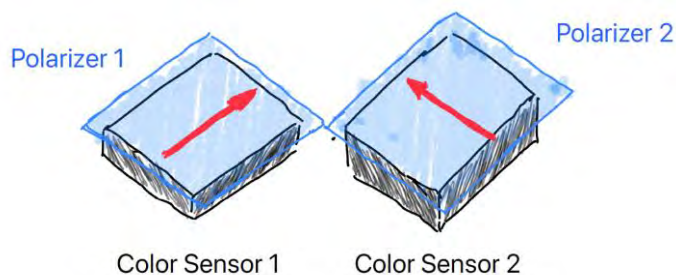


Figura 7.6: Disposición de los polarizadores sobre los sensores de color (imagen propia)

Por otro lado, la segunda complicación del sistema consiste en que el vehículo gira al realizar sus trayectorias, lo cual genera que el polarizador cambie de orientación y el color detectado varíe. Cabe recalcar que si el polarizador cambia su orientación puede detectar un color diferente, esto se debe a la propiedad del material birrefringente. Por lo tanto, se propone emplear un servomotor que compense los giros del vehículo, la información de giro es adquirida a partir de un IMU BNO055 instalado en este. En otras palabras, el servo motor compensa los giros de vehículo manteniendo fija la orientación de los sensores de color respecto al transmisor, con lo cual se mantiene el sentido de color.

Receptor Instalado

El vehículo es un Robot Maqueen Plus V2 alimentado por cuatro baterías AA, este móvil es adaptado con material impreso de PLA para agregar los dos sensores de color con sus polarizadores, un IMU, un servomotor y un LiDAR. La Figura 7.7 muestra el diagrama de conexiones del sistema, en el cual las salidas de información del RPLIDAR-A1 y el microcontrolador Arduino Due se direccionan hacia una laptop mediante USB. Asimismo, los sensores de color y el IMU se conectan a un multiplexor I2C TCA9548A para el tener el bus de comunicación con el Arduino Due, mientras que este microcontrolador emplea otro bus I2C para enviar comandos de movimiento al vehículo. Por último, el servomotor es controlado por un pin PWM del Arduino Due.

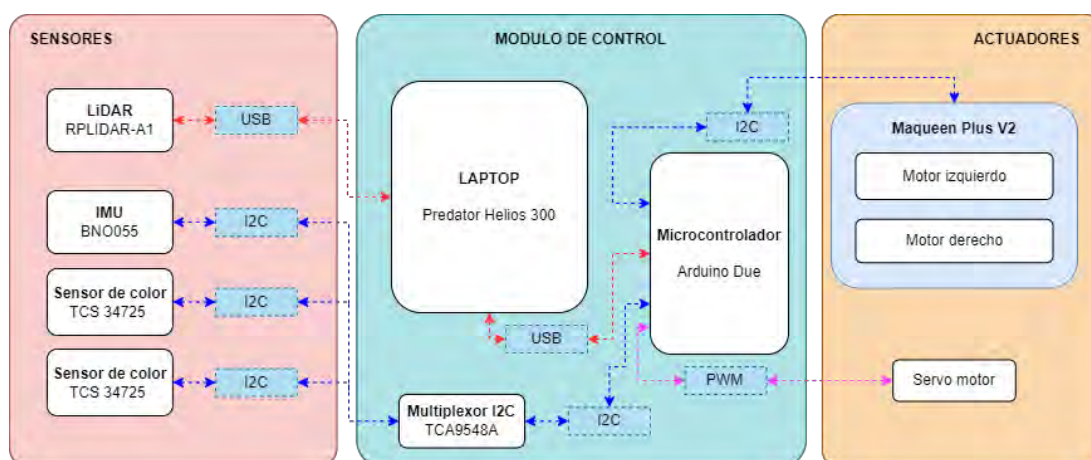


Figura 7.7: Diagrama de conexiones del receptor (imagen propia)

El prototipo instalado del receptor se muestra en la Figura 7.8, la cual detalla la disposición de los componentes en el robot. El LiDAR 2D se encuentra en la parte superior y no presenta interrupción con los sensores de color. Asimismo, el IMU es ubicado en el centro del robot para eliminar el desfaz en los giros.

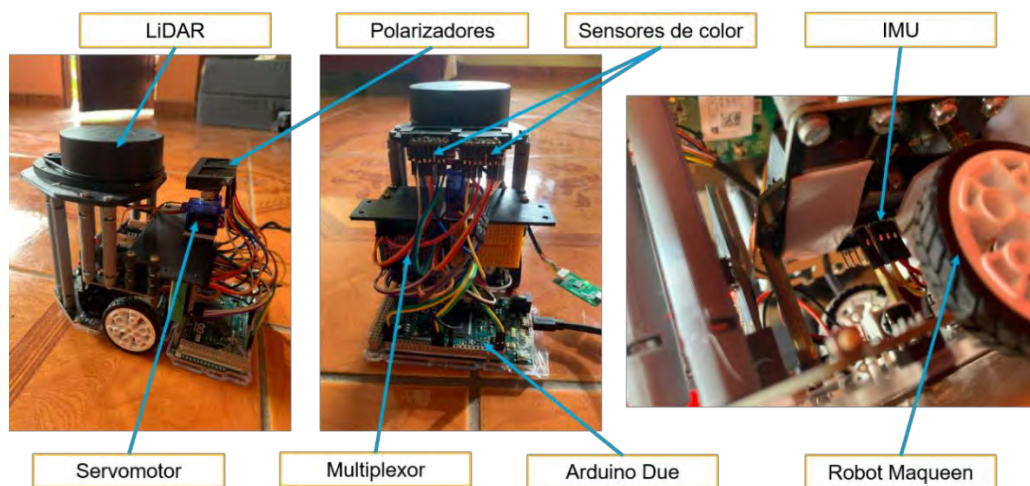


Figura 7.8: Disposición de componentes en el receptor (imagen propia)

7.4 Localización

Esta sección muestra el desarrollo de los algoritmos necesarios para la estimación de la posición del vehículo. Por ello, el sistema requiere diseñar la grilla que cumpla con los requerimientos para convertirse en un *landmark*; implementar un sistema de detección de colores que elimine problemas comunes que afectan a la propuesta de VLP; y la integración del IMU y VLP para estimar la posición del vehículo.

Detección de colores

El algoritmo de detección inicia con el cálculo de la diferencia entre los colores sensados por los sensores de color. Esta diferencia se realiza por canales (ΔRed , $\Delta Green$, $\Delta Blue$) y elimina la interferencia de la luz ambiental, la representación en formula es la siguiente:

$$\Delta R = R_1 - R_2; \Delta G = G_1 - G_2; \Delta B = B_1 - B_2$$

Donde R_1 , G_1 , B_1 ; y R_2 , G_2 , B_2 pertenecen a los canales sensados por los dos sensores de color respectivamente. Posteriormente el valor calculado es transformado de RGB hacia HSV (*hue*, *saturation*, *value*). Donde *hue* es el atributo de color y el grado para discernir un matiz; *saturation* describe la pureza del color; y *value* está relacionado al

brillo o intensidad de luz (Tian *et al.*, 2018). Este último es un valor que varía en función de la distancia y ángulo de incidencia que se encuentra el receptor respecto del transmisor. Por ende, la nueva representación de la diferencia se muestra en un plano HS, cabe resaltar que la fórmula de transformación de RGB a HSV para el caso de saturación (S^*) varía ligeramente.

$$S^* = \frac{\max(\Delta R, \Delta G, \Delta B) - \min(\Delta R, \Delta G, \Delta B)}{2 \max(|\Delta R|, |\Delta G|, |\Delta B|)}$$

La representación de los colores elegidos se muestra en el plano HS de la Figura 7.9, cabe mencionar que los valores están normalizados y los siete patrones de colores fueron elegidos de la Tabla 7.1. Para la obtención de la gráfica se desplaza al receptor sin el vehículo por todas las celdas de un cuadrante de cada grilla. Es decir, a partir de una grilla de 7×7 se toma una matriz de 4×4 de la esquina superior izquierda de la grilla proyectada. El procedimiento de sensado tiene las siguientes consideraciones: el receptor se agita sobre cada celda para agregar ruido a la medición, esto influye en crear una detección más robusta; el sensado por celda se realiza por un intervalo de tiempo de 2 segundos; y la orientación del receptor siempre se mantiene constante respecto a la del transmisor.

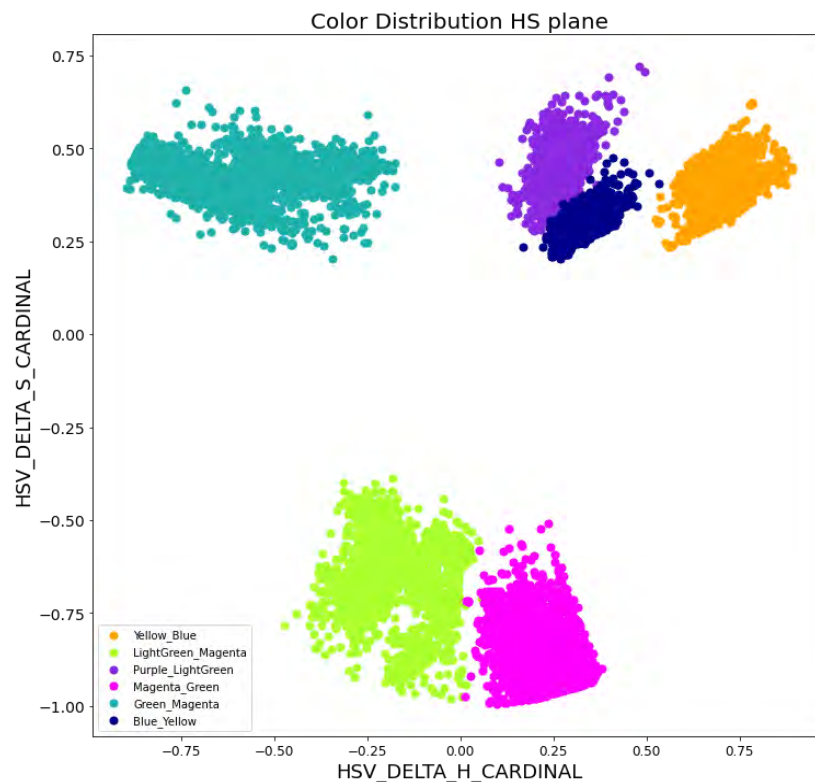


Figura 7.9: Plano HS de los patrones de colores seleccionados (imagen propia)

Luego, los valores encontrados en la gráfica contribuyen para entrenar el algoritmo de clasificación de *machine learning*. Los algoritmos implementados en la primera iteración son *Decision tree* con una profundidad de 3 basado en entropía; *KNN* con 6 vecinos, *logistic regression* con 200 iteraciones, y *SVM*. Cabe resaltar que la data se divide en 75% *train* y 25% *test*, y se ejecuta en 7 kFolds. Los resultados se muestran en la Tabla 7.2; de los cuales todos presenta un alto valor de *accuracy*, esto también se aprecia en cómo están distribuidos los puntos en el plano HS.

Tabla 7.2 Rendimiento de los algoritmos de clasificación

Algoritmo	Media	Desviación estándar
<i>Logistic Regression</i>	0.992	0.0016
<i>KNN</i>	0.998	0.0006
<i>Decision Tree</i>	0.778	0.0021
<i>SVM</i>	0.998	0.0005

A partir de los resultados se decide implementar las variantes de KNN y SVM para plasmar la gráfica representativa del clasificador sobre el plano HS. La Figura 7.10 muestra un resumen de las gráficas resultantes.

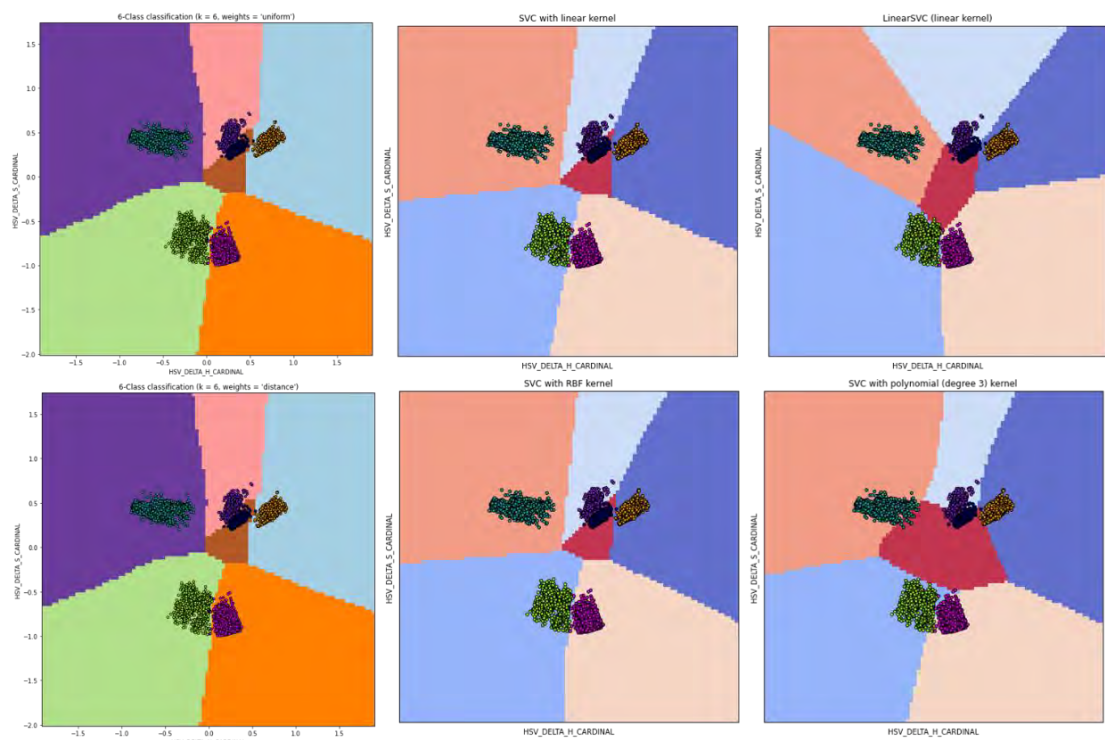


Figura 7.10: Variantes de los algoritmos de clasificación KNN y SVM (imagen propia)

A partir de las gráficas se elige al algoritmo de KNN de 6 vecinos basado en *uniform* para el peso; puesto que este parámetro permite que un nuevo punto no sea

influenciado por los puntos cercanos de otros vecinos. Esto es relevante puesto que el grupo de *Purple_LighGreen* y *Blue_Yellow* son muy cercanos y en algunas secciones se interceptan. Asimismo, visualmente esta gráfica final divide mejor a los grupos de colores. La Figura 7.11 muestra la gráfica del algoritmo seleccionado.

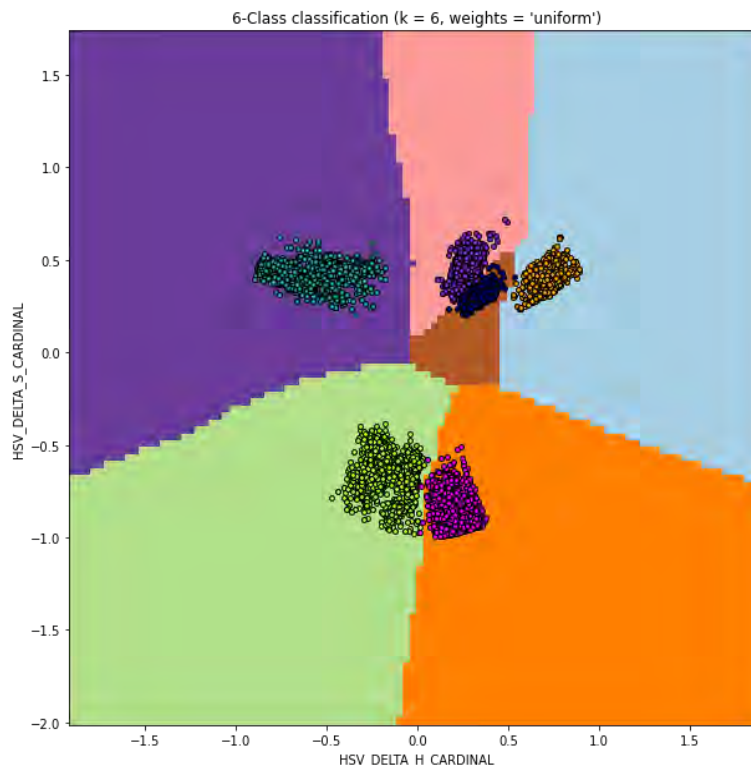


Figura 7.11: KNN 6 vecinos, *weights = uniform* (imagen propia)

Armado de grilla

El armado de la grilla contribuye en la implementación del filtro de Kalman extendido, para ello la grilla debe cumplir con algunas condiciones: los colores de una celda adyacente deben tener un alto contraste (colores distantes) y los caminos locales no deben de repetirse. El primer condicionante se obtiene calculando la distancia Euclidiana de los colores seleccionados, en la Figura 7.12 se observa una matriz de confusión donde se representan las distancias Euclidianas entre todos los centroides de las agrupaciones de colores del plano HS (Figura 7.9). Entonces los colores de celdas adyacentes deben ser distantes en base a la distancia Euclidiana.

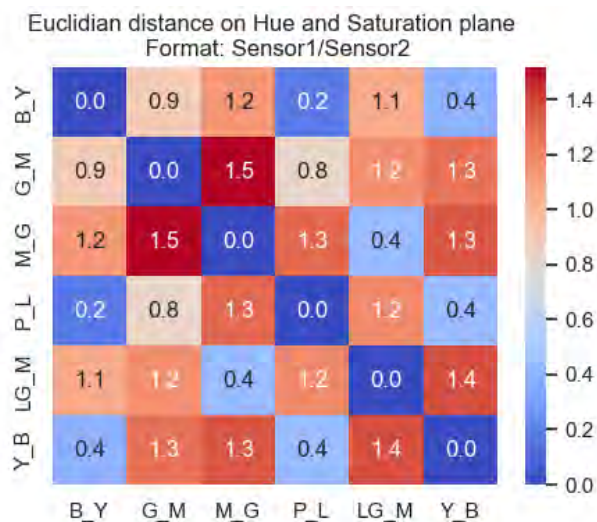


Figura 7.12: Distancia Euclidiana de los centroides de grupos de colores (imagen propia)

El segundo condicionante requiere el diseño de la grilla, esta tiene la característica de ser una matriz de 7×7 con 6 colores seleccionados; por ende, las regiones o caminos locales estan conformados por 4 celdas. Es decir, una celda es la central y los caminos locales son las extensionales 3 tres celdas diagonales, verticales y horizontales. La combinación o patrón de colores en una región local solo debe repetirse una vez en toda la grilla. Finalmente, la grilla resultante se muestra en la Figura 7.13, donde se aprecian dos grillas. La grilla de la izquierda es la vista del primer sensor de color con su polarizador y la otra es del segundo sensor color con el polarizador rotado en 90° respecto del primer polarizador.

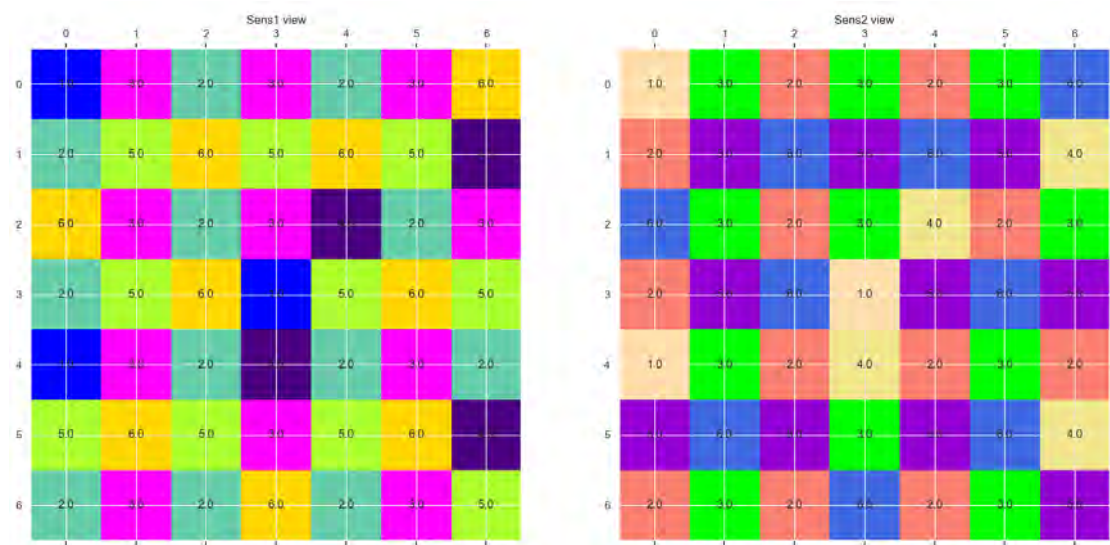


Figura 7.13: Grilla final del sistema (imagen propia)

CAPÍTULO 8

ANÁLISIS DE COSTOS

En este capítulo se presentan los costos involucrados en la realización del proyecto de tesis. Por ende, los costos son divididos en dos partes, lo cuales son: los costos de los componentes mecánicos y electrónicos, y los costos de diseño y fabricación. Los valores de costos se expresan en soles, para ello se emplea la conversión actual de dólares (1 USD = 3.8 PEN) y euros (1 EU = 4.0 PEN).

8.1 Costo de componentes mecánicos y electrónicos

Los componentes mecánicos se dividen en materias primas para la fabricación de piezas mecánicas y piezas mecánicas previamente fabricadas. En la Tabla 8.1 se muestra el costo de la materia prima, mientras que en la Tabla 8.2 se detalla el costo de las piezas mecánicas. Por otro lado, los componentes electrónicos son los actuadores, sensores y dispositivos electrónicos que se requiere para la ejecución de las labores agrícolas; en su mayoría estos componentes se adquieren en el mercado extranjero, por ello se añade el precio de importación con un factor de 30% adicional debido al desaduanaje e IGV. En la Tabla 8.3 se describe los costos de los componentes electrónicos.

Tabla 8.1 Costos de materia prima

MATERIA PRIMA	MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (USD)	PRECIO UNITARIO (PEN)	SUBTOTAL (PEN)
Planchas	Fibra de Carbono	4	-	110	440
Barras	Acero Inoxidable C45 DIN 17200	3	-	75	215
Bloque	Aluminio 6061-T6	2	126.63	-	962.39
Perfil	Aluminio-silicio EN AW-6060	1	-	150	150
Barras	Bronce SAE 68 B	4	-	20	80
Rollo filamento	PLA	3	-	55	165
Rollo filamento	ABS	3	-	75	225
Bloque	Acero fundido GS-52 DIN 1681	1	-	300	300
Perfil	Acero Inoxidable	3	-	100	300
Bloque	Acero de cementación C15 DIN 17120	1	-	120	120
Plancha	Aluminio 6061-T6	2	42.21	-	320.79
Costos Total de las materias primas					3278.18

Tabla 8.2 Costos de componentes mecánicos

COMPONENTE	NORMA / CÓDIGO	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (USD)	PRECIO UNITARIO (PEN)	SUBTOTAL (PEN)
Tornillos	M5, M6, M3, M2,5, M2 ISO 4762	100	-	-	200
Tuercas	M5, M6 ISO 4035	50	-	-	75
Arandelas de presión	ISO 7089	100	-	-	100
Perfiles estructurales	V-Slot 20 x 20 V-slot 40 x 40	5	-	90	450
Conectores de 90° V-Slot	-	50	-	2.5	125
Conectores en T V-Slot	-	10	-	10	100
Cubo de 3 vías V-Slot	-	10	-	15	150
Acople flexible	5 x 8 mm	1	-	22	22
T-nuts	-	50	-	-	25
Caja de Protección IP	WH-22 349 x 249.43 x 149.35 mm SA-39 199.9 x 199.9 x 101.1 mm	2	38.55 136.89	-	866.66
Prensa stopa	-	8	-	10	80
Rueda	HOBBYPARK	4	49	-	968.24
Costos Total de los componentes mecánicos					3161.9

Tabla 8.3 Costos de componentes electrónicos

COMPONENTE	CÓDIGO	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (USD)	PRECIO UNITARIO (PEN)	SUBTOTAL (PEN)
Motor grado 1	RMD X8	4	379	-	7489.04
Motor grado 2	AK 60-6	4	298.9	-	5906.26
Motor sembrado	RMD-L-5015-35T	1	102	-	503.88
Actuador lineal	FA-240-S-12-4	1	119.99	-	592.75
Cámara de profundidad	ZED 2i	1	449	-	2218.06
LiDAR	RPLIDAR-S2	1	366	-	1808.04
Sensor Inercial	Multi-Band GNSS	1	2749	-	13580.06
Estación base	LTU Rocket US	1	399	-	1971.06
Antena	AMO 5G13	1	165	-	815.1
Puente H	RoboClaw 2x7A	1	114.95	-	567.85
Circulina	FB2PST-012	3	-	1905.33	5715.99
Mosfet	512-FDC6401N	3	-	2.81	8.43
SBC con GPU	Jetson AGX Orin	1	1999	-	9875.06
SBC	Teensy 4.1	1	26.85	-	83.24
Transceptor	MCP 2551	1	-	10	10
Botones	199-HW1F2F10QDG120V	2	161.28	-	1593.45
Reguladores de voltaje	UBEC RED60-48D12W 60DAW4_2415S1.6 FED60-24S12W	4	8.99 120.54 103.39 88.26	-	1586.63
Relé de estado	769-S4EB-12V	1	23.40	-	115.6
Costos Total de los componentes mecánicos					54440.5

8.2 Costo de diseño y fabricación

El diseño del sistema integrado involucra todos los pasos conceptuales que se realizaron para obtener un diseño final del vehículo autónomo de agricultura. Los valores de costos de diseño se detallan en la Tabla 8.4. La conversión de horas trabajadas es de 20 PEN/h.

Tabla 8.4 Costos de diseño

LABOR DE DISEÑO	HORAS HOMBRES (H)	SUBTOTAL (PEN)
Conceptual	100	1500
Mecánico	100	1500
Electrónico	100	1500
Control	200	4000
Simulaciones	200	4000
Costo Total de diseño		12500

Los costos de fabricación están dirigidos a los costos por impresión 3D, mecanizado por CNC, torno y soldadura. En la Tabla 8.5 se observa los precios de manufactura. Cabe mencionar que la cantidad de material y tiempo de impresión son estimados en

el laminador ULTIMAKER CURA. Por otra parte, los valores de costos de los procesos de mecanizado se obtienen en base al mercado local.

Tabla 8.5 Costos de fabricación

LABOR DE DISEÑO	SUBTOTAL (PEN)
Impresión 3D	400
Soldadura	600
Corte	300
Mecanizado Torno	1500
Mecanizado CNC	3000
Costo Total de fabricación (PEN)	5800

8.3 Costo total

El resumen de los costos se muestra en la Tabla 8.6, donde se suman todos los costos previamente calculados para obtener el precio necesario del diseño e implementación del sistema integrado.

Tabla 8.6 Costos total del sistema integrado

CONCEPTO	SUBTOTAL (PEN)
Materia prima	3278.18
Componentes mecánicos	3161.9
Componentes electrónicos	54440.5
Diseño	12500
Fabricación	5800
Costo Total (PEN)	79180.58

CONCLUSIONES

En base a los capítulos presentados en el proyecto de tesis se confirma el desarrollo de un vehículo agrícola autónomo para actividades de sembrado y labrado en campos de cultivo de la sierra peruana. Por lo tanto, el documento presenta validaciones mediante simulaciones y prototipado que aseguran el funcionamiento de todos los subsistemas de vehículo y el cumplimiento de sus tareas. Además, esta propuesta de solución simboliza un aporte significativo al avance tecnológico para la agricultura de precisión en nuestro país.

El análisis del estado de las tecnologías ha permitido evaluar los avances tecnológicos relacionados a las labores agrícolas y la navegación autónoma de vehículos terrestres. De lo cual se concluye que la tendencia mundial de desarrollar una agricultura de precisión ha impulsado a muchas empresas y centros de investigación a crear modelos mecánicos autónomos o semiautónomos para la realización de tareas de labrado, sembrado, deshierbado, cosecha y transporte; con la finalidad de incrementar la rentabilidad de la agricultura, reducir enfermedades ocupacionales y contribuir en la mejora de la calidad de los productos agrícolas.

La lista de requerimientos ha facilitado la delimitación de las exigencias y deseos para el diseño conceptual del sistema, basado en el entorno de trabajo y las actividades agrícolas. A partir de ello, se concluye que los entornos agrestes y reducidos de los campos de cultivo de la sierra del Perú dificultan el desarrollo a gran escala de una agricultura industrial, puesto que influyen drásticamente en los requerimientos de geometría, cinemática, fuerza, energía, comunicación y uso.

El diseño mecánico de la estructura móvil se divide en tres subestructuras: grado de libertad 1 (rueda), segundo grado de libertad y suspensión; los cuales presentan un factor de seguridad de 1.16, 4.55 y 1.11, respectivamente. En su mayoría los componentes con el factor de seguridad crítico son fácilmente reemplazables, por lo cual se recomienda un mantenimiento preventivo luego de cada jornada de trabajo. A partir de los resultados de la simulación mecánica se valida la confiabilidad del sistema para desplazarse bajo las cargas del sistema y el entorno de trabajo (pendientes de 30°). Asimismo, el sistema de amortiguación diseñado tiene un tiempo de recuperación de

aproximadamente 3.5 s frente a un agujero de 10 cm, por lo cual se confirma la estabilidad del vehículo frente a desniveles en la superficie.

El subsistema de labrado presenta un factor de seguridad de 6.23 para realizar una perforación de 45 mm en tierra suelta, con lo cual se concluye que la herramienta de perforación no falla y brinda un rendimiento adecuado para la creación de surcos en tierras de campo de cultivo

El subsistema de sembrado diseñado puede depositar 1.84 g de semillas por cada revolución del difusor de semillas, por ende, este dispositivo puede esparcir las semillas de quinua por grupo en los campos de cultivo. Asimismo, este diseño valida que los grupos de semilla se encuentren separados por una distancia de 20 cm.

El diseño de la navegación autónoma del vehículo agrícola esta enfocado en la mejora de la estimación de la posición, con lo cual el rendimiento del algoritmo de SLAM obtenga mejores resultados. Por lo tanto, en base a la unión entre la posición estimada por la tecnología de *visible light positioning* y los valores sensados por el IMU, se puede concluir que este alcance es un aporte significativo para solucionar el problema de posicionamiento de vehículos en ambientes donde el uso de GPS no es posible.

El capítulo de análisis de costo estima como presupuesto final 79180.58 soles (\$20837). Este valor se encuentra por debajo del requerimiento de costo planteado, \$40000. Por lo tanto, el sistema es viable y en aproximadamente 2 años se convierte en un producto rentable trabajando en 5 campos de cultivo (parcelas de 200 m²).

El tiempo de autonomía de funcionamiento desarrollado en el diseño es de 2 horas y 30 minutos con un factor de seguridad de 1.2, ello cumple con el requerimiento mínimo de 2 horas de tiempo de autonomía. Por ende, el vehículo diseñado presenta un margen para brindar energía al sistema de manera continua. Por otro lado, el uso de antenas omnidireccionales presenta una expansión de los campos de cultivo de aproximadamente 8 veces; ello simboliza la viabilidad de que en posibles trabajos futuros se pueda desarrollar una flota de vehículos autónomos de agricultura que realicen labores agrícolas de manera paralela en 8 campos de cultivos cercanos a la antena omnidireccional.

BIBLIOGRAFÍA

- Adamov, B. (2018). Influence of mecanum wheels construction on accuracy of the omnidirectional platform navigation (on example of KUKA youBot robot). *2018 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*. 1-4. Doi: 10.23919/ICINS.2018.8405889.
- ASI (2021) The Future of Farming. Visitado el 16/02/2021.
<https://asirobots.com/farming/>
- Auat, F. & Carelli, R. (2013). Agricultural Robotics: Unmanned Robotic Service Units in Agricultural Tasks. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 7(3): 48-58. Doi: 10.1109/MIE.2013.2252957.
- Beeharry, Y. & Bassoo, V. (2020). Performance of ANN and AlexNet for Weed Detection Using UAV-Based Images. *2020 3rd International Conference on Emerging Trends in Electrical, Electronic and Communications Engineering*. 163-167. Doi: 10.1109/ELECOM49001.2020.9296994.
- Benos, L., Tsaopoulos, D. & Bochtis D. (2020). A Review on Ergonomics in Agriculture. Part I: Manual Operations. *Applied Sciences*. 10(6). Doi: 10.3390/app10061905
- Blok, P. M., van Boheemen, K., van Evert, F. K., Ijsselmuiden, J., & Kim, G. H. (2019). Robot navigation in orchards with localization based on Particle filter and Kalman filter. *Computers and Electronics in Agriculture*. 157: 261-269. Doi: 10.1016/j.compag.2018.12.046.
- Bloom, R., Zamalloa, M. Z., & Pai, C. (2019). LuxLink. *Proceedings of the 17th Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. <https://doi.org/10.1145/3356250.3360021>
- Boschini, C., Vargas, F. & Pineda, L. (2015). Evaluation of equipment for broadcast seed sowing of canary and linseed. *Agronomía Mesoamericana*. 26(1): 171-180. Doi: 10.15517/am.v26i1.16950.
- Ramos, E., Laffita, A., García de la Figal, A., Valdés, P. & Torres, R. (2012). Determinación experimental del coeficiente de fricción dinámico suelo-metal en un suelo Ferralítico rojo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(3): 35-40.

- Carpio, R. F., Potena, C., Maiolini, J., Ulivi, G., Rossello, N. B., Garone, E. & Gasparri, A. (2020). A navigation architecture FOR Ackermann vehicles in precision farming. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 5(2): 1103-1110. Doi:10.1109/lra.2020.2967306
- Case IH (2017). Is the Future Autonomous?. *The CASE IH Magazine*.
- Case IH (2018). CASE IH Defines Categories of Autonomy and Announces Pilot Program. *CASE IH Public Relations*.
- Cerna, L. (2007). *Agrotecnia Sostenible*. Universidad Privada Antenor Orrego. Visitado el 25/03/2021. <http://www.upao.edu.pe/fondoeditorial/pdf/agrotecnia.pdf>
- Dewi, N.S. & Komatsuzaki, M. (2018). On-body personal assist suit for commercial farming: Effect on heart rate, EMG, trunk movements, and user acceptance during digging. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 68:290-296.
- Dionido, R. & Ramos, M. (2017). Autonomous Seed-Planting Vehicle. *2017 7th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE)*. 121-126. Doi: 10.1109/ICCSCE.2017.8284391.
- Din, Z.M., Razzaq, W., Arif, U., Ahmad, W. & Muhammad, W. (2019). Real Time Ackerman Steering Angle Control for Self-Driving Car Autonomous Navigation. *2019 4th International Conference on Emerging Trends in Engineering, Sciences and Technology*. 1-4. Doi: 10.1109/ICEEST48626.2019.8981710
- Dongmok, K., Heeseung, H., Hwa Soo, K. & Jongwon, K. (2012). Optimal design and kinetic analysis of a stair-climbing mobile robot with rocker-bogie mechanism. *Mechanism and Machine Theory*. 50: 90-108. Doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2011.11.013.
- Ellery, A. (2016). *Planetary Rovers Robotic Exploration of the Solar System*. Springer.
- Emmi, L., Gonzalez-de-Soto, M., Pajares, G. & Gonzalez-de-Santos, P. (2014). New trends in robotics for agriculture: Integration and assessment of a real fleet of robots. *The Scientific World Journal*, 2014, 1-21. Doi:10.1155/2014/404059
- Escobal, J. (1993). Relaciones de largo plazo entre el sector agrícola y el no agrícola: Un estudio de cointegración para la economía peruana. *Economía*. 16(31): 71-89.
- FAO (2002). *World agriculture: towards 2015/2030 Summary report*. ISBN 92-5-104761-8

- FAO (2019). World food and agriculture statistical pocketbook 2019. ISBN 978-92-5-131849-2.
- FAO (2020). Statistical pocketbook world food and agriculture 2020. Doi: 10.4060/cb1521en.
- Fitch, R., Sukkarieh, S., Bergerman, M. & van Henten, E. (2015). 2015 IEEE RAS Summer School on Agricultural Robotics [Education]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. 22(2): 96-98. Doi: 10.1109/MRA.2015.2418520.
- Gómez, L. & Aguilar, E. (2016). *Guía de cultivo de la quinua*. Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Guan, W., Huang, L., Wen, S., Yan, Z., Liang, W., Yang, C. & Liu, Z. (2021). Robot Localization and Navigation Using Visible Light Positioning and SLAM Fusion. *Journal of Lightwave Technology*, 39 (22): 7040-7051. Doi: 10.1109/JLT.2021.3113358.
- Hague, T., Marchant, J. A., & Tillett, N. D. (2000). Ground based sensing systems for autonomous agricultural vehicles. *Computers and Electronics in Agriculture*, 25(1-2): 11-28.
- He, D. X., Matsuura, Y., Kozai, T. & Ting, K. C. (2003). A binocular stereovision system for transplant growth variable analysis. *Applied Engineering in Agriculture*. 19(5): 611–617.
- INEI (s.f.). Migraciones Internas en el Perú. Visitado el 30/01/2021. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib0018/ca322001.htm
- IGP (2005). Atlas climático de precipitación y temperatura del aire en la Cuenca del Río Mantaro: Volumen I. *Fondo Editorial del CONAM*.
- Juntaracena, K., Neubert, M.S. & Puntumetakul, R. (2018). Effects of muddy terrain on lower extremity muscle activity and discomfort during the rice planting. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 66:187-193.
- Koehler-Cole, K. & Elmore, R.W. (2020). Seeding Rates and Productivity of Broadcast Interseeded Cover Crops. *Agronomy*. 10(11): 1723. Doi: 10.3390/agronomy10111723.

- Kuo, Y.-S., Pannuto, P., Hsiao, K.-J., & Dutta, P. (2014). Luxapose. *Proceedings of the 20th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. <https://doi.org/10.1145/2639108.2639109>
- Lamprecht, S. & Ahlswede, S. (2020). 3D Tree Models. Precision Farming of Hazelnut Orchards (PANTHEON).
- LHAURA (s.f.). Abonadora sembradora 12K Manual de usuario. Visitado el 25/03/2021. <http://www.lhaura.com/wp-content/uploads/2017/10/10502-MANUAL-ABONADORA-SEBRADORA-12-k..pdf>
- Lessenger, J. (2005). *Agricultural Medicine: A Practical Guide*. Springer Science & Business Media.
- Lidemann, R. & Voordhees, C. (2005). Mars Exploration Rover mobility assembly design, test and performance. *2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. 1: 450-455. Doi: 10.1109/ICSMC.2005.1571187.
- Lu, H., Xiong, G. & Guo, K. (2016). Motion Predicting of Autonomous Tracked Vehicles with Online Slip Model Identification. *Mathematical Problems in Engineering*. 2016:13. Doi: 10.1155/2016/6375652.
- MIDAGRI (2007). Peruvian Agriculture Potencial a Global Opportunity.
- MIDAGRI (2010). Perú: Sector agrario resultados 2010. Análisis y estadísticas del desempeño agropecuario, agroindustrial y comercio exterior.
- Moazzam, S. I., Khan, U. S., Tiwana, M. I., Iqbal, J., Qureshi, W. S. & Shah, S. I. (2019). A review of application of deep learning for weeds and crops classification in agriculture. *2019 International Conference on Robotics and Automation in Industry (ICRAI)*. Doi: 10.1109/icrai47710.2019.8967350
- Morris, M. (2017). Gaining momentum in Peruvian agriculture: opportunities to increase productivity and enhance competitiveness. *World Bank Group*.
- Mousazadeh, H. (2013). A technical review on navigation systems of agricultural autonomous off-road vehicles. *Journal of Terramechanics*, 50(3), 211–232. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2013.03.004>

- Naeini, H., Karuppiah, K., Tamrin, S. & Dalal, K. (2014). Ergonomics in agriculture: an approach in prevention of work-related musculoskeletal. *Journal of Agriculture and Environmental Sciences*. 3(2): 33-51.
- NIOSH (2001). Simple Solution: Ergonomics for Farm Workers. *NIOSH Publication Dissemination*.
- Piron, A., Van der Heijden, F. & Destain, M. F. (2010). Weed detection in 3d images. *Precision Agriculture*. 12(5): 607-622. Doi:10.1007/s11119-010-9205-2.
- Qian, J., Zi, B., Wang, D., Ma, Y. & Zhang, D. (2017). The Design and Development of an Omni-Directional Mobile Robot Oriented to an Intelligent Manufacturing System. *Sensors*. 17(9): 2073. Doi: 10.3390/s17092073.
- Qiu, Q., Fan, Z., Meng, Z., Zhang, Q., Cong, Y., Li, B., Wang, N. & Zhao, C. (2018). Extended Ackerman Steering Principle for the coordinated movement control of a four-wheel drive agricultural mobile robot. *Computers and Electronics in Agriculture*. 15: 40-50. Doi: 10.1016/j.compag.2018.06.036.
- Ruiz, M. (1971). Sembradoras de Precisión. *MAG*.
- Shalal, N., Low, T., Mccarthy, C. & Hancock, N. (2013). A review of autonomous navigation systems in agricultural environments. *Innovative Agricultural Technologies for a Sustainable Future*. 1–16
- Sharifi M. & Chen X. (2015). A novel vision-based row guidance approach for navigation of agricultural mobile robots in orchards. *2015 6th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA)*. 251-255. Doi: 10.1109/ICARA.2015.7081155.
- Skacev, H., Micovic, A., Gutic, B., Dotilic, D., Vesic, A., Ignjatovic, V., . . . Zivkovic, M. (2020). On the development of the automatic weed detection tool. *2020 Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC)*. 123-126. Doi: 10.1109/zinc50678.2020.9161802
- Sonawane, N. (2015). An Experimental Method to Calculate Coefficient of Friction in Mecanum Wheel Rollers and Cost Analysis Using DFMA Techniques.

- Tang, J., Wang, D., Zhang, Z., He, L., Xin, J. & Xu, Y (2017). Weed identification based on K-means feature learning combined with convolutional neural network. *Computers and Electronics in Agriculture*. 135: 63-70. Doi: 10.1016/j.compag.2017.01.001.
- Tello, M. (2009). Impacto de los choques externos, ciclos económicos y arreglos preferenciales comerciales sobre la producción agropecuaria en el Perú, 1950-2007. *CISEPA, Pontificia Universidad Católica del Perú*. 277.
- VDI 2206 (2002). *Entwicklungsmethodik for mecha-tronische Systeme -Richtlinienentwurf*, VDI-Richtlinienausschuß A127/VDI 2206, Paderborn.
- VDI 2221 (1993). *Methodik zum Entwickeln und Kon-struieren technischer Systeme und Producte*, Beuth Verlag, Berlin.
- Velazco, J. & Pinilla, V. (2017). Development model, agricultural policies, and agricultural growth: Perú, 1950-2010. *Sociedad de Estudios de Historia Agraria*. 1704.
- Veramendi, T. & Lam, S. (2011). *Manejo Integrado del Algodonero*. Universidad Nacional Agraria de la Molina.
- Wintersteiger (s.f.). Sembradoras monogramo. Visitado el 25/03/2021. <https://www.wintersteiger.com/es/Cultivos-de-plantas-y-investigaci%C3%B3n-bot%C3%A1nica/Productos/Programa-de-productos/Sembradoras-monogramo>
- Xu, X., Shen, Y., Yang, J., Xu, C., Shen, G., Chen, G., & Ni, Y. (2017). PASSIVEVLC. *Proceedings of the 23rd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. <https://doi.org/10.1145/3117811.3117843>
- Yang, Z., Wang, Z., Zhang, J., Huang, C., & Zhang, Q. (2015). Wearables can afford. *Proceedings of the 13th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*. <https://doi.org/10.1145/2742647.2742648>