



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

INGENIERÍA MECÁNICA AGRÍCOLA

INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

**SISTEMA PARA PLANEACIÓN DE RUTAS Y RECARGA DE INSUMOS DE
ROBOTS COLABORATIVOS EN CULTIVOS EN HILERA**

TESIS

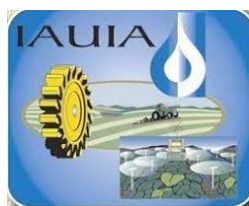
**Que como requisito parcial
para obtener el grado de:**

DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

Presenta:

PABLO ALAN CALDERÓN CARRASCO

Bajo la supervisión de: Dr. Noé Velázquez López



APROBADA

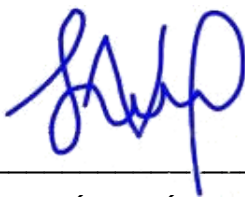


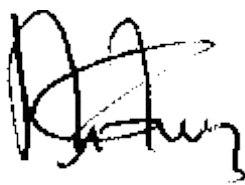
Chapingo, Estado de México, 26 de noviembre de 2021

SISTEMA PARA PLANEACIÓN DE RUTAS Y RECARGA DE INSUMOS DE
ROBOTS COLABORATIVOS EN CULTIVOS EN HILERA

Tesis realizada por **PABLO ALAN CALDERÓN CARRASCO** bajo la
supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada
como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR: 
DR. NOÉ VELÁZQUEZ LÓPEZ

ASESOR: 
DR. AGUSTÍN RUIZ GARCÍA

ASESOR: 
DR. GILBERTO DE JESÚS LÓPEZ CANTEÑS

CONTENIDO

1	INTRODUCCION GENERAL	12
1.1.1	Importancia del problema.....	12
1.1.2	Antecedentes y Justificación	12
1.1.3	Problema.....	15
1.1.4	Objetivos	15
1.1.5	Alcance del proyecto	15
1.1.6	Conclusiones.....	16
2	REVISION DE LITERATURA.....	17
2.1	INTRODUCCIÓN.....	17
2.2	SISTEMAS MULTI-ROBOT	17
2.3	SENSOR LIDAR-2D	18
2.4	APLICACIONES AGRÍCOLAS DE LIDAR	18
2.5	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO GENERAL	20
2.5.1	Partes.....	21
2.5.2	Formato de archivos para los datos	21
2.6	LITERAURA CITADA	23
3	ANALISIS DE SISTEMAS DE ROBOTS AGRÍCOLAS COLABORATIVOS	26
3.1	INTRODUCCIÓN.....	28
3.2	ROBOTS COLABORATIVOS	28
3.3	PARTES DE LOS ROBOTS MÓVILES EN LA AGRICULTURA.	29
3.4	SISTEMAS MULTI-ROBOT	33
3.4.1	Características de sistemas de robots colaborativos	33
3.4.2	Sistemas centralizados y sistemas descentralizados.....	34
3.4.3	Algoritmos de control automático más utilizados en las aplicaciones agrícolas de robots colaborativos.	36

3.4.4	Ambientes de simulación para el desarrollo de aplicaciones de robots colaborativos.....	37
3.4.5	Aplicaciones en la agricultura.....	38
3.5	CONCLUSIONES.....	43
3.6	BIBLIOGRAFÍA.....	45
4	ALGORITMO E INSTRUMENTACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE CABECERA Y PLANEACIÓN DE MOVIMIENTO EN CULTIVOS ESTABLECIDOS.	50
4.1	INTRODUCCIÓN.....	52
4.2	MATERIALES Y MÉTODOS.....	54
4.2.1	Algoritmo de detección con sensores ultrasónicos y temporizadores	56
4.2.2	Algoritmo sensores ultrasónicos y encoder.....	58
4.2.3	Algoritmo de detección de surco con LiDAR y encoder	60
4.2.4	Descripción de sitios	63
4.2.5	Filtro de ventana.....	63
4.2.6	Filtro para datos de LiDAR	64
4.2.7	Dirección alternativa de vueltas.....	65
4.2.8	Descripción del robot voltan	66
4.2.9	Calibración de sensores.....	67
4.2.10	Pruebas.....	68
4.2.11	Calibración de velocidad de avance del robot.....	68
4.3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	69
4.3.1	Pruebas del filtro de ventana.....	69
4.3.2	Resultados de pruebas de detección de cabecera	70
4.3.3	Implementación en distintos cultivos	72

4.4	CONCLUSIONES	73
4.5	AGRADECIMIENTOS.....	73
4.6	REFERENCIAS	74
5	DISEÑO MECANICO DE UN ROBOT AGRICOLA DE REABASTECIMIENTO EN CAMPO	77
5.1	INTRODUCCIÓN.....	79
5.2	OBJETIVOS	79
5.3	METODOLOGÍA.....	79
5.3.1	Simulación de brazo de suspensión.....	82
5.3.2	Propiedades del material.....	84
5.3.3	Torque y cargas en los ejes	85
5.3.4	Simulación y optimización de chasis	86
5.3.5	Sistema de descarga de granos y fertilizante.....	93
5.3.6	Alimentador de semillas	95
5.3.7	Alimentador de fertilizante	96
5.4	RESULTADOS	96
5.5	CONCLUSIONES.....	96

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Navegación	31
Tabla 2.	Comparación de diferentes protocolos de redes inalámbricas.....	32
Tabla 3.	Ejemplos de comunicación y computadoras en robots colaborativos .	35
Tabla 4.	Navegación autónoma en la agricultura por etapa.....	44
Tabla 5.	Fertilizantes comunes y su densidad aparente [1].	80
Tabla 6.	Medidas estimadas de tolva para fertilizante.	80
Tabla 7.	Volumen de semillas requerido.	82

Tabla 8. Propiedades del Acero estructural para la simulación.	85
Cuadro 1. Instrumentación de cada algoritmo.	54
Cuadro 2. Resultados de pruebas para detectar el final de surco en maqueta e invernadero.	71
Cuadro 3. Parámetros para el programa de detección de cabeceras.	72

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Triangulación RPLiDAR A1M8. Fuente Robopeak.	20
Figura 2. Datos de un LiDAR 2D.....	23
Figura 3. Instrumentación de un robot agrícola (voltan 2).....	30
Figura 4. Marco general de asignación de tareas. Fuente Cao et al. (2021). ...	39
Figura 5. Robot y herramienta para control mecánico de maleza. Fuente: McAllister et al., 2019.....	39
Figura 6. Diagrama de formación de carros y rutas, los carros representaos en color blanco. Fuente: Tian & Bhattacharya (2017).....	40
Figura 7. arquitectura jerárquica. Fuente Noguchi et al. (2004).....	41
Figura 8. Mapa de la topografía y relieve requerido por el control de misión para planear las rutas. Fuente: Hameed, (2019).	42
Figura 9. Sistema de monitoreo multi robot. Fuente. Conesa-Muñoz et al. (2015)	43
<i>Figura 10. Posición del sensores y zonas de monitoreo.</i>	<i>56</i>
Figura 11. Algoritmo para detección de cabeceras de cultivo con ultrasonidos y Δ tiempo.....	58
Figura 12. Algoritmo de detección de cabeceras con sensores ultrasónicos y encoder.	60
Figura 13. Algoritmo para la detección del final de surco con LiDAR.	62

Figura 14. Pruebas con LiDAR-2D en invernadero de rosas y con sensores ultrasónicos en maqueta.	63
Figura 15. Filtro de ventana por zona.	65
Figura 16. Diagrama de flujo para alternar la dirección de las vueltas al final del surco.	66
Figura 17. Robot voltan desarrollado en la universidad Autónoma Chapingo ..	67
Figura 18. Foto de la zona de prueba del filtro de datos de LiDAR.....	69
Figura 19. Gráfico de ruido en las lecturas de LiDAR, unidades en mm.....	69
Figura 20. Limpieza de cabeceras indispensable para el buen funcionamiento del algoritmo.	72
Figura 21. Vista previa de las tolvas.	81
Figura 20. Brazo de suspensión y cargas aplicadas.....	83
Figura 23. Primera simulación	83
Figura 24. Geometría del brazo de suspensión optimizada.	84
Figura 23. Eje de transmisión y sujeción de brazo de suspensión.....	85
Figura 26. Cargas aplicadas en la simulación.	86
Figura 27. Esfuerzo equivalente y desplazamientos del eje.	86
Figura 28. Diagrama de carga del chasis para la simulación.....	87
Figura 29. Esfuerzo equivalente en el chasis	88
Figura 30. simulación de fatiga, no superada en zonas de concentración de carga.....	89
Figura 31. desplazamiento con C12	89
Figura 32. Geometría de chasis del robot robot.....	90
Figura 33. Compresor de aire portátil con entrada de CC de 12V	91
Figura 34. configuración con Chumaceras	91
Figura 35. Configuración de peso reducido.	92
Figura 36. Diagrama de cuerpo libre de brazo de suspensión.....	93
Figura 37. Sistema de descarga de insumos agrícolas sólidos.	94

Figura 38. Banda alimentadora de insumos	95
Figura 39. Alimentador de semillas de resorte helicoidal.....	95
Figura 40. Diseño conceptual de alimentador de fertilizante.	96

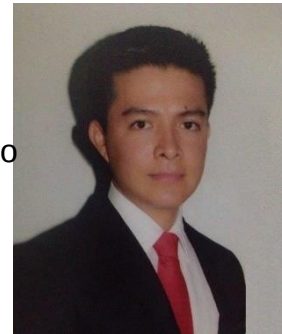
DATOS BIOGRÁFICOS

DATOS PERSONALES

NOMBRE: Pablo Alan Calderón Carrasco

LUGAR DE NACIMIENTO: Texcoco, Estado de México

FECHA DE NACIMIENTO: 02 de diciembre de 1990



CEDULA PROFESIONAL: 10690816

DESARROLLO ACADÉMICO

ESCOLARIDAD		CENTRO DOCENTE	PERIODO
EDUCACIÓN SUPERIOR	MEDIA	Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.	2006 – 2009
INGENIERO MECANICO AGRICOLA		Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola.	2009 - 2013
MAESTRO CIENCIAS INGENIERÍA MECÁNICA	EN EN	Instituto Tecnológico de Celaya, Departamento de Mecánica.	2014 - 2016

RESUMEN GENERAL

SISTEMA PARA PLANEACIÓN DE RUTAS Y RECARGA DE INSUMOS DE ROBOTS COLABORATIVOS EN CULTIVOS EN HILERA

En 2050 la población alcanzará 9,100 millones de personas. Los países en desarrollo deberán incrementar la producción de alimentos en 70% para lograr la seguridad alimentaria. La aplicación extendida de la robótica agrícola ayudará a alcanzar esta meta de forma sustentable.

El objetivo de este trabajo es encontrar estrategias para instrumentar y coordinar robots agrícolas de manera fiable y económica. En el capítulo II se analizaron los sistemas de gestión de robots agrícolas colaborativos. Después de este análisis se planteó encontrar estrategias de localización y gestión para evolucionar robots con sistemas de navegación basados en la detección de las plantas cultivadas y convertirlos en sistemas multi-robot colaborativos. Ya que los robots de los que se parte carecen de subsistema de localización no pueden coordinarse con otros robots móviles por lo que un objetivo fue desarrollar un sistema de detección de cabeceras de cultivo robusto que los complemente para cambiar de línea, pero también para usar el conteo de líneas de cultivo como método de localización local, este objetivo se abordó en el capítulo III y se instrumentó en el robot “Voltan”. Finalmente, el capítulo IV es un diseño de robot colaborativo para suministro a otros robots de insumos en campo.

Se obtuvieron como resultados, un algoritmo que usa LiDAR-2D, encoder y filtrado de datos propio para detección de cabeceras. Este tuvo efectividad del 100% en maqueta y en campo, lo que permite proponerlo para uso en un sistema de localización local.

En conclusión, en este trabajo se encontraron las características que debe cumplir un sistema de gestión de robots colaborativos, se desarrollaron algoritmos para planeación de movimiento y localización dentro de una parcela y se propuso un diseño de robot de suministro de insumos en campo.

Palabras clave: Robots agrícolas, localización de robot móvil, coordenadas locales, ambiente desconocido, detección de cabecera.

ABSTRACT

COLLABORATIVE ROBOTS PATH PLANNING AND INPUTS SUPPLY SYSTEM FOR ROW-CROPS

By 2050, the world's population is expected to reach 9.1 billion. Developing countries will need to increase food production by 70% to achieve food security. The widespread use of agricultural robotics will help to achieve this goal in a sustainable way.

The objective of this work is to find strategies aimed to implement and coordinate agricultural robots reliably and economically. Management systems for collaborative agricultural robots were analyzed in chapter II. As a result, to find localization and management strategies to evolve robots that use navigation systems based on crop detection on collaborative robot systems was proposed. However, as the base robots lack of localization subsystem, they cannot coordinate with others. Therefore, one objective was to develop a reliable end of the crop row detection system that complements them to switch lines, but also to use crop row counting as a local localization method, this objective was addressed in chapter III and was implemented in the "Voltan" robot. Finally, Chapter IV is a proposal for a collaborative robot for supplying other robots with inputs in field.

The results obtained were an algorithm that uses LiDAR-2D, encoder and its own data filtering for end of the crop row detection. This algorithm was 100% effective in the model and in the field, which allows it to be proposed for use in a local positioning system.

In conclusion, in this work the characteristics that a collaborative robot management system must fulfill were described, algorithms for movement planning and localization within a plot were developed, and a design of a robot for in field supply was proposed.

Keywords: Agricultural robots, mobile robot localization, local coordinates, unknown environment, end of the crop row detection

1 INTRODUCCION GENERAL

1.1.1 Importancia del problema

Para el año 2050 la población mundial alcanzará los 9,100 millones de habitantes FAO (2009). Se estima que para lograr la seguridad alimentaria en los países en desarrollo deberá incrementarse la producción de alimentos en 70% en un entorno de cambio climático y restricciones de los recursos naturales (Vázquez et al., 2018). El factor tecnológico es uno de los ejes para alcanzar esta meta de producción a través de la innovación y aplicación extendida de tecnologías como la robótica. La navegación autónoma de robots en la agricultura es compleja porque las condiciones son altamente variables, esto ha llevado a desarrollar sistemas robóticos igual de complejos que, aunque son funcionales no se implementan principalmente por su excesivo costo (Bechar & Vigneault, 2016).

1.1.2 Antecedentes y Justificación

Es necesario tener varios robots móviles en el campo para evitar el daño de compactación y erosión que las grandes máquinas ocasionan al suelo (Hameed, 2019). También por la existencia de ventanas de tiempo reducidas para realizar las labores agrícolas (Bechar & Vigneault, 2017) y para mantener o incrementar la eficiencia de trabajo comparada con los métodos mecanizados tradicionales.

Para lograr la meta de trabajar con varios robots en la misma parcela y momento, es necesario coordinarlos y para ello conocer su ubicación y comunicarse con ellos es esencial. Estos dos problemas están resueltos con el uso de tecnologías

que por su costo no se implementan de forma generalizada. Siendo el LiDAR 3-D y los sistemas de geoposicionamiento de alta precisión los componentes que más contribuyen a elevar el precio. Una alternativa para implementar más robots en la agricultura es hacerlos más atractivos económicamente, prescindiendo de los sensores y sistemas de mayor costo y usando las líneas de cultivo para navegar y localizarse. En este sentido, se han desarrollado sistemas que detectan los cultivos para desplazarse en el espacio entre líneas usando principalmente cámaras de video, LiDAR 2-D y sensores ultrasónicos (Malavazi et al., 2018, Zhang et al., 2014, Ahmadi et al., 2020).

Aunque se han propuesto sistemas de navegación basados en rasgos del ambiente, no se ha reportado un sistema que coordine robots agrícolas localizando a los agentes con base en la detección de rasgos extraídos del ambiente con un sistema de coordenadas locales, tal como el número de surco, la mayoría de los sistemas localiza a sus agentes mediante coordenadas globales. En general todos los sistemas que coordinan múltiples robots están dotados de estrategias para evitar las colisiones o tener colaboración entre los agentes, lo especial que se propone es tener habilidades colaborativas en el marco de la localización por la numeración de surcos, en específico se desea coordinar el encuentro para suministro de insumos. Por lo que esta investigación se enfoca en resolver el problema mediante sistemas que puedan instrumentarse de forma económica.

Por ello, se desarrolló un software libre, que usa sensores de bajo costo compensando las deficiencias de los sensores con el uso de redundancias, filtros, rutinas de protección y estrategias alternativas al geoposicionamiento global de alta precisión

El desarrollo de estrategias para un sistema agrícola multi-robot basado en coordenadas locales, es un tema poco estudiado y útil en la realidad general del campo en las naciones en desarrollo por su bajo costo.

Para lograr estos objetivos se partiría de los sistemas que detectan los cultivos para desplazarse en el espacio entre filas usando principalmente cámaras de video,

LiDAR 2-D y sensores ultrasónicos (Malavazi et al., 2018, Zhang et al., 2014, Ahmadi et al., 2020).

Malavazi et al., (2018) Emplearon solo un sensor LiDAR 2D para la navegación de un robot autónomo usando un cultivo establecido como guía. Desarrollaron un algoritmo para detectar los cultivos ajustando líneas, reportan no haber logrado detectar la cabecera del surco porque al llegar ahí el LiDAR no tienen ninguna referencia por estar situado en la parte frontal del robot y no detectar hacia atrás.

Chávez-Sánchez (2016) desarrollo un software para el reconocimiento automático del tallo en cultivo de tomate bajo invernadero mediante visión por computadora, de este trabajo se tomó el reconocimiento del color verde, se mejoró con el ajuste automático a las condiciones de luz y se usó para el cálculo del centro del surco en un cultivo establecido, posteriormente se aplicó a la corrección de trayectoria de un vehículo autónomo mediante la técnica *visual servoing* para mantenerlo centrado en el surco mientras se desplaza. Empleando la misma plataforma móvil, López-García (2021) desarrollo un software basado en visión estéreo para el mismo fin, ambos guían al robot por el centro del surco, pero no detectan cuando llega a la cabecera.

Ahmadi et al., (2020) proponen un sistema de navegación basado en visión por computadora, usan dos cámaras monoculares RGB montadas al frente y atrás de una plataforma móvil de dirección deslizante para usarlas de forma alternativa según el robot avance en un sentido u otro, cuando la cámara frontal llega la final de la línea se invierte el sentido del desplazamiento del robot y la cámara trasera entra en funcionamiento comandando al robot hacia la línea contigua mediante, con esta propuesta logran recorrer el 100% de las líneas de cultivo sin malezas lo que podría limitar la aplicación en campo.

Los tres casos citados anteriormente son ejemplos de sistemas de navegación basados en la extracción de rasgos del ambiente y en cada caso la detección fiable de la cabecera en condiciones de campo es un área de oportunidad. Esto provoca que en condiciones de campo no sea posible desencadenar rutinas de giro en

cabecera que den continuidad al trabajo retomándolo en otro surco que se requiere en tareas culturales como, aspersión de agroquímicos, fertilización control de malezas, etc.

1.1.3 Problema

La mayoría de los sistemas desarrollados en robótica agrícola no llegan al usuario, una de las causas más importantes es el excesivo costo que alcanzan. Los componentes más caros son el software, el LiDAR 3D y los sistemas de geoposicionamiento de alta precisión.

1.1.4 Objetivos

- Desarrollar software encargado de gestionar un grupo heterogéneo de robots para hacer diferentes labores agrícolas. Además de habilitar la cooperación y comunicación entre ellos a fin de hacerlos eficientes en el cumplimiento de las tareas asignadas.

Objetivos específicos

- Realizar un análisis de artículos sobre plataformas de comunicación y gestión de robots agrícolas colaborativos.
- Desarrollar e implementar un algoritmo robusto para la detección de cabeceras de parcela.
- Diseñar un robot colaborativo para suministro en campo de insumos agrícolas.

1.1.5 Alcance del proyecto

Se revisó el material bibliográfico relevante sobre robots agrícolas colaborativos y sistemas de gestión de éstos, así como sus subsistemas. De acuerdo con la problemática encontrada se optó por desarrollar un sistema de bajo costo basado en coordenadas locales con navegación des centralizada y habilidad de coordinación con otros agentes por lo que se avanza en el subsistema de detección de cabecera de surco para girar y también como método de localización local. También se propone un robot auxiliar para suministro de insumos.

1.1.6 Conclusiones

En conclusión, en este trabajo se encontraron las características que debe cumplir un sistema de gestión de robots colaborativos, se desarrollaron algoritmos para planeación de movimiento, detección de cabecera y localización dentro de una parcela. También se propone un diseño de robot de suministro de insumos en campo.

2 REVISION DE LITERATURA

2.1 INTRODUCCIÓN

Para el año 2050 la población mundial alcanzará los 9,100 millones de habitantes FAO (2009). Se estima que para lograr la seguridad alimentaria en los países en desarrollo deberá incrementarse la producción de alimentos en 70% en un entorno de cambio climático y restricciones de los recursos naturales (Vázquez et al., 2018). El factor tecnológico es uno de los ejes para alcanzar esta meta de producción a través de la innovación y aplicación extendida de tecnologías como la robótica. La navegación autónoma de robots en la agricultura es compleja porque las condiciones son altamente variables, esto ha llevado a desarrollar complejos sistemas robóticos que aunque son funcionales no se implementan principalmente por su excesivo costo (Bechar & Vigneault, 2016). Para implementar más robots en la agricultura una alternativa es hacerlos más atractivos económicamente prescindiendo de los sensores y sistemas de mayor costo y usando las líneas de cultivo para navegar y localizarse. Siendo el LiDAR 3-D y los sistemas de geoposicionamiento de alta precisión los componentes que más contribuyen a elevar el precio. Por ello, prescindiendo de los sensores más costos, se han desarrollado sistemas que detectan los cultivos para desplazarse en el espacio entre filas usando principalmente cámaras de video, LiDAR 2-D y sensores ultrasónicos (Malavazi et al., 2018, Zhang et al., 2014, Ahmadi et al., 2020).

2.2 SISTEMAS MULTI-ROBOT

Los sistemas multi-robot son necesarios en la agricultura por muchas razones, entre las que destaca evitar el daño de compactación y erosión que las grandes máquinas ocasionan al suelo (Hameed, 2019). También porque existen ventanas de tiempo reducidas para realizar las labores agrícolas (Bechar & Vigneault,

2017) y para mantener o incrementar la eficiencia de trabajo comparada con los métodos mecanizados tradicionales.

Los sistemas multi-robot se definen como un grupo de agentes inteligentes cooperando para ejecutar una cierta misión (Dudek and Jenkin 2010), surgen de la necesidad de ejecutar tareas complejas que requieren a un grupo heterogéneo de robots. Los sistemas colaborativos son por definición un sistema multi-robot que agrega la interacción entre los agentes haciéndolos intercambiar información, materiales, energía, etc. Eso implica que además de desarrollar tareas específicas, deben ser capaces de comunicarse, conocer su ubicación y mantenerse organizados.

2.3 SENSOR LIDAR-2D

Debido a la importancia del sensor LiDAR-2D para este trabajo, se presentan algunas aplicaciones agrícolas de la tecnología de LiDAR. también se revisan los principios de funcionamiento del LiDAR-2D que se empleó en el artículo principal de esta tesis, las partes que lo componen, el formato para intercambio de nubes de puntos de LiDAR y finalmente un ejemplo de la estructura de los datos obtenidos por el sensor

LiDAR es el acrónimo de *Light Detection And Ranging*, es un sistema que emplea pulsos de láser para la exploración remota del entorno. Con este sistema se obtiene una nube de puntos que detalla la posición de los objetos en el área de interés. Este sistema tiene aplicaciones diversas que van desde reconocimiento del camino para vehículos con navegación autónoma, pasando por la obtención de mapas 3D de alta resolución (usados por ejemplo para realizar inventarios forestales) hasta la localización de objetos que orbitan el espacio.

2.4 APLICACIONES AGRÍCOLAS DE LIDAR

Con los datos LiDAR tomados de manera aérea o por satélites se pueden obtener (Howard, 2015):

- Modelos digitales de elevación (imagen y pendiente del mapa, elevación y aspecto)
- Modelos de vegetación (ubicación del mapa, dosel de imágenes altura)

- Control de la erosión (mapa del flujo de agua, captaciones simular la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo)

Existe un repositorio para obtener nubes de puntos de datos topográficos, pero solo está disponible para datos de Estados Unidos cuyo gobierno invierte dinero público para obtenerlos y los comparten de forma gratuita por internet en: <https://portal.opentopography.org/datasets>

También hay numerosas aplicaciones reportadas usando esta tecnología a nivel de suelo entre las que se encuentran las siguientes:

(Lin, 2015) propone el uso de LiDAR 3D de alta densidad y detección de varios espectros de luz para estudiar el fenotipo de plantas usándolo para capturar las estructuras de las plantas de manera más automatizada ya que en aquel año aun se hacía de forma manual, quedando rezagado con respecto al análisis del genotipo que se hace de manera automatizada.

(Weiss & Biber, 2011) probaron un LiDAR 3D con la intención de obtener la localización de plantas individuales para realizar labores dirigidas a cada planta, además para usarlas como marcadores para navegar. Para ello propusieron al final de su estudio hacer un algoritmo para segmentar los clústeres ocupados en los que dividieron los datos del LiDAR para distinguir los que corresponden a cada surco y con esa información posteriormente navegar entre ellos. No reportaron en artículos posteriores haber desarrollado su idea de navegación.

(Malavazi et al., 2018) Emplearon solo un sensor LiDAR 2D para la navegación de un robot autónomo usando un cultivo establecido como guía. Desarrollaron un algoritmo para detectar los cultivos ajustando líneas, reportan no haber logrado detectar la cabecera del surco porque al llegar ahí el LiDAR no tienen ninguna referencia por estar situado en la parte frontal del robot y no detectar hacia atrás. Es muy común encontrar en aplicaciones roboticas el LiDAR acompañado de otros sensores para la localización del robot en el medio.

Zhang C., & Noguchi, N. (2017) usaron RTK-GPS para guiar robots por rutas preestablecidas, centrando su trabajo en encontrar estrategias para girar en las cabeceras, disminuyendo el tiempo de giro de múltiples robots que se mueven

juntos mediante la optimización de patrones de formación y tiempos de espera. En este caso, aunque la navegación la realizaron aprovechando la elevada precisión en la localización mediante RTK-GPS montaron un sensor LiDAR como elemento de seguridad que les permite reaccionar a los cambios en el ambiente y obstáculos que pudieran presentarse.

- El sensor LiDAR tiene claras ventajas que ya se aprovechan en la navegación de vehículos autónomos, investigación, planeación de uso de recursos y mitigación de riesgos para el cuidado del medio ambiente.
- El costo de sensores LiDAR de alta frecuencia sigue siendo elevado a pesar de su popularización.

2.5 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO GENERAL

El haz de laser transmitido por el LiDAR es enviado a través de un medio de transmisión en el que puede sufrir atenuación y dispersión. La luz incidente es inmediatamente reflejada y dispersada cuando alcanza la superficie de un objetivo. Un receptor telescópico recibe la luz reflejada en su campo de visión y la transmite a un fotodetector mediante el cual es convertida en un pulso eléctrico. En el caso de los sensores que funcionan por tiempo de vuelo la diferencia de tiempo (Δt) entre la emisión y recepción del pulso determina la distancia (R) mediante la siguiente fórmula: $R = \frac{1}{2} * C * \Delta t$ donde C representa la velocidad de la luz. También esta la técnica de triangulación en la que la distancia del objeto se calcula mediante un ángulo que converge entre el emisor y el receptor.

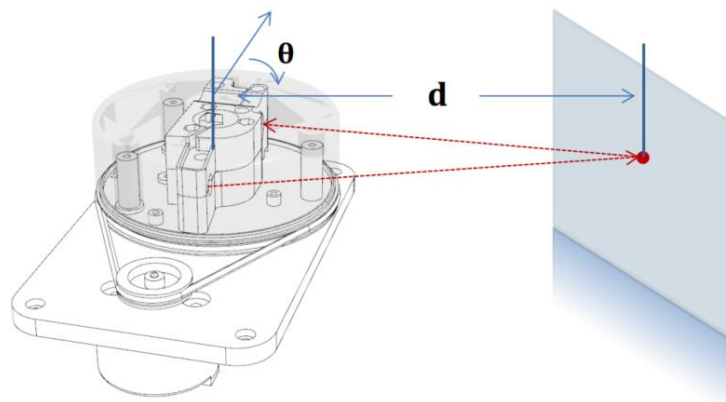


Figura 1. Triangulación RPLiDAR A1M8. Fuente Robopeak.

2.5.1 Partes

El sistema LiDAR móvil consta de 3 subsistemas;

1. Localización o **Geo-referencia** emplea todos o una combinación de GPS, giroscopios y acelerómetros para determinar la posición, velocidad y orientación del vehículo en todo momento con respecto a un sistema de coordenadas (por ejemplo, WGS84).

2. **El emisor láser y dispositivo de escaneo o receptor**, comúnmente ambos se encuentran girando para censar en un plano perpendicular a su eje de rotación (2D) trabajan juntos para censar la distancia y el ángulo de un punto sobre un objeto próximo. El ángulo del sensor es obtenido mediante un encóder de alta precisión. Para la detección de la distancia del sensor al punto hay dos técnicas; a) tiempo de vuelo y b) cambio de fase.

a) Un escáner basado en tiempo de vuelo envía un pulso de laser que se refleja en un objeto, el reflejo es captado nuevamente por el escáner y la diferencia de tiempo (Δt) entre la emisión y recepción del pulso determina la distancia R mediante la siguiente fórmula: $R = \frac{1}{2} * C * \Delta t$ donde C representa la velocidad de la luz.

b) Los escáneres de cambio de fase, emiten un rayo láser con potencia óptica sinusoidal modulada que se envía a un objetivo, al ser reflejada y recibida de regreso presenta una diferencia de fase respecto a la señal que está siendo emitida en ese instante, el cambio de fase registrado es proporcional a la distancia recorrida.

3. **Unidad de control** que se encarga de operar todos los componentes, sincronizar las mediciones y guardar los datos.

2.5.2 Formato de archivos para los datos

“.LAS” es un formato de archivo público, establecido por la *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS) que permite el intercambio de ficheros que contienen información de una nube de puntos tridimensional (Dong & Chen, 2018). El formato LAS es un archivo binario que mantiene toda la

información procedente del sistema LiDAR y conserva la misma según la propia naturaleza de los datos y del sistema de captura.

Este formato de archivo binario se plantea como una alternativa a los archivos propietarios generados por distintas empresas, y su principal ventaja es facilitar el intercambio de estos archivos entre diferentes sistemas y software.

Además, se plantea como una alternativa a los ficheros ASCII, que pierden gran parte de la información propia de los datos LIDAR y que generaría archivos de tamaño excesivo y de difícil manejo.

Está en constante revisión y la estructura actualizada puede encontrarse en <https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/fdd/fdd000418.shtml>

Ejemplo de datos LiDAR (RoboPeak A1M8)

El LiDAR A1M8 no cuenta con sistema de geo referencia. Emite una señal laser infrarroja modulada, esta señal es reflejada y captada por un sistema de visión embebido, la naturaleza de la señal emitida provoca que la señal se vea distorsionada cuando el sensor se empla bajo los rayos directos del sol. En el caso del modelo A1M8, la unidad de control solo se encarga de operar los componentes y procesar las mediciones, los datos no son guardados, se envían directamente. La figura 3 muestra la estructura de los datos obtenidos en un escaneo de 360°, la variable *range* es la distancia en mm, con rango de medición típico de 0.15 m a 12 m para este sensor, la resolución es de alrededor del 1% de la distancia medida.

Cabeceo: ángulo de la cabeza rotatoria en que fue tomada la medición, con valor de 0 a 360° no se presenta explícitamente, pero se calcula a partir del *angle_min* + *angle_increment* de manera incremental

La calidad de la medición recibida está dada en la etiqueta *intensities* cuanto mayor sea el número mostrado es indicativo de que el sensor ha captado el reflejo del haz de luz con mayor intensidad.

También suele incluir un indicador de nuevo escaneo booleano para separar los datos obtenidos cada que se completa una vuelta del sensor.

- Sensors and Signal Analysis Metrics. *Transportation Research Procedia*, 28, 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.183>
- Krinkin, K., & Filatov, A. (2021). Correlation filter of 2D laser scans for indoor environment. *Robotics and Autonomous Systems*, 142, 103809. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103809>
- Leuschen, M. L., Cavallaro, J. R., & Walker, I. D. (2002). Robotic fault detection using nonlinear analytical redundancy. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1(May), 456–463. <https://doi.org/10.1109/robot.2002.1013402>
- Madhavan, T. R., & Adharsh, M. (2019). Obstacle Detection and Obstacle Avoidance Algorithm based on 2-D RPLiDAR. *2019 International Conference on Computer Communication and Informatics, ICCCI 2019*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICCCI.2019.8821803>
- Malavazi, F. B. P., Guyonneau, R., Fasquel, J. B., Lagrange, S., & Mercier, F. (2018). LiDAR-only based navigation algorithm for an autonomous agricultural robot. *Computers and Electronics in Agriculture*, 154(February), 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.034>
- Nebot, P., Torres-Sospedra, J., & Martínez, R. J. (2011). A new HLA-based distributed control architecture for agricultural teams of robots in hybrid applications with real and simulated devices or environments. *Sensors (Switzerland)*, 11(4), 4385–4400. <https://doi.org/10.3390/s110404385>
- Olcay, E., Schuhmann, F., & Lohmann, B. (2020). Collective navigation of a multi-robot system in an unknown environment. *Robotics and Autonomous Systems*, 132, 103604. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103604>
- Vázquez, A. P., Trinidad, D. A. L., & Merino, F. C. G. (2018). Desafíos y propuestas para lograr la seguridad alimentaria hacia el año 2050. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(1), 175–189.
- Zhang, C., & Noguchi, N. (2017). Development of a multi-robot tractor system

for agriculture field work. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.08.017>

Zhang, J., Maeta, S., Bergerman, M., & Singh, S. (2014). Mapping Orchards for Autonomous Navigation. *ASABE Annual International Meeting*, 7004, 1–9. <https://doi.org/10.13031/aim.20141838567>

3 ANALISIS DE SISTEMAS DE ROBOTS AGRÍCOLAS COLABORATIVOS

Pablo Calderón-Carrasco¹ Noé Velázquez-López^{1*}, Agustín Ruiz García¹, Gilberto de Jesús López Canteñs¹.

¹UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C.P. 56230, MÉXICO.

Resumen

Cuando los robots agrícolas son ligeros comparados con la maquinaria tradicional, se evita el daño de compactación y erosión que las grandes máquinas ocasionan al suelo, pero por la existencia de ventanas de tiempo naturales para realizar las labores agrícolas y para mantener o incrementar la eficiencia de trabajo comparada con los métodos mecanizados tradicionales surge la necesidad de contar más de un robot móvil trabajando en el campo al mismo tiempo. Los robots agrícolas colaborativos son una clase de sistema multi-robot en la cual dos o más agentes ejecutan una misión en la misma área de trabajo y al mismo tiempo, en estos sistemas ha sido ampliamente estudiada la planeación de rutas para evitar colisiones y la comunicación entre agentes o con un servidor. Este es un análisis bibliográfico sobre plataformas de comunicación y gestión de robots agrícolas colaborativos. Con base en la información revisada se propone un sistema multi robot de localización local que se basa en el conteo de surcos y se estudia la arquitectura e instrumentación necesaria para implementarlo.

Palabras clave: Sistema multi robot, arquitecturas, robots colaborativos.

ANALYSIS OF COLLABORATIVE ROBOT SYSTEMS IN AGRICULTURE

Pablo Calderón-Carrasco¹ Noé Velázquez-López^{1*}, Agustín Ruiz García¹, Gilberto de Jesús López Canteñas¹.

¹UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C.P. 56230, MÉXICO.

Abstract

As agricultural robots are light compared to traditional machinery, the compaction and erosion damage that large machines cause to the soil is avoided. Therefore, due time bounds imposed by natural climate windows to carry out agricultural tasks and to maintain or increase the work efficiency compared to traditional mechanized methods, it is required to have more than one mobile robot working in the field at the same time. Collaborative agricultural robots are a kind of multi-robot system in which two or more agents execute a mission in the same work area and at the same time, in these systems the path planning to avoid collisions and communication between agents or with a server have been widely studied. This is a literature review on collaborative agricultural robot management and communication platforms. Based on the reviewed information, a local localization multi-robot system is proposed that can be based on row-crop counting. Also, the architecture and instrumentation necessary to implement it are studied.

Keywords: Multi robot system, architectures, collaborative robots.

3.1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas multi-robot son necesarios en la agricultura por muchas razones, entre las que destaca evitar el daño de compactación y erosión que las grandes máquinas ocasionan al suelo (Hameed, 2019). También porque existen ventanas de tiempo reducidas para realizar las labores agrícolas (Bechar & Vigneault, 2017) y para mantener o incrementar la eficiencia de trabajo comparada con los métodos mecanizados tradicionales.

Los sistemas multi-robot se definen como un grupo de agentes inteligentes cooperando para ejecutar una cierta misión (Dudek and Jenkin 2010), surgen de la necesidad de ejecutar tareas complejas que requieren a un grupo heterogéneo de robots. Los sistemas colaborativos son por definición un sistema multi-robot que agrega la interacción entre los agentes haciéndolos intercambiar información, materiales, energía, etc. Eso implica que además de desarrollar tareas específicas, deben ser capaces de comunicarse, conocer su ubicación y mantenerse organizados.

Con el fin de encontrar los requerimientos que debe cumplir un sistema de robots colaborativo en la agricultura, Se revisaron y discutieron artículos revisados por pares publicados en los últimos cinco años sin contar el presente año, para lo cual se empleó la plataforma *science direct* usando para la búsqueda los descriptores “*agricultural robots*”, “*multi-robot system*”, “*field operation*”, “*collaborative robot*” así como combinaciones de estas. se descartaron aquellos artículos que no se relacionan con el área agrícola.

3.2 ROBOTS COLABORATIVOS

En el caso de robots móviles el término empleado para designar la colaboración entre humanos y robots es human robot interacción(HRI) (Vasconez et al., 2019) y el término colaborativos se aplica a robots móviles o agentes que actúan en sistemas multi-robot dedicados a ejecutar una misión compartiendo el mismo espacio y tiempo, en estos sistemas el primer reto reportado es la capacidad de evitar colisiones y de comunicarse entre sí o con una central para realizar la tarea

asignada de manera eficiente (Nebot et al., 2011; Olcay et al., 2020; Zhang & Noguchi, 2017).

El término robots colaborativos en la manufactura tiene diferente significado.

La industria de manufactura de bienes es la que más robots emplea. En este ámbito el término “colaborativo” se usa para designar la convivencia de personas y robots dentro de la misma área (Vicentini, 2020). Los robots colaborativos industriales están equipados con sensibles detectores de colisión en cada eje, se mueven a velocidad reducida y tienen poca capacidad de carga útil (hasta 35kg en el caso de FANUC). Están dedicados a tareas pesadas, repetitivas o tediosas donde es menos adecuado hacer una celda para confinar al robot o como apoyo al trabajador humano por ergonomía. Los problemas sobre colisiones entre robots están resueltos en los robots de manufactura, dado que están sobre bases rígidas para aumentar la repetibilidad de sus movimientos y se mueven en ambientes estructurados. Evitan las colisiones con otros robots definiendo zonas de seguridad e interferencia, el trabajo de múltiples robots en la misma zona se resuelve mediante desfase temporal. Por otro lado, los robots móviles que existen en la industria están dedicados al suministro de materiales y flujo en las líneas de ensamble, en todos los casos se desplazan en un ambiente estructurado donde el recorrido está adaptado al robot para guiarlo en la ruta.

3.3 PARTES DE LOS ROBOTS MÓVILES EN LA AGRICULTURA.

Ya sea que se desplacen por aire o por tierra (Figura 3) las partes que los robots agrícolas pueden tener son:

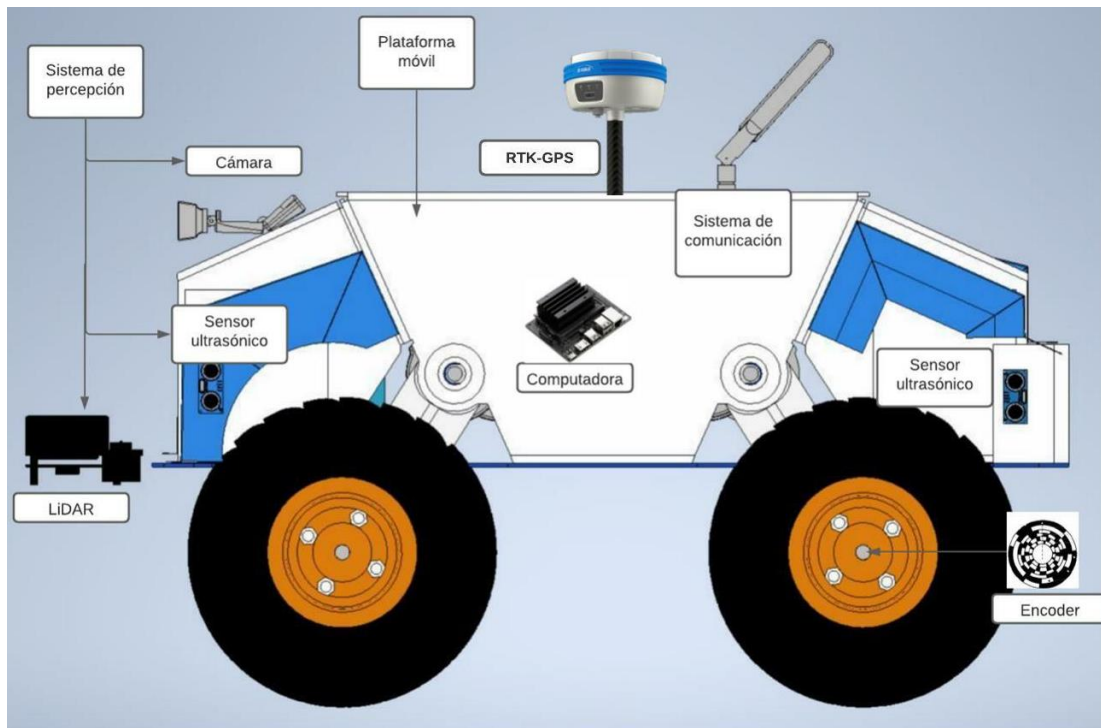


Figura 3. Instrumentación de un robot agrícola (voltan 2).

Plataforma móvil. Es la estructura sobre la que se montan los demás sistemas, esta provista de los actuadores necesarios para desplazarse, por ejemplo, (Zhang & Noguchi, 2017) usan un tractor comercial modificado.

El sistema de localización provee la posición absoluta(global) o relativa (local) y la orientación. Consta de sensores como encoder (odometría), receptor GPS (localización global), IMU(navegación inercial), LÍDAR usando SLAM (con limitaciones en agricultura) y cámaras (extrayendo rasgos del ambiente). Un ejemplo en el que emplean todas las tecnologías anteriores excepto cámaras es el presentado por (Weiss & Biber, 2011) en el que usan un LiDAR 3D para capturar la posición y rasgos de las plantas cultivadas. Ejemplo de método de localización local es el uso de elementos fijos en el ambiente en posiciones conocidas como marcadores visuales, o emisores inalámbricos (Shule et al., 2020).

Sistema percepción; Consta de dos tipos de sensores según su uso:

Exteroceptivos, para variables en el ambiente (tales como medidores de rango de distancia; LIDAR, RADAR), cámaras termográficas, etc. Estos son la base para responder con acciones acordes a las condiciones encontradas en el ambiente.

Interoceptivos. Miden variables dentro del robot para conocer su estado como temperatura, estado de carga de batería entre otros.

Sistema de navegación; directamente ligado a los sistemas de localización y percepción, pero agrega algoritmos para planeación de rutas y evasión de obstáculos. Permite a un robot moverse a cualquier punto accesible y libre de colisiones sin la intervención humana. Hay dos extremos en las estrategias de navegación, ambas pueden usarse en la agricultura (Olca et al., 2020):

Tabla 1. Navegación

Enfoque de navegación global	Enfoque de navegación local
El robot recibe un mapa detallado del ambiente antes de desplazarse en él. La ruta del robot se calcula de manera óptima con base en los obstáculos conocidos. El robot no puede hacer frente a cambios en el ambiente durante la operación. Emplea sistemas de localización global de alta precisión como RTK-GPS.	No requiere información previa del ambiente. El robot planea sus acciones de forma autónoma basado en datos de sensores y reacciona a eventos inesperados. Emplea sensores como encoder, cámaras, sensores ultrasónicos, LiDAR.

La opción más precisa en cuanto a localización es la que utiliza el enfoque de navegación global usando sensores RTK-GPS, sin embargo, requiere de información previa del predio a trabajar. Por otro lado, el enfoque de navegación local es más flexible y dependiendo de los sensores utilizados podría ser igual de robusta. Por lo que la mejor opción dependería de si se cuenta con un mapa detallado del predio o no.

Los pasos a seguir para según (Faisal et al., 2016) son percepción, exploración, mapeo, localización, planeación y ejecución de la ruta.

Sistema de comunicación; consta del hardware y software necesario para enviar y recibir mensajes de manera inalámbrica entre los diferentes agentes y/o servidor. Puede ser unidireccional o bidireccional.

Un ejemplo poco frecuente por su reciente aparición es el uso de redes 5G cuyo ancho de banda (1Gbps) y baja latencia (1 ms) tiene el potencial de deslocalizar el procesamiento masivo de datos dentro del robot al hacer posible el computo en servidores remotos o en la nube con baja latencia. La desventaja de la tecnología 5G es que las estaciones repetidoras de señal deben colocarse cada 250 m. La tabla 2 muestra la capacidad de algunos de los protocolos de red actuales como referencia (Tang et al., 2021).

Tabla 2. Comparación de diferentes protocolos de redes inalámbricas

Tecnología	Frecuencia de banda	Alcance	Tasa de transmisión	Escalable	Fiabilidad	Latencia baja
LoRaWAN	915–928 MHz	5 km	50 kbps	No	No	No
ZigBee	902–928 MHz,	< 1 km	250 kbps	No	No	No
Bluetooth	2.4 GHz 2.402–2.480 GHz	Clásico: 100 m BLE: 240 m	Clásico: 3 Mbps BLE: 2 Mbps	No	Sí	Sí
Wi-Fi	2.4–60 GHz	100 m	10 Mbps	Sí	Sí	Sí
LTE-M (Rel13)	1.7–2.1 GHz, 1.9 GHz, 2.5–2.7 GHz	12 km	1 Mbps	Sí	Sí	Sí
LTE-M (Rel14)	1.7–2.1 GHz, 1.9 GHz, 2.5–2.7 GHz	12 km	4 Mbps	Sí	Sí	Sí
NB-IoT	700,800,900 MHz	15 km	200 kbps	Sí	Sí	Sí
5G NR	< 6 GHz, 20–60 GHz	200 m	1 Gbps	Sí	Sí	Sí

Fuente: Tang et al., (2021)

Sistema de actuadores, son las herramientas que puede portar el robot de acuerdo con la función o tarea que debe realizar. Son por ejemplo los implementos necesarios para hacer labores agrícolas, cosechar frutos o dosificar químicos sobre

las plantas. Por ejemplo, en el caso del trabajo presentado por Roshanianfard et al. (2019) el sistema de actuadores es un brazo robótico diseñado para cosechar calabazas y melones.

3.4 SISTEMAS MULTI-ROBOT

Los robots móviles agrícolas son máquinas diseñadas para una sola tarea, pero también pueden ser plataformas sobre las cuales se montan o remolcar diferentes implementos para un amplio rango de aplicaciones,

3.4.1 Características de sistemas de robots colaborativos

Las características de funcionamiento más importantes que un robot colaborativo debe obtener a través de sus algoritmos de control son según (Kagan et al., 2020):

Reactividad, es la habilidad de percibir el entorno y responder a sus cambios.

Proactividad, es el comportamiento orientado a cumplir los objetivos.

Habilidad social, es la habilidad de interactuar con otros agentes.

Una vez resuelta la reactividad, proactividad y habilidad social de múltiples robots en una parcela, los ejemplos de aplicación pueden ser tantos como implementos se desarrollen.

Los algoritmos colaborativos proveen de la habilidad de trabajar con múltiples agentes en el mismo espacio sin colisionar y de una forma más o menos eficiente de acuerdo con el algoritmo de control que empleen. Consiguen evitar colisiones y coordinarse mediante la comunicación y jerarquización con sus homólogos o con una central de control.

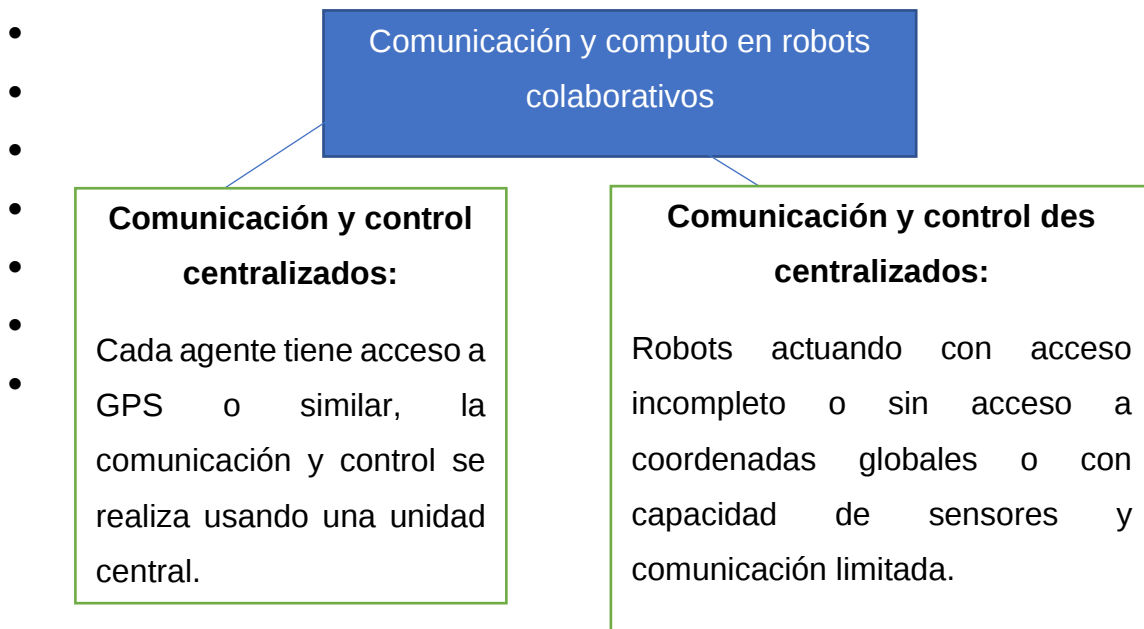
Después de robotizar una tarea los algoritmos colaborativos sirven para elevar la eficiencia del sistema al agregar más agentes y coordinarlos en el trabajo.

Es evidente que en los sistemas centralizados la comunicación y el ancho de banda con cada agente es importante, mientras que no se requiere una amplia capacidad de cómputo a bordo. Lo opuesto ocurre en sistemas descentralizados donde se lleva mayor capacidad de cómputo a bordo para procesar en el sitio los datos

proporcionados por sensores como cámaras, medidores de rango y la comunicación requiere menor ancho de banda.

3.4.2 Sistemas centralizados y sistemas descentralizados

Si entendemos por robots móviles colaborativos a aquellos agentes capaces de tomar decisiones que actúan en sistemas multi-robot dedicados a ejecutar una misma misión compartiendo el espacio y tiempo se hace evidente que todos deben ser capaces de evitar colisiones y de comunicarse entre sí o con una central para realizar la tarea de manera eficiente(Vicentini, 2020). Se distinguen dos grupos principales cada uno con necesidades de comunicación y computo a bordo diferentes(Kagan, 2019):



Por supuesto existen sistemas híbridos o que tratan de mezclar ambos para obtener sus ventajas por ejemplo los jerárquicos en los que robots que se desplazan en grupo son dirigidos por uno que está mejor instrumentado (Jawhar et al., 2018).

Tabla 3. Ejemplos de comunicación y computadoras en robots colaborativos

Ejemplos de Comunicación y control centralizados.	Ejemplos de comunicación y control des centralizados:
Zhang, C., & Noguchi, N. (2017). Prueban diferentes patrones de formación para un sistema multi-robot, los robots están equipados cada uno con un RTK-GPS, IMU, y una PC, la comunicación entre los robots es mediante internet con una tasa de actualización de 5Hz.	(Nebot et al., 2011) Proponen un sistema Descentralizado para equipos de robots, cada robot cuenta con GPS (Pathfinder ProXH), sistema de visión, medidor de rango laser HOKUYO de 240°. Usa una PC interna sin especificar su capacidad. Las comunicaciones son mediante Wifi usando antenas omnidireccionales de 1.5 metros de largo 15dbi de ganancia (TP-Link TL-ANT2415D). Para proveer la red se usó un router inalámbrico TP-Link 3G (TL-MR3420) (Olcay et al., 2020) Simularon un sistema de navegación colectivo empleando capacidades limitadas de sensores y comunicación de cada agente, al ser una simulación se dice que los robots estarían comunicados de manera inalámbrica y no se especifica la capacidad de procesamiento de cada uno de ellos.

•

3.4.3 Algoritmos de control automático más utilizados en las aplicaciones agrícolas de robots colaborativos.

Master slave

(Noguchi et al., 2004) emplearon un par de robots agrícolas con control descentralizado para probar dos algoritmos, GOTO que se emplea cuando el maestro, que recibe una ruta predefinida guiada por RTK-GPS en este caso, requiere que el esclavo vaya a una posición específica y el FOLLOW que se aplica cuando el esclavo tiene que seguir al maestro a una distancia y ángulo predefinido. Las ventajas de estos algoritmos son que evitan colisiones y hacen posible poner más de un robot en el campo. La desventaja es que solo el esclavo cambia su trayectoria para evitar colisiones llevando a ineficiencias pues el maestro no está pendiente del estado y posición del esclavo en ningún momento.

Leader-follower system

(Zhang et al., 2016) probaron un algoritmo en el que dos tractores robot que de manera independiente siguen rutas predefinidas guiadas por RTK-GPS y que se coordinan mediante un servicio de comunicación servidor/cliente de esta manera ambos se comunican y cooperan para hacer más eficientes sus trayectorias y el uso de las cabeceras para girar al siguiente surco. Las colisiones entre sí se evitan definiendo zonas de seguridad rectangulares que se extienden más allá de la longitud real de los tractores

Algorithms de coverage de parcela y planeación de movimiento

(Hameed, 2019) presenta un sistema que consta de un generador inteligente de rutas para múltiples agentes y que requiere un detallado mapa en 3D de la topografía y orientación de los surcos en el terreno, y un centro de control de misión capaz de asignar tareas a cada agente, y a través del cual los agentes son supervisados y se comunican entre sí. La ejecución de la navegación con evasión de obstáculos se ejecuta por cada agente mediante una computadora a bordo lo que los hace capaces de reaccionar a los cambios en el ambiente. El objetivo de este autor es que un grupo de robots sustituya a las grandes máquinas agrícolas que

causan daño al suelo sin aumentar la necesidad de personal para guiar o supervisar a los más numerosos y pequeños robots.

3.4.4 Ambientes de simulación para el desarrollo de aplicaciones de robots colaborativos.

Un software de simulación es una herramienta útil en el desarrollo de sistemas robóticos porque permite probar algoritmos, diseñar robots y entrenar sistemas de IA utilizando escenarios realistas, pero sin construirlos. Las partes esenciales de éstos son un motor de física que requiere un modelo del robot y de su ambiente para funcionar, un motor de gráficos si la simulación es en 2D o 3D y una interfaz de usuario.

Microsoft Robotics Developer Studio

(Matta-Gómez et al., 2014) emplearon el entorno de simulación Microsoft Robotics Developer Studio para hacer una aplicación de mapeo para múltiples robots en el que todos colaboran para crear un mapa único que comparten entre sí mientras navegan. El software ofrece un motor de gráficos y otro de dinámica usados en la mayoría de los videojuegos de la consola de Microsoft. Pero también está basado en dos librerías CCR (*Concurrency and Coordination Runtime*) y DSS (*Distributed Software Services*) que proveen los servicios simulados distribuidos, es decir que permite simular a los robots como un conjunto de servicios coordinados jerárquicamente y en continua comunicación.

ROS - Modular Open Robots Simulation Engine

Tienen la capacidad de probar el software de control de los robots tal como se usa en el sistema real. El banco de pruebas virtual se compone de cuatro partes: un simulador, un monitor, un conjunto de controladores de robot y el middleware ROS que se utiliza para conectar todas las partes. En particular, usaron el simulador realista MORSE 3D y lo convirtieron en un nodo de ROS. El monitor también se realizó como nodo ROS, lo que permite supervisar los procesos experimentales y además puede detener el experimento cuando se activa la condición de detención,

recopilar datos de medición y calcular las métricas posteriormente. Este software es de código abierto y está disponible en https://github.com/yzrobot/mrs_testbed con una aplicación de exploración con múltiples robots a modo de ejemplo (Yan et al., 2017).

Gazebo

Es un software libre con una comunidad de soporte amplia y activa, para la parte dinámica de la simulación se puede elegir entre numerosos motores de física como por ejemplo ODE (<http://www.ode.org/>), bullet (<https://pybullet.org/wordpress/>) y Simbody (<https://simtk.org/projects/simbody/>), gráficos de alta calidad con OGRE(<https://www.ogre3d.org/>) e interfaces gráficas y programáticas. Es la herramienta natural cuando se programa utilizando ROS.

3.4.5 Aplicaciones en la agricultura

Cao et al. (2021) Proponen un algoritmo de optimización por colonia de hormigas mejorado, para la asignación de tareas a un parque de maquinaria con navegación autónoma. Se asignan tareas de manera óptima considerando la capacidad de operación de la maquinaria y una función de costo de la ruta, evitando la maquinaria ociosa o sobre cargada de trabajo. Este desarrollo se encuentra en fase de simulación. Comprende un solo aspecto de la gestión de robots agrícolas sin abordar técnicas de la navegación o comunicación. Ver Figura 2.

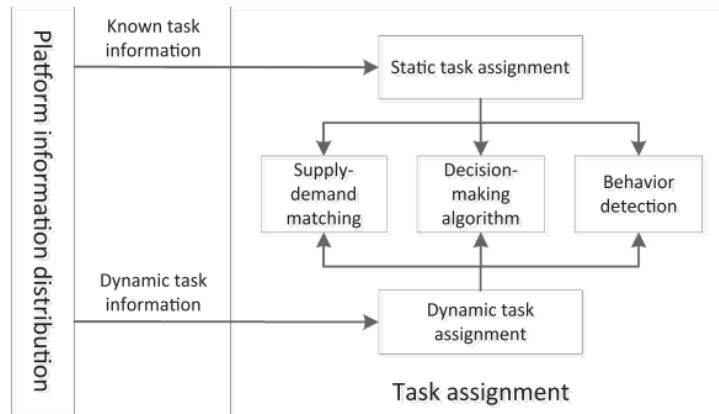


Figura 4. Marco general de asignación de tareas. Fuente Cao et al. (2021).

- McAllister et al. (2019) Presentan una estrategia para coordinar a un grupo heterogéneo de robots para deshierbar malezas en una parcela, se enfocaron en demostrar que teniendo información parcial sobre las hierbas en la parcela de solo un metro a la redonda de donde se encuentra el agente se puede implementar un sistema de recompensas para que los agentes se muevan a las zonas con malezas más viejas para no permitir que crezcan más allá de un límite establecido. El artículo presenta una simulación que por el momento no se contrasta con datos experimentales.

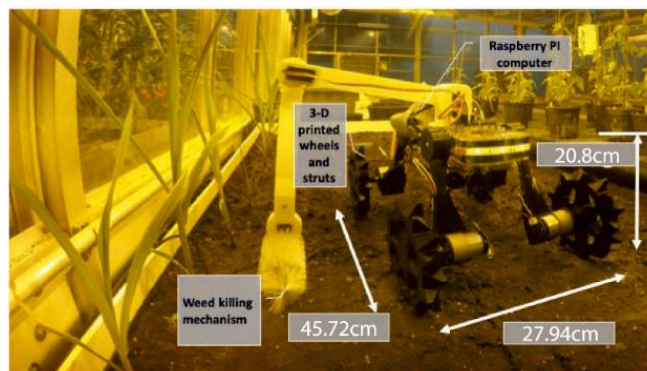


Figura 5. Robot y herramienta para control mecánico de maleza. Fuente: McAllister et al., 2019

- Tian & Bhattacharya (2017) presentan un planeador de rutas centralizado para una flota de carros transportadores de granos en una operación de cosecha de granos con cosechadora combinada, el objetivo es reducir la

labor manual sin interrupción de por falta de carros, estudian la posición del almacén, la calendarización de los carros y la planeación de ruta. Ver figura 4.

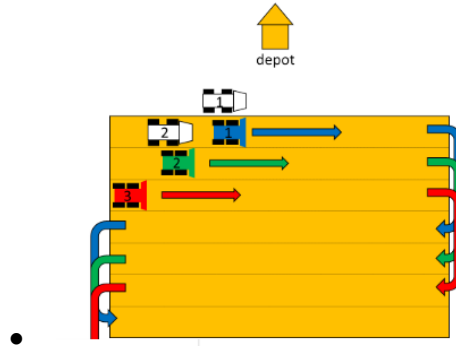


Figura 6. Diagrama de formación de carros y rutas, los carros representaos en color blanco. Fuente: Tian & Bhattacharya (2017)

- Zhang et al. (2016) Probaron un algoritmo en el que dos tractores robot que de manera independiente siguen rutas predefinidas guiadas por RTK-GPS y que se coordinan mediante un servicio de comunicación servidor/cliente de esta manera ambos se comunican y cooperan para hacer más eficientes sus trayectorias y el uso de las cabeceras para girar al siguiente surco. Las colisiones entre si se evitan definiendo zonas de seguridad rectangulares que se extienden más allá de la longitud real de los tractores.
- Noguchi et al. (2004) Emplearon un par de robots agrícolas con control descentralizado para probar dos algoritmos, GOTO que se emplea cuando el maestro, que recibe una ruta predefinida guiada por RTK-GPS en este caso, requiere que el esclavo vaya a una posición específica y el FOLLOW que se aplica cuando el esclavo tiene que seguir al maestro a una distancia y ángulo predefinido. Las ventajas de estos algoritmos son que evitan colisiones y hacen posible poner más de un robot en el campo. La desventaja es que solo el esclavo cambia su trayectoria para evitar colisiones llevando a ineficiencias pues el maestro no está pendiente del estado y posición del esclavo en ningún momento. Este es uno de los primeros ejemplos en coordinación de robots agricultores, aunque estrictamente no es un sistema colaborativo ya

que no existe comunicación de dos vías ya que el esclavo no retroalimenta y el maestro sólo ordena acciones.

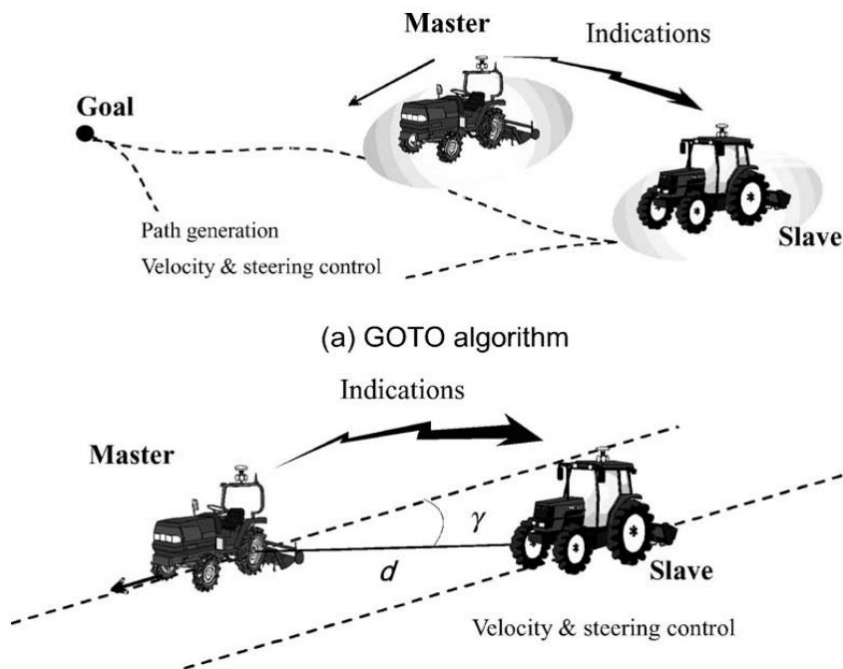


Figura 7. arquitectura jerárquica. Fuente Noguchi et al. (2004)

- Hameed (2019) presenta un sistema para planear rutas que hagan más eficiente la cobertura del terreno, consta de un generador inteligente de rutas para múltiples agentes y que requiere un detallado mapa en 3D de la topografía y orientación de los surcos en el terreno, así como un centro de control de misión capaz de asignar tareas a cada agente a través del cual los agentes son supervisados y se comunican entre sí. La ejecución de la navegación con evasión de obstáculos se ejecuta por cada agente mediante una computadora a bordo lo que los hace capaces de reaccionar a los cambios en el ambiente. El objetivo de este autor es que un grupo robots sustituya a las grandes maquinas agrícolas que causan daño al suelo sin aumentar la necesidad de personal para guiar o supervisar los pequeños robots.

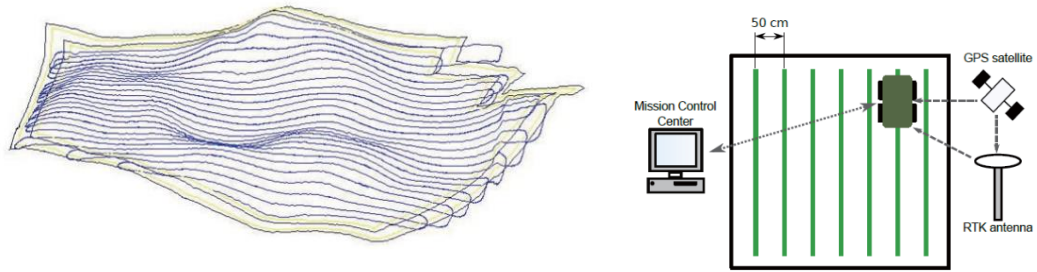


Figura 8. Mapa de la topografía y relieve requerido por el control de misión para planear las rutas. Fuente: Hameed, (2019).

Conesa-Muñoz et al. (2015). Presentan un sistema de supervisión del estado y posición de los robots con el fin de evitar colisiones y atender errores en la operación de las máquinas. Consiste en un sistema de evasión de colisiones, un sistema de alarmas multi nivel en el que cada una recibe un nivel de gravedad y de ser de alta prioridad, las alarmas llegan a un único operador de toda la flotilla. También cuenta con un módulo de recuperación de errores que recibe las alarmas de mediana prioridad y a través de una base de datos ordena acciones para neutralizar los errores. Los errores de baja prioridad son reportados y corregidos directamente en el agente. Los autores reportan haber trabajado con un total de tres agentes, a pesar de ser un sistema modular donde se pueden agregar más agentes se tiene que revisar y depurar para evitar que se saturen las comunicaciones, ver Figura 5.

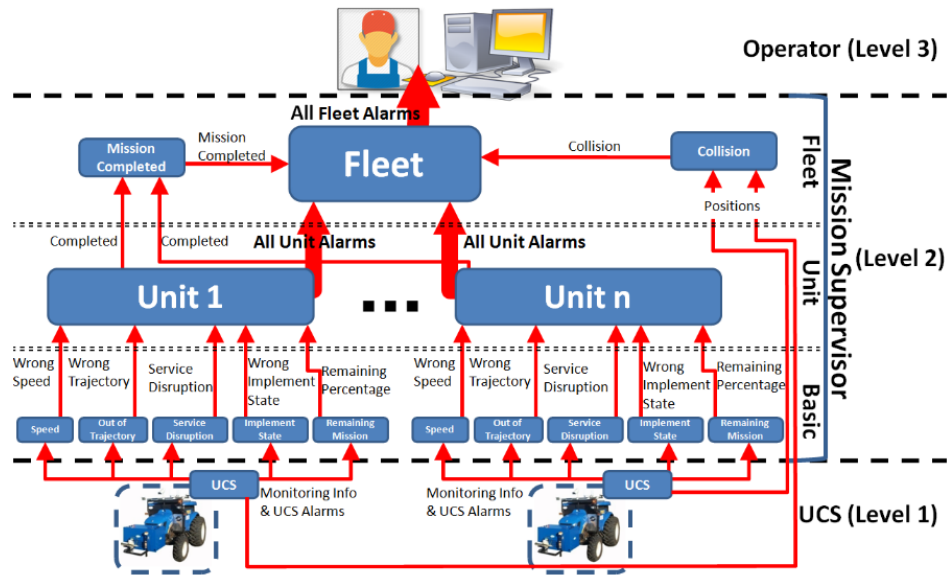


Figura 9. Sistema de monitoreo multi robot. Fuente. Conesa-Muñoz et al. (2015)

3.5 CONCLUSIONES

En los sistemas centralizados la comunicación y el ancho de banda con cada agente es muy importante, mientras que no se requiere una amplia capacidad de cómputo a bordo. En sistemas descentralizados el agente está mejor equipado para tomar decisiones lleva mayor capacidad de cómputo a bordo para procesar en el sitio los datos proporcionados por sensores como cámaras y medidores de rango de distancia.

El costo de los sistemas robóticos es un factor importante a tener en ya que es un factor que impide que sistemas funcionales se implementen principalmente por el uso de sistemas de posicionamiento de alta precisión y LiDAR 3D (Bechar & Vigneault, 2016). para considerar

Aunque en los artículos mencionados no se especifican las características de la computadora usada en cada caso las idóneas para un sistema descentralizado con habilidad social son aquellas capaces de ejecutar análisis de imágenes, filtrado de datos, algoritmos de fusión de sensores, redes neuronales y que además tengan bajo consumo energético para no afectar la autonomía del sistema, por eso, en este

momento las placas de computación que utilizan GPUs como las Jetson de Nvidia, Raspberry Pi o la Asus Tinker board son las mejores opciones, si el espacio no es problema, durante el desarrollo o la prueba de las aplicaciones una Workstation móvil es más cómoda.

Podríamos emplear una combinación de GPS, LÍDAR 2D y odometría. De esta manera podríamos correr el algoritmo de detección de final de surco solo en los últimos metros antes de la cabecera, activándolo mediante los datos del GPS con amplia tolerancia, evitando falsos positivos por muerte de plantas en una sección amplia de la parcela.

Tabla 4. Navegación autónoma en la agricultura por etapa.

Etapas	Percepción	Exploración	Mapeo	Localización	Planeación	Ejecución
Preparación del terreno a cosecha.	Uso de un mapa detallado del área en coordenadas globales. Sensor LiDAR 3D para evitar colisiones con obstáculos imprevistos.			Uso de RTK-GPS para ubicación e IMU para orientación.	Definir ruta basada en puntos en coordenadas globales	Contar con un modelo dinámico del robot y retroalimentación de RTK-GPS y odometría.
Siembra (alternativa)	Sensor Lidar 2D dirigido hacia el suelo delante del robot	Algoritmo seguidor de camellón de surco y detección	Conteo de surcos	Comparar con la cantidad de surcos restantes para finalizar la tarea.	Algoritmo para calcular la maniobra para mantener centrado al robot y	Contar con un modelo dinámico del robot y retroalimentación con odometría.

		de cabecera		Incluso GPS básico.	girar en cabecera s.	
Labores de cultivo y Cosecha	Sistema de visión artificial para detección de centro de surco	Algoritmo para detección de cabecera	Cont eo de surco s	Comparar con la cantidad de surcos restantes para finalizar la tarea. Incluso GPS económico.	Algoritmo para calcular la maniobra para mantener centrado al robot y girar en cabecera s.	Contar con un modelo dinámico del robot y retroalimenta ción con odometría.

3.6 BIBLIOGRAFÍA

- Faisal, M., Mathkour, H., Alsulaiman, M., & Zuair, M. (2016). Multi-sensors multi-baseline mapping system for mobile robot using stereovision camera and laser-range device. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(6), 168781401665463. <https://doi.org/10.1177/1687814016654634>
- Jawhar, I., Mohamed, N., Wu, J., & Al-Jaroodi, J. (2018). Networking of Multi-Robot Systems: Architectures and Requirements. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 7(4), 52. <https://doi.org/10.3390/jsan7040052>
- Kagan, E. (Ed.). (2019). *Autonomous mobile robots and multi-robot systems _ motion-planning, communication, and swarming* (2020, Wiley). Wiley. <https://www.wiley.com/en->

us/Autonomous+Mobile+Robots+and+Multi+Robot+Systems%3A+Motion+Plannin
g%2C+Communication%2C+and+Swarming-p-9781119213154

Malavazi, F. B. P., Guyonneau, R., Fasquel, J. B., Lagrange, S., & Mercier, F. (2018). LiDAR-only based navigation algorithm for an autonomous agricultural robot. *Computers and Electronics in Agriculture*, 154(February), 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.034>

Nebot, P., Torres-Sospedra, J., & Martínez, R. J. (2011). A new HLA-based distributed control architecture for agricultural teams of robots in hybrid applications with real and simulated devices or environments. *Sensors (Switzerland)*, 11(4), 4385–4400. <https://doi.org/10.3390/s110404385>

Olcay, E., Schuhmann, F., & Lohmann, B. (2020). Collective navigation of a multi-robot system in an unknown environment. *Robotics and Autonomous Systems*, 132, 103604. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103604>

Roshanianfard, A., Noguchi, N., & Kamata, T. (2019). Design and performance of a robotic arm for farm use. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(1), 146–158. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191201.3721>

Tang, Y., Dananjayan, S., Hou, C., Guo, Q., Luo, S., & He, Y. (2021). A survey on the 5G network and its impact on agriculture : Challenges and opportunities. *Computers and Electronics in Agriculture*, 180(December 2020), 105895. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105895>

Vicentini, F. (2020). Terminology in safety of collaborative robotics. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 63(November 2019), 101921. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101921>

Weiss, U., & Biber, P. (2011). Plant detection and mapping for agricultural robots using a 3D LIDAR sensor. *Robotics and Autonomous Systems*, 59(5), 265–273. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2011.02.011>

- Zhang, C., & Noguchi, N. (2017). Development of a multi-robot tractor system for agriculture field work. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 79–90.
- Hameed, I. A. (2019). A coverage planner for multi-robot systems in agriculture. *2018 IEEE International Conference on Real-Time Computing and Robotics, RCAR 2018*, 698–704. <https://doi.org/10.1109/RCAR.2018.8621801>
- Matta-Gómez, A., del Cerro, J., & Barrientos, A. (2014). Multi-robot data mapping simulation by using microsoft robotics developer studio. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 49, 305–319. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2014.10.003>
- Vasconez, J. P., Kantor, G. A., & Auat Cheein, F. A. (2019). Human–robot interaction in agriculture: A survey and current challenges. *Biosystems Engineering*, 179, 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.12.005>
- Yan, Z., Fabresse, L., Laval, J., & Bouraqadi, N. (2017). Building a ROS-based testbed for realistic multi-robot simulation: Taking the exploration as an example. *Robotics*, 6(3), 1–21. <https://doi.org/10.3390/robotics6030021>
- Comis, D. 2010. “ARS Study Helps Farmers Make Best Use of Fertilizers.” USDA Agricultural Research Service. <http://www.ars.usda.gov/is/pr/2010/100609.htm> (accessed June 10, 2016).
- Dong, P., & Chen, Q. (2018). *LiDAR Remote Sensing and Applications* (1st Editio).
- Howard, B. (2015). LIDAR and its use in agriculture. In *Agricultural Innovation* (Issue September).
- Lin, Y. (2015). LiDAR: An important tool for next-generation phenotyping technology of high potential for plant phenomics? *Computers and Electronics in Agriculture*, 119, 61–73. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.10.011>
- Malavazi, F. B. P., Guyonneau, R., Fasquel, J. B., Lagrange, S., & Mercier, F. (2018). LiDAR-only based navigation algorithm for an autonomous agricultural robot.

Computers and Electronics in Agriculture, 154(February), 71–79.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.034>

Bechar, A., & Vigneault, C. (2017). Agricultural robots for field operations. Part 2: Operations and systems. *Biosystems Engineering*, 153, 110–128.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.11.004>

Conesa-Muñoz, J., Gonzalez-de-Soto, M., Gonzalez-de-Santos, P., & Ribeiro, A. (2015). Distributed multi-level supervision to effectively monitor the operations of a fleet of autonomous vehicles in agricultural tasks. *Sensors (Switzerland)*, 15(3), 5402–5428.
<https://doi.org/10.3390/s150305402>

Kagan, E., Shvalb, N., & Ben-Gal, I. (2020). *Autonomous mobile robots and multi-robot systems: Motion planning, communication, and swarming* (E. Kagan, N. Shvalb, & I. Ben-Gal, Eds.; First edit). John Wiley & Sons, Inc.,. <https://www.wiley.com/en-us/Autonomous+Mobile+Robots+and+Multi+Robot+Systems%3A+Motion+Plannin+g%2C+Communication%2C+and+Swarming-p-9781119213154>

McAllister, W., Osipychev, D., Davis, A., & Chowdhary, G. (2019). Agbots: Weeding a field with a team of autonomous robots. *Computers and Electronics in Agriculture*, 163(September 2018), 104827. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.036>

Noguchi, N., Will, J., Reid, J., & Zhang, Q. (2004). Development of a master-slave robot system for farm operations. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44(1), 1–19.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.01.006>

Shule, W., Almansa, C. M., Queralta, J. P., Zou, Z., & Westerlund, T. (2020). UWB-Based Localization for Multi-UAV Systems and Collaborative Heterogeneous Multi-Robot Systems. *Procedia Computer Science*, 175(2019), 357–364.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.07.051>

- Tian, Y., & Bhattacharya, S. (2017). Smart autonomous grain carts for harvesting-on-demand. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2017-Septe*, 5168–5173. <https://doi.org/10.1109/IROS.2017.8206405>
- Zhang, C., Noguchi, N., & Yang, L. (2016). Leader-follower system using two robot tractors to improve work efficiency. *Computers and Electronics in Agriculture*, 121, 269–281. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.12.015>
- Dudek, G. and Jenkin, M. (2010). *Computational Principles of Mobile Robotics*, 2e. New York: Cambridge University Press.

4 ALGORITMO E INSTRUMENTACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE CABECERA Y PLANEACIÓN DE MOVIMIENTO EN CULTIVOS ESTABLECIDOS.

Pablo Calderón-Carrasco¹, Noé Velázquez-López¹, Agustín Ruiz García¹, Gilberto de Jesús López Canteñs¹.

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo. km 38.5 Carretera México–Texcoco. Chapingo, Estado de México, C.P. 56230. México.

En 2050 la población alcanzará 9,100 millones de personas. Los países en desarrollo deberán incrementar la producción de alimentos en 70% para lograr la seguridad alimentaria. La aplicación extendida de la robótica agrícola ayudara a alcanzar esta meta de forma sustentable. Para implementar más robots en la agricultura es necesario hacerlos fiables y económicos.

Objetivo: Desarrollar un sistema de detección de final de línea de cultivo robusto y de bajo costo, mediante sensores de medición de distancia para complementar la navegación autónoma y desencadenar el cambio de línea.

Metodología: Se desarrolló de forma iterativa el algoritmo que complementa un sistema de navegación entre líneas de cultivo por visión artificial con la detección de cabeceras usando sensores ultrasónicos y LiDAR-2D. Se realizaron pruebas en cada etapa midiendo el porcentaje de detección evaluado en una maqueta y la versión final también en un cultivo de *rosa spp.*

Resultados: El algoritmo con sensores ultrasónicos y enconder fue 96.7% efectivo. Mientras que el algoritmo que usa LiDAR-2D y enconder tuvo efectividad del 100% en maqueta y campo.

Limitaciones del estudio: El fabricante del LiDAR A1M8 no recomienda su uso cuando el sol incide directamente en el entorno.

Originalidad: Usa filtros propios, se puede usar en microcontroladores, aplicable a diversos cultivos y funciona en condiciones de campo.

Conclusiones: Se desarrolló un algoritmo robusto y de bajo costo para detectar el fin de línea parametrizado para aplicar en diferentes cultivos y un filtro de datos LiDAR específico para la aplicación.

Ideas sobresalientes: Censado de líneas de cultivo establecido para dotar a un robot o cualquier máquina agrícola semiautónoma de la capacidad de detectar las cabeceras de parcelas en presencia moderada de maleza.

Keywords: Navegación, localización, coordenadas locales, ambiente desconocido, filtro de ventana.

ALGORITHM AND INSTRUMENTATION ENDO OF THE CROP- ROW DETECTION AND PATH PLANNING IN ESTABLISHED CROPS

Pablo Calderón-Carrasco¹, Noé Velázquez-López¹, Agustín Ruiz García¹,
Gilberto de Jesús López Canteñas¹.

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y uso Integral del Agua, Universidad Autónoma
Chapingo. km 38.5 Carretera México–Texcoco. Chapingo, Estado de México,
C.P. 56230. México.

Abstract

In 2050 the population will reach 9.1 billion people. Developing countries will need to increase food production by 70% to achieve food security. The widespread application of agricultural robotics will help to achieve this goal in a sustainable way. To implement more robots in agriculture it is necessary to make them reliable and inexpensive.

Objective: To develop a robust and low-cost crop end-of-line detection system, using distance measurement sensors to complement autonomous navigation and trigger line changes. **Methodology:** The algorithm that complements a navigation system between crop lines by artificial vision was developed iteratively with the detection of headlands using ultrasonic sensors and LiDAR-2D. Tests were carried out at each stage measuring the detection percentage evaluated in a model and the final version also in a rose spp. Culture. **Results:** The algorithm with ultrasonic sensors and encoder was 96.7% effective. While the algorithm that uses LiDAR-2D and encoder had 100% effectiveness in mock-up and field.

Study limitations: The manufacturer of the LiDAR A1M8 does not recommend its use when the sun is directly on the environment. **Originality:** It uses its own filters, can be used in microcontrollers, applicable to various crops and works in field conditions.

Conclusions: A robust and low-cost algorithm was developed to detect the parameterized end of line to apply in different crops and a specific LiDAR data filter for the application.

Outstanding ideas: Census of crop lines established to provide a robot or any semi-autonomous agricultural machine with the ability to detect the headwaters of plots in moderate presence of weeds.

Keywords: Navigation, localization, local coordinates, unknown environment, window filter.

4.1 INTRODUCCIÓN

Para el año 2050 la población mundial alcanzará los 9,100 millones de habitantes FAO (2009). Se estima que para lograr la seguridad alimentaria en los países en desarrollo deberá incrementarse la producción de alimentos en 70% en un entorno de cambio climático y restricciones de los recursos naturales (Vázquez et al., 2018). El factor tecnológico es uno de los ejes para alcanzar esta meta de producción a través de la innovación y aplicación extendida de tecnologías como la robótica. La navegación autónoma de robots en la agricultura es compleja porque las condiciones son altamente variables, esto ha llevado a desarrollar complejos sistemas robóticos que aunque son funcionales no se implementan principalmente por su excesivo costo (Bechar & Vigneault, 2016). Para implementar más robots en la agricultura una alternativa es hacerlos más atractivos económicamente prescindiendo de los sensores y sistemas de mayor costo y usando las líneas de cultivo para navegar y localizarse. Siendo el LiDAR 3-D y los sistemas de geoposicionamiento de alta precisión los componentes que más contribuyen a elevar el precio. Por ello, prescindiendo de los sensores más costos, se han desarrollado sistemas que detectan los cultivos para desplazarse en el espacio entre filas usando principalmente cámaras de video, LiDAR 2-D y sensores ultrasónicos (Malavazi et al., 2018, Zhang et al., 2014, Ahmadi et al., 2020). Estos sistemas aunque son más económicos que los que utilizan coordenadas globales, enfrentan dos problemas principales; el primero es que tienen que detectar de manera fiable la cabecera de la parcela para incorporarse a la siguiente línea de cultivo y continuar la operación (J. Zhang et al., 2014). Es un problema porque al llegar a la cabecera las plantas que les sirven de guía dejan de estar presentes y los sensores que en general se encuentran dirigidos hacia el frente pierden toda referencia, como lo mencionan Malavazi et al., (2018) quienes desarrollaron la detección de cultivos y navegación entre líneas con un LiDAR 2D sin resolver la detección de la cabecera.

Ahmadi et al., (2020) proponen un sistema de navegación basado en visión por computadora, usan dos cámaras monoculares RGB montadas al frente y atrás de una plataforma móvil de dirección deslizante para usarlas de forma alternativa

según el robot avance en un sentido u otro, cuando la cámara frontal llega la final de la línea se invierte el sentido del desplazamiento del robot y la cámara trasera entra en funcionamiento comandando al robot hacia la línea contigua, con esta aproximación logran recorrer el 100% de las líneas de cultivo en condiciones controladas para la prueba porque se requiere que las plantas cultivadas estén presentes en el suelo sin malezas en pasillos y cabeceras lo que podría limitar la aplicación en campo.

Por otro lado Zhang et al., (2014) propusieron usar marcadores reflectantes para señalar la cabecera y desarrollaron un sistema para mapear la longitud del cultivo durante un recorrido manual para usar el mapa posteriormente reduciendo los errores. En este último caso sería preferible eliminar el trabajo manual de preparación en cada nueva parcela. Estos y otros sistemas podrían beneficiarse de un algoritmo basado en dos zonas de detección como el presentado en este trabajo para incrementar su eficiencia y aplicación en campo.

El segundo problema que enfrentan los sistemas de bajo costo es la localización. Aunque no se cuente con coordenadas globales es deseable saber dónde se ha trabajado y tener la capacidad de pausar el trabajo para recolectar insumos recargar baterías y reanudarlo en el mismo lugar. La localización además es requisito indispensable para el trabajo colaborativo. Los robots agrícolas colaborativos son una clase de sistema multi-robot en el cual dos o más agentes ejecutan una misión en la misma área de trabajo y al mismo tiempo, en estos sistemas ha sido ampliamente estudiada la planeación de rutas para evitar colisiones y la comunicación entre agentes o con un servidor remoto (Nebot et al., 2011; Olcay et al., 2020; C. Zhang & Noguchi, 2017).

Dado que no se utilizan coordenadas globales se debe contar con otra manera de ubicar en el terreno a cada robot. Se propone que sea mediante el número de fila o surco y el algoritmo para resolver la detección de cabeceras de manera fiable que se desarrolló contribuye a que la localización sea factible por este método.

En la Universidad Autónoma Chapingo se desarrolló un robot agricultor que utiliza visión artificial para guiar su desplazamiento entre las líneas de cultivo con el nombre de voltan. Está instrumentado con una cámara RGB dirigida hacia el frente del robot, como hemos corroborado, una cámara de video no puede ser el único sensor exteroceptivo por la sensibilidad a las condiciones de luz y principalmente porque no brinda información de la profundidad de los objetos en su campo visual (Escolà et al., 2021). Por lo que se requiere de un sistema auxiliar que ayude a evitar colisiones y a detectar la cabecera del surco para detenerse, girar e internarse en el surco siguiente.

Por lo tanto, el objetivo del trabajo fue desarrollar e implementar un algoritmo robusto y de bajo costo para la detección de cabeceras de parcela, mediante sensores ultrasónicos o LiDAR-2D para complementar la navegación autónoma y desencadenar el cambio de línea. Mismo sistema que por su alta efectividad puede ser empleado como parte de un sistema de localización local.

4.2 MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó la estructura con la que se ha establecido un cultivo para planear el movimiento de un robot en un campo agrícola. En específico se aprovechó la secuencia de la desaparición de la planta cultivada a medida que el robot avanza entre las líneas de cultivo y la existencia de un claro como indicadores para detectar la cabecera de una parcela.

Se propusieron tres algoritmos de forma sucesiva basados todos en el monitoreo de dos zonas para la detección de la secuencia de salida en una cabecera, se implementó y probó en tres etapas usando diferentes configuraciones, ver cuadro 1.

Cuadro 1. Instrumentación de cada algoritmo.

Característica	Algoritmo (Figura 6)	1 Algoritmo (Figura 7	2 Algoritmo (Figura 8	3
----------------	-------------------------	--------------------------	--------------------------	---

Sensores de detección plantas	para de	4 sensores ultrasónicos HC-SR05		LiDAR-2D modelo A1M8 de RoboPeak
Colocación		Se usaron dos sensores ultrasónicos a cada lado del robot montados a 25 cm del suelo monitoreando zonas separadas por 50 cm. Ver figura 1.	Se usaron dos sensores ultrasónicos a cada lado del robot montados a 25 cm del suelo con separación de 50 cm entre los sensores del mismo lado.	El sensor LiDAR se montó en la parte frontal del robot voltan, a 25 centímetros del suelo. Ver figura 1.
Referencia de desplazamiento del robot	de	Asume velocidad constante y usa la función millis() para obtener intervalos de tiempo sin detección de plantas.	Encoder incremental marca Autonics modelo EP50S8-5000-3-T-5 de 5000 pulsos por revolución. Se integró para medir el giro de una de las ruedas motrices a partir de la cual se aproxima el desplazamiento del robot sin considerar el patinaje.	
Plataforma móvil		Voltan en los 3 casos		
Microcontrolador		2 tarjetas Arduino Mega 2560		
Compilador y librerías	y	Arduino IDE, NewPing	Arduino IDE, NewPing, digitalWriteFast.h	Arduino IDE, RPLidar.h, digitalWriteFast.h

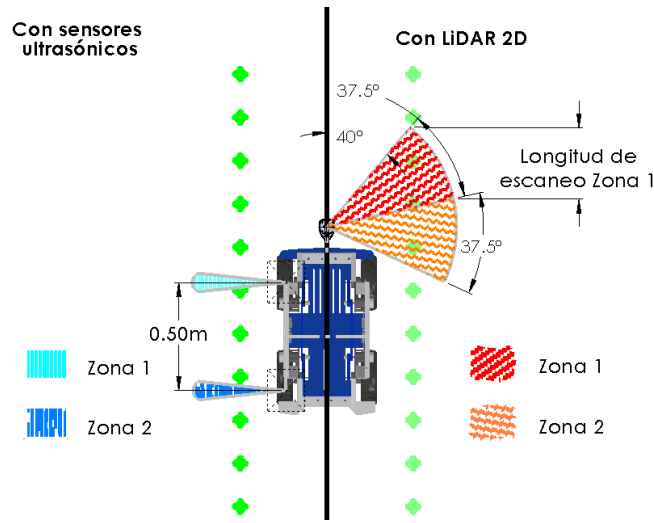


Figura 10. Posición del sensores y zonas de monitoreo.

4.2.1 Algoritmo de detección con sensores ultrasónicos y temporizadores

El algoritmo es un ciclo que se mantiene activo hasta la detección de la cabecera. La primera parte calcula $\Delta tiempo$ que es el tiempo de ejecución del algoritmo completo en el ciclo anterior para almacenarlo de manera incremental en dos variables independientes (*Tiempo de avance en vacío Z1* y *Tiempo de avance en vacío Z2*), cada una relacionada con uno de los sensores ultrasónicos que monitorean las plantas en el lateral del robot. Cuando un sensor ultrasónico detecta plantas en su zona se reestablece el contador de tiempo asociado a esa zona. Ver figura 1.

En la parte final del algoritmo se encuentran las condiciones para determinar cuándo se ha cruzado el final del surco. Ambas condiciones deben cumplirse de forma simultánea.

a) Condición para la zona 1.

$$2(Vt) < \text{Tiempo de avance en vacío Z1} < 3(Vt) \quad (1)$$

b) Condición para la zona 2.

$$1(Vt) < \text{Tiempo de avance en vacío Z2} < 2(Vt) \quad (2)$$

Dónde:

V_t = Tiempo estimado que el robot tarda en avanzar la distancia entre las dos zonas de monitoreo [s].

Tiempo de avance en vacío Z1 y Tiempo de avance en vacío Z2 = tiempo transcurrido desde que el sensor detectó una planta en la zona 1 o 2 respectivamente.

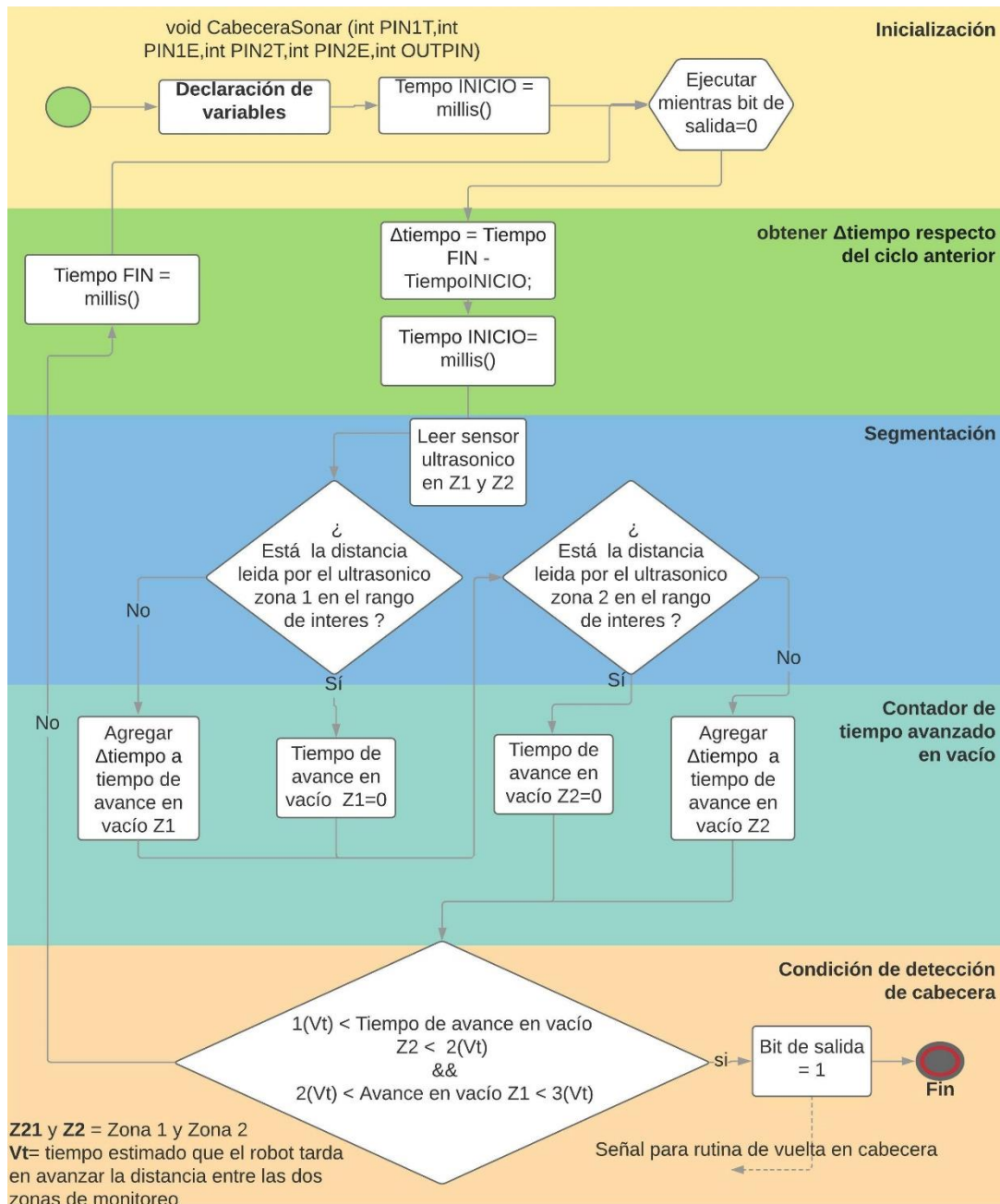


Figura 11. Algoritmo para detección de cabeceras de cultivo con ultrasonidos y Δtiempo.

4.2.2 Algoritmo sensores ultrasónicos y encoder

El algoritmo consta de dos partes generales, todas dentro de un ciclo que se mantiene activo hasta la detección de la cabecera. La primera parte es un ciclo que contabiliza de manera incremental el desplazamiento del robot y lo almacena en dos

variables independientes (*Avance en vacío Z1* y *Avance en vacío Z2*), cada una relacionada con uno de los sensores ultrasónicos que monitorean las plantas en el lateral del robot. Cuando un sensor ultrasónico detecta plantas en su zona se reestablece el contador de desplazamiento asociado a esa zona. Ver Figura 1.

En la parte final del algoritmo se encuentran las condiciones para determinar cuándo se ha cruzado el final del surco. Ambas condiciones deben cumplirse de forma simultánea. Dado que no hay traslape en los intervalos definidos por las condiciones de disparo no habrá falsos positivos cuando el robot circule por un baldío.

c) Condición para la zona 1.

$$2(Ze) < AVZ1 < 3(Ze) \quad (3)$$

d) Condición para la zona 2.

$$1(Ze) < AVZ2 < 2(Ze) \quad (4)$$

Dónde: $AVZ1$ y $AVZ2$ = Distancia recorrida desde que el sensor detecto una planta en la zona 1 o 2 respectivamente [m].

Ze = longitud que hay entre la zona de monitoreo del sensor 1 y la zona de monitoreo del sensor 2[m].

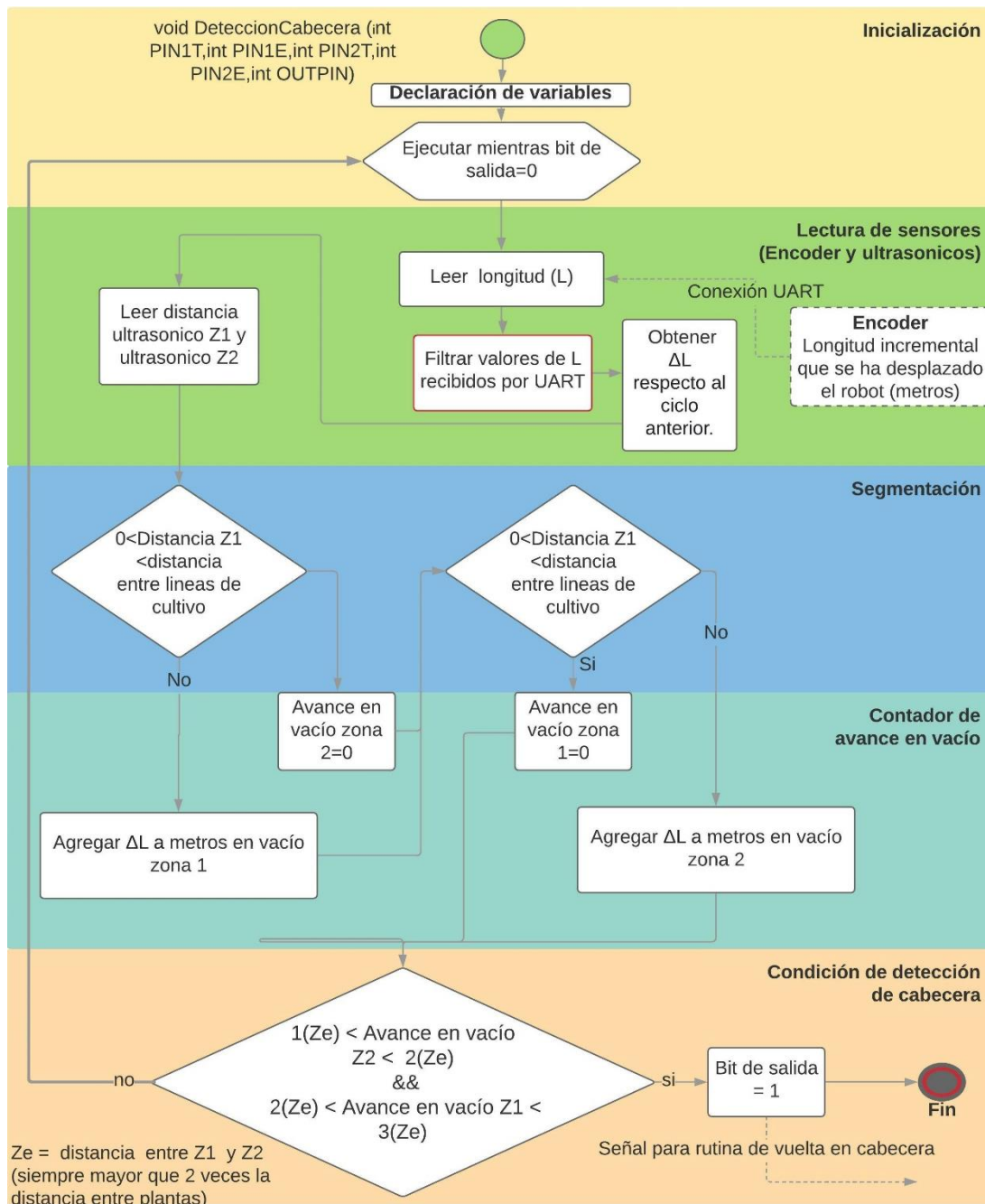


Figura 12. Algoritmo de detección de cabeceras con sensores ultrasónicos y encoder.

4.2.3 Algoritmo de detección de surco con LiDAR y encoder

El algoritmo consta de tres partes, todas dentro de un ciclo que se mantiene activo hasta la detección de la cabecera del surco. La primera parte es un ciclo que contabiliza el desplazamiento del robot informado por un encoder y lo almacena en

dos variables independientes, cada una relacionada con una zona de monitoreo de plantas al lateral del robot. La segunda parte segmenta mediante operaciones lógicas los puntos recibidos del LiDAR de acuerdo con el ángulo y distancia de cada uno, los filtra y agrupa en las dos zonas mencionadas. Cuando hay puntos de LiDAR en una zona determinada se reestablece el contador de desplazamiento asociado a esa zona. Ver figura 1.

En la parte final del algoritmo se encuentran las condiciones para determinar cuándo se ha cruzado el final del surco. Ambas condiciones deben cumplirse de forma simultánea.

a) Condición para la zona 1.

$$2(Ze) < AVZ1 < 3(Ze) \quad (5)$$

b) Condición para la zona 2.

$$1(Ze) < AVZ2 < 2(Ze) \quad (6)$$

Dónde: $AVZ1$ y $AVZ2$ = Distancia recorrida desde que el sensor detecto una planta en la zona 1 o 2 respectivamente.

Ze = Longitud de la zona de escaneo [m]. Determinada por:

$$Ze = Lm * \sin(\alpha) \quad (7)$$

el ángulo del sector circular que corresponda a la zona de escaneo (α) y la mitad de la distancia entre líneas de cultivo Lm [m].

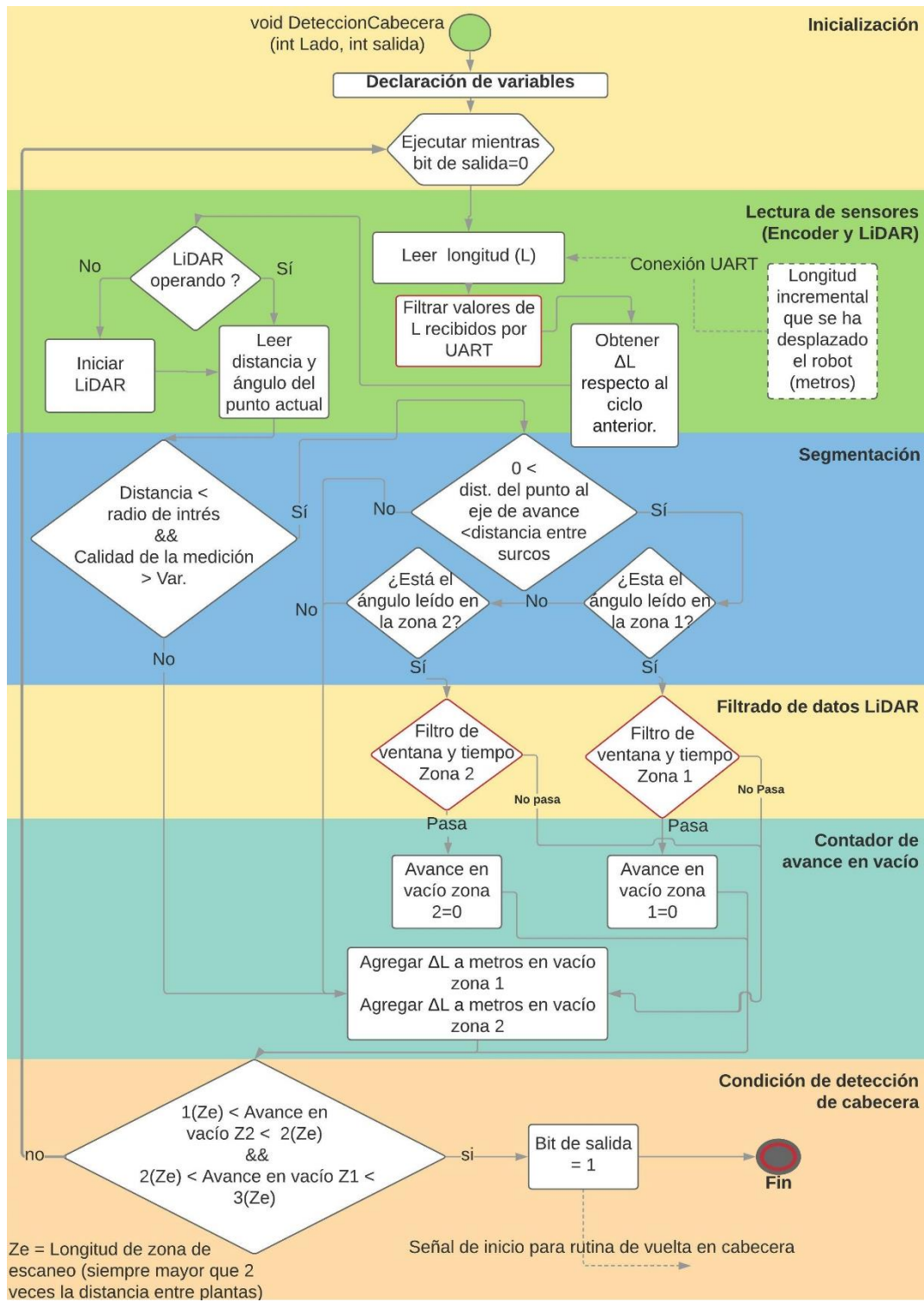


Figura 13. Algoritmo para la detección del final de surco con LiDAR.

4.2.4 Descripción de sitios

Maqueta: Una maqueta para pruebas que imita en dimensiones dos surcos cortos de maíz, sembrados con una separación de 0.2 m y distancia entre surcos de 0.8 m; los tallos de las plantas se representaron con varas de bambú (*Bambusoideae*) con diámetro de entre 1cm y 2 cm y altura de 0.3 m, las hojas no fueron representadas. La maqueta se colocó en un prado con pasto corto.

Invernadero: Las pruebas de campo se realizaron el 17 de septiembre de 2021 en el invernadero cenital de ventilas laterales del CCIT del Colegio de Posgraduados campus Montecillo que tiene un área de 250 m² y está dedicado al cultivo de *Rosa spp.* de las variedades topaz y rock star. La altura total de las plantas es de 80 cm. Las rosas están en camas de cultivo de 1.30 m x 20.7 m con una distancia entre camas de 1.30 m, cuenta con pasillos en las cabeceras de 2.80 m y 31.0 m.



Figura 14. Pruebas con LiDAR-2D en invernadero de rosas y con sensores ultrasónicos en maqueta.

4.2.5 Filtro de ventana

El filtro fue simplificado adaptando a esta aplicación ideas de diversos autores (Krinkin y Filatov, 2021; Madhavan & Adharsh, 2019). La simplificación fue requerida ya que este tipo de filtros comparan el escaneo actual con dos o tres escaneos

pasados y dado que el LiDAR opera a 5.5 Hz procesar esa cantidad de datos es computacionalmente costoso (Krinkin & Filatov, 2021).

Finalmente, el programa fue parametrizado para aplicarlo a diversos cultivos a partir de medidas fáciles de tomar. El algoritmo con LiDAR se probó en condiciones de campo en un invernadero de cultivo de rosas realizando 30 repeticiones en diferentes líneas de cultivo

4.2.6 Filtro para datos de LiDAR

El ruido en los datos del LiDAR-2D es bajo y aleatorio se origina por la alta luminosidad, malezas, reflejos captados por el sensor e insectos voladores. Con el filtro se eliminan los puntos aislados y de aparición repentina que no corresponden a objetos de tamaño considerable.

Se empleó un filtro de tamaño de ventana. Este tipo de filtro se basa en que la diferencia entre los más de cinco escaneos de 360° que el sensor realiza cada segundo es mínima. Es adecuado en esta aplicación porque elimina los datos que no se registran de forma consistente a través de varios escaneos de una zona, siempre considerando una ventana o tolerancia para compensar el movimiento del robot o los objetos. Fue simplificado para la presente aplicación al no almacenar coordenadas exactas de los escaneos, porque en este caso basta con saber si en cada zona de interés se detecta consistentemente por lo menos un objeto. Para poder comparar escaneos sucesivos se impone un límite de tiempo que corresponde al periodo T en milisegundos, $1/f$ de escaneo, después del cuál el contador almacenado de los escaneos anteriores caduca. El diagrama de flujo del filtro se muestra en la figura 6.

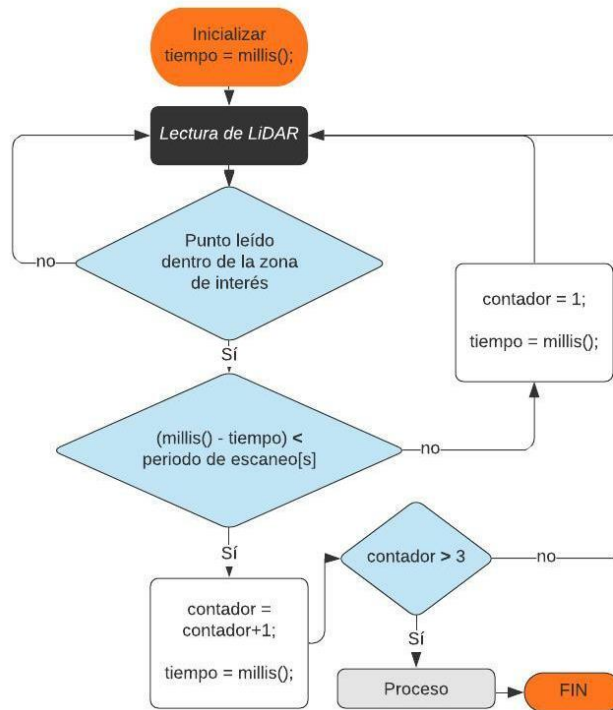


Figura 15. Filtro de ventana por zona.

4.2.7 Dirección alternativa de vueltas

Se implementó el programa de la Figura 7, para indicar al robot en qué dirección tomar el siguiente pasillo entre líneas de cultivo. Consiste en incrementar un contador y revisar en su representación binaria si el ultimo bit es 1 o 0, ya que si es 0 el valor corresponde a un número impar y 1 si es par. Según el valor de este bit con este algoritmo se llama al algoritmo de detección de cabecera, pero con diferentes parámetros que definen el lado de la línea de cultivo a censar durante el recorrido y la dirección de la vuelta siguiente en la cabecera. Censar un solo lado de la línea de cultivo ayuda a disminuir la cantidad de datos procesados.

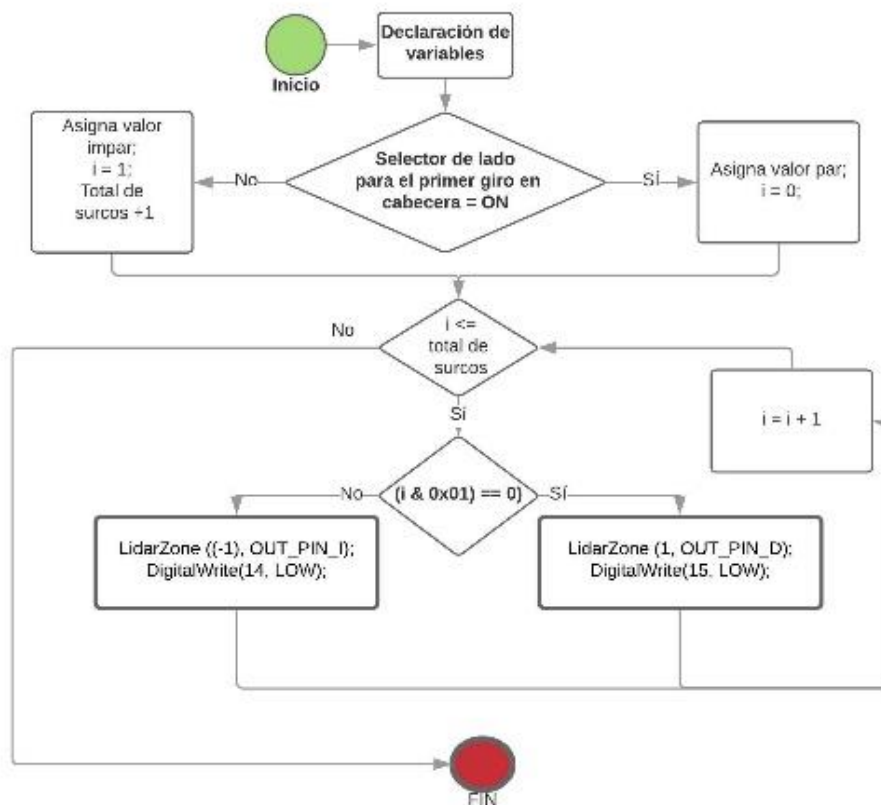


Figura 16. Diagrama de flujo para alternar la dirección de las vueltas al final del surco.

4.2.8 Descripción del robot voltan

Es un robot móvil de dirección deslizante (*skid steer*) que se utilizó como material para las pruebas y su desarrollo no es el objeto de estudio de este trabajo. Consta de un chasis de aluminio tubular recubierto de lámina de acrílico, montado sobre cuatro ruedas agrícolas de 25 cm de diámetro con suspensión independiente (patente MX/u/2018/000639, 2018). El tren motriz está integrado por dos motores de corriente continua (12 V) de 180W con controlador IBT-2 para cada uno y transmisión por cadena a dos ruedas del mismo lado cada uno. Está equipado con dos encoders E50S8-5000-3-T-5 marca Autonics®, un Arduino mega 2560®, una cámara web Logitech C920, una laptop a bordo y una batería sellada de ácido plomo marca MHB de 12V 26Ah/HR. Ver figura 8.



Figura 17. Robot voltan desarrollado en la universidad Autónoma Chapingo

El sistema de visión por computadora puede ejecutarse en el sistema operativo Windows 10 usando Visual Studio 2017 o en Ubuntu 16.04 usando ROS. Implementa a través de librerías de Open CV y programación propia la técnica de *visual servoing* que controla los motores a través de una retroalimentación visual. Consiste en aislar el color verde de las plantas en las líneas de cultivo a los costados del robot, calcular el centro de la masa de color detectada y enviar el dato como retroalimentación mediante comunicación serial a un Arduino Mega 256 que se encarga de comandar los motores y recibir la información de los encoders instalados.

4.2.9 Calibración de sensores

Antes de comenzar las pruebas se calibró el parámetro del sensor LiDAR denominado *Quality* que asigna un valor de 0 a 100 a los puntos detectados de acuerdo con la nitidez de la refracción captada por el sensor. En este caso se descartaron los valores de calidad menor a 5. Con este sensor cuanta más luz hay en el ambiente la calidad de los puntos captados es más baja. Aunque también influyen en la calidad los colores de las superficies, su tamaño y ángulo de incidencia.

En el caso de uso de sensores ultrasónicos se limitó el rango de detección a 50 cm y fueron colocados de forma perpendicular a las plantas para mejorar la efectividad de detección (Gibbs et al., 2017). Limitar el rango de detección también le da mayor velocidad al algoritmo al no esperar por el rebote de las ondas de sonido a mayor distancia. La velocidad máxima a la que se puede circular censando el terreno sin dejar espacios se calculó a partir de la apertura del pulso ultrasónico que para el HC-SR05 es de 15°, la distancia media del sensor a las plantas (d_m) 0.125 m y tiempo entre lecturas de los sensores (t_a) de 20 ms, este último determinado por el tiempo de ejecución del algoritmo y el rango máximo de lectura configurado para el sensor, Empleando la siguiente relación:

$$V_{max} = \frac{d_m \sin(15^\circ)}{t_a} = 1.618 \text{ m/s} \quad (8)$$

4.2.10 Pruebas

Las pruebas a cada algoritmo consistieron en instrumentarlos sobre la plataforma móvil del robot voltan, colocar el robot entre dos líneas del cultivo o la maqueta sin internarse en ellas, a 1.5 m antes del pie de líneas, activar el robot para hacerlo avanzar entre las líneas de cultivo sin intervenir hasta la cabecera donde el algoritmo debe comandar la detención y sentido de giro del robot. Se contabilizan los eventos de detección, no detección y falso positivo para construir el porcentaje de detección que se usa como indicador para evaluar la efectividad. Los falsos positivos y las no detecciones fueron consideradas fallas.

4.2.11 Calibración de velocidad de avance del robot

Sobre el terreno de prueba se pintaron dos marcas separadas por 10 m y se midió el tiempo que el robot requirió para recorrerla. Para hacer que las pruebas fueran comparables se ajustó la modulación de pulso de los controladores de motores hasta obtener una velocidad de 0.45 m/s.

4.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.3.1 Pruebas del filtro de ventana

Se realizaron pruebas estáticas en las que el LiDAR-2D configurado a frecuencia de escaneo de 5.5 Hz y resolución de 1° se colocó a 25 cm del suelo, con una cantidad moderada de maleza sobrepasando la altura del sensor, como se muestra en la figura 9.



Figura 18. Foto de la zona de prueba del filtro de datos de LiDAR.

El objetivo de esto es simular una cabecera de línea de cultivo con presencia de poca maleza. Se establecieron dos zonas de 37.5° y radio de 1m. Se registraron 641 lecturas durante 5 minutos, que representan lecturas no deseadas que de no eliminarse harían fallar el algoritmo. Ver figura 10.

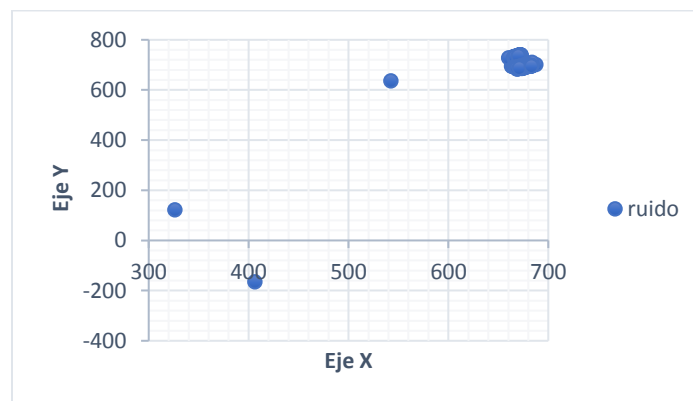


Figura 19. Gráfico de ruido en las lecturas de LiDAR, unidades en mm.

El filtro se aplicó en tiempo real y ninguno de estos puntos lo superó por lo que se considera que tiene un buen desempeño. Se realizó también una prueba estática en presencia de la maqueta de plantas cultivadas. En la misma superficie el sensor reportó 6200 puntos durante los 5 minutos de duración de la prueba. En estas condiciones el filtro eliminó 1/3 de los puntos lo que no interfiere en los resultados del algoritmo de detección de cabeceras cuando se encuentre circulando entre las líneas de cultivo. La eliminación de 1/3 de los puntos ocurre por la condición en el algoritmo del filtro de requerir 3 detecciones sucesivas en la misma zona para considerar la zona como ocupada, pudiendo ser el primer valor uno aceptado por el filtro en un ciclo anterior, el segundo uno contabilizado, pero sin el estatus de aceptado y el tercero aceptado por el filtro que a su vez es el primer valor aceptado para el ciclo siguiente de filtrado. Ver figura 6.

4.3.2 Resultados de pruebas de detección de cabecera

El primer algoritmo tuvo un desempeño malo con detección de 47.3%. La principal causa del mal desempeño es que la velocidad del robot no es uniforme debido a la desigual resistencia al avance presentada por el suelo. Destaca que debido a que no hay traslape en los intervalos definidos para las condiciones de disparo de la detección de cabecera, no hay falsos positivos cuando el robot circula por un baldío. Esto pone a este algoritmo un paso por encima de la detección de cabecera por ausencia simple. Sin embargo, puede ocurrir un falso positivo, aun cuando el robot este detenido, si los sensores detectan un objeto que cruza ambas zonas momentáneamente y que se mueva de adelante hacia atrás del robot, lo que podría activar una rutina de forma accidental si no se tienen las precauciones adecuadas.

El segundo algoritmo que empleo sensores ultrasónicos, pero incorpora los datos de un encoder incrementó la eficiencia de detección de cabecera en más del doble (96.7%) debido a que ya no ubo afectación por el movimiento no uniforme del robot. Porque se conoce de manera directa el desplazamiento, sin embargo, no fue perfecta debido al ruido en las lecturas de los sensores ultrasónicos que no pudieron filtrarse.

El tercer algoritmo que se instrumentó usando el LiDAR 2D tuvo una eficiencia de 100% tanto en las pruebas en el invernadero de rosas como en la maqueta. Esto se debe a la mayor tasa de monitoreo del sensor, pero también a la implementación de un filtro de datos. El filtro de ventana simplificado que se desarrolló eliminó el ruido de las lecturas de LiDAR provocado por pequeñas malezas en las cabeceras, insectos y errores de lectura propios del sensor. Ver cuadro 4.

Cuadro 2. Resultados de pruebas para detectar el final de surco en maqueta e invernadero.

Algoritmo		Repeticiones	Fallas	Eficiencia	Velocidad media
Ultrasónicos encoder	sin	16	9	43.7%	0.89 m/s
Ultrasónicos encoder	con	30	1	96.7%	0.45 m/s
LiDAR con encoder		30	0	100%	0.45 m/s
LiDAR con encoder (prueba en invernadero con rosas)	en con	30	0	100%	0.45m/s

En caso de no contar con un claro suficientemente despejado de maleza en la cabecera, una alternativa es elevar los sensores hasta donde la altura del cultivo lo permita para que las malezas no interfieran.

Este algoritmo es la detección redundante y coordinada de la cabecera del surco, por otro lado, el filtro de ventana agrega en sí mismo redundancia en la medición y manejo de datos de LiDAR. Este hecho es el que permite tener mayor efectividad, ya que agregar redundancias y subrutinas de protección destinadas a detectar fallos de los sensores y fallos mecánicos evita errores y los riesgos asociados (Leuschen et al., 2002).

4.3.3 Implementación en distintos cultivos

Los requisitos para implementar el algoritmo en los cultivos ya establecidos son que la altura de las plantas le permita al sensor detectarlos, que los cultivos estén organizados en filas o líneas y que exista un claro en las cabeceras de por lo menos 4 veces la distancia entre plantas. Es importante que las cabeceras se encuentren limpias de maleza y obstáculos Figura 11.



Figura 20. Limpieza de cabeceras indispensable para el buen funcionamiento del algoritmo.

Para la implementación se requiere tomar las siguientes medidas del cultivo que se usarán como parámetros del algoritmo. Ver Cuadro 2.

Cuadro 3. Parámetros para el programa de detección de cabeceras.

Parámetro	Uso
Espacio entre líneas de cultivo	Se usa como alcance máximo del sensor. Limitar a esta distancia evita tomar datos de las filas de cultivo contiguas. Cuando se usa LiDAR también sirve para calcular Ze (Longitud de la zona de escaneo).
Distancia entre plantas	Debe ser de máximo un tercio de Ze

Claro en cabeceras

Medición de por lo menos 4 veces Z_e .
Sirve para corroborar que el algoritmo
se pueda utilizar.

4.4 CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema de detección de final de línea efectivo y de bajo costo, mediante sensores ultrasónicos o LiDAR-2D para complementar la navegación autónoma y desencadenar el cambio de línea.

El algoritmo que utiliza sensores ultrasónicos y enconder fue efectivo en 29 de 30 repeticiones. Mientras que el algoritmo que usa LiDAR-2D no tuvo fallas tanto en ambiente controlado como en condiciones de campo.

El algoritmo que utiliza datos de sensores ultrasónicos mostró ser una opción suficientemente robusta para implementarse en aplicaciones básicas y que requieran mantener un costo bajo. El algoritmo que emplea LiDAR es una alternativa de costo medio pero que agrega versatilidad por la posibilidad de agregar filtrado de datos cuando cabeceras con poca maleza.

Se evaluaron los tres algoritmos desarrollados y se encontró que el algoritmo que utiliza el LiDAR A1M8 es la mejor opción.

4.5 AGRADECIMIENTOS

Al M.C Patricio Sánchez Guzmán por permitir el uso del invernadero de rosas del CCIT del Colegio de postgraduados, Campus Montecillo.

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca de estudio de posgrado y a la Universidad Autónoma Chapingo por los recursos para la investigación otorgados a través de la DIGIP.

4.6 REFERENCIAS

- Ahmadi, A., Nardi, L., Chebrolu, N., & Stachniss, C. (2020). Visual Servoing-based Navigation for Monitoring Row-Crop Fields. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation, September*, 4920–4926.
<https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9197114>
- Bechar, A., & Vigneault, C. (2016). Agricultural robots for field operations: Concepts and components. *Biosystems Engineering*, 149, 94–111.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.014>
- Escolà, A., Auat Cheein, F., & Rosell-Polo, J. R. (2021). Agricultural Robotic Sensors for Crop and Environmental Modelling. En A. Bechar (Ed.), *Innovation in Agricultural Robotics for Precision Agriculture* (pp. 31–62). Springer.
<https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-77036-5>
- Flippo, D. F., & Miller, D. P. (2014). Turning efficiency prediction for skid steering via single wheel testing. *Journal of Terramechanics*, 52(1), 23–29.
<https://doi.org/10.1016/j.jterra.2014.02.001>
- Gibbs, G., Jia, H., & Madani, I. (2017). Obstacle Detection with Ultrasonic Sensors and Signal Analysis Metrics. *Transportation Research Procedia*, 28, 173–182.
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.183>
- Krinkin, K., & Filatov, A. (2021). Correlation filter of 2D laser scans for indoor environment. *Robotics and Autonomous Systems*, 142, 103809.
<https://doi.org/10.1016/j.robot.2021.103809>
- Leuschen, M. L., Cavallaro, J. R., & Walker, I. D. (2002). Robotic fault detection using nonlinear analytical redundancy. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1(May), 456–463.
<https://doi.org/10.1109/robot.2002.1013402>
- Madhavan, T. R., & Adharsh, M. (2019). Obstacle Detection and Obstacle Avoidance Algorithm based on 2-D RPLiDAR. *2019 International Conference*

on Computer Communication and Informatics, ICCCI 2019, 1–4.

<https://doi.org/10.1109/ICCCI.2019.8821803>

Malavazi, F. B. P., Guyonneau, R., Fasquel, J. B., Lagrange, S., & Mercier, F. (2018). LiDAR-only based navigation algorithm for an autonomous agricultural robot. *Computers and Electronics in Agriculture*, 154(February), 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.034>

Nebot, P., Torres-Sospedra, J., & Martínez, R. J. (2011). A new HLA-based distributed control architecture for agricultural teams of robots in hybrid applications with real and simulated devices or environments. *Sensors (Switzerland)*, 11(4), 4385–4400. <https://doi.org/10.3390/s110404385>

Olcay, E., Schuhmann, F., & Lohmann, B. (2020). Collective navigation of a multi-robot system in an unknown environment. *Robotics and Autonomous Systems*, 132, 103604. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2020.103604>

Vázquez, A. P., Trinidad, D. A. L., & Merino, F. C. G. (2018). Desafíos y propuestas para lograr la seguridad alimentaria hacia el año 2050. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(1), 175–189.

Zhang, C., & Noguchi, N. (2017). Development of a multi-robot tractor system for agriculture field work. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.08.017>

Zhang, J., Maeta, S., Bergerman, M., & Singh, S. (2014). Mapping Orchards for Autonomous Navigation. *ASABE Annual International Meeting*, 7004, 1–9. <https://doi.org/10.13031/aim.20141838567>

Evans, B. (2007). Arduino Notebook. Traducido y adaptado por José Manuel Ruiz, disponible en: <https://arduinoobot.pbworks.com/f/Manual+Programacion+Arduino.pdf>

Calderón, P., Reyes A., Velázquez, L. (2019). Algoritmos para la detección del final de surco empleando sensores ultrasónicos aplicados en la navegación de un

robot agricultor. XX Congreso nacional de ciencias agronómicas. Texcoco, México.

Robopeak (2017). Documentation manual and SDK manual RPLIDAR.

5 DISEÑO MECANICO DE UN ROBOT AGRICOLA DE REABASTECIMIENTO EN CAMPO

Pablo Calderón-Carrasco¹, Noé Velázquez-López¹, Agustín Ruiz García¹, Gilberto de Jesús López Canteñs¹.

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo. km 38.5 Carretera México–Texcoco. Chapingo, Estado de México, C.P. 56230. México.

Resumen

En los sistemas multi-robot se tiene la ventaja de contar con un número ilimitado de combinaciones de funciones de los agentes, lo que lleva a complementar el trabajo cada uno con la función específica para la que fue diseñado o equipado en el caso de robots multi tareas. En este caso se trata de un robot con una sola función de reabastecimiento. El sistema de dirección será de tipo sked steer y con suspensión similar al robot “Voltan”. En este ejercicio de diseño se utilizó la metodología de Budynas y los programas de diseño asistido por computadora SolidWorks para hacer modelos de los que posteriormente se realizó una simulación estática en ANSYS

Palabras clave: Sistema multi-robot, Simulación mecánica, surtidor de insumos, dosificador de semilla.

MECHANICAL DESIGN OF AN AGRICULTURAL ROBOT FOR IN FIELD INPUTS SUPPLY

Pablo Calderón-Carrasco¹, Noé Velázquez-López¹, Agustín Ruiz García¹,
Gilberto de Jesús López Canteñas¹.

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y uso Integral del Agua, Universidad Autónoma
Chapingo. km 38.5 Carretera México–Texcoco. Chapingo, Estado de México,
C.P. 56230. México.

Abstract

In multi-robot systems there is the advantage of having an unlimited number of combinations of agent functions, which leads to complement the work each one with the specific function for which it was designed or equipped in the case of multi robots. chores. In this case it is a robot with a single refueling function. The steering system will be of the skeed steer type and with a suspension similar to the “Voltan” robot. In this design exercise, the Budynas methodology and SolidWorks computer-aided design programs were used to make models of which a static simulation was subsequently performed in ANSYS.

Palabras clave: Multi-robot system, mechanical simulation, input dispenser, seed dispenser.

5.1 INTRODUCCIÓN

El robot de reabastecimiento aumentará la capacidad de trabajo autónomo trabajar por las cabeceras de los surcos. El ancho de su estructura podrá ser de hasta 1m. Deberá estar preparado para cargar los insumos necesarios para que el robot Voltan trabaje 1 ha. Con respecto a su estructura, el chasis será de perfil tubular, debe tener la capacidad de llevar fertilizante, semilla o líquidos. El sistema de dirección será de tipo skeed steer y con suspensión similar al Voltan.

5.2 OBJETIVOS

Crear un robot que se desplace por las cabeceras llevando suministros a un robot agricultor. Con las siguientes especificaciones:

- Ancho de chasis 1 m
- Capacidad de carga de 200 kg
- Semilla y suministros para 1 ha
- Transmisión por cadena
- Skeed steer
- Guiado por LiDAR
- Sistema de comunicación inalámbrica

5.3 METODOLOGÍA

Se utilizó la metodología de diseño de Budynas (2011) y los programas de diseño asistido por computadora Solidworks para hacer modelos de los que posteriormente se realizó una simulación estática en ANSYS.

Para definir el largo del chasis se requiere definir las dimensiones de los componentes que albergará el robot. Empezando por la tolva de fertilizante que de acuerdo con la disponibilidad de nutrientes en el suelo y la necesidad de las plantas varia. Se plantea tener una tolva para 200kg de fertilizante de la menor densidad aparente. La Tabla 1 muestra la densidad aparente de diferentes fertilizantes y el tamaño proyectado de una tolva para contener 200 kg.

Tabla 5. Fertilizantes comunes y su densidad aparente [1].

Fertilizante, formulación	Densidad aparente mínima (Kg/m3)	Densidad aparente máxima (Kg/m3)	Tolva para 200 kg (m3)
UREA, 46-00-00	770	809	0.25974026
TRIPLE 16, 16-16-16	970	1,140	0.206185567
SULFATO DE AMONIO, 20.5-00-00 + 24%S	960	1,040	0.208333333
KCL, 00-00-60	1,025	1,200	0.195121951
K-MAG, 00-00-22 + 11%Mg + 22%S	1,506	1,600	0.132802125
MAP, 11-52-00	971	1,060	0.205973223
FOSFONITRATO, 33- 03-00	913	1,000	0.21905805

Con estos datos en general se estiman las medidas de la tolva para fertilizante propuesto son

Tabla 6. Medidas estimadas de tolva para fertilizante.

Ancho	Largo	Alto	Volumen
1 m	0.6 m	0.45 m	0.27 m

Se requiere también un almacenamiento de semillas, suponiendo cultivo de maíz, el volumen de las semillas requerido se calculará a partir de la densidad de siembra

y la densidad aparente de la semilla, INTAGRI (2018) presenta un cuadro de densidad de siembra, suponiendo distancia entre surcos de 79 cm y entre planta de 11 cm la densidad de siembra es de 118,421 plantas/ha. Si se considera que el peso del grano de maíz es de 19 a 30 g por cada 100 granos [3][4]. La densidad aparente es de 700 a 800 kg /m³, también fueron tomadas en cuenta para el diseño de la tolva el ángulo de talud de 26° a 29° y coeficiente de frotamiento 0,308 a 0,424.

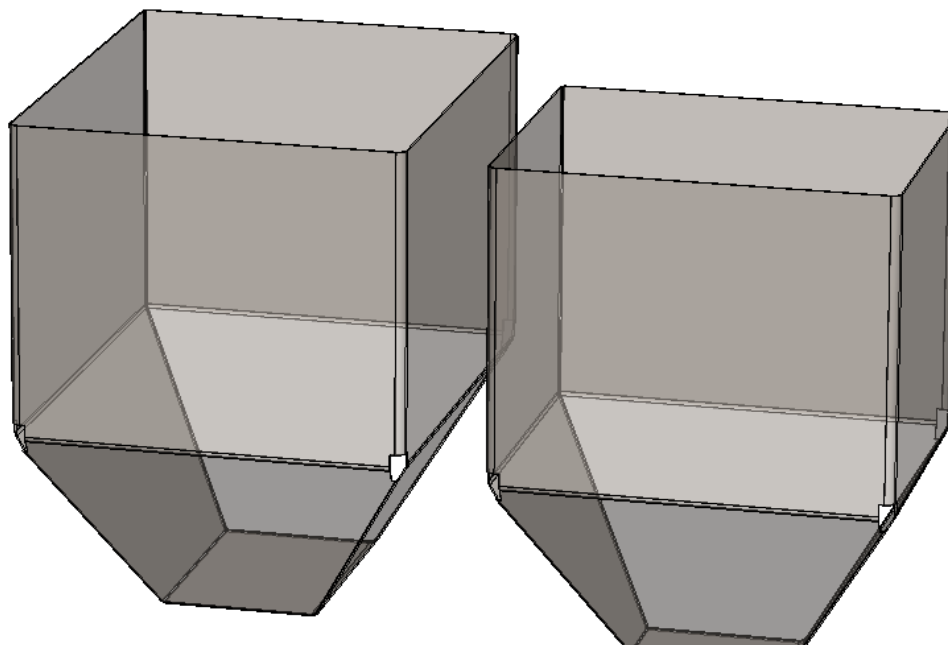


Figura 21. Vista previa de las tolvas.

Por el tipo de dirección del robot se deben colocar las tolvas de manera que el centro de gravedad permanezca lo más centrado posible, bajo diferentes condiciones de carga y que incluso pueda ajustarse automáticamente para asegurar que los giros se realizan correctamente. Esta consideración se tomará en cuenta en análisis posteriores.

Se requiere también un almacenamiento de semillas, suponiendo cultivo de maíz, el volumen de las semillas requerido se calculará a partir de la densidad de siembra y la densidad aparente de la semilla, INTAGRI (2018) presenta un cuadro de densidad de siembra, suponiendo distancia entre surcos de 79 cm y entre planta de 11 cm la densidad de siembra es de 118,421 plantas/ha. Si se considera que el

peso del grano de maíz es de 19 a 30 g por cada 100 granos [3][4]. La densidad aparente es de 700 a 800 kg /m³, también fueron tomadas en cuenta para el diseño de la tolva el ángulo de talud de 26° a 29° y coeficiente de frotamiento 0,308 a 0,424.

Tabla 7. Volumen de semillas requerido.

PROPIEDAD	NUMERODE SEMILLAS	MASA	VOLUMEN (DAP 700 Kg/m ³)
GRANOS NECESARIOS	118,421	22.499KG 35.5Kg	0.032m3 0.051m3

Por el tipo de dirección se deben colocar las tolvas de manera que el centro de gravedad permanezca lo más centrado posible, bajo diferentes condiciones de carga y que incluso pueda ajustarse automáticamente para asegurar que los giros se realizan correctamente. Esta consideración se tomará en cuenta en análisis posteriores.

Con las dimensiones de las tolvas y el chasis se estimo la masa total de la estructura. Se simularon en condiciones extremas de carga estática los componentes principales del chasis en un programa por elemento finito.

5.3.1 Simulación de brazo de suspensión

En una primera aproximación se simuló el brazo de suspensión fabricado en PTR de 2" X 2" X 0.25". Se restringió el brazo de manera similar a las condiciones de ensamble en el robot. Se supuso una volcadura hacia un costado, se aplico una carga perpendicular de 2000 N, la magnitud y dirección de esta fuerza aseguran que el brazo tenga la rigidez suficiente para operar en cualquier condición real de carga.

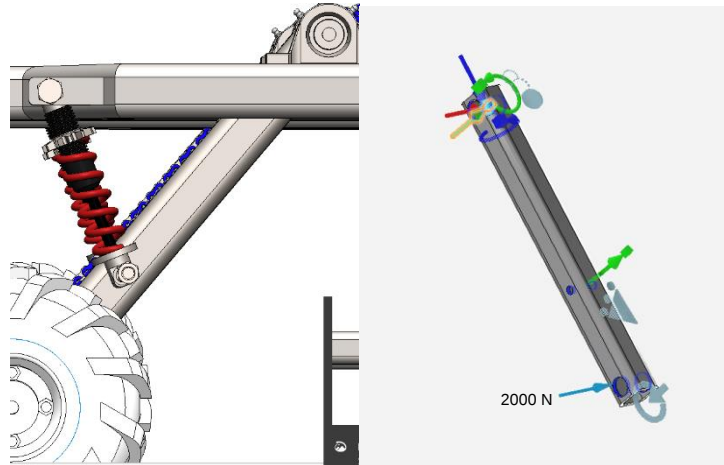


Figura 22. Brazo de suspensión y cargas aplicadas

La primera simulación arrojó resultados por encima del esfuerzo de fluencia del material (105.2%).

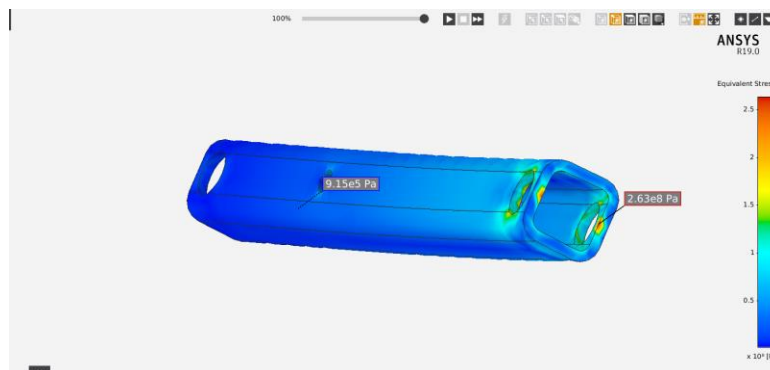


Figura 23. Primera simulación

Se realizó una segunda simulación modificando la geometría.

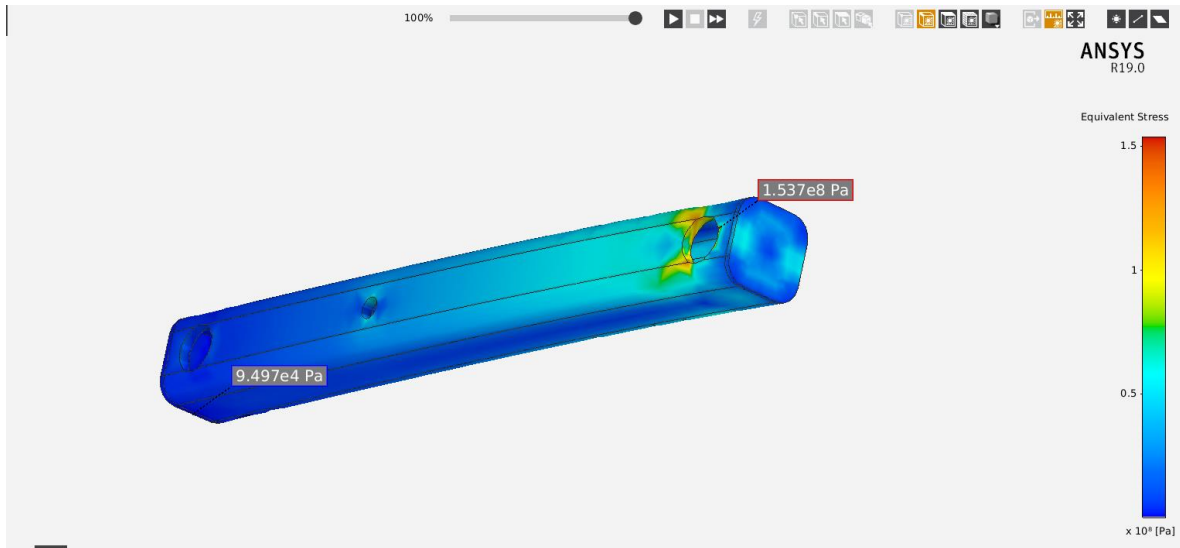


Figura 24. Geometría del brazo de suspensión optimizada.

Las modificaciones fueron: el orificio para rodamiento a +5 mm de la orilla, tapa de placa de 1/8" soldada. El resultado fue 61% esfuerzo de fluencia.

5.3.2 Propiedades del material

Cabe mencionar que en todas las simulaciones se empleó en las propiedades del material acero estructural.

Con las dimensiones de las tolvas y el chasis se estimó la masa total de la estructura. Se simularon en condiciones extremas de carga estática los componentes principales del chasis en un programa por elemento finito.

Con las dimensiones de las tolvas y el chasis se estimó la masa total de la estructura. Se simularon en condiciones extremas de carga estática los componentes principales del chasis en un programa por elemento finito.

Strain life curve		
TotalStrainLife		
Strength coefficient, σ_f'	9.2E+08 Pa	
Strength exponent, b	-0.106	
Ductility coefficient, ϵ_f'	0.213	
Ductility exponent, c	-0.47	
▼ Cyclic Stress-Strain		
Cyclic Stress-Strain curve		
CyclicStressStrain		
Cyclic strength coefficient, K'	1E+09 Pa	
Cyclic strain hardening exponent, n'	0.2	
Density, ρ	7850 kg m ⁻³	
Tensile yield strength, S_{yt}	2.5E+08 Pa	
Tensile ultimate strength, S_{ut}	4.6E+08 Pa	
Coefficient of thermal expansion, α	1.2E-05 C ⁻¹	
Specific heat, c_p	434 J kg ⁻¹ C ⁻¹	
Isotropic thermal conductivity, k	60.5 W m ⁻¹ C ⁻¹	
Isotropic resistivity	1.7E-07 ohm m	

Tabla 8. Propiedades del Acero estructural para la simulación.

5.3.3 Torque y cargas en los ejes

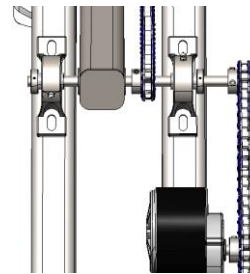
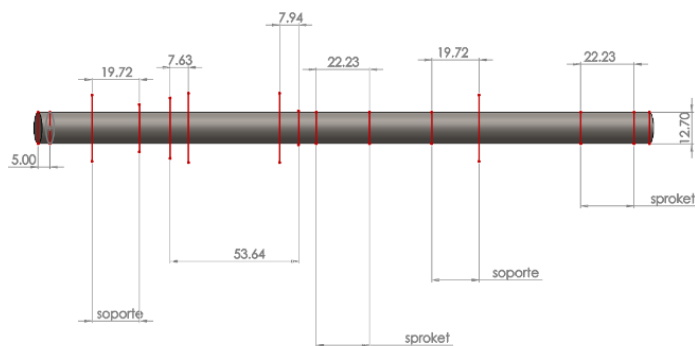


Figura 25. Eje de transmisión y sujeción de brazo de suspensión.

El motor que se planea usar es de 247 watts que produce 0.8 N*m a 2950 rpm, viene equipado con un reductor con relación 9.78:1, que por lo tanto tiene una salida de 7.824 N*m si se desprecia en este momento la eficiencia de la transmisión y se considera que se planean usar cadenas con piñones de 17 y 34 dientes para aumentar el torque al doble, en la simulación se usarán 17 N*m. Suponiendo un escenario en el que el motor es forzado y además el torque se dirige a una sola rueda, como si su compañera con la que comparte el torque del motor se encontrara sin tracción. También se aplico la carga correspondiente a 200 kg de peso del vehículo.

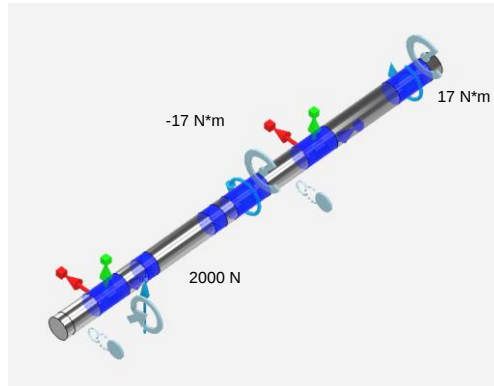


Figura 26. Cargas aplicadas en la simulación.

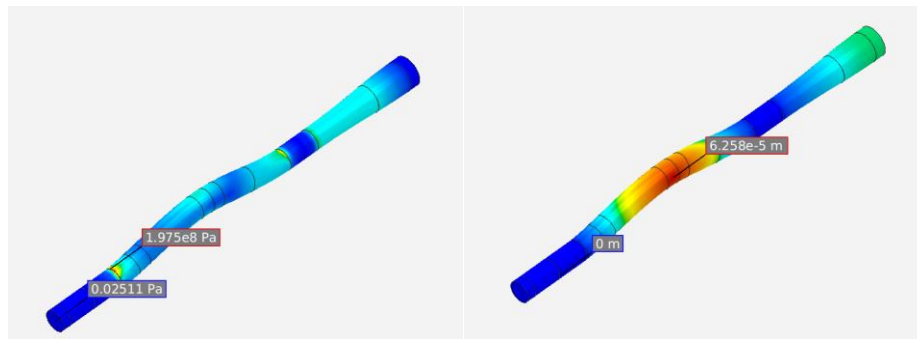


Figura 27. Esfuerzo equivalente y desplazamientos del eje.

Se observa que el esfuerzo equivalente es menor al esfuerzo de fluencia del material que es según tablas es de 2.5×10^8 por lo tanto el esfuerzo presentado es 21% menor a el necesario para que el material salga de su zona elástica.

5.3.4 Simulación y optimización de chasis

Simulación y optimización de chasis. Para este caso el chasis se simulará de manera estática considerando el doble de carga al que estará sometido, compensando el hecho de que no es una simulación dinámica, se considerará un factor de seguridad de 30% y desplazamientos máximos de 1mm.

Cargas aplicadas

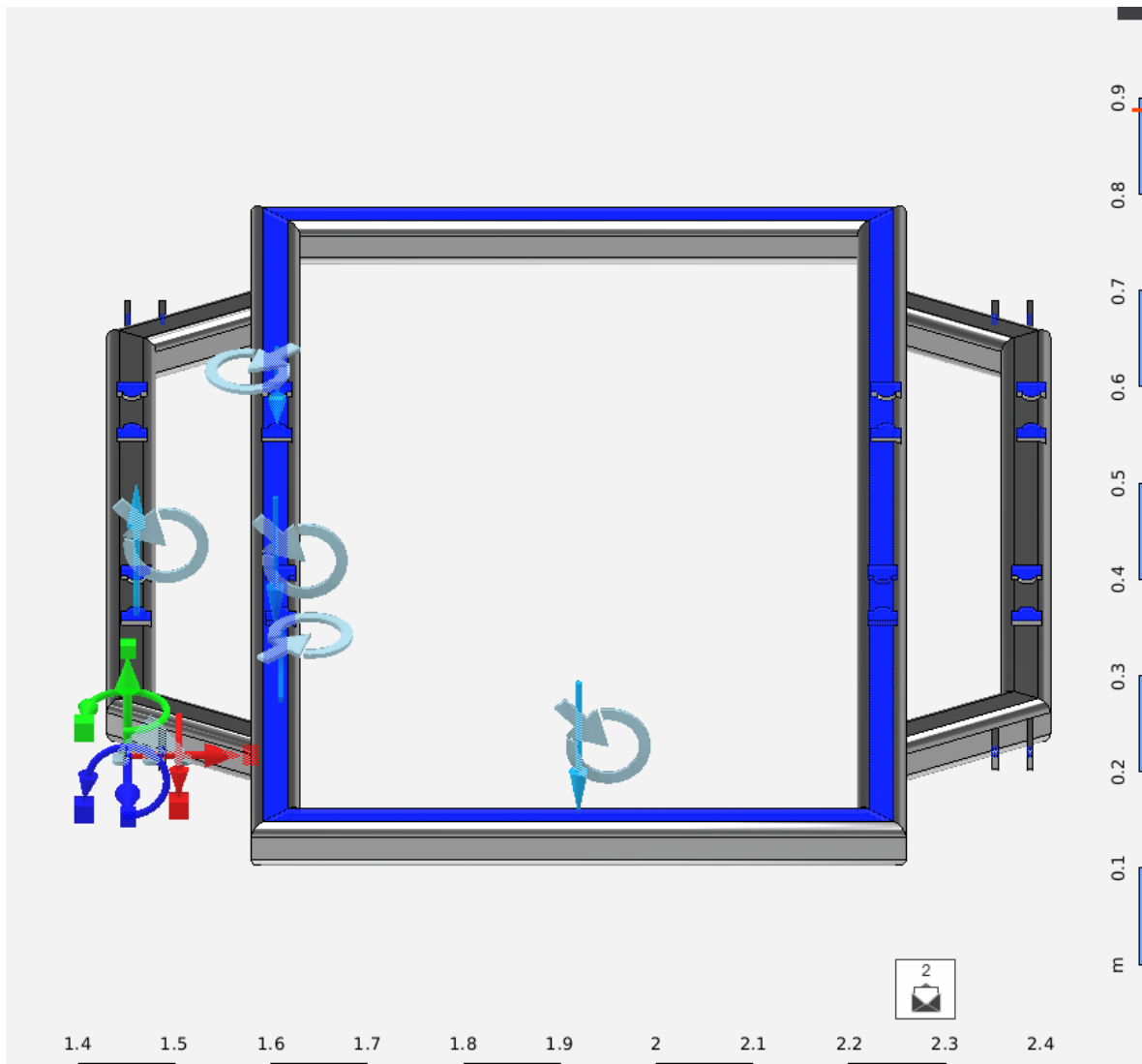


Figura 28. Diagrama de carga del chasis para la simulación.

La estructura se fijó en los cuatro orificios para pernos de amortiguador, sobre la superficie superior del marco se distribuyeron 3000 N, que corresponderían al peso de los insumos y equipos para manejarlos, en las bases de las chumaceras se aplicaron 3000 N de fuerza en orientación vertical y dirección ascendente.

Se consideró la tensión ejercida por la cadena de 10 N aunque no se calculó exactamente su orden de magnitud parece no impactar en los resultados

En una primera simulación se observó que el elemento está sobredimensionado, se procede a bajar la cedula del material lo que ayudará a reducir masa y mejorar las prestaciones dinámicas del chasis.



Figura 29. Esfuerzo equivalente en el chasis

Se empieza a notar en la simulación de fatiga que habrá que reforzar las orejas para amortiguador, es posible que sea un defecto en el mallado para descartarlo se aumentará localmente la calidad de malla en esa zona.

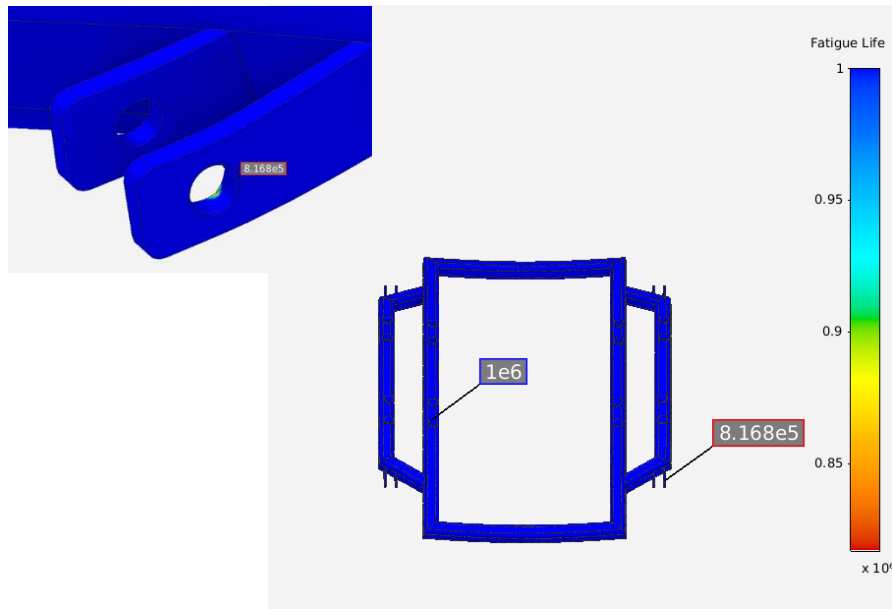


Figura 30. simulación de fatiga, no superada en zonas de concentración de carga.

Nuevamente las orejas para el amortiguador son deficientes para manejar la carga y a fatiga no consiguen el número de ciclos infinito. Se reforzó la zona con nervaduras y se solucionó el problema.

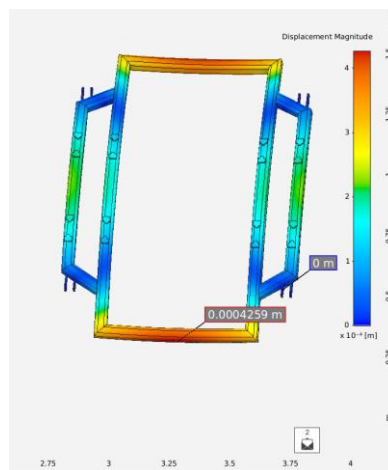


Figura 31. desplazamiento con C12

En las simulaciones el desplazamiento fue aceptable de 0.4mm.

Se realizó una simulación adicional con carga de 400kg sobre el chasis distribuyendo la carga resultando ser el punto más débil nuevamente la conexión con los amortiguadores. Pero sin causar problemas.

Geometría del robot y su influencia en el giro deslizante sobre su propio eje

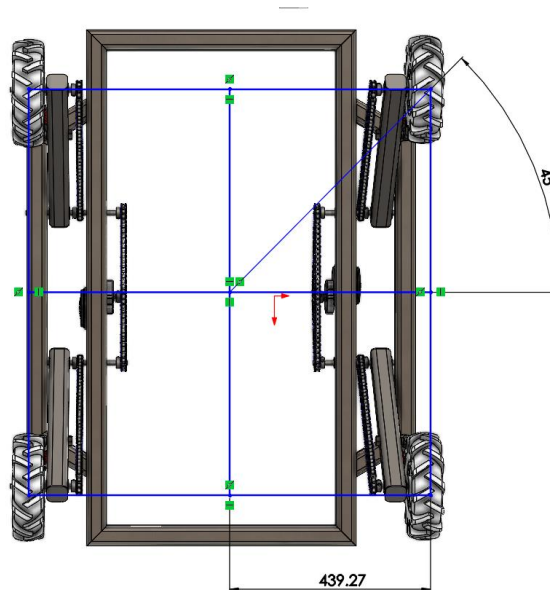


Figura 32. Geometría de chasis del robot robot

Se redujo el ángulo θ hasta $45^\circ = (\pi/4)\text{rad}$ para aumentar la eficiencia de giro del robot según (Flippo & Miller, 2014) por otro lado no se puede reducir más el ángulo porque tendríamos problemas de estabilidad al frenar y avanzar, el ángulo elegido también simplifica los cálculos.

Una idea para aumentar la eficiencia de giro sobre su centro de gravedad es elevar el robot y así reducir la distancia entre ruedas delanteras y traseras.

La idea para levantar una rueda es usar amortiguadores de aire y liberar la presión cuando se requiera dar la vuelta, la rueda no se levanta completamente, pero se elimina la posibilidad de que la carga se apoye en ella reduciendo la fuerza normal y con ello la fricción con el suelo.

Desventajas

- Hay que llevar aire comprimido a bordo o el compresor.

Ventajas

- El mecanismo no se vuelve más complejo,
- El amortiguador simplemente se sustituye por uno de aire.
- Llevar compresor a bordo da la posibilidad de usar aire comprimido en otras tareas.



Figura 33. Compresor de aire portátil con entrada de CC de 12V

Se cambio el diseño del chasis para tener el centro de gravedad más bajo, y ahorrar peso en las chumaceras usando en su lugar rodamientos con pestaña soldados al chasis

Reducción de peso de la suspensión

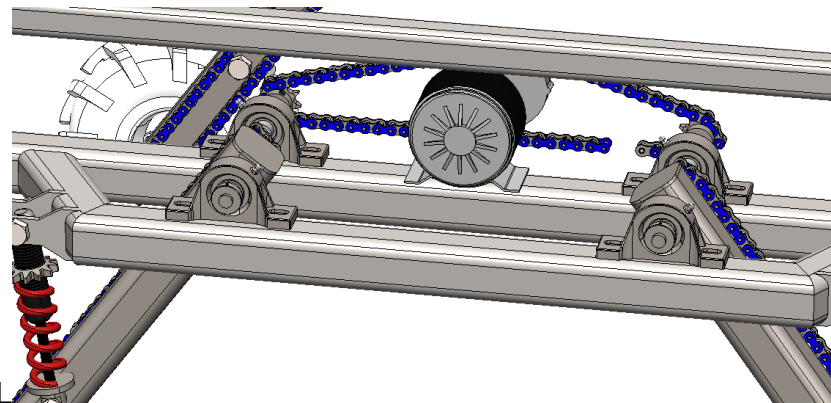


Figura 34. configuración con Chumaceras

Configuración anterior el peso del chasis y suspensión es de 112kg

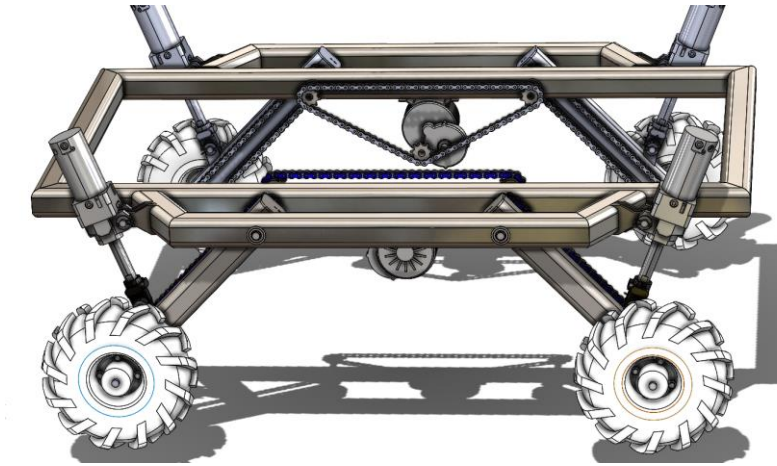


Figura 35. Configuración de peso reducido.

Peso con nueva configuración 87.41kg

La ventaja de esta nueva configuración es que el centro de gravedad es más bajo, y el peso que se reduce ayudará a bajar el torque necesario para girar sobre su propio eje.

Cálculo de fuerza requerida en el cilindro neumático de suspensión.

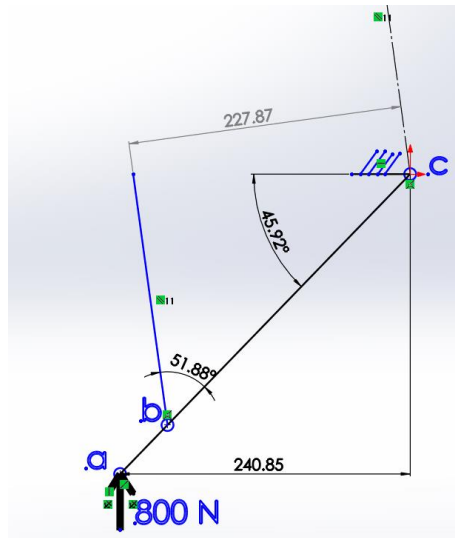


Figura 36. Diagrama de cuerpo libre de brazo de suspensión

Con la sumatoria de momentos en c en esta posición para 2G (gravedad) es decir el doble del peso estático la fuerza en “a” tiene que ser 1585 N operando el cilindro seleccionado a 0.6MPa es capaz de mover 1180N a 1G tendría que tener una fuerza de 800N que la presión este entre estos dos valores significa que requerimos una válvula para cerrar el cilindro cuando el robot avance y que existirá un efecto de resorte y desplazamientos del embolo del cilindro cuando la fuerza exceda los 1100N. Ver Figura 34.

5.3.5 Sistema de descarga de granos y fertilizante

Consta de una banda que corre por el centro de un tubo DE PVC hidráulico, CON UNA LONGITUD DE 130 m

La longitud es esa porque el robot que va a bastecer es de 80 cm de largo y se agregaron 50 cm más para llegar hasta el depósito de la sembradora que lleva detrás. Se pretende que se aproxime de frente hacia un costado del robot

abastecedor mediante sistema de visión, posteriormente exista un cruce de información entre ambos robots y uno controle el eje x y el otro el eje Y para centrar el tubo de descarga en el lugar que corresponda de la sembradora. En la punta del tubo de reabastecimiento habrá una cámara que dará las coordenadas.

El sistema de descarga consta también de un mecanismo de levante empleado durante el desplazamiento del robot en la parcela. Emplea switch limitador de carrera y un sistema de polea acoplado un “winch”.

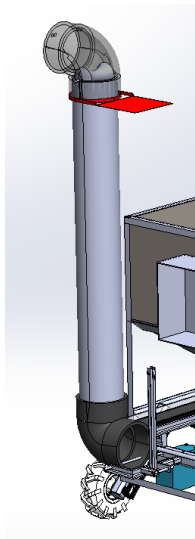


Figura 37. Sistema de descarga de insumos agrícolas sólidos.

Banda transportadora para concentrar los suministros solidos desde las tolvas al sistema de entrega.

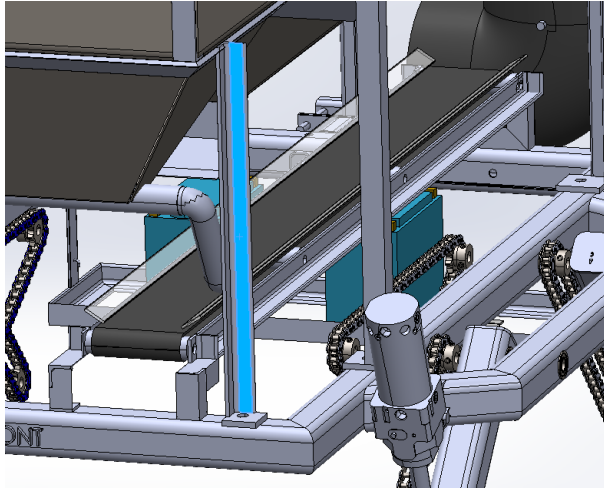


Figura 38. Banda alimentadora de insumos

5.3.6 Alimentador de semillas

Diseño de concepto de un alimentador de semillas

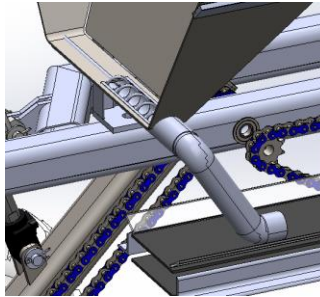


Figura 39. Alimentador de semillas de resorte helicoidal.

El resorte helicoidal permite conservar la viabilidad de las semillas porque si la velocidad es adecuada no sufren aplastamiento.

5.3.7 Alimentador de fertilizante

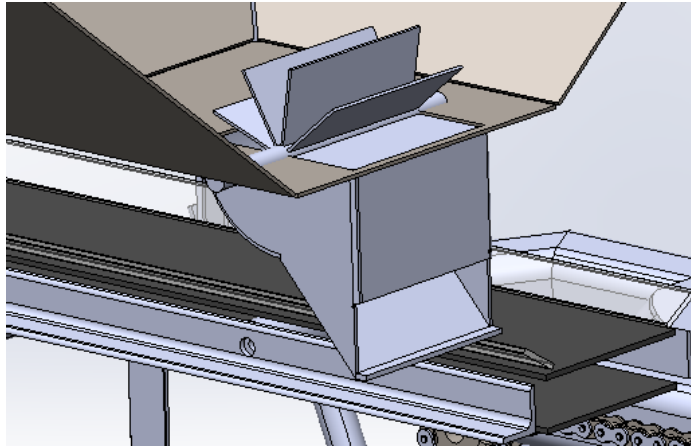


Figura 40. Diseño conceptual de alimentador de fertilizante.

En el caso del alimentador de semillas de fertilizante el manejo es menos cuidadoso que con las semillas y el aplastamiento no es un problema por eso se puede optar por este tipo de mecanismos que regulan de manera eficiente la salida de material y mediante un pin con retracción eléctrica se pueden fijar para servir como compuerta.

5.4 RESULTADOS

Se realizó el diseño mecánico del chasis y se validó mediante simulación, se buscó que en las pruebas de fatiga rebasara la vida infinita, se realizaron diseños de geometría de los diferentes mecanismos que el robot tienen que equipar para cumplir su función.

5.5 CONCLUSIONES

Se diseñó un robot para desplazarse por las cabeceras llevando suministros a un robot agricultor. Con las siguientes especificaciones:

- Ancho de chasis 1 m
- Capacidad de carga de 200 kg
- Semilla y suministros para 1 ha
- Transmisión por cadena
- Skid steer

- Guiado por LiDAR
- Sistema de comunicación inalámbrica

Referencias

[1] Ficha técnica, FERTINOVA agro productos. En línea 01/07/2020; <http://www.fertinova.mx/sites/default/files/fichas%20t%C3%A9cnicas.pdf>

[2]INTAGRI (2018) Densidad de Siembra en el Cultivo de Maíz. Serie Cereales Núm. 38. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 4 p. Extraído de <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/densidad-de-siembra-en-el-cultivo-de-maiz> -

[3]<http://www.fao.org/3/t0395s/T0395S02.htm#Capitulo%201%20Introducci%C3%B3n>

[4][http://rafaela.inta.gov.ar/publicaciones/documentos/hoja_inf/hojainf_3.htm#:~:text=En%20cuanto%20al%20peso%20promedio,planta%20\(0%2C94\)](http://rafaela.inta.gov.ar/publicaciones/documentos/hoja_inf/hojainf_3.htm#:~:text=En%20cuanto%20al%20peso%20promedio,planta%20(0%2C94)).

[5] Budynas, R. G., Nisbett, J. K., & Shigley, J. E. (2011). Shigley's mechanical engineering design. New York: McGraw-Hill.