

**UCLV**  
Universidad Central  
"Marta Abreu" de Las Villas



**FIE**  
Facultad de  
Ingeniería Eléctrica

Departamento de Control Automático

## **TRABAJO DE DIPLOMA**

Título del trabajo: Generación y seguimiento de trayectorias típicas para vehículos agrícolas autónomos

Autor del trabajo: Robinson Borges González

Tutores del trabajo: Ing. Alexander Rodríguez Conte

Dr.C. Luis Hernández Santana

Santa Clara, enero 2023  
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

**Atribución- No Comercial- Compartir Igual**



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Departamento de Control Automático**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

### **Generación y seguimiento de trayectorias típicas para vehículos agrícolas autónomos**

**Autor: Robinson Borges González**

**Tutores: Ing. Alexander Rodríguez Conte, Dr.C. Luis  
Hernández Santana**

**Santa Clara**

**2023**

**"Año 65 de la Revolución"**

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Departamento de Control Automático**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

### **Generación y seguimiento de trayectorias típicas para vehículos agrícolas autónomos**

**Autor: Robinson Borges González**

[rborges@uclv.cu](mailto:rborges@uclv.cu)

**Tutor: Alexander Rodríguez Conte**

Profesor instructor,

[arconte@uclv.cu](mailto:arconte@uclv.cu)

**Dr.C. Luis Hernández Santana**

Profesor titular, Departamento de Automática y Sistemas  
Computacionales, Facultad de Ingeniería Eléctrica,

[luishs@uclv.edu.cu](mailto:luishs@uclv.edu.cu)

**Santa Clara**

**2023**

**"Año 65 de la Revolución"**



## **PENSAMIENTO**

*En la agricultura, como en todo, preparar bien ahorra tiempo, desengaños y riesgos.*

*José Martí.*

## **DEDICATORIA**

A mis padres por su dedicación, formación y confianza desde mis primeros pasos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Infinitamente bendecido por la simple razón de su existencia; el mayor cumplido de este largo trayecto sin lugar a dudas se enmarca en el apoyo y empeño de mis padres y mi familia en cada minuto desde el punto de partida. Seguido a ello agradecer a mis amigos por la increíble influencia que tuvieron en disímiles ocasiones, por simplemente estar ahí. Importante mencionar la labor de mi tutor, los profesores y personas que se han mantenido inmersos en esta fase de crecimiento individual. ¡A todos, muchas gracias!

## **RESUMEN**

Las tareas agrícolas de preparación de la tierra, siembra, cultivo y cosecha requieren un cierto nivel de precisión para lograr una mayor eficiencia, productividad y rentabilidad. Esta precisión se puede aumentar si se utilizan pilotos automáticos en los principales exponentes de la maquinaria agrícola representados por tractores, pulverizadores y cosechadoras. En el presente trabajo se propone valorar un algoritmo de generación de rutas para un piloto automático que permita la conducción autónoma de vehículos terrestres para labores agrícolas. Para ello se define el modelo cinemático tomado como referencia para el movimiento y se genera un algoritmo eficaz para trazar trayectorias y caminos que se ajusten a las necesidades requeridas para cada una de las diferentes funciones. Finalmente, se dedica un espacio a presentar los resultados de la simulación en el seguimiento de estas rutas con condiciones iniciales definidas por un operador.

## GLOSARIO DE SIGLAS Y TÉRMINOS

**AFS:** Sistema avanzado de cultivo

**AGV:** Vehículo autónomo terrestre

**AP:** Agricultura de Precisión

**ARP:** Planificación de rutas agrícolas

**DGPS:** Sistema de posicionamiento global diferencial

**DWA:** Enfoque de ventana dinámica

**GDS:** Sensores de dirección geomagnética

**GNSS:** Sistema de navegación global por satélite

**GPS:** Sistemas de posicionamiento global

**ICR:** Centro Instantáneo de Rotación

**IMU:** Unidad de medida inercial

**INS:** Sistemas de navegación inercial

**LOS:** *Line of Sight*

**PP:** *Pure Pursuit*

**RTK:** Cinemática de tiempo real

**SIG:** Sistemas de Información Geográfica

**TCM:** Módulo de compensación de terreno

**VFH:** Histograma de campo vectorial

## TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO .....	i
DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
RESUMEN .....	iv
GLOSARIO DE SIGLAS Y TÉRMINOS.....	v
INTRODUCCIÓN .....	1
Organización del informe .....	6
CAPÍTULO 1.    PLANIFICACIÓN DE RUTAS PARA LABORES AGRÍCOLAS .....	8
1.1    Vehículo autónomo terrestre .....	10
1.1.1    Vehiculos agricolas de alto porte autónomos .....	10
1.2    Sistema de navegación, control y guiado.....	13
1.2.1    Sistema de navegación.....	13
1.2.2    Sistema de control.....	14
1.2.3    Sistema de guiado .....	15
1.3    Modelo cinemático de vehículos terrestres .....	16
1.4    Generación de trayectorias y caminos.....	18
1.4.1    Especificaciones.....	18
1.4.2    Algoritmos .....	19

1.4.3	Trayectorias típicas en la agricultura .....	21
1.5	Consideraciones finales del capítulo .....	22
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.....		23
2.1	Software y hardware empleados .....	23
2.2	Trayectorias y caminos .....	24
2.2.1	Rectas.....	25
2.2.2	Circunferencias y arcos de circunferencias .....	26
2.3	Algoritmo de generación de trayectoria definido.....	31
2.4	Cobertura de área .....	33
2.5	Algoritmo de guiado .....	34
2.6	Descripción del vehículo de alto porte para autopiloto.....	37
2.7	Consideraciones finales del capítulo.....	38
CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DE LAS TRAYECTORIAS DEFINIDAS.....		39
3.1	Definición de las diferentes trayectorias posibles.....	39
3.1.1	Línea .....	40
3.1.2	Circunferencia o arcos de circunferencia .....	41
3.2	Definición de trayectorias combinadas que cubren el área.....	40
3.2.1	Giro en U .....	42
3.2.2	Giro en $\Omega$ .....	43
3.3	Ejemplo para labores en el campo con dimensiones definidas .....	45
3.3.1	Radios de giro superior al radio de curvatura mínima del tractor .....	45
3.3.2	Radios de giro inferior al radio de curvatura mínimo.....	46
3.4	Seguimiento de trayectorias y caminos del tractor .....	47
3.4.1	Trayectorias .....	48

3.4.2 Caminos .....	49
3.5 Consideraciones finales del capítulo .....	51
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	52
Conclusiones .....	52
Recomendaciones .....	52
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	53
ANEXOS .....	60
Anexo I Función de inicio de ruta o coordenada inicial del vehículo .....	60
Anexo II Función para trayectoria o camino rectilíneo .....	60
Anexo III Función para trayectoria o camino circular .....	61
Figura 1.1. Tractor autónomo Case IH [19].....	11
Figura 1.2. Tractor 8320R Jhon Deere [19].....	12
Figura 1.3. Tractor Yanmar [19].....	12
Figura 1.4. Tres grados de libertad del vehículo [61].....	17
Figura 2.1. Trayectoria recta en la superficie plana.....	25
Figura 2.2. Camino curvo en la superficie plana [66]. .....	26
Figura 2.3. Arco circular girado a la izquierda [66]. .....	28
Figura 2.4. Área de trabajo definida. ....	31
Figura 2.5. Algoritmo de trabajo para las trayectorias y caminos. ....	32
Figura 2.6. Distribución real del área efectiva. ....	34
Figura 2.7. Esquema de guiado PP. ....	36
Figura 2.8. Relaciones del tractor. ....	37

Figura 3.1. Trayectorias rectilíneas.....	40
Figura 3.2. Trayectorias curvas o circulares.....	41
Figura 3.3. Trayectorias y caminos con giros tipo U.....	43
Figura 3.4. Trayectorias y caminos con giros tipo $\Omega$ .....	44
Figura 3.5. Ejemplo de trayectorias y caminos en una parcela aplicando giros tipo U.....	46
Figura 3.6. Ejemplo de campo con giros tipo $\Omega$ .....	47
Figura 3.7. Seguimiento de trayectoria con giros tipo U.....	48
Figura 3.8. Seguimiento de trayectoria con giros tipo $\Omega$ .....	49
Figura 3.9. Seguimiento de camino con giros tipo U.....	50
Figura 3.10. Seguimiento de caminos con giros tipo $\Omega$ .....	50

## INTRODUCCIÓN

La agricultura es el conjunto de actividades económicas y técnicas relacionadas con el tratamiento del suelo y el cultivo de la tierra para la producción de alimentos. Su fundamento se basa en la explotación de los recursos que la tierra origina, favorecida por la acción del ser humano: alimentos vegetales como frutas, hortalizas, pastos cultivados, forrajes y cereales; cultivos energéticos, fibras utilizadas por la industria textil, etc. Teniendo en cuenta el notable incremento en el sector poblacional y su condicionamiento directo en la reducción de tierras cultivables, se identifica como un instrumento de desarrollo fundamental en la disminución de la proporción de personas que padecen hambre y viven en la extrema pobreza [1].

Al mirar hacia atrás en la historia de los países más desarrollados, se puede observar que la agricultura ha jugado un papel importante en el proceso completo de enriquecimiento y desarrollo social. El sector agrario de una nación contribuye al proceso de avance económico de la misma. La agricultura influye en el sustento de las demás áreas de la economía, da origen a una fuente de mercado interno, propicia la disminución de la pobreza y sitúa el sector agroexportador como origen de ingresos, por solo citar algunas [2].

Es considerada la columna vertebral del sistema económico, debido a que representa el motor productivo del día a día mundial. Según estadísticas de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y agricultura), en algunos países el 42 % de la población depende directamente de la agricultura [3]. A pesar de ello, esta actividad contiene una serie de problemas entre los cuales encontramos la tendencia de las generaciones más jóvenes a la migración hacia zonas urbanas y la desvinculación de profesionales del campo. Esto ha ocasionado dificultades para mantener la gestión agrícola de forma sostenible.

Si se analizan los pasos agigantados del mundo tecnológico con la llamada agricultura de precisión (AP), lo anteriormente mencionado puede ser mitigado con eficiencia. Es reconocida como alternativa para lograr avances significativos en la producción de alimentos con novedosas tecnologías de la información [4]. Su influencia se basa sobre dos líneas de desarrollo: la agronómica y la ingeniería agrícola. La primera, referida a los trabajos de las décadas del '70 y '80, sobre la utilización de métodos de investigación de campo para conocer mejor la variabilidad de los factores de suelo y plantas [5]. Incluyendo dentro de ello el muestreo y análisis de suelo [6], fotografía del área y análisis de cultivos [7]. La segunda, referida a la evolución de las máquinas agrícolas, utilizando sensores y sistema de posicionamiento global (GPS) para mapeo y aplicación de insumos con dosis variada [8]. Su desarrollo se ha promovido con la incorporación de varias tecnologías de última generación para mejorar la productividad y hacer frente a este desafío de potencial innovador.

A nivel mundial ha surgido un nuevo término denominado “*Ag Tech*” el cual se utiliza para hacer referencia a las nuevas tecnologías emergentes aplicadas al sector agrícola y que tienen un impacto significativo en el mismo [9]. Aparece también la llamada agricultura 4.0 como una posible solución para mejorar el crecimiento agrícola, asegurando las necesidades futuras de la población mundial de una manera justa, resiliente y sostenible [10, 11]. Ambas tendencias abarcan las ramas de desarrollo de Sensores [13, 14], *Big Data* y Software de gestión, Robótica [15], Vehículos autónomos [16], Biotecnologías [15], entre otras. Destacan como principales herramientas de aplicación tecnológica en la agricultura los sistemas de navegación global por satélites, sensores y los sistemas de información geográfica (SIG). Los SIG son softwares compuestos por varios módulos dedicados al almacenamiento de datos de localización geográfica, que posibilitan el análisis de patrones y simulaciones para la toma de decisiones en la producción agrícola [17]. Todo ello se encuentra en constante dinámica de desarrollo para el crecimiento de este sector a nivel mundial.

Se han producido varios modelos exitosos en este campo de investigación. En los últimos años particularmente los robots móviles terrestres se han introducido en la industria agrícola a lo largo del mundo. Muestra de ello son las investigaciones realizadas en países como China [18], Estados Unidos [19], España e India [20], entre otros. En ellas se realizan

importantes innovaciones en el campo de los vehículos autónomos terrestres para la realización de diversas labores en la agricultura como el nivelado del terreno, detección de hierbas, irrigación y dispersión de agroquímicos, que hasta fechas actuales son todavía realizadas con vehículos tripulados.

En el ámbito cubano se han comenzado a implementar novedosos proyectos relacionados con la AP en el país. Además se han desarrollado estudios que demuestran las potencialidades de la AP, tanto en lo económico como en lo social [21]. Cuba avanza en ese sentido en diferentes sectores, y una de las expresiones que lo demuestra es la orientación del presidente para construir Observatorios que den soporte tecnológico e informacional al Plan de Soberanía Alimentaria y Educación Nutricional de Cuba. Señal que manifiesta la consciente necesidad que tiene el país de introducir la gestión de la información y el conocimiento mediante el uso óptimo de las tecnologías en el reto de producir más alimentos de forma sostenible para la nación [22].

Algunos de sus principales avances se aprecian por el trabajo de la empresa CEDAI. Destaca el caso de la automatización de un sistema de fertirriego para casas de cultivo a nivel nacional. Un notable avance surge en la Empresa Pecuaria “Niña Bonita” en Batabanó, donde se realizó un estudio que demuestra la reducción de los costos, al utilizar técnicas de GPS y SIG, en comparación con las técnicas convencionales que se empleaban con anterioridad [23]. También se informan importantes contribuciones del Grupo de Automática Robótica y Percepción (GARP) adscrito al Departamento de Control Automático de la Facultad de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas (UCLV) en relación con aplicaciones agrícolas, en sectores de riego [24], fotogrametría [25], adquisición de imágenes aéreas [26], cosecha [27], procesamiento de la información [28], fertilización [29], entre otros. Especialistas de la UCLV y de la Estación Territorial de Investigaciones de la Caña de Azúcar de Villa Clara (ETICA) desarrollaron un Sistema de Información Geográfico basado en software libre para la aplicación de nuevas técnicas de gestión de parcelas en la provincia de Villa Clara [30]. GEOCUBA-IC, de conjunto con un grupo de centros de investigación y empresas del país lograron un sistema automatizado para el estudio y control de los arrozales como una herramienta geoinformática de ayuda a los directivos, técnicos y productores de arroz, en el manejo de los campos arroceros (prototipo “SAECA”)[31]. Otro avance radica en la creación de la

Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) para la gestión agrícola del macizo cañero del norte de Villa Clara [32], y el uso de drones y otros avances tecnológicos para identificar plagas en campos de caña cubanos. Dicha IDE se encuentra en constante actualización por parte de GEOCUBA y AZCUBA de la provincia Villa Clara.

De forma general la automatización de operaciones específicas ha permitido a los agricultores administrar la producción de cultivos de manera eficiente con menos energía y costos. Uno de los eslabones que destacan son los robots y vehículos autónomos de uso agrícola (tractores, cosechadoras y pulverizadoras) [33, 34]. Estos brindan la oportunidad de desarrollar una nueva gama de equipos agrícolas flexibles basados en máquinas pequeñas e inteligentes que reducen los desechos, mejoran la viabilidad económica, minimizan el impacto ambiental y aumentan la sostenibilidad alimentaria. Sus intervenciones van destinadas a la preparación de terreno, siembra, cultivo, fertilización, fitosanidad y cosecha [35].

Entre sus principales exponentes radican los modelos KUBOTA [36], NEW HOLLAND [37], JOHN DEERE [38] y CASE IH [39]. JOHN DEERE ofrece un elemento de control de dirección llamado *AutoTrac* que utiliza *StarFire* GNSS (Sistema de navegación Global por satélite) como sistema de guía. El mismo ofrece una gama de precisiones de posicionamiento que se pueden seleccionar en función de la aplicación y es compatible con la información de corrección de transmisión satelital o RTK (cinemática de tiempo real). Ello permite una precisión de posicionamiento de 2,5 hasta 3 *cm* en los más recientes. Están equipados con el Módulo de Compensación de Terreno (TCM) que utiliza sensores para compensar el balanceo del vehículo, cabeceo y guiñada para proporcionar un posicionamiento y desplazamiento preciso.

CASE IH y NEW HOLLAND funcionan con varios receptores GNSS y servicios de corrección diferencial incluyendo *Omnistar* y *Trimble (Centerpoint RTX y Punto de rango RTX)*. Case IH ha lanzado recientemente un servicio de corrección RTK patentado (AFS RTK+) en EEUU y Canadá, que utiliza una red de estaciones base RTK instalada por los distribuidores, y las correcciones se transmiten a través de la red celular. Al igual que JOHN DEERE; NEW HOLLAND y CASE IH poseen una corrección o compensación, en este caso referida también a la lluvia para corregir la medición de la posición del suelo. El

sistema proporciona una integración directa con el mecanismo electrohidráulico para el control de la dirección [40].

En este contexto Cuba solo muestra insignificantes alcances. Específicamente en la agricultura cañera aparecen maquinarias con Sistema Avanzado de Cultivo (AFS, por sus siglas en inglés), tales como cosechadoras de la serie A7000, A8000 y A8800, pulverizadoras Patriot 250 y tractores Maxumm 150, pertenecientes a la marca Case IH. Estas maquinarias han sido objeto de estudio para determinar varios aspectos de su explotación. Tales son los casos del análisis de los computadores de abordo, los sistemas de posicionamiento, los mecanismos de actuación y los sistemas de sensores.

Los tractores y las máquinas agrícolas autopropulsadas que se desplazan por los campos son tradicionalmente guiados por un conductor humano. Este diseña la estrategia de operación en función del tipo de tarea, modelo y especificaciones de la máquina, además de su propia experiencia. La estrategia afecta directamente la eficiencia del campo. No obstante, existen condiciones en las que la planificación humana puede conducir a una baja eficiencia de campo, por lo tanto, es necesario utilizar métodos algorítmicos de planificación basados en modelos matemáticos avanzados para generar rutas para la maquinaria de campo automatizada [41].

Atendiendo a las bondades de estas plataformas y al desarrollo que se puede lograr con su uso, es de notoria significación para la gestión agrícola en el país la necesidad de diseñar un algoritmo para la generación de trayectorias o caminos e implementarlo de manera directa en la maquinaria agrícola con que se cuenta. Su alcance aparecerá reflejado en el diseño y puesta en marcha de un autopiloto de facturación nacional para ser utilizado en labores agrícolas. Evidenciando la autonomía tecnológica y económica de dicho desarrollo, y su inmensa gama de prestaciones para un acercamiento al mundo agrícola desarrollado.

**Problema científico:**

A pesar de los estudios realizados con anterioridad en relación con la maquinaria agrícola y los sistemas de guiado y control para la navegación autónoma; no se cuenta con un algoritmo que permita la planificación de rutas de labores agrícolas que aporten eficiencia a las mismas. Por tanto, se establece como problema científico de esta investigación la necesidad de obtener un algoritmo eficaz para la generación de trayectorias y caminos que

permitan la planificación de rutas para labores agrícolas con vehículos terrestres en el ámbito cubano.

**Hipótesis:**

Teniendo en cuenta los estudios realizados en Cuba en relación a la gestión agraria de manera informatizada, el desarrollo de un algoritmo de generación de trayectoria para labores agrícolas contribuirá al diseño de un piloto automático para vehículos agrícolas terrestres, lo cual implica un mayor grado de automatización, precisión y eficiencia en las tareas de campo.

**Objetivo general:**

- Proponer un algoritmo de generación de rutas agrícolas (trayectorias y caminos) para la conducción autónoma de vehículos agrícolas terrestres.

**Objetivos específicos:**

- Definir los aspectos teóricos relacionados con la navegación autónoma y la planificación de trayectorias y caminos.
- Identificar las características de las rutas típicas para labores agrícolas.
- Desarrollar un algoritmo que genere rutas para labores agrícolas en forma de trayectorias y caminos.
- Evaluar mediante simulación las prestaciones de dicho algoritmo en la conducción autónoma de vehículos agrícolas de alto porte.

**Organización del informe**

La organización del informe de esta investigación tendrá la siguiente estructura:

A. Introducción

B. Capítulos

- a. CAPITULO I: En este capítulo se caracterizan algunos elementos fundamentales de los vehículos agrícolas autónomos que son de vital importancia para el trabajo en esta rama de la robótica móvil.

- 
- b. CAPITULO II: En este capítulo se expone de forma sintetizada la manera de usar el software seleccionado como herramienta para la generación y el seguimiento de las trayectorias típicas deseadas por el usuario.
  - c. CAPITULO III: Este capítulo se dedica a exponer mediante ejemplos de guía los resultados de la simulación realizada en la investigación.
  - d. Conclusiones
  - C. Recomendaciones
  - D. Referencias Bibliográficas y/o Bibliografía
  - E. Anexos

## **CAPÍTULO 1. PLANIFICACIÓN DE RUTAS PARA LABORES AGRÍCOLAS**

Las herramientas de automatización inteligente promueven la excelencia en las operaciones y fomentan las configuraciones estructurales en las redes de suministro industrial. La mecanización y la automatización en la agricultura se han traducido en un aumento de la productividad tanto en términos de calidad como de cantidad. Para el sector agrícola en particular, la mayoría de los esfuerzos de investigación relacionados se centran en la implementación directa y prueba de sistemas físicos reales en operaciones agrícolas [33]. La AP emplea una metodología similar a la usada frecuentemente por los seres vivos y que, a su vez, inspira el funcionamiento de los sistemas automáticos de control industrial: medir, procesar la información, generar señales de control y actuar, reiterando este proceso de manera continua, para así conseguir que los resultados se acerquen a los objetivos [26].

El principal desafío surge por factores inherentes que incluyen características y particularidades geográficas, geométricas y geológicas de los campos [35]. Inferen además condiciones climáticas y meteorológicas, encuentros con objetos aleatorios y obstáculos que comprenden un nivel adicional de retos [36]. Todas estas limitantes requieren de sistemas automatizados con programación y control dinámicos promovidos por inteligencia, que permitan evaluar decisiones de navegación alternativas utilizando información sensorial en tiempo real sobre el estado de los campos y cultivos [37].

La introducción de estas tecnologías permite medir la variabilidad tanto temporal como espacial y hacer un seguimiento a las zonas de cultivo donde la producción no es óptima para lograr una buena gerencia en la producción de grandes extensiones de tierra, registrar un esquema real de las mismas y un uso más adecuado de insumos. Contribuye a una mejor administración de las cosechas y posibilita un análisis e interpretación de la información

---

suministrada en la recolección de datos para la toma de decisiones de los procesos a seguir. Permite monitorizar la cosecha con una precisión muy alta, detectar errores o deficiencias en la irrigación de la tierra, lo que contribuye a un significativo ahorro de agua y contar con información meteorológica de la zona de cultivo. Además, facilita en gran medida las decisiones con respecto a los tiempos de recolección del cultivo, posibilita conocer con exactitud su desarrollo y aumenta la rentabilidad de la producción [19].

Existen también algunos requerimientos que habría que tener en cuenta si se pretenden desarrollar este tipo de innovaciones en Cuba. La implementación de esta técnica implica un profundo cambio en los procesos de manejo de determinadas operaciones, lo que supondría tener que realizar la correcta capacitación del trabajador agrícola. Es necesario que la integración de las nuevas tecnologías se realice en etapas consecutivas y de forma progresiva, dada la diferente naturaleza de los beneficios económicos resultantes se hace difícil la estimación de estos de una única manera y complejiza la evaluación de la evolución de los costes y los beneficios a medio y largo plazo [24].

Un sinnúmero de tareas en la AP implica desplazamientos y movimientos notablemente grandes por parte de los desarrolladores del trabajo en áreas extensas de terreno y varias veces en zonas peligrosas. Aparejado a esta índole aparece la navegación autónoma como desenvolvimiento preciso para dichas actividades [38].

La utilización y el tiempo necesarios para administrar y realizar operaciones de campo en áreas cada vez mayores de cultivos se han vuelto un aspecto muy importante en las labores agrícolas. Motivado por las exigencias de las operaciones sostenibles y la reducción del uso de los contaminantes como dióxido de carbono, requiere la optimización de las trayectorias de los vehículos y el uso posterior por parte de los mismos en la reducción de la distancia recorrida [42]. Las tareas optimizadas involucran la planificación de rutas agrícolas (ARP, por sus siglas en inglés), que se utilizan para gestionar el movimiento de máquinas en relación con sus tareas de campo a las otras ubicaciones de este sector. Se pueden derivar una serie de beneficios de optimizar el uso de humanos y máquinas, como una reducción de tiempo y, por lo tanto, un aumento de las ganancias. Además, se reduce el costo de la maquinaria agrícola, se necesita contratar menos trabajadores temporales y se requiere menos tiempo para las operaciones de campo. Evita la erosión de los suelos,

desertificación, contaminación, contribuyendo a un desarrollo medioambiental de alto contenido [43].

## **1.1 Vehículo autónomo terrestre**

Durante muchos años la navegación autónoma aérea fue el método más desglosado por investigadores y desarrolladores dentro de la AP producto de la popularidad generada alrededor de los drones [44]. En la actualidad la navegación autónoma terrestre ha tomado gran auge desde perspectivas novedosas [45]. Dicho sector de investigación posee un grado mayor de complejidad debido a las adversidades que presentan los vehículos para desplazarse sobre terrenos agrícolas. Tales son los casos de obstáculos, desniveles, deslizamientos, huecos, variación de tierras, por solo citar algunos. Estas dificultades generan un campo vasto de investigación, donde los expertos han probado varias técnicas de navegación y posicionamiento [39, 40], de guiado [46, 47] y evasión de obstáculos [48], de control lineal [49] y no lineal [41], todo ello basado en el modelado cinemático y dinámico de los vehículos.

En correspondencia con el rápido avance en las tecnologías de comunicación, sensores e informática, se ha proporcionado un progreso importante en el campo de los sistemas de guía de vehículos autónomos agrícolas. La innovación sobre estos sistemas radica en el diseño adecuado para la detección, el mapeo, la localización, la planificación de rutas y la evasión de obstáculos [42].

El algoritmo de navegación a implementar debe utilizar información sensorial para determinar una trayectoria adecuada, tomar una decisión acertada y moverse correctamente dentro de su entorno sin colisión para el cumplimiento de la tarea asignada. Teniendo en cuenta dicha metodología de acción, los sistemas de navegación autónoma para vehículos agrícolas constan de sensores, métodos computacionales y estrategias de control de navegación [50].

### **1.1.1 Vehículos agrícolas de alto porte autónomos**

La idea de automatizar funciones en máquinas agrícolas surge a partir de los años 80, cuando comienza el concepto de agricultura de precisión [51]. En la actualidad los sistemas autónomos son de gran utilidad porque simplifican las tareas diarias del ser humano.

Empresas reconocidas en la producción de vehículos agrícolas de alto porte como John Deere, Case IH, Yanmar, New Holland, entre otros, han desarrollado esta tecnología para modernizar la agricultura o tener el concepto para llevarlo a cabo. En trabajos recientes se menciona que Case IH en *Farm Progress Show* de 2016, presentó su concepto de tractor autónomo, el cual puede ser operado remotamente y no tiene una cabina de operador (Figura 1.1). El modelo se basa en la línea Case IH Magnum y se puede manipular desde una *tablet*. Usando sensores y cámaras de video a bordo, el tractor puede identificar obstáculos y esquivarlos fácilmente, además de la autonomía sistema, estableciendo la ruta más eficiente según el terreno y los obstáculos.



Figura 1.1. Tractor autónomo Case IH [19].

La empresa John Deere en 2017 presentó su tractor autónomo, el modelo 8320R (Figura 1.2), que cuenta con un modelo autónomo y un sistema denominado “*AutoTrac Controller*”, el cual permite la autonomía del tractor e incluso se puede adaptar a tractores de otras marcas con el kit autónomo *Plug and Play*. Este equipo dispone de un escáner láser que permite detectar obstáculos hasta una distancia máxima de 100 metros. Por otro lado, la empresa New Holland diseñó el NHDrive que puede trabajar en diferentes labores agrícolas diurnas y nocturnas. El trabajo puede ser supervisado por una *Tablet* remota o desde la cabina del tractor. También

tiene completa autonomía, sin que exista supervisión presencial por parte de un operador.



Figura 1.2. Tractor 8320R Jhon Deere [19].

Por otro lado, Yanmar *Robot Tractor* (Figura 1.3) funciona con tecnología *SmartPilot* (es la marca de líneas de productos que incorporan la tecnología de conducción autónoma de Yanmar), que utiliza datos de posicionamiento de precisión y conducción autónoma robótica en su desarrollo.



Figura 1.3. Tractor Yanmar [19].

Los tractores autónomos representan la evolución de aquellas ideas sobre la automatización de procesos en el sector agrícola. Las ventajas de trabajar con este equipo se reflejan directamente en la producción, tanto en precisión como en tiempo. Algunos pueden operarse manualmente, lo que permite que, durante el día, una persona opere el tractor y por la noche para seguir las actividades de producción se pueda utilizar de forma autónoma.

## **1.2 Sistema de navegación, control y guiado**

Los diferentes modelos de conducción autónoma integran sensores, actuadores, controladores y software destinados a la navegación precisa del vehículo. En este sentido se presentan los sistemas de navegación, control y guiado.

### **1.2.1 Sistema de navegación**

La navegación es la ciencia de dirigir determinando su posición/actitud, rumbo y distancia recorrida. En algunos casos también se determinan la velocidad y la aceleración. Esto generalmente se hace mediante el uso de un sistema global de navegación por satélite (GNSS) combinado con sensores de movimiento como acelerómetros y giroscopios.

### **GPS**

La combinación del GPS con los sistemas de información geográfica (SIG) ha facilitado el desarrollo y aplicación de la AP o de localización específica. Esta tecnología permite agrupar datos obtenidos en tiempo real con información sobre posicionamiento, que contribuye al análisis y el manejo eficaz de gran cantidad de datos geoespaciales. Las aplicaciones en la agricultura de precisión basadas en el GPS suelen ser muy utilizadas en la planificación de cultivos, muestreo de los suelos, orientación de tractores, el levantamiento de mapas topográficos y mapas de rendimiento [46].

Estos sistemas no dependen de la apariencia visual del cultivo, no se ven afectados negativamente por la densidad de malezas, las sombras, las plantas que faltan u otras condiciones que degradan el rendimiento de los sistemas de guía de visión artificial [47]. Destacan dos modos de rendimiento del GPS: el de receptor único que recopila la información de tiempo y el tiempo es procesado en posición, y modo diferencial (DGPS) usando dos receptores de los cuales un receptor está montado en una posición estacionaria y el otro está en la máquina/vehículo [48].

## **Odómetros**

La ubicación es básica para la navegación, varias técnicas han sido descritas para estimar la posición y orientación de un vehículo. Estas incluyen la odometría que no es más que la estimación de posición a partir de puntos de referencia conocidos y localización respecto al entorno global [49, 50]. Es el método de navegación más utilizado para el posicionamiento de robots y vehículos móviles porque proporciona una buena precisión a corto plazo, es económico y permite tasas de muestreo muy altas [51].

## **IMU Unidad de medida Inercial**

Una Unidad de Medida Inercial (IMU) es un dispositivo electrónico que puede medir la fuerza, la velocidad angular y el campo magnético de un cuerpo. Los dispositivos IMU generalmente constan de tres acelerómetros, giroscopios y magnetómetros, uno para cada uno de los ejes ortogonales X, Y y Z. Las IMU son un dispositivo de uso común para el control y guiado de vehículos autónomos, a menudo implementados en sistemas de navegación inercial (INS), debido a que un procesamiento de sus datos permite calcular la velocidad lineal, la actitud y posiciones angulares relativas a un marco de referencia global. Estos dispositivos poseen algunas limitantes ya que no pueden proporcionar información sobre la ubicación real de los vehículos, solo su movimiento, por lo que esto debe ser determinado por alguna otra fuente como GPS. Otra desventaja respecto a la navegación radica en la tendencia a sufrir un error acumulado que puede llevar a la aparición de la deriva, problema que se soluciona implementando un sistema de seguimiento posicional (GPS) que puede continuamente corregir dichos errores [52, 53].

## **Acelerómetros**

Los acelerómetros miden la aceleración con respecto a un marco de referencia inercial incluyendo la aceleración gravitacional y rotacional, así como aceleración lineal [54].

### **1.2.2 Sistema de control**

Específicamente el control de movimiento es la acción de determinar las fuerzas y los momentos de control necesarios que debe proporcionar el vehículo para satisfacer un determinado objetivo de control. Este objetivo deseado generalmente se ve en conjunto con el sistema de guía. Ejemplos de objetivos de control son la energía mínima, la regulación

del punto de ajuste, el seguimiento de la trayectoria y el control de la maniobra. La construcción del algoritmo referente implica el diseño de leyes de control de retroalimentación y avance. Las salidas del sistema de navegación, posición, velocidad y aceleración se utilizan para el control de retroalimentación, mientras que el de avance se implementa utilizando señales disponibles en el sistema de guía y otros sensores externos [43].

Entre los sensores más empleados destacan: los basados en láser y ultrasonido, los de visión artificial y los inerciales [37]. También sobresalen el Sistema de Posicionamiento Global, los sensores de dirección geomagnética (GDS) y los dispositivos para la corrección cinemática en tiempo real, entre otros [52].

La implementación del algoritmo de control implica el diseño de controles realimentados y leyes de control anticipatorio. Destacan los controladores PID convencionales que por lo general emplean un modelo linealizado para la dinámica y están sintonizados correctamente para estabilizar el sistema. Como siempre sucede con sistemas linealizados, el enfoque podría fallar para ángulos de paso grandes o variables en el tiempo. Generalmente son utilizados para los llamados controles de profundidad. Estos van referidos a lograr la regulación del punto de ajuste, lo cual constituye un paso importante hacia un escenario general de seguimiento de caminos donde la tarea es converger a cualquier línea recta en el espacio dado. El uso de estos controladores ha reportado un desempeño satisfactorio, pues teniendo en cuenta su simplicidad, se destaca como un enfoque atractivo para implementación [53].

### **1.2.3 Sistema de guiado**

El guiado es la acción o el sistema que calcula continuamente la posición, la velocidad y la aceleración de referencia (deseadas) del vehículo que utilizará el sistema de control de movimiento. Estos datos generalmente se proporcionan al operador humano y al sistema de navegación. Los componentes básicos de un sistema de guía son sensores de movimiento, datos externos como datos meteorológicos y una computadora. La computadora recopila y procesa la información y luego envía los resultados al sistema de control de movimiento. En muchos casos, se utilizan técnicas avanzadas de optimización para calcular la trayectoria o ruta óptima que deben seguir. Esto podría incluir características sofisticadas

como optimización de combustible, tiempo mínimo de navegación, enrutamiento meteorológico, prevención de colisiones, control de formación y sincronización [54].

Las soluciones de guiado para el escenario *path following* pueden ser separadas en dos grupos: geométricas y de control. Las soluciones geométricas, mayormente utilizadas en entornos agrícolas, se basan en escoger un punto virtual en el camino y generar una acción de control con el fin de dirigir el vehículo a ese punto virtual. Destacan entre sus principales exponentes el denominado línea de visión (*Line of Sight, LOS*) y *Pure Pursuit* (PP) [55]. El primero referente a una de las estrategias más utilizadas cuando se desea realizar el seguimiento de un camino previamente definido, existiendo variantes para el seguimiento de caminos rectos y curvos. Por su parte el PP rastrea una ruta de referencia utilizando solo la geometría de la cinemática del vehículo y la ruta en cuestión [56].

### 1.3 Modelo cinemático de vehículos terrestres

La estructura cinemática de un vehículo terrestre es posible apreciarla como un conjunto de cadenas cinemáticas cerradas, tantas como ruedas en contacto con el suelo. De este modo la interacción rueda-suelo, equivale desde el punto de vista cinemático a una articulación planar con tres grados de libertad, donde uno de ellos, generalmente sin controlar, representa los deslizamientos laterales. Tales hechos dificultan la construcción del modelo y precisamente, cobra gran importancia la perfecta sincronización de la velocidad de las ruedas para alcanzar una localización determinada. Esto puede asociarse a que el avance a lo largo de un grado de libertad cartesiano, se consigue gracias a la mezcla de las aportaciones de las velocidades lineales de las ruedas al punto de guía de dicho vehículo [57].

Esta razón de complejidad ha llevado a que muchos autores emplean soluciones cinemáticas particularizadas para cada configuración específica de vehículos. Podemos destacar la disposición de Ackerman [35, 58] y los modelos síncronos [59], o el modelo de la bicicleta [60], en el cual se sientan las bases del desarrollo.

La cinemática de manera general se enfoca en el estudio del movimiento del vehículo en función de su geometría (Figura 1.4). Se pueden destacar disímiles aplicaciones inmediatas, teniendo en cuenta la posibilidad de utilizarlo como modelo de partida para el diseño del



- $\delta(t)$  es el ángulo de dirección del vehículo en el tiempo  $t$  y es igual a la curvatura  $k(t)$  donde el radio de curvatura  $r$  se define por la interconexión de dos ejes en el Centro Instantáneo de Rotación (ICR) y  $L$  es la distancia entre ejes.

#### 1.4 Generación de trayectorias y caminos

La planificación de rutas locales se utiliza como guía para el recorrido de los vehículos autónomos. Estos pueden reaccionar a las influencias ambientales durante la conducción [59], ya que están diseñados para entornos dinámicos complejos y pueden utilizar métodos que se generalicen a situaciones impredecibles y razonen de manera oportuna para alcanzar la confiabilidad a nivel humano y reaccionar con seguridad ante todo tipo de situaciones [62]. Pueden generarse de dos modos fundamentales: *online* u *offline* [63].

**Trayectoria:** Es una curva temporal para cada una de las coordenadas sobre las que se debe realizar un control del equipamiento implementado.

$$x(t), y(t), \psi(t)$$

**Camino:** Es una curva definida en el espacio cartesiano o de configuración que debe seguir el vehículo. No se tiene en cuenta el factor tiempo.

$$C = f(x, y, \psi)$$

Algunos investigadores han desarrollado la función de planificación de trayectorias y giros para tractores robóticos [64, 65]. Desde el punto de vista de la agricultura de precisión, se busca establecer un camino de operación más corto considerado óptimo, donde se reduzcan los giros bruscos y se responda a las necesidades requeridas [66].

##### 1.4.1 Especificaciones

Teniendo en cuenta la escala y el rango de cobertura del camino existen dos esquemas de planificación de algoritmos: globales y locales [67]. El planificador de ruta global se basa en información de navegación general (generalmente obtenida del GPS) para un vehículo que pretende viajar desde su configuración inicial hasta una configuración final a través de los múltiples puntos de paso [68]. El planificador global también utiliza la topología del entorno general conocido o un mapa de cuadrícula [69], pero no dispone de datos locales específicos para un vehículo de conducción, como el tamaño real del vehículo, los topes de

velocidad, los carriles, los límites de la carretera y los obstáculos. Por el contrario, el planificador de ruta local emplea información de escala física recopilada por los sensores a bordo y se enfoca en el rango de distancia corta desde la configuración actual del vehículo hasta la configuración de destino. Este tipo suele aplicarse comúnmente para cambiar de carril o evitar obstáculos [70].

### 1.4.2 Algoritmos

Existen múltiples objetivos para la planificación de caminos locales. Un ejemplo de tal objetivo es encontrar el camino factible más corto y operar en el menor tiempo posible como se usa en el enfoque de ventana dinámica [3]. Debe tenerse en cuenta que la planificación de caminos locales asegure que la carga del vehículo no se dañe ni se desordene y por otro lado el desgaste del sistema de propulsión debe mantenerse en niveles bajos [71].

Dos algoritmos generalmente utilizados para este propósito son el histograma de campo vectorial [72] y el enfoque de ventana dinámica [73]. Ambos trabajan con un origen común: leen los sensores del AGV y los resultados se analizan para mostrar obstáculos o espacio libre. A partir de esta información de localización de obstáculos, se calcula una orden de control para que el AGV no colisione con un obstáculo y prometa ser la mejor opción para acudir a la posición requerida. El enfoque de ventana dinámica (DWA) es un algoritmo de planificación de rutas locales que incluye limitaciones dinámicas del AGV [45]. Primero obtiene una ventana de muestreo de la velocidad basado en el modelo cinemático y la velocidad actual del vehículo, luego genera la trayectoria para cada conjunto de velocidad dentro de la ventana. Finalmente evalúa estas trayectorias por la función de evaluación para encontrar la velocidad óptima en el siguiente momento. De acuerdo con la información de la posición del sensor y del vehículo, las funciones de evaluación a menudo consideran tres factores de velocidad: ruta, ángulo y distancia. Este método puede directamente obtener la velocidad lineal y angular deseada teniendo en cuenta el modelo de cinemática empleado, que hace que la trayectoria sea más suave y adecuada para el movimiento del mismo. Sin embargo, hay que resaltar que sigue siendo no ideal en dos aspectos. En primer lugar, la evaluación de funciones es inadecuada para hacer frente a algunas situaciones especiales donde el vehículo se encuentra muy cerca del punto

objetivo o se enfrenta la distribución espiral de obstáculos [74]. En segundo lugar, en la planificación de rutas el grado de demanda para cada función de evaluación es variable en el tiempo. Por otra parte, el histograma de campo vectorial (VFH), primero comprime los datos del mapa de su entorno inmediato y luego encuentra una dirección de conducción basada en la representación del mapa comprimido [44].

Métodos más comunes para generar caminos deseados en aplicaciones de vehículos es el uso de curvas de *Dubins* o *Reeds and Shepp*, las cuales trazan un camino que consiste en tramos de línea recta y arcos circulares [75, 76]. Un problema asociado a esta trayectoria es la discontinuidad en la curvatura en las uniones de dichos segmentos. En el caso de vehículos dirigidos, la curvatura está relacionada con la orientación de las ruedas delanteras.

Para este tipo de caso en específico aparecen los arcos de *clotoide* como curvas de transición entre segmentos de diferente curvatura. Estos se definen por la propiedad de que su curvatura es lineal dependiendo de manera directa de la longitud del arco generado. Se pueden usar para combinar segmentos de trayectoria de diferente curvatura fija, como arcos circulares y rectas, con un cambio lineal en la curvatura durante la transición [77]. En el caso de un vehículo similar a un automóvil no holonómico, el cual es conducido por la activación de la aceleración/freno en las ruedas traseras y/o delanteras, mientras que es dirigido siempre por las ruedas delanteras, el movimiento se presenta mediante una cinemática no holonómica. Se trabaja con ecuaciones donde se supone que no existe contacto o deslizamiento rodante en la superficie del suelo con neumáticos y, por lo tanto, el ángulo de dirección corresponde a la curvatura en el centro de movimiento del vehículo cuando su modelado se realiza como un punto del centro de movimiento.

Para describir la trayectoria del vehículo en el tiempo considerado, se requieren los datos del ángulo de dirección en todo momento con posición inicial dada. Sin embargo, en el problema de generación de caminos para conectar la posición inicial a la final, los datos de la dirección deben encontrarse solo de dos posiciones finales implementando un algoritmo computacional. Un método posible para obtener una solución es adoptar un procedimiento de prueba y error o iterativo con la variación y las restricciones de los parámetros apropiados para garantizar la convergencia de la solución. La clotoide de orden (o espiral

de Euler) se usa como un componente básico en la ruta. Cada segmento es compuesto con otra clotoide para generar la solución del camino bajo la restricción de usar el número mínimo de segmentos de clotoide. Un camino definido con ellas es eficiente para analizar y controlar un vehículo similar a un automóvil. De hecho, este tipo de ruta proporciona información directa sobre el progreso de la curvatura a lo largo de la longitud y proporciona, por lo tanto, información de maniobra casi inmediata al sistema de control de vehículos [78].

### 1.4.3 Trayectorias típicas en la agricultura

En sentido general las labores agrícolas más comunes son preparación de tierras, siembra, cultivo (incluye la eliminación de plagas y malezas) y la cosecha. En cada una de ellas se requiere que la precisión sea tal que se utilice el menor gasto de insumos y siga las líneas de guía del terreno. Esto provoca que el suelo se conserve y evita la desertificación, así como la degradación de los mismos.

**Preparación de tierras:** Se realiza fundamentalmente con tractores que utilizan como herramientas de trabajo arados, subsoladores, entre otras. Son muy empleados en esta labor los giros en U y  $\Omega$ , pues brindan gran facilidad de incorporación de un carril o senda a la siguiente [79, 80].

**Siembra:** Desde el mismo momento que comienza el surcado para la posterior plantación se utiliza el guiado automático con estación RTK. Esto posibilita que las labores posteriores, además de los medios de distribución de fertilizantes, productos orgánicos y herbicidas sean incorporados con la disminución de posibles errores humanos al efectuar su aplicación. Se utilizan para esta labor de igual modo los tractores y además las llamadas sembradoras que responden a trayectorias circulares o combinaciones de rectas y arcos de circunferencia [8].

**Cosecha:** Dicha actividad basada en la recolección de los cultivos o productos logrados a través de la siembra presenta como principales exponentes para su desarrollo: cosechadoras, segadoras, rastrillos hileradores, empacadoras y remolques autocargadores por solo citar algunos. En su utilización aparecen reflejadas todas las trayectorias anteriormente mencionadas [81].

### 1.5 Consideraciones finales del capítulo

- Sobresalen entre los principales exponentes de los vehículos agrícolas autónomos Case IH, Jhon Deere, NEW HOLLAND y Yanmar.
- Todo este equipamiento de alta gama de automatización presenta en su estructura general un sistema de guiado, navegación y control que rigen su comportamiento.
- Los algoritmos de generación de trayectorias y caminos utilizan de forma general la combinación de tramos rectos y arcos de circunferencias, así como arcos de *clotoide*.
- En las labores de preparación de la tierra, siembra y cosecha son mayormente usadas las trayectorias circulares, en U y omega respectivamente para una mayor eficiencia y rentabilidad.

## CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se plantean los materiales y métodos que serán utilizados en el trabajo. Se realiza una breve descripción del control cinemático, basado en el seguimiento de trayectorias, caminos y líneas. Se analizan cada uno de los métodos de generación y su modelo de implementación en MATLAB, así como los parámetros para evaluar la exactitud de los mismos.

Para ello se introducirá inicialmente la idea de cómo generar trayectorias tanto rectas como curvas basadas en sus respectivas expresiones matemáticas. Posteriormente se define el algoritmo diseñado para la combinatoria de las mismas con sus especificaciones pertinentes. Se trabaja sobre la base de un vehículo al alcance del desarrollo agrícola existente y se detallan cada una de sus características, así como su correspondiente algoritmo de guiado para la implementación en la tarea.

### 2.1 Software y hardware empleados

El software utilizado fue el MATLAB R2018b (9.5.0.944444) debido a todas sus aplicaciones. El poderoso *Simulink* es un entorno de diagrama de bloques para simulación multidominio basado en modelos que admite diseño a nivel de sistema, simulación, generación automática de código, prueba y verificación continuas de sistemas integrados. Proporciona un editor gráfico, bibliotecas de bloques personalizables y solucionadores para modelar y simular sistemas dinámicos. Está integrado con MATLAB®, lo que le permite incorporar algoritmos de MATLAB en modelos y exportar los resultados de la simulación para su posterior análisis. Este software en sentido general extiende la capacidad de implementación de funciones matemáticas para un trabajo simplificado y preciso.

Se utilizó una computadora de escritorio con las siguientes prestaciones:

- Procesador (CPU): Intel(R) Core (TM) i7-8750H CPU @ 2.20GHz 2.21 GHz
- Tarjeta Gráfica: NVIDIA® HD GTX 1660Ti
- RAM: 8.00 GB (7.80 GB usable)
- Almacenamiento: 1TB SSD

## 2.2 Trayectorias y caminos

El concepto de planificación de rutas consiste en encontrar una ruta segura capaz de guiar un vehículo desde una posición inicial a una final pasando por puntos intermedios de forma que se cumplan una serie de requisitos impuestos. Se denomina ruta segura a un camino continuo y libre de obstáculos [82].

La cinemática asociada a los robots móviles parte de la determinación de las acciones del vehículo necesarias para llevarlo desde su posición actual a una posición final deseada, considerando las velocidades y la orientación. El seguimiento de ruta es una opción para el control de la trayectoria del mismo. La otra opción sería el seguimiento de trayectoria, donde la ruta de referencia contiene información en función del tiempo.

El camino se puede seguir a diferentes perfiles de velocidad, mientras que en el seguimiento de trayectoria el perfil de velocidad no se puede adaptar [83].

La ruta de referencia se especifica como una ruta parametrizada en función de la longitud del arco  $x^*$  en dos dimensiones. Por cuestiones de simplicidad, se omite el superíndice \* que indica la ruta de referencia para facilitar el desarrollo de su expresión:

$$s(x) = \begin{pmatrix} s_1(x) \\ s_2(x) \\ 0 \end{pmatrix}; x \in [0, x_E] \quad (4)$$

Donde:

- $s_1(x)$  coordenada longitudinal en marco inercial cartesiano.
- $s_2(x)$  coordenada lateral en marco inercial cartesiano.
- $x \in [0, x_E]$  longitud del arco o línea recorrida.
- $x_E$  longitud total del camino.

Para el seguimiento de trayectorias es de notable importancia la longitud del arco  $x$  parametrizado en el tiempo  $t$ :

$$x = x(t) \in [0, x_E] \quad (5)$$

El rango de la longitud del arco parte desde 0 o inicio del camino y se extiende hasta  $x_E$  que representa la longitud final del mismo. Mientras tanto la primera derivada de las componentes longitudinal y lateral determinan la tangente del ángulo de orientación del vehículo.

$$\tan(\psi) = \frac{s_2'}{s_1'} \quad (6)$$

A continuación, se explican por separado cada uno de los elementos básicos destinados a la generación de líneas tanto rectas como curvas para la creación de rutas deseadas.

### 2.2.1 Rectas

Las trayectorias rectas (figura 2.1) van definidas por las coordenadas de posición a donde se desea llegar y la orientación inicial que presenta el vehículo ( $\psi$ ). La ecuación 7 define las coordenadas deseadas en las componentes horizontal y vertical sobre el área de trabajo.

$$s(x) = \begin{pmatrix} s_1(x) \\ s_2(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{1_0} + xe * \cos(\psi) \\ s_{2_0} + xe * \sin(\psi) \end{pmatrix} \quad (7)$$

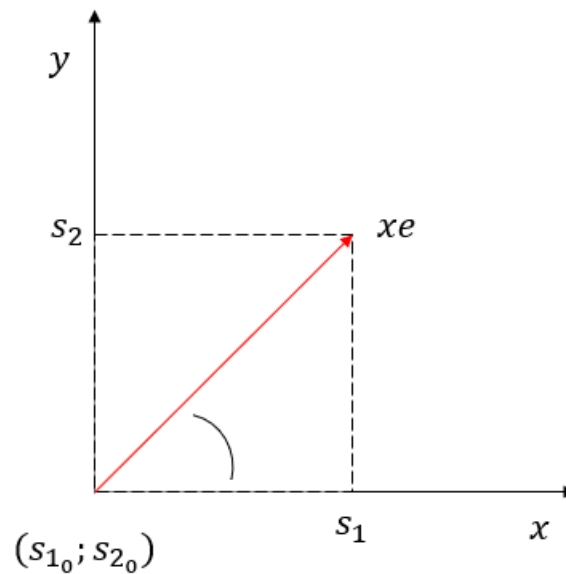


Figura 2.1. Trayectoria recta en la superficie plana.

### 2.2.2 Circunferencias y arcos de circunferencias

Vienen dadas por arcos de circunferencia o segmentos circulares como se aprecia en la figura 2.2:

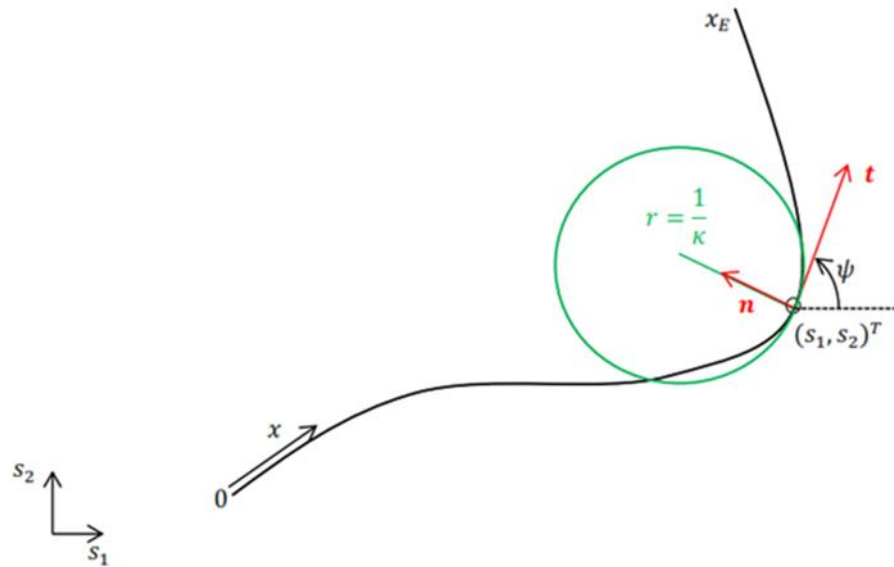


Figura 2.2. Camino curvo en la superficie plana [66].

El rango de la longitud del arco parte desde 0 (inicio del camino) a  $x_E$  (longitud final del camino).

Donde:

- $s_1(x)$  coordenada longitudinal en marco inercial cartesiano.
- $s_2(x)$  coordenada lateral en marco inercial cartesiano.
- $x \in [0, x_E]$  longitud del arco o línea recorrida.
- $x_E$  longitud total del camino.
- $r$  define el radio de curvatura.
- $n$  representa el vector normal asociado al giro.
- $t$  vector tangencial asociado al arco.

El círculo con radio  $r(x)$  se aproxima al camino localmente en cada punto o *waypoint* del mismo  $(x) = (s_1(x), s_2(x))^T$ . El vector tangencial  $t(x)$  del camino también es el vector tangencial de este círculo y el vector normal  $n(x)$  apunta hacia el centro como se aprecia.

De la definición de camino de referencia se derivan las siguientes cantidades de ruta necesaria para el control de su seguimiento. Las fórmulas dadas son ampliamente conocidas como fórmulas de Frenet-Serret.

La longitud de arco infinitesimal viene dada por:

$$dx = \sqrt{ds_1^2 + ds_2^2} \quad (8)$$

Esta depende de la distancia entre dos valores cercanos definidos por cada instante de tiempo. Mientras tanto el vector tangencial es la derivada de cada una de las componentes de posición:

$$\mathbf{t}(x) = \frac{ds}{dx} = \begin{pmatrix} \frac{ds_1}{dx} \\ \frac{ds_2}{dx} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_1' \\ s_2' \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

La longitud de  $\mathbf{t}$  o valor modular referente es igual a uno por definición:

$$|\mathbf{t}(x)| = \sqrt{\left(\frac{ds_1}{dx}\right)^2 + \left(\frac{ds_2}{dx}\right)^2} = \frac{1}{dx} \sqrt{ds_1^2 + ds_2^2} = 1 \quad (10)$$

Para los vectores tangencial, normal y rotacional se introduce una tercera coordenada, la cual apunta hacia arriba ortogonalmente a la superficie plana. En el caso del vector tangencial, esta tercera coordenada es igual a cero.

El ángulo de orientación definido como  $\psi$  indica el sentido de cada uno de los desplazamientos o tramos a recorrer:

$$\tan(\psi) = \frac{s_2'}{s_1'} \rightarrow \psi(x) = \text{atan}\left(\frac{s_2'}{s_1'}\right) \quad (11)$$

Para mantener un valor del ángulo en el primer cuadrante, se emplea la expresión:

$$\psi(x) = \text{atan2}(ds_2, ds_1) = \text{atan2}(s_2', s_1') \quad (12)$$

La curvatura local o constante de giro viene dada por la expresión:

$$k(x) = \left| \frac{d^2s}{dx^2} \right| = \sqrt{s_1''(x)^2 + s_2''(x)^2} = \frac{1}{r(x)} \quad (13)$$

Esta queda resumida como la inversa del radio en cuestión. El aumento de uno conlleva al decremento del otro y viceversa.

El vector normal  $\mathbf{n}$  es la segunda derivada normalizada de  $\mathbf{s}$ , la primera derivada normalizada de  $\mathbf{t}$  y es ortogonal a la dirección del camino de referencia  $\mathbf{t}$ . Queda definido de la siguiente manera:

$$\mathbf{n}(x) = \frac{1}{\left|\frac{d^2\mathbf{s}}{dx^2}\right|} \frac{d^2\mathbf{s}}{dx^2} = \frac{1}{\left|\frac{d\mathbf{t}}{dx}\right|} \frac{d\mathbf{t}}{dx} = \frac{1}{|\mathbf{t}'|} \mathbf{t}' = \frac{1}{\sqrt{s_1''^2 + s_2''^2}} \begin{pmatrix} \frac{d^2s_1}{dx^2} \\ \frac{d^2s_2}{dx^2} \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{s_1''^2 + s_2''^2}} \begin{pmatrix} s_1'' \\ s_2'' \\ 0 \end{pmatrix} \quad (14)$$

Simplificando sus expresiones iniciales se concreta que su longitud es igual a uno.

### Giros hacia la izquierda

En el caso de los giros hacia la izquierda (figura 2.3), partiendo de la definición de curvatura, por la ecuación:

$$\mathbf{s}(x) = \begin{pmatrix} s_1(x) \\ s_2(x) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{c1} + r \cos\left(\frac{x}{r} + \psi_0 - \frac{\pi}{2}\right) \\ s_{c2} + r \sin\left(\frac{x}{r} + \psi_0 - \frac{\pi}{2}\right) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

Donde:

- $r$  radio.
- $(s_{c1}, s_{c2})$  coordenadas del centro de giro instantáneo.
- $\psi_0$  ángulo de orientación al iniciar el tramo.

Teniendo en cuenta que  $x \in [0, x_E]$  queda descrito gráficamente de la siguiente manera:

$$x_E = r * \psi_{deseado} \quad (16)$$

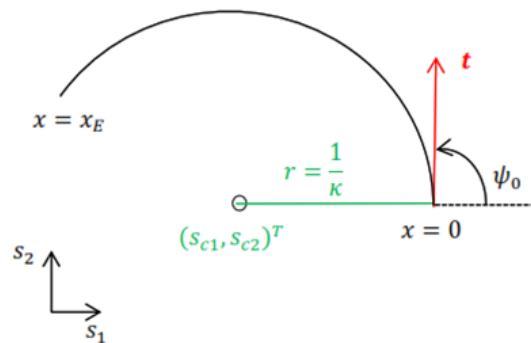


Figura 2.3. Arco circular girado a la izquierda [66].

Para un círculo completo, se deduce que la longitud del camino  $x_E$  es igual a  $2\pi r$  y si se valora el caso especial de  $\psi_0 = \frac{\pi}{2}$  se puede simplificar a modo que resulte lo siguiente:

$$s_1 = s_{c1} + r \cos \frac{x}{r} \quad (17)$$

$$s_2 = s_{c2} + r \sin \frac{x}{r} \quad (18)$$

Las cantidades de las primeras derivadas del arco circular respecto a ambos ejes son:

$$s_1' = -\sin \frac{x}{r} \quad (19)$$

$$s_2' = \cos \frac{x}{r} \quad (20)$$

Derivando por segunda vez:

$$s_1'' = -\frac{1}{r} \cos \frac{x}{r} \quad (21)$$

$$s_2'' = -\frac{1}{r} \sin \frac{x}{r} \quad (22)$$

De tal manera se obtiene cada término diferencial por separado:

$$ds_1 = \frac{ds_1}{dx} dx = -\sin \frac{x}{r} dx \quad (23)$$

$$ds_2 = \frac{ds_2}{dx} dx = \cos \frac{x}{r} dx \quad (24)$$

Elevando ambos al cuadrado y aplicando la raíz se obtiene su valor generalizado o modular:

$$\sqrt{ds_1^2 + ds_2^2} = dx \quad (25)$$

Teniendo en cuenta el grado de orientación se define:

$$\psi(x) = \text{atan } s_2'/s_1' = -\text{atan} \left( \frac{1}{\tan(\frac{x}{r})} \right) = \frac{x}{r} + \frac{\pi}{2} \quad (26)$$

La constante asociada al radio de curvatura teniendo en cuenta la orientación de las ruedas está dada por:

$$k = \sqrt{s_1''^2 + s_2''^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{r} \cos \left(\frac{x}{r}\right)\right)^2 + \left(\frac{1}{r} \sin \left(\frac{x}{r}\right)\right)^2} = \frac{1}{r} = \text{const} \quad (27)$$

Y los vectores tangenciales y normal quedan definidos de la siguiente manera:

$$\mathbf{t} = \begin{pmatrix} s_1' \\ s_2' \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\left(\frac{x}{r}\right) \\ \cos\left(\frac{x}{r}\right) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (28)$$

$$\mathbf{n} = \frac{1}{\sqrt{s_1''^2 + s_2''^2}} \begin{pmatrix} s_1'' \\ s_2'' \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos\left(\frac{x}{r}\right) \\ -\sin\left(\frac{x}{r}\right) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (29)$$

### Giro a la derecha

En este caso la diferencia radica en el cambio de signo a la hora de expresar la ecuación que define la curvatura:

$$s(x) = \begin{pmatrix} s_1(x) \\ s_2(x) \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{c1} - r \cos\left(\frac{x}{r} + \psi_0 - \frac{\pi}{2}\right) \\ s_{c2} - r \sin\left(\frac{x}{r} + \psi_0 - \frac{\pi}{2}\right) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (30)$$

De nuevo, en el caso especial de  $\psi_0 = \frac{\pi}{2}$  se considera de la siguiente manera:

$$s_1 = s_{c1} - r \cos\frac{x}{r} \quad (31)$$

$$s_2 = s_{c2} + r \sin\frac{x}{r} \quad (32)$$

En este caso, hay que señalar que es muy importante tener en cuenta el tercer elemento de el vector de rotación  $\mathbf{t} \times \mathbf{n}$  pues toma valor negativo:

$$\mathbf{t} = \begin{pmatrix} s_1' \\ s_2' \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin\left(\frac{x}{r}\right) \\ \cos\left(\frac{x}{r}\right) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (33)$$

$$\mathbf{n} = \frac{1}{\sqrt{s_1''^2 + s_2''^2}} \begin{pmatrix} s_1'' \\ s_2'' \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{x}{r}\right) \\ -\sin\left(\frac{x}{r}\right) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (34)$$

El factor o constante de curvatura, sin embargo, es positiva tanto para giros a la izquierda como a la derecha:

$$k = \sqrt{s_1''^2 + s_2''^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{r} \cos\left(\frac{x}{r}\right)\right)^2 + \left(\frac{1}{r} \sin\left(\frac{x}{r}\right)\right)^2} = \frac{1}{r} = \text{const} \quad (35)$$

### 2.3 Algoritmo de generación de trayectoria definido

En el estudio de las actividades agrícolas es evidente apreciar el sinnúmero de labores que se pueden realizar, entre ellas labranza, regadío, cosecha, etc. Todos los campos presentan diferentes dimensiones, al igual que los surcos y su distribución. Esta última está dada por las características y especificaciones del equipamiento agrícola para realizar la tarea asignada. En este sentido, de forma general, se define el largo ( $L$ ) y ancho ( $A$ ) del terreno sobre el que se pretende trabajar y seguido a ello la distancia entre los surcos o senderos por los cuales transite el vehículo en cuestión.

En la figura 2.4 aparece denotado por los segmentos AC y AB, largo y ancho donde:

- AC representa el largo ( $L$ ).
- AB representa el ancho ( $A$ ).



Figura 2.4. Área de trabajo definida.

Con estas variables se procede a definir la posición inicial del vehículo con su respectivo equipamiento en la coordenada  $(\frac{A_E}{2} ; L_T + L_E)$ .

Donde:

- $\frac{A_E}{2}$  es la mitad del ancho del equipamiento.
- $L_T + L_E$  es la suma del largo del tractor y el largo del equipamiento.

Se parte de dichas coordenadas para evitar que el vehículo comience fuera del campo o rango de trabajo, contrarrestando de este modo fallas o rupturas. Además, se escoge esta posición para que el área de trabajo efectiva comprenda mayores dimensiones y se aproveche con creces.

Teniendo en cuenta dichos aspectos se comienza con el desarrollo de la trayectoria recta que abarca desde esa coordenada hasta  $(\frac{A_E}{2}; L)$ . Se define  $R_{min}$  como el radio de curvatura mínimo que posee el vehículo que se pretende utilizar para la labor agrícola.

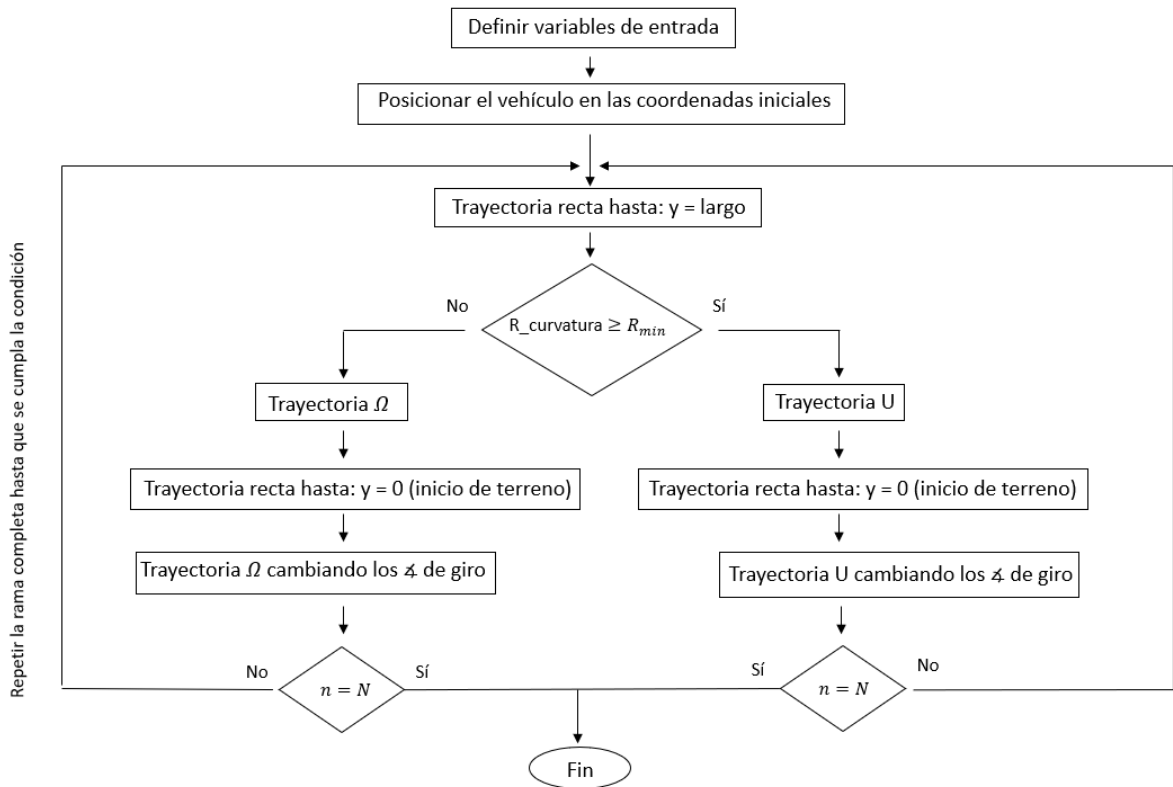


Figura 2.5. Algoritmo de trabajo para las trayectorias y caminos.

Siguiendo el esquema del algoritmo diseñado (Figura 2.5) se evalúa el radio de curvatura definido respecto al valor mínimo del vehículo utilizado. Dicho radio de curvatura está dado por el ancho entre los surcos que se definen por el usuario. Teniendo en cuenta este aspecto se describe:

$$A_s = R_{curvatura} \quad (36)$$

Donde:

- $A_s$  es la distancia entre dos surcos consecutivos por los que debe pasar el vehículo.
- $R_{curvatura}$  es radio de curvatura.

Como etapa divisoria de ambas ramas del algoritmo se establece esa condición fija por la estructura y prestaciones de cada tipo. Por su parte el giro omega ( $\Omega$ ) permite un manejo adecuado a lo largo de una curva cerrada, expandiéndola de manera suave, cuestión que sería complicada para los giros en U [79], pues conociendo que ese es el radio de curvatura mínimo, no ayudaría al desarrollo de la maniobra para lograr los requerimientos establecidos. El nombre dado a estos tipos de giros se corresponde con la figura que simulan.

Según la línea de desarrollo escogida atendiendo a la condición anteriormente mencionada, es importante destacar que en ambos casos se procede con una trayectoria recta de regreso hacia el punto donde  $y = 0$  y ahí se realiza el mismo giro cambiándole el sentido de orientación a los ángulos del primero realizado.

Este proceso en cada rama se repetirá hasta que  $n = N$ , donde  $n$  es un contador que irá iterando cada ciclo de forma consecutiva hasta llegar a su semejante  $N$ , que es el número de iteraciones real según  $A$  y  $A_s$  definidos, dispuesto de la siguiente manera:

$$N = \frac{A}{A_s} \quad (37)$$

## 2.4 Cobertura de área

Al completar las  $N$  iteraciones el área definida a lo largo del ancho de la región dada queda totalmente cubierta. Hay un aspecto muy importante que se debe tener en cuenta respecto al largo de las trayectorias rectilíneas o área efectiva de trabajo. En el caso de los recorridos con giros de tipo U o de tipo  $\Omega$ , el largo del surco o senda en ambos extremos debe poseer un área destinada al giro, que responde a la longitud escogida para el radio del mismo. En el caso de los giros en U el largo de la sección efectiva (Figura 2.6) se reduce rectilíneamente a:

$$L_{efectivo} = L - 2 * R_{curvatura} \quad (38)$$

Donde:

- $L_{efectivo}$  es el largo que poseen los surcos.
- $L$  es el largo del terreno definido.
- $R_{curvatura}$  radio de curvatura (relacionado a la distancia entre los surcos).

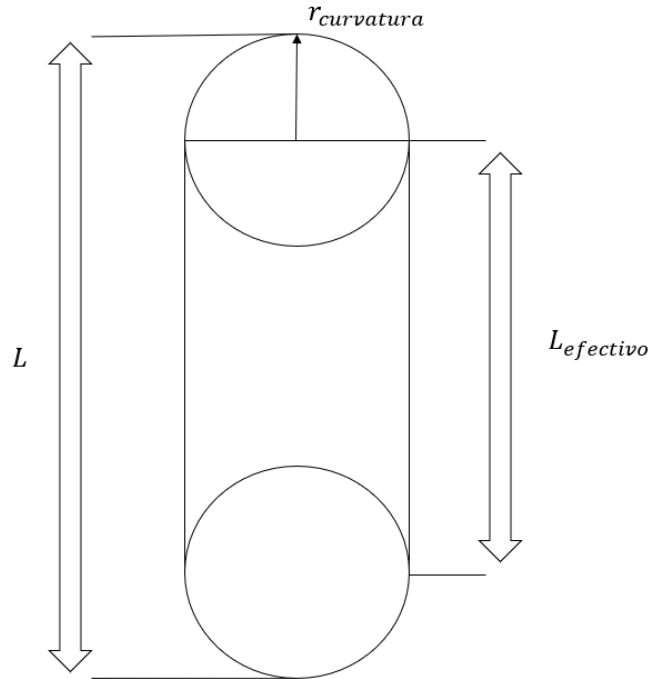


Figura 2.6. Distribución real del área efectiva.

En el caso de los giros omega el área destinada al giro es más amplia. Esto se debe a que al realizar una apertura respecto a la senda recorrida para lograr una menor distancia entre ella y la siguiente con la gran suavidad que este modelo presenta; la fórmula anteriormente definida se puede aproximar a:

$$L_{efectivo} \approx L - 3 * R_{curvatura} \quad (39)$$

## 2.5 Algoritmo de guiado

El algoritmo de orientación utilizado en esta investigación es *Pure Pursuit* (PP). Este es un algoritmo de tipo geométrico, por lo que rastrea una ruta de referencia utilizando solo la geometría de la cinemática del vehículo y la ruta de referencia. El controlador PP utiliza un punto de anticipación que es una distancia fija en la ruta de referencia por delante del vehículo. Por tanto, el vehículo debe avanzar hasta ese punto utilizando un ángulo de giro

que se debe calcular. En este método, el centro del eje trasero se utiliza como punto de referencia en el vehículo, por lo que el ángulo de dirección  $\delta$  se puede calcular como [12]:

$$\delta_s = \frac{\tan^{-1}(2L\sin(\alpha))}{l_d} \quad (40)$$

Dónde:

- $l_d$  es la distancia entre el punto objetivo y el eje trasero, conocida como distancia de anticipación.
- $L$  es la distancia entre el eje trasero y delantero.
- $\alpha$  es el ángulo entre el rumbo de la carrocería del vehículo y la línea de visión delantera.

El error en este caso se define como error transversal y es la distancia lateral entre el vector de rumbo y el punto objetivo y se puede determinar como:

$$\sin(\alpha) = \frac{e_d}{l_d} \quad (41)$$

$$k = \frac{2}{l_d} e_d \quad (42)$$

Siendo:

- $k$  la curvatura.
- $e_d$  es el error transversal, la distancia entre la carretera y el eje trasero del vehículo.

Por lo tanto, la ecuación anterior muestra que la curvatura  $k$  es proporcional al error transversal. A medida que aumenta el error, también lo hace la curvatura, lo que posibilita que el vehículo regrese al camino de manera más agresiva. La ganancia proporcional  $\frac{2}{l_d^2}$  es ajustable ( $l_d$ ).

El control PP se puede definir para que funcione como un controlador de ángulo de dirección proporcional que opera para eliminar el error transversal.

$$\delta_s = \frac{2L}{l_d^2} e_d \quad (43)$$

Por otro lado, para el caso de seguimiento de caminos el algoritmo que se utiliza en esta investigación es el denominado Línea de Visión (LOS, por sus siglas en inglés). Este

algoritmo al igual que PP, es de tipo geométrico. Las ecuaciones 44 y 45 permiten obtener una medida del error transversal al camino. Una vez alcanzado un punto en el camino o *waypoint* deseado, el vehículo continúa hacia la búsqueda del siguiente.

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{y_{k+1} - y_k}{x_{k+1} - x_k} \right) \quad (44)$$

$$e_d = -(x - x_k) \sin(\alpha) + (y - y_k) \cos(\alpha) \quad (45)$$

Donde:

- $\alpha$  es el ángulo entre la línea de visión formada por el *waypoint* actual y el siguiente con el vector longitudinal del vehículo.
- $x_k; y_k$  es la coordenada del *waypoint* actual.
- $x_{k+1}; y_{k+1}$  es la coordenada del *waypoint* siguiente.

El esquema de guiado utilizado se muestra a continuación en la figura 2.7, el cual muestra el manejo de cada una de las variables a controlar.

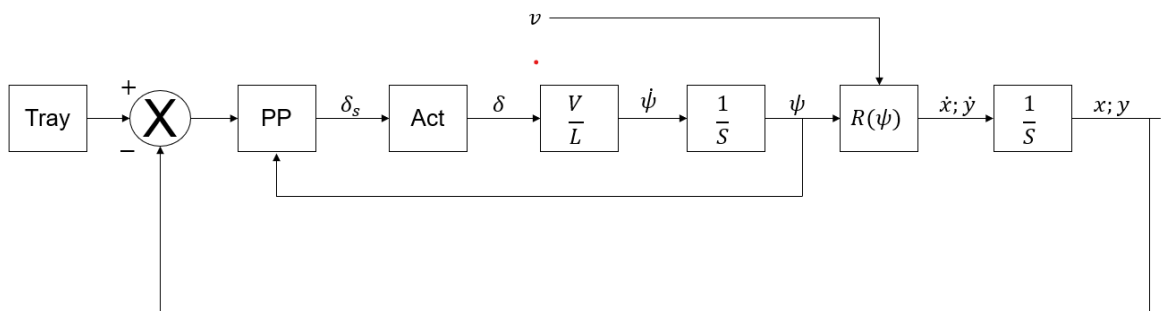


Figura 2.7. Esquema de guiado PP.

Donde:

- Tray: trayectoria generada.
- PP: algoritmo de guiado *Pure Pursuit*.
- Act: actuador de dirección.
- $R(\psi)$  representa el modelo cinemático del vehículo en cuestión.

## 2.6 Descripción del vehículo de alto porte para autopiloto

El tractor Case IH Maxxum 110 es uno de los vehículos utilizados en Cuba para trabajo agrícola. La Figura 2.7 muestra el sistema de referencia OXYZ (azul) está fijado al vehículo, mientras que el sistema de referencia EXYZ (negro) es la Tierra o sistema no móvil. Se supone que el movimiento se realiza en el plano XY, por tanto, se introduce como referencias:  $z_0 = 0m$  y la amplitud de los ángulos cabeceo y balanceo con sus respectivas variaciones son cero  $\theta = \varphi = \theta' = \varphi' = 0^\circ$ . En estas condiciones los estados del tractor son:

$$\eta = [x, y, \psi]^T; v = [u, v, r]^T \quad (46)$$

Donde:

- $\eta$  denota el vector de posición expresado en el marco de referencia terrestre.
- $v$  representa el vector de velocidad lineal y angular con coordenadas en el tractor referenciado.

Las ecuaciones cinemáticas se pueden expresar en forma vectorial usando algunas transformaciones angulares basadas en el modelo de Euler como:

$$\eta' = R(\psi)v = \begin{bmatrix} C_\psi & -S_\psi & 0 \\ S_\psi & C_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (47)$$

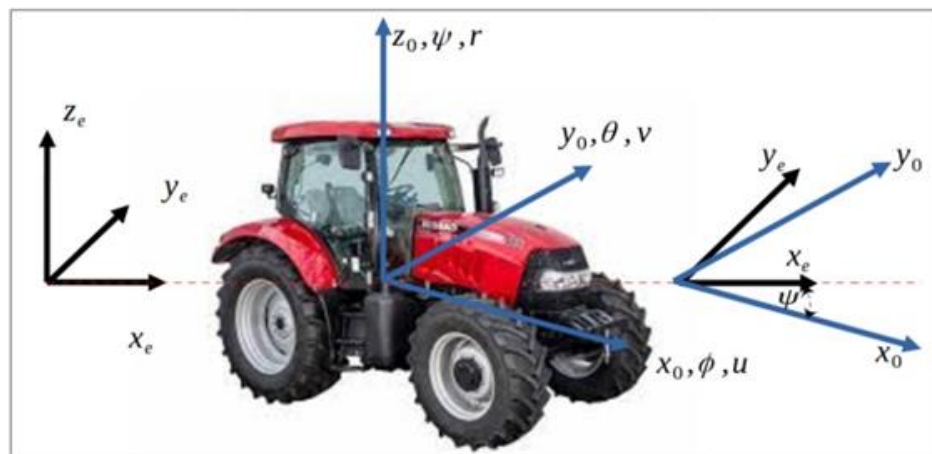


Figura 2.8. Relaciones del tractor.

**Tabla 2.1.** Características del tractor Case IH Maxxum 110.

Variable	Valor	Descripción
$L$	4.68	Distancia entre ejes ( $m$ )
$l_f$	2.75	Distancia del COG al eje delantero ( $m$ )
$l_r$	1.93	Distancia del COG al eje trasero ( $m$ )
$R$	5.71	Radio de curvatura del vehículo ( $m$ )
$v_{max}$	5	Velocidad máxima de trabajo del vehículo ( $m/s$ )
$v$	2	Velocidad de trabajo ( $m/s$ )
$\delta$	$55^\circ = 0.96$	Ángulo máximo de dirección ( $rad$ )

En la tabla se muestran los parámetros cinemáticos asociados a este vehículo. Estos lo sitúan como un exponente esencial para la implementación de un autopiloto de facturación nacional.

## 2.7 Consideraciones finales del capítulo

- Las trayectorias contienen restricciones o controles temporales que se rigen a razón de una velocidad definida. Por su parte los caminos se recorren y se van venciendo por medio de los *waypoints* definidos en el *path*.
- El algoritmo de generación de trayectoria basa su principal línea de trabajo en la comparación del radio de curvatura definido o distancia entre los surcos y el radio de curvatura mínimo que posee el vehículo con el que se pretende trabajar.
- El área que se necesita para la maniobra de giro condiciona de manera inversa la longitud de los surcos o área de trabajo efectiva.

## CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DE LAS TRAYECTORIAS DEFINIDAS.

En este capítulo se plantean las diferentes trayectorias posibles representadas por líneas y secciones circulares. Se realiza una breve descripción de su comportamiento en dependencia de las variables de entrada que reciban las funciones que las generan. Luego se analizan los giros que surgen con su combinatoria y se muestran dos ejemplos ilustrativos del algoritmo diseñado para las especificaciones requeridas por el usuario en ambos casos. Se trabaja sobre la base de un vehículo al alcance del desarrollo agrícola existente y se introducen cada una de sus características reales, así como su correspondiente algoritmo de guiado para la implementación atendiendo al tipo de la tarea. En cada caso se culmina con la referente ruta seguida de manera eficiente hasta el punto o condición de parada.

### 3.1 Definición de las diferentes trayectorias posibles

Como se puede apreciar dentro de las labores agrícolas figuran un sinnúmero de trayectorias y caminos. Acorde a las necesidades de la labor y disposición geográfica del campo se escoge la ruta que se pretende tomar. Teniendo en cuenta largo y ancho del terreno, y dimensiones y ángulos de rotación mínima del vehículo a utilizar, se selecciona el tipo de trayectoria más óptima y factible para el desempeño de la labor. Destacan diferentes tipos que suelen ser los más comunes: línea recta, circunferencias y arcos de circunferencias.

El primer aspecto a tomar en cuenta para este tipo de procedimientos es una función llamada *inicio\_de\_ruta(S1,S2,psi)*. Esta recibe como argumentos las coordenadas iniciales establecidas como punto de partida en metros. Además, se le añade el ángulo de orientación inicial del vehículo en radianes. Estos tres argumentos que la componen son factores de

vital importancia para condicionar el inicio y direccionamiento del recorrido en el campo asignado.

### 3.1.1 Línea

Con coordenadas iniciales y orientación definida como variables de entrada se pueden generar trayectorias rectilíneas (Figura 3.1). Estas permiten la navegación entre dos puntos asignados, manteniendo un mismo sentido y solo variando la componente de las coordenadas en la cual ocurra el desplazamiento mediante una función denominada *linea\_recta(ruta,xe)*, que recibe como argumentos la variable de la ruta en cuestión y la posición final que se desea alcanzar. Basado en la fórmula definida en el epígrafe 2.2.1 y tomando dos orientaciones iniciales diferentes para observar los cambios en los sentidos de dirección, los resultados de este modelo de trayectoria fueron:

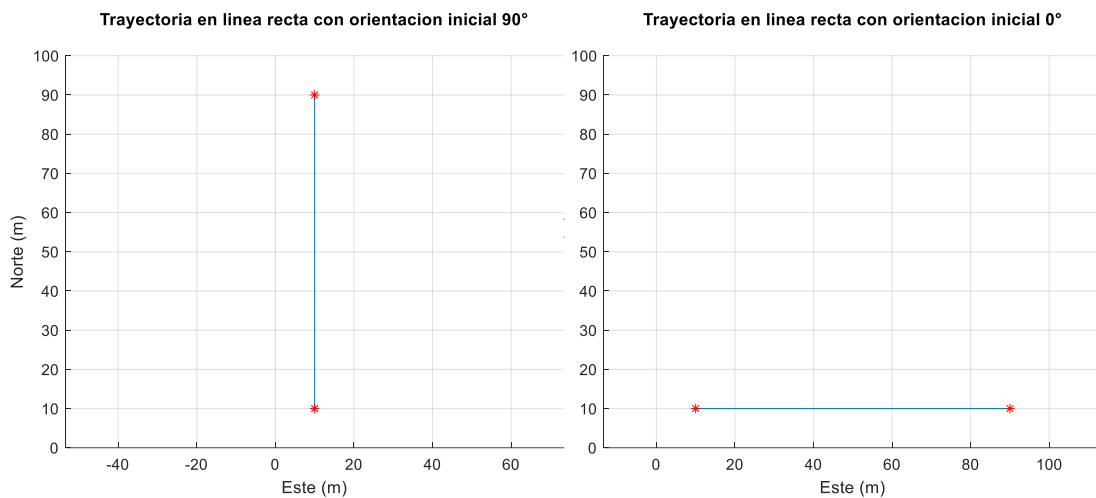


Figura 3.1. Trayectorias rectilíneas.

Se definió en ambos casos como punto de partida la coordenada (10;10) y como distancia a recorrer o longitud de la recta de igual modo se tomó el mismo valor arbitrario para las dos (80m). Se aprecia como poseen un sentido de orientación totalmente diferente, una se desplaza respecto al eje de las abscisas y otra en el sentido de las ordenadas.

Ambos ejemplos son muy comunes para cuestiones agrícolas donde se pretenda recorrer rutas rectilíneas referentes a surcos o sendas que definen la distribución del terreno sobre el que se desea trabajar.

### 3.1.2 Circunferencia o arcos de circunferencia

En el caso de una trayectoria circular o circunferencia (Figura 3.2) también se tienen en cuenta el establecimiento de coordenadas y ángulo de orientación inicial como puntos de partida. Se define una función llamada *arco\_de\_circunferencia(ruta,r,rad)* que adquiere las condiciones de la ruta al igual que en las líneas rectas. A esta se le introducen como variables de entrada el radio de curvatura deseado en metros y el ángulo en cuestión para el giro deseado en radianes. Este ángulo representa la nueva orientación que se desea tenga el vehículo para otro fragmento de la ruta. Basado en la formula definida en el epígrafe 2.2.2 y tomando dos orientaciones iniciales diferentes para observar los cambios en los sentidos de dirección, los resultados de este modelo de trayectoria fueron:

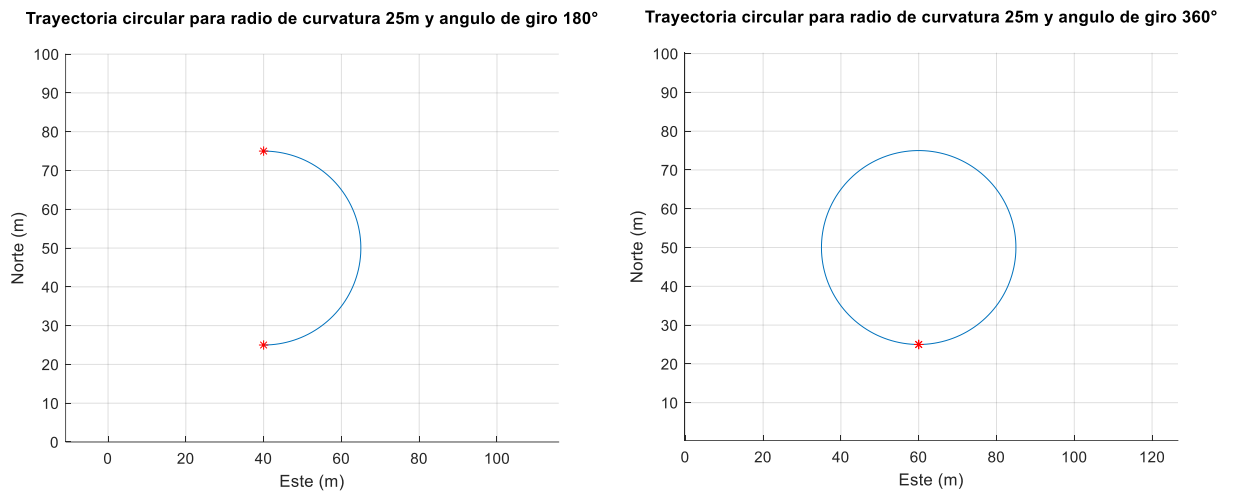


Figura 3.2. Trayectorias curvas o circulares.

En el primero de los casos se aprecia una trayectoria circular o semicircunferencia que parte desde la coordenada (40;25), con un ángulo de orientación inicial definido de  $0^\circ$ . Se desplaza con un radio de curvatura de  $25\text{ m}$  y girando  $180^\circ$  respecto a su direccionamiento inicial definido. Por otro lado, la otra ruta en cuestión mantiene la misma orientación inicial dada anteriormente al igual que el radio de curvatura. Como se puede apreciar sí varía su punto de partida definido por (60;25) y su ángulo de giro responde a una circunferencia completa o  $360^\circ$ . Ambos ejemplos son muy comunes para cuestiones agrícolas donde se desee generar un giro o cambio de sentido que sea factible tanto en labores de preparación de tierras, siembra, cosecha, etc.

### 3.2 Definición de trayectorias combinadas que cubren el área

Con el dominio previo tanto de las líneas como las circunferencias y arcos de circunferencia es viable la combinación de las mismas. Para ello se complementan las funciones  $linea\_recta(ruta,xe)$  y  $arcos\_de\_circunferencia(ruta,r,rad)$ . Se utilizan según las necesidades o requisitos de las rutas que se pretenden generar. Al utilizar alguno de los dos modelos anteriormente mencionados, la ubicación se guarda dentro de una variable local llamada  $ruta$  cuando se recorre un tramo o sector. Esa variable contiene la información referida tanto a posición como orientaciones finales. Conociendo estos valores resulta bastante viable desplazarse de ese punto en cuestión hacia algún otro, cumplimentando de este modo la maniobra deseada.

En el sector agrícola aparecen como principales exponentes de esta combinatoria los llamados giros en U y  $\Omega$ . Estos son muy utilizados debido a las principales tendencias de trabajo y prestaciones de los mismos.

#### 3.2.1 Giro en U

Los giros en U (Figura 3.3) como su sigla lo indica, cambian completamente el sentido de la trayectoria que se analice. Suelen utilizarse en situaciones donde se desee proceder a un cambio de senda u orientación. Como se definió en el epígrafe 2.3 tienen una limitante muy importante a la hora de su aplicación ya que dependen de manera directa de la relación entre el radio de giro mínimo del vehículo y el radio de la curvatura deseada para implementación. Mientras su radio de giro mínimo no exceda el radio de la curvatura deseada tomará validez su sentido para una correcta aplicación. Basado en estas especificidades, el resultado de este modelo de trayectoria generado se muestra a continuación:

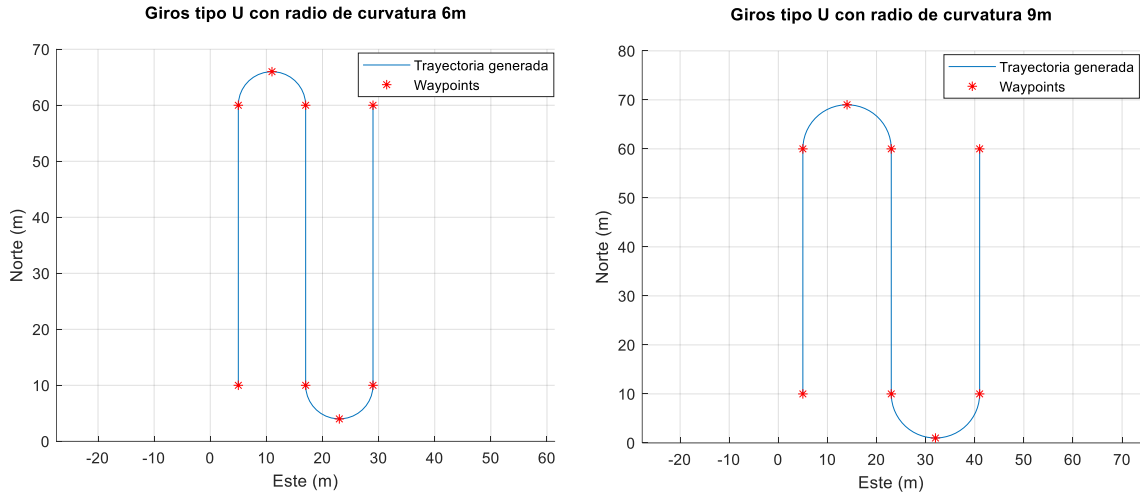


Figura 3.3. Trayectorias y caminos con giros tipo U.

En ambos ejemplos se puede apreciar como a partir de la coordenada (5;10) se inicia una trayectoria recta, la cual se extiende 50 *m* hasta alcanzar el par (5;60). Es aquí donde comienza la combinación de recta y curva para un cambio de sentido en la orientación que venía definida. Se escogieron radios de curvatura de 6 y 10 *m* respectivamente para lograr diferentes amplitudes entre las sendas rectilíneas. Se puede observar que posterior a la realización del primer giro, el vehículo se incorpora a la línea de retorno correspondiente. Esta equidista de la inicial con un valor equivalente al doble del radio de curvatura, más bien conocido como diámetro. Al llegar a su final o más específicamente al punto donde se vuelven a completar los 50 *m* de línea recta definidos, se prosigue al segundo giro. Este consta de la misma estructura del primero realizado, solo que el valor del ángulo de giro cambia su sentido o signo como se definió en el epígrafe 2.2.2. La longitud de los arcos es de 9.42 y 15.70 *m* y la constante asociada al radio de curvatura teniendo en cuenta la orientación de las ruedas está dada por  $\frac{1}{6}$  y  $\frac{1}{10}$  para cada caso según las ecuaciones 8 y 13.

### 3.2.2 Giro en $\Omega$

Por otra parte, los giros en omega permiten solucionar la problemática que surge cuando el radio de curvatura, dada la distancia entre los carriles o surcos es menor que el radio de giro del vehículo. Debido a su forma o disposición, realizan una cierta apertura en cuanto a la coordenada de inicio tomada como referencia para la maniobra. Suelen utilizarse cuando se desea lograr ángulos de giro más pequeños al que posee el vehículo en cuestión. Basado en

esta línea de trabajo y desarrollo, el resultado de este modelo de trayectoria generado se muestra a continuación:

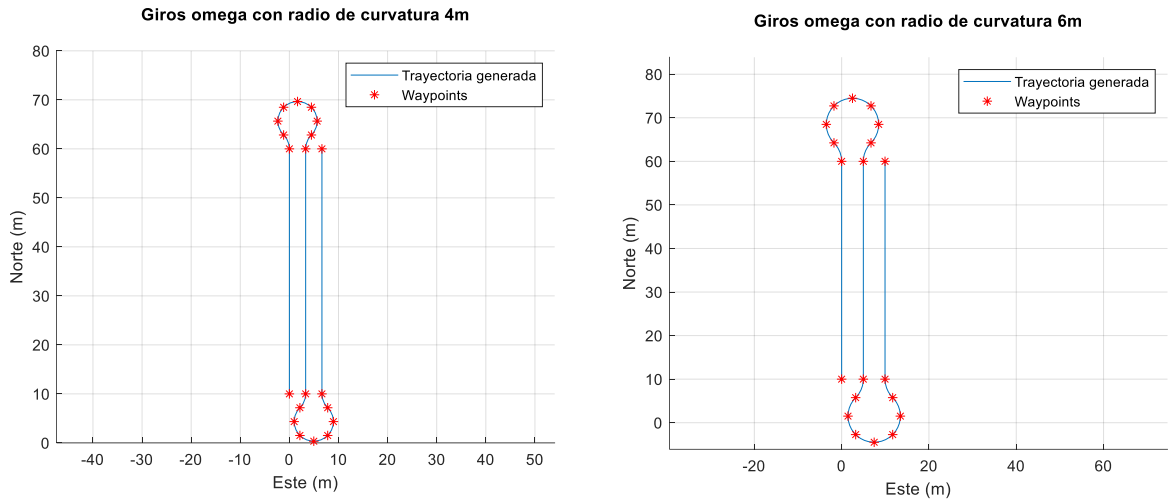


Figura 3.4. Trayectorias y caminos con giros tipo  $\Omega$ .

En ambos ejemplos se puede apreciar como a partir de la coordenada (0;10) se inicia una trayectoria recta, la cual se extiende 50 m hasta alcanzar el par (0;60). Es aquí donde comienza la combinación de recta y curva para un cambio de sentido en la orientación que venía definida. A diferencia de los giros en U, omega se refiere a una curva más suave. La misma se va conformando con pequeños sectores circulares de igual radio de curvatura, pero con variaciones en el ángulo de giro definido. Para lograr esta variante se tomó como primer ángulo de referencia  $45^\circ$ , que se ajusta perfectamente a las características del vehículo. Se comenzó por cambiar el sentido tomando la primera variable angular como positiva para de este modo lograr una apertura respecto a la línea recorrida. Seguido a ello se realizan seis giros en sentido inverso al primero y manteniendo la amplitud del ángulo que se definió inicialmente ( $45^\circ$ ). Luego con un simple cambio de dirección de igual magnitud y diferente signo se logra un sentido o dirección paralela a la primera trayectoria rectilínea y los surcos obtienen una distancia relativamente pequeña (uno del otro) teniendo en cuenta el ángulo de giro de la maquinaria utilizada. Se escogieron radios de curvatura de 4 y 6 m respectivamente para cada uno de los tramos circulares. Como se evidencia el radio de curvatura es directamente proporcional al área implicada en el giro y a la separación de las sendas. Posterior a la realización del primer giro completo, el vehículo se incorpora a la

línea de retorno correspondiente y al llegar a su final o más bien al punto donde se vuelven a completar los 50m de línea recta definidos, se realiza segundo giro. Este consta de la misma estructura del primero realizado, solo que el valor del ángulo de giro cambia su sentido o signo respecto a todo el modelo de operación seguido en el primero. La longitud de los arcos completos de giro es de 25.12 y 37.68 m que corresponden a la ecuación 8.

### 3.3 Ejemplo para labores en el campo con dimensiones definidas

Teniendo en cuenta las disímiles características en cuanto a dimensiones que poseen las regiones agrícolas y las especificidades que presentan los vehículos que operan en ellas se escogen diferentes tipos de trayectorias. Tomando como referencia el vehículo mencionado en el epígrafe 2.6 se evalúa la necesidad de un autopiloto para mayor eficiencia. A continuación, se muestran varios ejemplos típicos a tener en cuenta según las necesidades. Las trayectorias deseadas fueron definidas siguiendo la metodología anteriormente planteada. Además, se obtienen los vectores de *waypoints* o puntos del camino para ser usados posteriormente en los algoritmos de guiado referentes a cada caso.

En ambos ejemplos se definieron como variables de entrada o dimensiones del campo 100x100 m respectivamente. Como coordenada inicial o punto de partida queda descrito el par (2;12,85) para que el equipamiento seleccionado inicie sobre la región del campo y quede disponible un área dentro de este para los giros o maniobras. Se toma exclusivamente esa pues responde a las dimensiones exactas del equipamiento utilizado.

#### 3.3.1 Radios de giro superior al radio de curvatura mínima del tractor

Teniendo en cuenta que el equipamiento utilizado posee un radio de curvatura mínimo de 5,71 m y se desea lograr una separación de 9 m entre los surcos o sendas se utilizan los giros en U. Según la cobertura de área definida en el epígrafe 2.4 el largo de cada uno de ellos es de 91,83 m y la zona que abarca el giro se extiende fuera de ellos 4,5 m respectivamente (Figura 3.5). El resultado de este modelo de trayectoria generado se muestra a continuación:

**Caso en que el radio de giro es mayor a a la curvatura mínima del tractor**

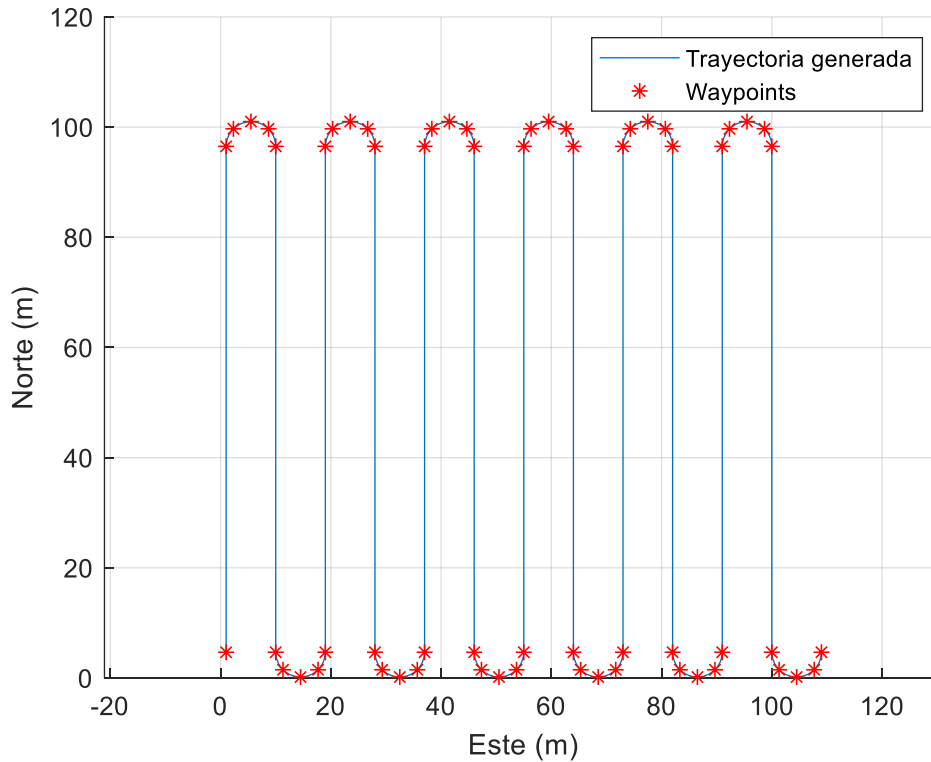


Figura 3.5. Ejemplo de trayectorias y caminos en una parcela aplicando giros tipo U.

Según condiciones establecidas inicialmente se logra el modelo de trayectoria deseado ajustándose a las necesidades requeridas. Se abarca toda el área o región implicada hasta el último surco perteneciente al terreno manteniendo su distancia acorde a la definida inicialmente.

### 3.3.2 Radios de giro inferior al radio de curvatura mínimo

Utilizando el mismo equipamiento, pero teniendo en cuenta que se desea lograr una separación de  $4,73\text{ m}$  entre los surcos o sendas se utilizan los giros tipo  $\Omega$  (Figura 3.6). Se garantiza de este modo que el tractor pueda lograr un giro o curva suave, incorporándose a una distancia más cercana a la de su radio de curvatura mínimo. El largo de cada uno de los surcos en este caso es de  $73,12\text{ m}$  y la zona que abarca el giro se extiende fuera de ellos  $13,78\text{ m}$  respectivamente. El resultado de este modelo de trayectoria generado se muestra a continuación:

### Caso en que el radio de giro es menor a la curvatura mínima del tractor

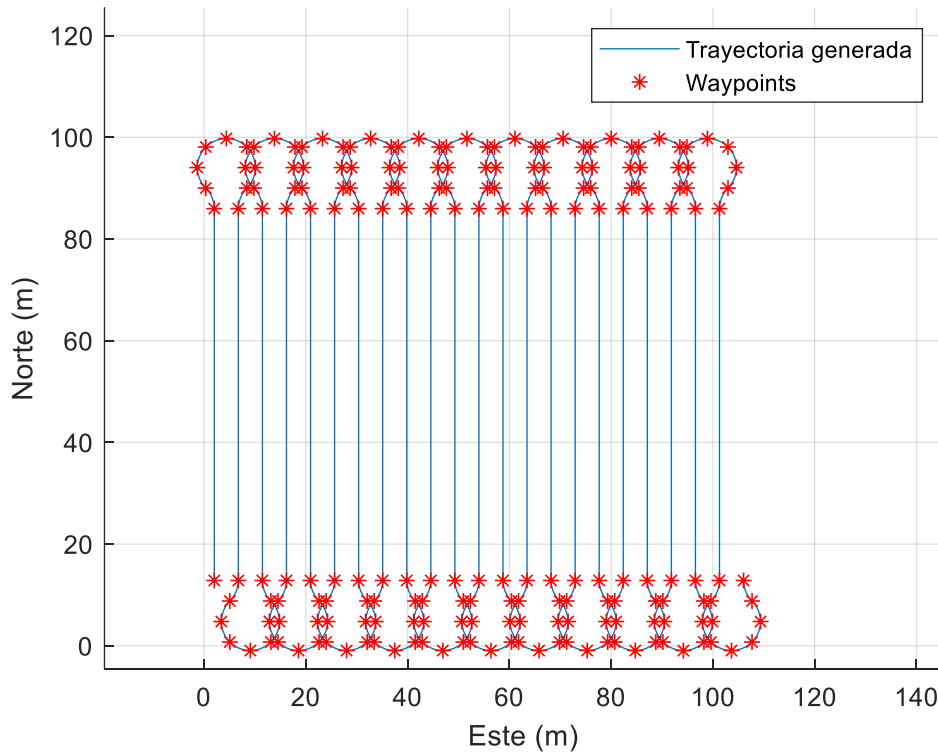


Figura 3.6. Ejemplo de campo con giros tipo  $\Omega$ .

Al igual que en el ejemplo anterior se logra el modelo de trayectoria deseado ajustándose a las necesidades requeridas. Se abarca toda el área o región implicada hasta el último surco perteneciente al terreno manteniendo su distancia acorde a la definida inicialmente. Esta trayectoria difiere en  $18,71m$  a la primera en cuanto a la longitud de cada carril rectilíneo. De este modo se puede apreciar como al utilizar giros en U se necesita una menor área para su realización. Mientras el giro de tipo omega su parte logra distancias menores entre los surcos atendiendo al radio de curvatura mínimo del vehículo, pero necesita a su vez una mayor área para la realización de la maniobra de giro.

### 3.4 Seguimiento de trayectorias y caminos del tractor

A continuación, se realiza el seguimiento de trayectorias y caminos que se definen con los métodos anteriormente propuestos. Para ello se utilizan los algoritmos de guiado convencionales definidos en el epígrafe 2.5. De esta manera se pretende demostrar la

aplicación de los resultados obtenidos en el seguimiento de trayectorias por parte de vehículos terrestres, a fin de apreciar la fiabilidad de este algoritmo para un autopiloto de facturación cubana.

### 3.4.1 Trayectorias

Ambos ejemplos se desarrollan bajo el algoritmo de guiado definido en el epígrafe 2.5 *Pure Pursuit* (PP). Basado en su definición matemática y procedimientos se requiere lograr un seguimiento de las trayectorias empleadas bajo restricciones o controles temporales que se rigen a razón de una velocidad de  $1m/s$  respectivamente (Figura 3.7). Los resultados obtenidos mediante simulación se representan a continuación:

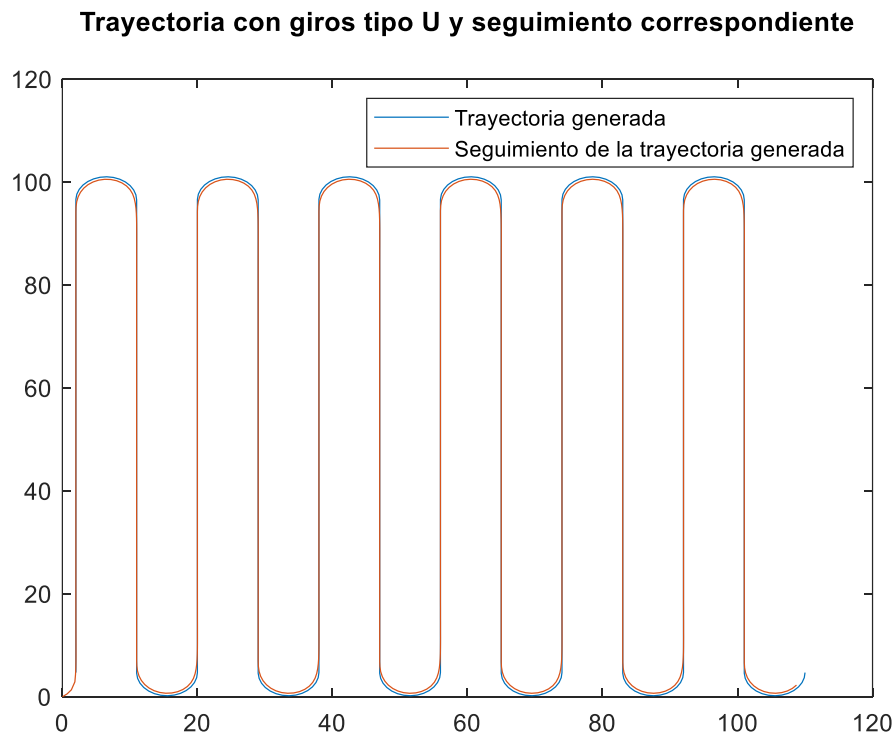
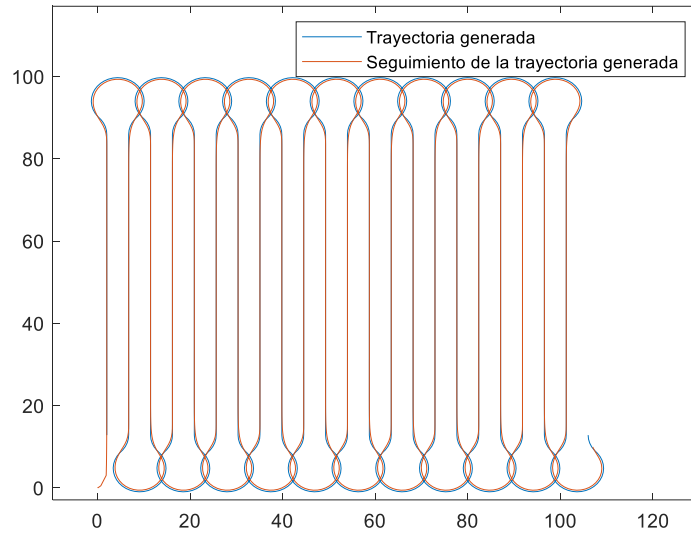


Figura 3.7. Seguimiento de trayectoria con giros tipo U.

Se puede apreciar en la leyenda que proporcionan dichas gráficas que la línea de color azul indica la trayectoria generada a través del algoritmo creado para cada caso. Por su parte la roja es la encargada de señalar el seguimiento de dicha trayectoria de manera eficiente y concreta.

Trayectoria con giros tipo omega y seguimiento correspondiente

Figura 3.8. Seguimiento de trayectoria con giros tipo  $\Omega$ .

### 3.4.2 Caminos

En este tipo de casos se trabaja con el algoritmo de guiado definido en el epígrafe 2.5 LOS (*Line of Sight*). Teniendo en cuenta su desarrollo matemático e implementación se requiere lograr un seguimiento de las trayectorias generadas bajo restricciones de vencer cada uno de los segmentos que aparece definido entre los *waypoints* o puntos a seguir (Figura 3.8).

Los resultados obtenidos mediante simulación se observan a continuación:

Waypoints que generan el camino con giros tipo U y su seguimiento

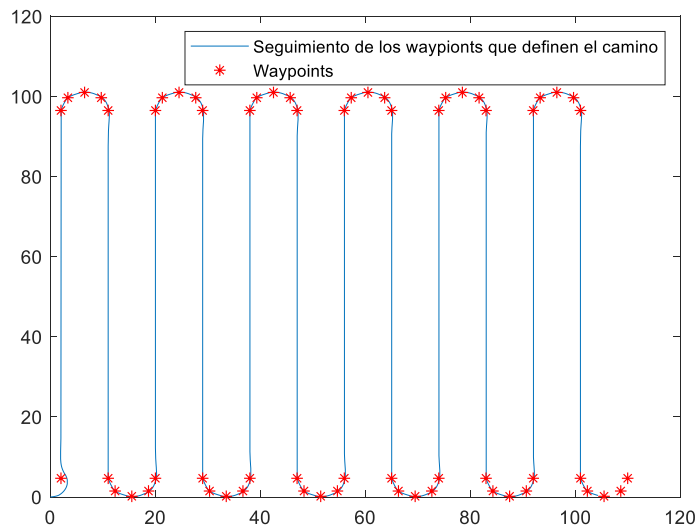
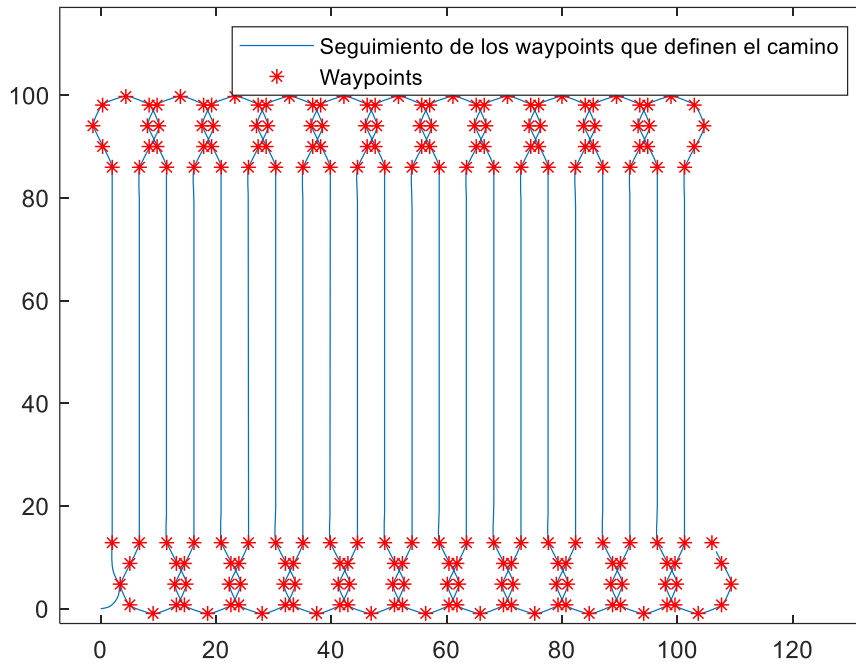


Figura 3.9. Seguimiento de camino con giros tipo U.

**Waypoints que generan el camino con giros tipo omega y su seguimiento**Figura 3.10. Seguimiento de caminos con giros tipo  $\Omega$ .

En estos casos los \* de color rojo se encargan de señalar la ruta definida para seguimiento. Se parte del punto o *waypoint* inicial y se van venciendo uno a uno los siguientes hasta llegar a la condición de parada.

**Análisis económico e impacto medioambiental:**

La agricultura de precisión conlleva una estrategia de manejo dirigida a incrementar la productividad y los retornos económicos con un impacto reducido en el medio ambiente. Desde una perspectiva económica podría definirse como producción agrícola eficiente o como el uso correcto de insumos en el tiempo y en el espacio con el fin de optimizar la producción y minimizar el desperdicio.

Específicamente la conducción autónoma humaniza el trabajo del hombre, reduce la mano de obra destinada a la labor, disminuye los costes y optimiza el tiempo. Permite el logro de mayores rendimientos pues es posible aumentar la producción sin necesidad de expandir el área agrícola, contribuyendo de este modo a menor deforestación y agotamiento de los

recursos naturales. Además, posibilita el ahorro de combustible, reduce la cantidad de fertilizantes y agroquímicos, lo que incide de manera positiva en la reducción de gases de efecto invernadero y contaminación de los suelos. Mejora la sanidad agrícola a través del monitoreo de los cultivos, la incidencia de las plagas y otras enfermedades que atentan contra el desarrollo de la labranza.

Con los resultados de esta investigación se amplía el trabajo que se realiza en Cuba en materia de producción agrícola más eficiente. Contar con un algoritmo que permita generar rutas para diferentes labores agrícolas teniendo en cuenta los requerimientos del área de labranza, así como del vehículo y la herramienta permite añadir una nueva rama en la aplicación de la AP en Cuba. Además, contribuye a la soberanía tecnológica del país para la implementación de un autopiloto que responda a las necesidades del territorio nacional.

### 3.5 Consideraciones finales del capítulo

- Las líneas y circunferencias o arcos de circunferencia son elementos fundamentales para la generación de trayectorias en las labores agrícolas. Su combinación permite lograr los llamados giros en U y omega para la labranza, cosecha u otra actividad relacionada a esta índole.
- Los giros en  $\Omega$  permiten solucionar la problemática que surge cuando el radio de curvatura dada la distancia entre los carriles o surcos es menor que el radio de giro del vehículo. Debido a su forma o disposición, realizan una cierta apertura en cuanto a la coordenada de inicio tomada como referencia para la maniobra.
- En caso de poder realizar ambos giros es importante destacar que el giro en U garantiza una mayor longitud de los surcos, pues el área que requiere para el cambio de senda es menor que la referida a  $\Omega$ .
- Los algoritmos de seguimiento de estas trayectorias y caminos con su correspondiente implementación contribuyen al sistema de guiado para un autopiloto que desempeñe dichas rutas o trayectos para la eficiencia de la gestión agrícola en el país.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- 1 Se identificó que las labores agrícolas típicas (preparación de tierras, siembra y cosecha) presentan rutas formadas por tramos rectos y arcos de circunferencia.
- 2 El algoritmo desarrollado permite generar tanto caminos como trayectorias teniendo en cuenta las características del vehículo y la herramienta agrícola, así como de la información espacial de la parcela, a partir de la combinación de tramos rectos y arcos de circunferencia.
- 3 Las simulaciones de seguimiento de trayectorias y caminos generados mediante el algoritmo demuestran la efectividad del mismo en la conducción autónoma mediante esquemas de guiado comúnmente utilizados en los vehículos autónomos.
- 4 Con esta investigación se contribuye a la implementación de un autopiloto de facturación nacional para su empleo en labores agrícolas en el país.

### Recomendaciones

- 1 Evaluar otro tipo de rutas referentes al trabajo agrícola para desarrollar funciones que describan su comportamiento en dicho ámbito.
- 2 Desarrollar el algoritmo en otros lenguajes de programación para su implementación en un sistema real.
- 3 Desarrollar la vinculación con sistemas de información geográfica para obtener las especificaciones espaciales.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] J. R. Hendrickson, J. Hanson, D. L. Tanaka, and G. Sassenrath, "Principles of integrated agricultural systems: Introduction to processes and definition," *Renewable Agriculture Food Systems*, vol. 23, no. 4, pp. 265-271, 2008.
- [2] K. Pawlak and M. Kołodziejczak, "The role of agriculture in ensuring food security in developing countries: Considerations in the context of the problem of sustainable food production," *Sustainability*, vol. 12, no. 13, p. 5488, 2020.
- [3] S. M. Say, M. Keskin, M. Sehri, and Y. E. Sekerli, "Adoption of precision agriculture technologies in developed and developing countries," *The Online Journal of Science Technology-January*, vol. 8, no. 1, pp. 7-15, 2018.
- [4] U. R. Mogili and B. Deepak, "Review on application of drone systems in precision agriculture," *Procedia computer science*, vol. 133, pp. 502-509, 2018.
- [5] S. M. Say, M. Keskin, M. Sehri, and Y. E. Sekerli, "Adoption of precision agriculture technologies in developed and developing countries," *The Online Journal of Science Technology-January*, vol. 8, no. 1, pp. 7-15, 2018.
- [6] S. Kumar, S. K. Karaliya, and S. Chaudhary, "Precision farming technologies towards enhancing productivity and sustainability of rice-wheat cropping system," *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci*, vol. 6, no. 3, pp. 142-151, 2017.
- [7] G. Bucci, D. Bentivoglio, and A. Finco, "Precision agriculture as a driver for sustainable farming systems: state of art in literature and research," *Calitatea*, vol. 19, no. S1, pp. 114-121, 2018.
- [8] J. A. Porrúa, "De la agricultura precisa a la agricultura de precisión," *Revista Ingeniería Agrícola*, vol. 10, no. 3, pp. 62-71, 2020.
- [9] E. García and F. Flego, "Agricultura de precisión," *Revista Ciencia y Tecnología*, vol. 8, pp. 99-116, 2014.
- [10] D. C. Rose and J. Chilvers, "Agriculture 4.0: Broadening responsible innovation in an era of smart farming," *Frontiers in Sustainable Food Systems*, vol. 2, p. 87, 2018.
- [11] S. O. Araújo, R. S. Peres, J. Barata, F. Lidon, and J. C. Ramalho, "Characterising the agriculture 4.0 landscape—Emerging trends, challenges and opportunities," *Agronomy*, vol. 11, no. 4, p. 667, 2021.

- [12] L. Klerkx, E. Jakku, and P. Labarthe, "A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda," *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, vol. 90, p. 100315, 2019.
- [13] N. Noguchi, "Agricultural vehicle robot," *Journal of Robotics Mechatronics*, vol. 30, no. 2, pp. 165-172, 2018.
- [14] K. Umsup, K. Tammark, and P. Thanpattranon, "Performance evaluation of low-cost GPS-data logger module for smart-farm tractor," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 301, no. 1, p. 012019: IOP Publishing.
- [15] L. K. C. Santos, "El uso de la tecnología en la agricultura," *Pro Sciences: Revista De Producción, Ciencias e Investigación*, vol. 2, no. 14, pp. 25-32, 2018.
- [16] C. Parraguez, "Nuevas tecnologías en el agro: 11 tendencias mundiales," *Pmg Chile*, 2017.
- [17] W. F. Wieczorek and A. M. Delmerico, "Geographic information systems," *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, vol. 1, no. 2, pp. 167-186, 2009.
- [18] R. Takai, L. Yang, and N. Noguchi, "Development of a crawler-type robot tractor using RTK-GPS and IMU," *Engineering in Agriculture, Environment Food*, vol. 7, no. 4, pp. 143-147, 2014.
- [19] A. Alberto-Rodriguez *et al.*, "Review of control on agricultural robot tractors," *Int. J. Comb. Optim. Probl. Informatics*, vol. 11, no. 3, pp. 9-20, 2020.
- [20] P. Tokekar, J. Vander Hook, D. Mulla, and V. Isler, "Sensor planning for a symbiotic UAV and UGV system for precision agriculture," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 32, no. 6, pp. 1498-1511, 2016.
- [21] I. Q. Herrero, Y. R. López, P. M. H. Alfonso, and E. F. Roach, "La aplicación de la Agricultura de Precisión: su impacto social," *Revista ciencias técnicas agropecuarias*, vol. 15, no. 3, pp. 42-44, 2006.
- [22] P. Brizuela Chirino, M. Díaz Pérez, Y. Aguilera Corrales, and M. Chiroles Cantera, "Soluciones tecnológicas en ciencia, tecnología e innovación para la soberanía alimentaria y el gobierno electrónico," *Revista Cubana de Educación Superior*, vol. 41, no. 1, 2022.
- [23] D. Lora Cabrera, M. Fernández Sánchez, R. Ramos González, and A. E. García de la Figal Costales, "Factibilidad económica del empleo de las herramientas de agricultura de precisión en la Empresa Pecuaria "Niña Bonita"," *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 21, no. 4, pp. 19-23, 2012.
- [24] L. Avello Fernández, "Sistema de supervisión y control remoto para máquinas de riego de pivote central empleando tecnología inalámbrica," Universidad Central" Marta Abreu" de Las Villas, Facultad de Ingeniería ..., 2019.
- [25] S. K. Gutierrez, L. H. Santana, R. O. Morales, O. A. Díaz, and I. D. Mora, "Análisis de imágenes multiespectrales adquiridas con vehículos aéreos no tripulados en

- agricultura de precisión," *Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, vol. 39, no. 2, pp. 79-91, 2018.
- [26] S. Triana Escobedo, "Implementación de una aplicación para el procesamiento primario de imágenes de grandes dimensiones en un entorno HPC," Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, 2018.
- [27] C. A. Pérez García, "Metodología para la extracción de datos de cosecha en cosechadoras cañeras Case IH A8000," Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Ingeniería ..., 2016.
- [28] A. Coca-Rodríguez and J. V. Lorenzo-Ginori, "Effects of interpolation on segmentation in cell imaging," *Computación y Sistemas*, vol. 18, no. 1, pp. 97-109, 2014.
- [29] L. B. Vázquez Blanco, "Sistema automatizado en pulverizador para aplicación variable de fitosanitarios," Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Ingeniería ..., 2017.
- [30] C. A. Perez-Garcia, J. J. Pérez-Atray, L. Hernández-Santana, R. Gustabello-Cogle, and E. Becerra-de Armas, "Sistema de Información Geográfica para la agricultura cañera en la provincia de Villa Clara," *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, vol. 13, no. 2, pp. 30-46, 2019.
- [31] L. BARRUETO *et al.*, "Resultados obtenidos en el proyecto" SAECA". Sistema automatizado para el estudio y control de los arrozales Results Obtained in the" SAECA" Project. Automated SYstem for the Study and Control of Rice Fiel," in *X Congreso Internacional "GEOMÁTICA", X Congreso Internacional "GEOMÁTICA", La Habana, Cuba, 2018.*
- [32] I. Cisternas, I. Velásquez, A. Caro, and A. Rodríguez, "Systematic literature review of implementations of precision agriculture," *Computers Electronics in Agriculture*, vol. 176, p. 105626, 2020.
- [33] M. S. A. Mahmud, M. S. Z. Abidin, A. A. Emmanuel, and H. S. Hasan, "Robotics and automation in agriculture: present and future applications," *Applications of Modelling Simulation*, vol. 4, pp. 130-140, 2020.
- [34] D. J. Pérez Navarro, "Modelado de la pulverizadora Patriot 250 como vehículo autónomo terrestre para aplicaciones agrícolas," Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Facultad de Ingeniería ..., 2021.
- [35] R. F. Carpio *et al.*, "A navigation architecture for ackermann vehicles in precision farming," *IEEE Robotics Automation Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 1103-1110, 2020.
- [36] H. Emaish, K. M. Abualnaja, E. E. Kandil, and N. R. Abdelsalam, "Evaluation of the performance and gas emissions of a tractor diesel engine using blended fuel diesel and biodiesel to determine the best loading stages," *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, pp. 1-12, 2021.
- [37] H. Shufeng, H. Yong, and F. Hui, "Recent development in automatic guidance and autonomous vehicle for agriculture: A Review," *浙江大学学报*, vol. 44, no. 4, pp. 381-391, 2018.

- [38] G. M. Santamaría Herrera, "Determinación de la potencia del tractor agrícola para el desarrollo de la mecanización en Huánuco-Panao," 2020.
- [39] J. Spencer, "Case IH exhibits its best," *Farmer's Weekly*, vol. 2017, no. 17020, pp. 52-53, 2017.
- [40] J. A. Thomasson, C. P. Baillie, D. L. Antille, C. R. Lobsey, and C. L. McCarthy, *Autonomous technologies in agricultural equipment: A review of the state of the art*. American Society of Agricultural and Biological Engineers St. Joseph, MI, USA, 2019.
- [41] A. A. Bakhtiari, H. Navid, J. Mehri, and D. D. Bochtis, "Optimal route planning of agricultural field operations using ant colony optimization," *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, vol. 13, no. 4, 2011.
- [42] A. Al-Zamil and A. K. J. Saudagar, "Drivers and challenges of applying green computing for sustainable agriculture: A case study," *Sustainable Computing: Informatics Systems*, vol. 28, p. 100264, 2020.
- [43] A. Utamima and A. Djunaidy, "Agricultural routing planning: A narrative review of literature," *Procedia Computer Science*, vol. 197, pp. 693-700, 2022.
- [44] C. Papachristos, S. Khattak, F. Mascarich, and K. Alexis, "Autonomous navigation and mapping in underground mines using aerial robots," in *2019 IEEE Aerospace Conference*, 2019, pp. 1-8: IEEE.
- [45] X. Xiao *et al.*, "Autonomous ground navigation in highly constrained spaces: Lessons learned from the barn challenge at icra 2022," *arXiv preprint arXiv:2204.1047*, 2022.
- [46] R. Eaton, H. Pota, and J. Katupitiya, "Path tracking control of agricultural tractors with compensation for steering dynamics," in *Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference*, 2009, pp. 7357-7362: IEEE.
- [47] Y. Jing, G. Liu, and C. Luo, "Path tracking control with slip compensation of a global navigation satellite system based tractor-scraper land levelling system," *Biosystems Engineering*, vol. 212, pp. 360-377, 2021.
- [48] Z. Liu, Z. Lü, W. Zheng, W. Zhang, and X. Cheng, "Design of obstacle avoidance controller for agricultural tractor based on ROS," *International Journal of Agricultural Biological Engineering*, vol. 12, no. 6, pp. 58-65, 2019.
- [49] X. Liu, A. K. Madhusudhanan, and D. Cebon, "Minimum swept-path control for autonomous reversing of a tractor semi-trailer," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 5, pp. 4367-4376, 2019.
- [50] H. Mousazadeh, "A technical review on navigation systems of agricultural autonomous off-road vehicles," *Journal of Terramechanics*, vol. 50, no. 3, pp. 211-232, 2013.
- [51] D. Maloku, "Adoption of precision farming technologies: USA and EU situation," *SEA-Practical Application of Science*, vol. 8, no. 22, pp. 7-14, 2020.

- [52] H. Lan, M. Elsheikh, W. Abdelfatah, A. Wahdan, and N. El-Sheimy, "Integrated RTK/INS navigation for precision agriculture," in *Proceedings of the 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019)*, 2019, pp. 4076-4086.
- [53] A. M. Lekkas, "Guidance and path-planning systems for autonomous vehicles," 2014.
- [54] M. Li, K. Imou, K. Wakabayashi, and S. Yokoyama, "Review of research on agricultural vehicle autonomous guidance," *International Journal of Agricultural Biological Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 1-16, 2009.
- [55] M. A. bin Mansor, "Motion control algorithm for path following and trajectory tracking for unmanned surface vehicle: A review paper," in *2018 3rd International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (CRC)*, 2018, pp. 73-77: IEEE.
- [56] L. E. Hernández-Morales, Y. Valeriano-Medina, and L. Hernández-Santana, "Algoritmo no lineal de guiado aplicado en vehículos marinos en presencia de perturbaciones medioambientales," *Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, vol. 43, no. 2, pp. 17-31, 2022.
- [57] V. M. Martínez, G. Gil-Gómez, and A. G. Cerezo, "MODELADO CINEMATICO Y DINAMICO DE UN ROBOT MÓVIL OMNI-DIRECCIONAL," *Malaga* p. 9, 2003.
- [58] J. Ackermann *et al.*, *Robust control: the parameter space approach*. Springer, 2002.
- [59] Y. Zhao and S. L. BeMent, "Kinematics, dynamics and control of wheeled mobile robots," in *Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1992, pp. 91, 92, 93, 94, 95, 96-91, 92, 93, 94, 95, 96: IEEE Computer Society.
- [60] R. Rajamani, "Lateral vehicle dynamics," in *Vehicle Dynamics and control*: Springer, 2012, pp. 15-46.
- [61] R. Rajamani, *Vehicle dynamics and control*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [62] M. K. Singh and D. R. Parhi, "Path optimisation of a mobile robot using an artificial neural network controller," *International Journal of Systems Science*, vol. 42, no. 1, pp. 107-120, 2011.
- [63] T. Kroger, "Online trajectory generation: Straight-line trajectories," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 27, no. 5, pp. 1010-1016, 2011.
- [64] N. Noguchi and H. Terao, "Path planning of an agricultural mobile robot by neural network and genetic algorithm," *Computers electronics in agriculture*, vol. 18, no. 2-3, pp. 187-204, 1997.
- [65] I. J. U. P. d. D. C. N. U. Seo, Department of Agricultural Machinery Engineering, "Working path formation system for autonomous traveling tractor," 2010.
- [66] F. Tränkle, (Modellbasierte Entwicklung Mechatronischer Systeme). Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg, 2021.

- [67] J. Villagra, V. Milanés, J. Pérez, J. J. R. Godoy, and A. Systems, "Smooth path and speed planning for an automated public transport vehicle," vol. 60, no. 2, pp. 252-265, 2012.
- [68] K. Macek, R. Philippsen, and R. Y. Siegwart, "Path following for autonomous vehicle navigation based on kinodynamic control," *Journal of computing information technology*, vol. 17, no. 1, pp. 17-26, 2009.
- [69] A. Elfes, "Using occupancy grids for mobile robot perception and navigation," *Computer*, vol. 22, no. 6, pp. 46-57, 1989.
- [70] J. Vilca, L. Adouane, and Y. Mezouar, "Reactive navigation of a mobile robot using elliptic trajectories and effective online obstacle detection," *Gyroscope Navigation*, vol. 4, no. 1, pp. 14-25, 2013.
- [71] T. Heinemann, O. Riedel, and A. Lechler, "Generating smooth trajectories in local path planning for automated guided vehicles in Production," *Procedia Manufacturing*, vol. 39, pp. 98-105, 2019.
- [72] J. Borenstein and Y. Koren, "The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots," *IEEE transactions on robotics automation*, vol. 7, no. 3, pp. 278-288, 1991.
- [73] D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun, "The dynamic window approach to collision avoidance," *IEEE Robotics Automation Magazine*, vol. 4, no. 1, pp. 23-33, 1997.
- [74] L. Chang, L. Shan, C. Jiang, and Y. Dai, "Reinforcement based mobile robot path planning with improved dynamic window approach in unknown environment," *Autonomous Robots*, vol. 45, no. 1, pp. 51-76, 2021.
- [75] L. E. Dubins, "On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents," *American Journal of mathematics*, vol. 79, no. 3, pp. 497-516, 1957.
- [76] J. Reeds and L. Shepp, "Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards," *Pacific journal of mathematics*, vol. 145, no. 2, pp. 367-393, 1990.
- [77] S. Gim, L. Adouane, S. Lee, and J.-P. Derutin, "Clothoids composition method for smooth path generation of car-like vehicle navigation," *Journal of Intelligent Robotic Systems*, vol. 88, no. 1, pp. 129-146, 2017.
- [78] S. Gim, L. Adouane, S. Lee, J.-P. J. J. o. I. Derutin, and R. Systems, "Clothoids composition method for smooth path generation of car-like vehicle navigation," vol. 88, no. 1, pp. 129-146, 2017.
- [79] X. Z. Han, H. C. Moon, and J. H. Kim, "Off-Road Machinery System Engineering: Development of a Path Generation and Tracking Algorithm for a Korean Auto-guidance Tillage Tractor," *바이오시스템공학*, vol. 38, no. 1, pp. 1-8, 2013.
- [80] X. Z. Han *et al.*, "Path-tracking simulation and field tests for an auto-guidance tillage tractor for a paddy field," *Computers Electronics in Agriculture*, vol. 112, pp. 161-171, 2015.

- 
- [81] K. Prach, I. Jongepierová, K. Řehouňková, and K. Fajmon, "Restoration of grasslands on ex-arable land using regional and commercial seed mixtures and spontaneous succession: successional trajectories and changes in species richness," *Agriculture, Ecosystems Environment*, vol. 182, pp. 131-136, 2014.
- [82] M. del Río Salio, "Generación de rutas para el guiado de un tractor en una parcela agrícola mediante GPS."
- [83] D. V. G. Juan, "Generación de Trayectorias de Curvatura Continua para el Seguimiento de Líneas basado en Visión Artificial."

## ANEXOS

### Anexo I Función de inicio de ruta o coordenada inicial del vehículo

```
function new_track = inicio_de_ruta(s1, s2, psi)

new_track = struct('points', cell(1), ...
    'tracks', cell(1));
new_track.points{1} = struct('s1', s1, ...
    's2', s2, 'psi', psi, 'x', 0);
end
```

### Anexo II Función para trayectoria o camino rectilíneo

```
function ruta = linea_recta(ruta, xe)

cnt = length(ruta.tracks);
p = ruta.points{cnt+1};
ruta.points{cnt+2} = ...
    struct('s1', p.s1 + xe * cos(p.psi), ...
        's2', p.s2 + xe * sin(p.psi), ...
        'psi', p.psi, ...
        'x', p.x + xe);
ruta.tracks{cnt+1} = struct('type', 'straight',
    ...
    'xe', xe);
end
```

**Anexo III Función para trayectoria o camino circular**

```
function ruta = arco_de_circunferencia(ruta, r, rad)

cnt = mbc_track_get_cnt(ruta);
p = ruta.points{cnt+1};
xe = rad * r;
center1 = p.s1 + sign(xe) * r * cos(p.psi + pi/2);
center2 = p.s2 + sign(xe) * r * sin(p.psi + pi/2);
ruta.points{cnt+2} = ...
    struct('s1', center1 - sign(xe) * r * cos(p.psi +
pi/2 + rad), ...
        's2', center2 - sign(xe) * r * sin(p.psi + pi/2 +
rad), ...
        'psi', p.psi + rad, ...
        'x', p.x + abs(xe));
ruta.tracks{cnt+1} = struct('type', 'circle', ...
    'r', r, 'xe', xe);
end
```