

**Universidad Complutense de Madrid**

Máster en Ingeniería de Sistemas y de Control

**Proyecto Fin de Máster**

**Sistema de planificación y seguimiento de rutas en  
vehículos autónomos marinos**



Alumno: **Javier Dormido Canto**

Directores: **Eva Besada Portas**  
**José Antonio López Orozco**

Curso académico 2017-2018

Convocatoria de defensa: Febrero

Máster en Ingeniería de Sistemas y de Control

# **Sistema de planificación y seguimiento de rutas en vehículos autónomos marinos**

Alumno: **Javier Dormido Canto**

Directores: **Eva Besada Portas**  
**José Antonio López Orozco**





## Autorización

Autorizamos a la Universidad Complutense de Madrid y a la Universidad Nacional de Educación a Distancia a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a sus autores, tanto la memoria de este Trabajo Fin de Máster, como el código, la documentación y/o el prototipo desarrollado.

Firmado:

Firma del alumno

## *Agradecimientos*

Quiero dar mi más sincero agradecimiento a mis directores del proyecto fin de máster, Eva Besada Portas y José Antonio López Orozco por todas las atenciones y el tiempo que me han dedicado.

Agradecer la comprensión de mis familiares: mis hermanos, cuñados y sobrinos. Y de forma muy especial a mis padres, Sebastián y María Antonia por su constante apoyo.

En general, a mis compañeros del grupo ISCAR. Y finalmente, un recuerdo muy especial a la memoria de Jesús Manuel de la Cruz, por todas sus enseñanzas y su legado.

# Resumen

El presente trabajo se enmarca dentro del problema de la planificación y seguimiento de trayectorias para vehículos autónomos de superficie.

Para el problema de seguimiento de trayectorias, el trabajo presenta el análisis de dos tipos de maniobras, conocidas como Maniobras Compuestas y Maniobras Paramétricas. Ambas han sido desarrolladas dentro del proyecto SALACOM, y han sido probadas en un entorno simulado y en un entorno real (experimentos en pantano de El Atazar). La descripción de las maniobras, el código desarrollado y los resultados de las pruebas y experimentos son recogidos en este trabajo.

Para el problema de planificación de trayectorias, el trabajo presenta el desarrollo de un Planificador asociado a las Maniobras Compuestas. Basado en el principio de las curvas de Dubins, este planificador es la herramienta, que el usuario utiliza para generar, a partir de unos puntos de paso o Waypoints, la estructura de la trayectoria necesaria para la ejecución de la maniobra.

Para la ejecución de pruebas en entorno simulado, se ha creado un modelo del vehículo en el sistema Twincat de Beckhoff, que permite ejecutar las maniobras antes de ser probadas en un entorno real.

Las pruebas reales se han llevado a cabo sobre un barco autónomo de 4 metros de eslora, que utiliza el mismo software que se usa durante las simulaciones, pero aplicando las órdenes de control y realizando las medidas con los actuadores y sensores del barco.

**Palabras clave:** Autónomo, USV, PLC, Controlador, Maniobra Compuesta, Maniobra Paramétrica, Planificador, Trayectoria, Segmento, Tramo, Giro

# Índice

<b>Capítulo 1: Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivación e Interés del Tema .....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estado del Arte .....	4
1.4 Organización de la Memoria .....	7
<b>Capítulo 2: El Vehículo: Modelo, Control de Rumbo y Sistema de Propulsión.....</b>	<b>8</b>
2.1 Modelo del USV .....	8
2.2 Control de Rumbo .....	9
2.2.1 Simulación Controlador de Rumbo .....	10
2.3 Sistema de Propulsión .....	12
<b>Capítulo 3: Planificación y Seguimiento de Maniobras Compuestas.....</b>	<b>14</b>
3.1 Estructura de Datos de la Trayectoria Planificada.....	14
3.2 Planificación de la Trayectoria y Tipos de Giro.....	15
3.2.1 Giro Recto Continuo.....	18
3.2.2 Giro Interno .....	19
3.2.2.1 Patologías Giro Interno.....	21
3.2.3 Giro Externo .....	22
3.2.3.1 Patologías Giro Externo .....	26
3.2.4 Giro Interno-Externo .....	28
3.2.4.1 Patologías Giro Interno-Externo.....	30
3.2.5 Giro Rumbo .....	32
3.2.5.1 Patología Giro Rumbo .....	34
3.3 Análisis de la Estructura de Datos de la Trayectoria Planificada.....	35
3.4 Seguimiento de Maniobras Compuestas .....	36
3.4.1 Estado para el Recorrido de un Punto Virtual por la Trayectoria .....	37
3.4.2 Funciones para la Integración de la Trayectoria.....	37
3.4.2.1 Cálculo del Último Segmento .....	39
3.5 Pruebas Maniobra Compuesta.....	44
3.5.1 Prueba 1. Cuadrado .....	44
3.6 Experimentos Maniobra Compuesta .....	47
3.6.1 Experimento 1. Cuadrado .....	47
<b>Capítulo 4: Definición y Seguimiento de Maniobras Paramétricas.....</b>	<b>50</b>
4.1 Definición de Curva Paramétrica .....	50
4.2 Curvas Implementadas .....	51
4.2.1 Recta. Cálculo de la Curvatura y Tangente del Ángulo .....	51
4.2.2 Círculo. Cálculo de la Curvatura y Tangente del Ángulo .....	52

4.2.3 Elipse. Cálculo de la Curvatura y Tangente del Ángulo .....	54
4.2.4 Lemniscata. Cálculo de la Curvatura y Tangente del Ángulo .....	55
4.2.5 Sinusoidal. Cálculo de la Curvatura y Tangente del Ángulo .....	56
4.3 Seguimiento Trayectoria Paramétrica .....	58
4.4 Pruebas Maniobra Paramétrica .....	58
4.4.1 Prueba 1. Círculo .....	58
4.4.2 Prueba 2. Elipse .....	60
4.4.3 Prueba 3. Lemniscata.....	61
4.5 Experimentos Maniobra Paramétrica .....	63
4.5.1 Experimento 1. Círculo .....	63
4.5.2 Experimento 2. Elipse .....	65
4.5.3 Experimento 3. Lemniscata .....	67
<b>Capítulo 5: Implementación Software.....</b>	<b>69</b>
5.1 Planificador.....	70
5.1.1 Diseño de Clases.....	71
5.1.2 Clase Vector2D .....	72
5.1.2.1 Propiedades.....	72
5.1.2.2 Métodos .....	72
5.1.3 Clase Giro .....	73
5.1.3.1 Propiedades.....	74
5.1.3.2 Métodos .....	74
5.1.4 Clase Ruta.....	75
5.1.4.1 Propiedades.....	75
5.1.4.2 Métodos .....	75
5.1.5 Clase Planificador.....	79
5.1.5.1 Propiedades.....	79
5.1.5.2 Métodos .....	79
<b>Capítulo 6: Conclusiones .....</b>	<b>80</b>
6.1 Líneas de Trabajo Futuro.....	81
<b>Capítulo 7: Bibliografía .....</b>	<b>83</b>
<b>Anexo 1: Planificador - Manual de Usuario.....</b>	<b>86</b>

# Lista de Figuras

## Capítulo 1

Figura 1: Prototipo Diseñado por Norman Bel Geddes .....	1
Figura 2: USV B7 The Beagle .....	5
Figura 3: USV Saildrone.....	5
Figura 4: USV Sea Machines.....	6
Figura 5: USV Indra.....	6

## Capítulo 2

Figura 6: Prototipo USV's del Proyecto SALACOM.....	8
Figura 7: Descomposición Vector Velocidad .....	9
Figura 8: Estructura del Lazo de Control del Rumbo del USV.....	9
Figura 9: Simulación Control de Rumbo – Recorrido Barco (azul).....	11
Figura 10: Simulación Control de Rumbo – Señal de Referencia Rumbo (90°, rojo) – Rumbo Barco (azul).....	11
Figura 11: Simulación Velocidad – Tensión Hélice (rojo): 2V – Velocidad Barco (azul) .....	12
Figura 12: Simulación Velocidad – Tensión Hélice (rojo): 4V – Velocidad Barco (azul) .....	13
Figura 13: Simulación Velocidad – Tensión Hélice (rojo): 6V – Velocidad Barco (azul) .....	13

## Capítulo 3

Figura 14: Recorrido Ejemplo.....	15
Figura 15: Ventana Planificador Recorrido Ejemplo.....	16
Figura 16: Trayectoria del Recorrido Ejemplo.....	17
Figura 17: Movimiento Recto Continuo .....	18
Figura 18: Giro Interno .....	19
Figura 19: Patología Giro Interno I.....	21
Figura 20: Patología Giro Interno II.....	21
Figura 21: Patología Giro Interno III .....	22
Figura 22: Giro Externo .....	23
Figura 23: Patología Giro Externo I.....	26
Figura 24: Patología Giro Externo II.....	26
Figura 25: Patología Giro Externo III .....	27
Figura 26: Giro Interno-Externo .....	28
Figura 27: Patología Giro Interno-Externo I .....	30
Figura 28: Patología Giro Interno-Externo II.....	31
Figura 29: Giro Rumbo .....	32
Figura 30: Patología Giro Rumbo I.....	34
Figura 31: Funciones PLC – Maniobra Compuesta .....	38
Figura 32: Cálculo del Último Tramo Circular (I).....	39
Figura 33: Cálculo del Último Tramo Circular (II).....	40
Figura 34: Cálculo del Último Tramo Circular (III) .....	41
Figura 35: Cálculo del Último Tramo Recto (I).....	42
Figura 36: Cálculo del Último Tramo Recto (II) .....	43
Figura 37: Maniobra Compuesta - Recorrido Prueba Cuadrado.....	44

Figura 38: Maniobra Compuesta - Recorrido Prueba Cuadrado: Punto Virtual (rojo); Barco (azul) .....	45
Figura 39: Maniobra Compuesta - Rumbo Prueba Cuadrado: Señal de Referencia (rojo); Barco (azul) .....	46
Figura 40: Maniobra Compuesta - Recorrido Experimento Cuadrado: Punto Virtual (rojo); Barco (azul).....	47
Figura 41: Maniobra Compuesta - Rumbo Experimento Cuadrado: Señal de Referencia (rojo); Barco (azul).....	48
Figura 42: Maniobra Compuesta - Rumbo Experimento Cuadrado: Evolución Error.....	49

## Capítulo 4

Figura 43: Recta Paramétrica .....	52
Figura 44: Círculo Paramétrico.....	53
Figura 45: Elipse Paramétrica .....	55
Figura 46: Lemniscata Paramétrica.....	56
Figura 47: Sinusoidal Paramétrico .....	57
Figura 48: Maniobra Paramétrica - Recorrido Prueba Círculo: Punto Virtual (rojo); Barco (azul).....	59
Figura 49: Maniobra Paramétrica - Rumbo Prueba Círculo: Señal de Referencia (rojo); Barco (azul) .....	59
Figura 50: Maniobra Paramétrica - Recorrido Prueba Elipse: Punto Virtual (rojo); Barco (azul).....	60
Figura 51: Maniobra Paramétrica - Rumbo Prueba Elipse: Señal de Referencia (rojo); Barco (azul) .....	61
Figura 52: Maniobra Paramétrica - Recorrido Prueba Lemniscata: Punto Virtual (rojo); Barco (azul) .....	62
Figura 53: Maniobra Paramétrica - Rumbo Prueba Lemniscata: Señal de Referencia (rojo); Barco (azul).....	62
Figura 54: Maniobra Paramétrica - Recorrido Experimento Círculo: Punto Virtual (rojo); Barco (azul) .....	63
Figura 55: Maniobra Paramétrica - Rumbo Experimento Círculo: Señal de Referencia (rojo); Barco (azul).....	64
Figura 56: Maniobra Paramétrica - Rumbo Experimento Círculo: Evolución Error .....	64
Figura 57: Maniobra Paramétrica - Recorrido Experimento Elipse: Punto Virtual (rojo); Barco (azul) .....	65
Figura 58: Maniobra Paramétrica - Rumbo Experimento Elipse: Señal de Referencia (rojo); Barco (azul).....	66
Figura 59: Maniobra Paramétrica - Rumbo Experimento Elipse: Evolución Error .....	66
Figura 60: Maniobra Paramétrica - Recorrido Experimento Lemniscata: Punto Virtual (rojo); Barco (azul).....	67
Figura 61: Maniobra Paramétrica - Rumbo Experimento Lemniscata: Señal de Referencia (rojo); Barco (azul).....	68
Figura 62: Maniobra Paramétrica - Rumbo Experimento Lemniscata: Evolución Error.....	68

## Capítulo 5

Figura 63: Arquitectura del Proyecto SALACOM.....	69
Figura 64: Planificador - Diseño de Clases .....	71
Figura 65: Planificador - Interfaz Gráfico: Panel Recta.....	76
Figura 66: Planificador - Interfaz Gráfico: Panel GiroRumbo .....	77

Figura 67: Planificador - Interfaz Gráfico: Panel Ruta .....	78
--	----

## **Capítulo 6**

Figura 68: Evasión de Obstáculos .....	81
--	----

## **Anexo**

Figura 69: Panel Recta .....	86
Figura 70: Panel Giro Rumbo .....	87
Figura 71: Panel Ruta.....	87
Figura 72: Trayectoria Ejemplo I.....	88
Figura 73: Ejemplo I – Panel Recta .....	89
Figura 74: Trayectoria Ejemplo II.....	89
Figura 75: Ejemplo II – Panel Giro Rumbo .....	90
Figura 76: Ejemplo II – Resultado Gráfico .....	90
Figura 77: Trayectoria Ejemplo III .....	91
Figura 78: Ejemplo III – Panel Ruta .....	92
Figura 79: Ejemplo III – Resultado Gráfico.....	92

# Lista de Tablas

## Capítulo 3

Tabla 1: Planificación Ejemplo de Trayectoria.....	15
Tabla 2: Estructura de Datos de la Trayectoria Ejemplo.....	35
Tabla 3: Maniobra Compuesta - Planificación Trayectoria Prueba Cuadrado.....	44
Tabla 4: Maniobra Compuesta - Planificación Trayectoria Experimento Cuadrado .....	47

## Anexo

Tabla 5: Waypoints Ejemplo I .....	88
Tabla 6: Planificación Trayectoria Ejemplo I .....	89
Tabla 7: Waypoints Ejemplo III.....	91
Tabla 8: Planificación Trayectoria Ejemplo III.....	91

## Capítulo 1: Introducción

Este capítulo repasa la evolución histórica y el interés de los vehículos autónomos, en especial de los marinos de superficie, para los que se identifica sus principales retos: la planificación y la navegación.

### 1.1 Motivación e Interés del Tema

Durante años los científicos se preguntaron cómo sería la vida después del año 2000. En la industria automotriz, muchos imaginaron vehículos “voladores” atravesando ciudades futuristas. Sin llegar a ese extremo aún, es indudable que la concepción de los vehículos está cambiando a una velocidad comparable a la velocidad con la que avanza la tecnología. Una realidad dentro de este desarrollo son los llamados *vehículos autónomos*, capaces de imitar las habilidades humanas en cuestión de manejo y control.

El concepto de conducción autónoma aparece por primera vez en el año 1939, cuando Norman Bel Geddes presentó, en la feria de Nueva York, un vehículo controlado por un circuito eléctrico [1].

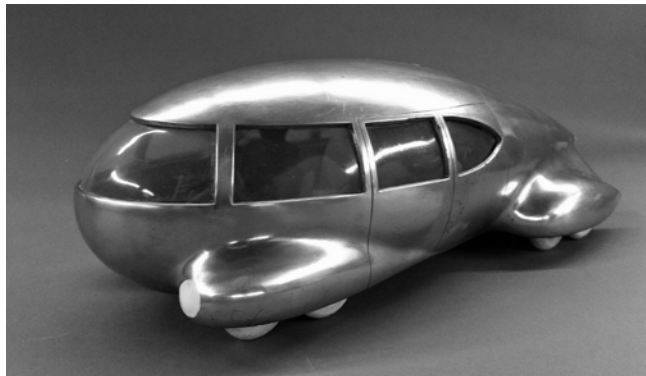


Figura 1: Prototipo diseñado por Norman Bel Geddes

Desde entonces, diversos factores han influido en el desarrollo de los vehículos autónomos que conocemos hoy día. Entre los más sobresalientes cabe señalar los siguientes:

1. *Limitaciones tecnológicas.* Las ideas planteadas durante el siglo XX en el diseño de vehículos autónomos se encontraban con las restricciones tecnológicas del momento. Gracias a los avances en las tecnologías de la computación y la automatización, estas limitaciones se han empezado a superar, y empresas tan importantes como Google, Tesla o Mercedes Benz invierten en este sector de forma cada vez más importante [2].
2. *Coste económico.* El desarrollo tecnológico ha traído consigo un descenso drástico en los costes de fabricación. Un ejemplo es el ordenador IBM 610, que

en el año 1957 salió a la venta por 55000\$ de la época; nada que ver con la oferta tecnológica y los precios que se disfrutaban en la actualidad.

3. *Factor humano*. Superar las limitaciones que presenta el ser humano, como por ejemplo la toma de decisiones para desplazamientos en entornos adversos, ha sido una motivación para el desarrollo de vehículos autónomos.

Si bien desde hace décadas existe un interés creciente en los vehículos autónomos, especialmente en el ámbito militar, no ha sido hasta estos últimos años cuando han dejado de ser prototipos de carácter experimental para pasar a ser sistemas reales. La incorporación de los vehículos no tripulados a la sociedad y su capacidad para desarrollar misiones ha sido divulgada, por diferentes medios (prensa, Internet..., etc), a la opinión pública en general. De hecho, existen vehículos autónomos que ayudan en labores civiles como: asistencia a personas con discapacidad, fumigación, recolección, transporte, exploración e inspección en túneles ó edificios, etc. [3]

Este extraordinario auge ha originado la creación de empresas dedicadas a mejorar el equipamiento e infraestructura que forma parte de estos vehículos, como son la instrumentación para el guiado, navegación y control, ó las comunicaciones, entre otros. Al mismo tiempo, han surgido un número considerable de grupos de investigación centrados en desarrollar aplicaciones basadas en el uso de vehículos no tripulados. Entre estos grupos, se encuentran el Grupo de Ingeniería de Sistemas, Control, Automática y Control (ISCAR) de la Universidad Complutense de Madrid (UCM) y el Departamento de Informática y Automática de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), que lideran el proyecto SALACOM (Sistema Autónomo de Localización y Actuación ante Contaminantes en el Mar), financiado por el Plan Nacional de Investigación en el Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad. Su objetivo es el desarrollo de un sistema compuesto por vehículos autónomos marinos de superficie (USVs), submarinos (Autonomous Underwater Vehicle, AUVs) y aéreos (Unmanned Aerial Vehicle, UAVs) que, en caso de un accidente que provoque un vertido contaminante, pueda realizar una actuación rápida para minimizar el impacto sobre el medio ambiente [4] desplegando una barrera de protección sobre la zona contaminada. La propuesta de este trabajo de investigación se encuentra íntimamente relacionada con este proyecto.

## 1.2 Objetivos

El futuro del sector marítimo contempla el uso de vehículos autónomos de superficie (USV, Unmanned Surface Vehicle) con el fin de reducir los errores humanos que provoquen accidentes, disminuir costes operativos y cumplir fielmente la regulación ambiental.

Es sencillo detectar que la principal dificultad en cualquier aplicación que maneje USV's marinos es la navegación autónoma. Por navegación autónoma se entiende la

capacidad de ir de un punto del espacio a otro evitando obstáculos. Para ejecutar maniobras de navegación autónoma, es imprescindible realizar las siguientes tareas:

1. *Reconocer y localizar el vehículo en el entorno.* El grado de conocimiento del entorno es básico a la hora de afrontar la resolución de este problema, ya que si éste no es conocido se aplican técnicas de navegación reactivas, mientras que si el entorno es conocido se emplean técnicas de navegación planificadas. Este trabajo ataca el problema de la generación de consignas de control para la navegación dentro de un entorno conocido y libre de obstáculos.
2. *Planificar la trayectoria.* Consiste en diseñar la ruta que se desea que recorra el vehículo, a partir de unos puntos de paso o *Waypoints* por los que ha de transitar. La idea general en la planificación de trayectorias consiste en desvincular el problema de la cinemática y dinámica del vehículo del de la obtención de una ruta (óptima o no) libre de obstáculos.

En muchos de los sistemas en los que intervienen USV's se requiere la participación de operadores humanos que, desde un Centro de Control de Tierra (CCT), además de realizar las dos tareas recién comentadas, velarán por la seguridad y el correcto funcionamiento de los vehículos ante las distintas maniobras que éstos pueden realizar. Un ejemplo de este tipo de sistema es el que se desarrolla en el proyecto de investigación SALACOM.

El presente trabajo tiene los siguientes objetivos:

1. Desarrollar el sistema de planificación de rutas de los USV's del proyecto SALACOM para las Maniobras Compuestas.
2. Implementar los algoritmos para gobernar un USV durante el seguimiento de una ruta planificada.

Para alcanzar el 1<sup>er</sup> objetivo, es necesario implementar una aplicación Planificador que calcule la estructura de datos que define la trayectoria diseñada por el operario a partir de unos Waypoints de paso.

Para alcanzar el 2<sup>o</sup> objetivo, es necesario implementar un módulo de comunicación con el USV para que, desde el CCT, se puedan lanzar maniobras y conocer en todo momento los datos que mide la IMU integrada en el vehículo: posición, orientación y velocidad. Estos algoritmos de control permiten gobernar, de forma autónoma, la dirección (timón) y la propulsión (hélice) del USV a partir de las medidas tomadas por la IMU.

### 1.3 Estado del Arte

En esta sección se presenta información sobre los sistemas de planificación, con objeto de dar a conocer dichos métodos dentro de un marco general. Se incluyen referencias que sirven como ampliación de conocimiento en el área.

En la década de los ochenta y noventa la popularidad de los robots y sus usos en la industria [5] hicieron que investigadores y programadores se dedicaran a resolver el problema de la planificación de trayectorias libres de colisiones entre los robots y su entorno. Desplazarse de un sitio a otro es fácil e intuitivo para el hombre, sin embargo es una tarea compleja para los vehículos autónomos. Una primera aproximación a los métodos de planificación fue realizada por Lozano Pérez [6] y una década después con la aparición del libro de Jean – Claude Latombe [7] surgieron numerosas publicaciones que lo sitúan como referencia en el campo de la planificación de trayectorias.

El procesamiento computacional y su continuo avance ha permitido que estos métodos de planificación de trayectorias hagan parte de aplicaciones innovadoras como es el caso de la exploración de otros planetas.

Para dar solución al problema de la planificación de trayectorias existen varios métodos de origen geométrico entre los que destacan 3 métodos:

1. *Métodos de campos de potenciales artificiales*: En estos métodos se genera una función escalar sobre el espacio de configuraciones de modo que su gradiente pueda ser utilizado como una guía en la que se trace la trayectoria. Estos campos de potencial se crean a partir de los obstáculos, del vehículo y de la meta. Lo que pretenden conseguir es que el vehículo sea atraído por la meta, a la vez que es repelido por los obstáculos.
2. *Métodos Roadmap (mapas de carretera)*: Son aquellos que construyen una descripción del espacio de configuraciones libres de colisión en forma de una red de curvas unidimensionales que formarán parte del espacio de soluciones. Entre estos métodos están los diagramas de Voronoi [8] y los grafos de visibilidad.
3. *Métodos de descomposición por celdas*: Se basan en la descomposición del espacio de configuraciones libres de colisión en regiones convexas denominadas celdas. Cada una de estas celdas se representa por un nodo en el denominado grafo de adyacencia. Cuando dos de dichas celdas tienen un límite en común, se agrega un arco al grafo que une sus correspondientes nodos [9]. Este grafo se usará para hallar la solución. Entre estos métodos están la descomposición vertical y las técnicas quadtree.

Debido a que en entornos complejos, con restricciones cinemáticas, los métodos geométricos pueden presentar limitaciones en cuanto al tiempo de cómputo necesario y al éxito en la generación de trayectorias, se ha desarrollado en la última década una nueva metodología llamada *Mapas Probabilísticos*, que utilizan una generación de

configuraciones aleatorias para identificar su entorno [10]. Un ejemplo de estos métodos son los algoritmos RRT (Rapidly exploring Random Tree) que se basan en la construcción de un árbol de configuraciones que crece explorando a partir de un punto origen.

Expuestos algunos sistemas de planificación, se muestra a continuación una relación de proyectos basados en prototipos USVs.

El USV “B7 The Beagle” está diseñado y fabricado por Al Marakeb, en los Emiratos Árabes Unidos. Este USV de 7,9 m de eslora con capacidad de tanque para 1000 kilómetros, proporciona soluciones marinas para aplicaciones militares (patrulla anti-piratería, seguridad de fronteras marítimas..., etc) y comerciales (recopilación de datos para la minería en alta mar y extracción de petróleo y gas).



**Figura 2:** USV B7 The Beagle

En la Figura 3 se observa un USV desarrollado por la empresa Saildrone (California, EEUU). Se trata de un pequeño trimaran encargado de monitorizar las poblaciones de peces y recopilar datos medioambientales.



**Figura 3:** USV Saildrone

En la Figura 4 se observa el USV desarrollado por la empresa Sea Machines (Boston, EEUU). Se trata de un navío diurno cuya tarea es operar remolcadores



**Figura 4:** USV Sea Machines

En España, Indra ha fabricado, dentro del proyecto Civil UAVs Initiative de la Xunta de Galicia, un prototipo (Figura 5) de 7,3 metros de eslora capaz de alcanzar los 35 nudos de velocidad. Se pilota desde tierra, de forma remota, y envía en tiempo real datos de radar e imágenes recogidas desde sus sensores.



**Figura 5:** USV Indra

## **1.4 Organización de la Memoria**

Este trabajo se ha estructurado en seis capítulos y un anexo. La Introducción al trabajo vista a lo largo del capítulo 1 da paso al capítulo 2 donde, para el vehículo utilizado durante las simulaciones y experimentos, se expone su modelo, su control de rumbo y su sistema de propulsión. En el capítulo 3 se detalla la maniobra de seguimiento denominada Maniobra Compuesta y su planificador asociado, encargado de calcular las trayectorias que debe seguir el vehículo. Este capítulo finaliza con la ejecución de una prueba y un experimento real de la Maniobra Compuesta. Las maniobras de seguimiento de trayectorias paramétricas y los resultados obtenidos en pruebas y experimentos se exponen en el capítulo 4. En el capítulo 5 se detalla la implementación software, haciendo hincapié en el desarrollo de la aplicación Planificador asociado a la Maniobra Compuesta. En el capítulo 6 se enumeran las conclusiones de este trabajo así como las líneas futuras de actuación. Finalmente, se incluye un anexo con el manual de usuario, con ejemplos prácticos, de la aplicación Planificador.

## Capítulo 2: El Vehículo: Modelo, Control de Rumbo y Sistema de Propulsión

En este capítulo se detalla el modelo, el control de rumbo y el sistema de propulsión utilizado para las pruebas y los experimentos llevados a cabo por el prototipo que aparece en la Figura 6. Este USV incorpora un PC industrial donde se ejecuta un PLC (Programmable Logic Controller) para gobernar el vehículo. A lo largo de la memoria, se entiende por prueba la ejecución de una maniobra en un entorno simulado, mientras que un experimento se desarrolla en un entorno real como es el pantano de El Atazar.



**Figura 6:** Prototipo USV's del Proyecto SALACOM

### 2.1 Modelo del USV

El PLC que se ocupa del control en tiempo real del barco incorpora un modelo para las pruebas (simulaciones), que tiene las siguientes entradas de control:

- $u_c$ : Ángulo del timón
- $U_0$ : Velocidad lineal del barco

En cuanto a las salidas del modelo, se enumeran las siguientes:

- $\psi$ : Rumbo del barco.
- $\psi'$ : Velocidad angular del timón. Es el incremento/decremento del ángulo de timón por unidad de tiempo.
- $\delta$ : Ángulo del timón
- $x'$ : Velocidad lineal del barco según eje X.
  - o  $x' = V \times \cos(\psi)$ , donde  $V = \sqrt{x'^2 + y'^2}$  es la velocidad del barco.
- $y'$ : Velocidad lineal del barco según eje Y
  - o  $y' = V \times \sin(\psi)$ , donde  $V = \sqrt{x'^2 + y'^2}$  es la velocidad del barco.

- $(X, Y)$ : Coordenadas de la posición del barco.
  - o  $X = X_0 + x' \cdot T$ , donde  $X_0$  es el valor de la coordenada X en el instante  $t-1$  y  $T$  el período de muestreo (0.01 segundos).
  - o  $Y = Y_0 + y' \cdot T$ , donde  $Y_0$  es el valor de la coordenada Y en el instante  $t-1$  y  $T$  el período de muestreo (0.01 segundos).

En la Figura 7 se puede observar gráficamente la descomposición del vector velocidad ( $V$ ) del barco situado en el punto  $B(X, Y)$  y que avanza según un rumbo  $\psi$ .

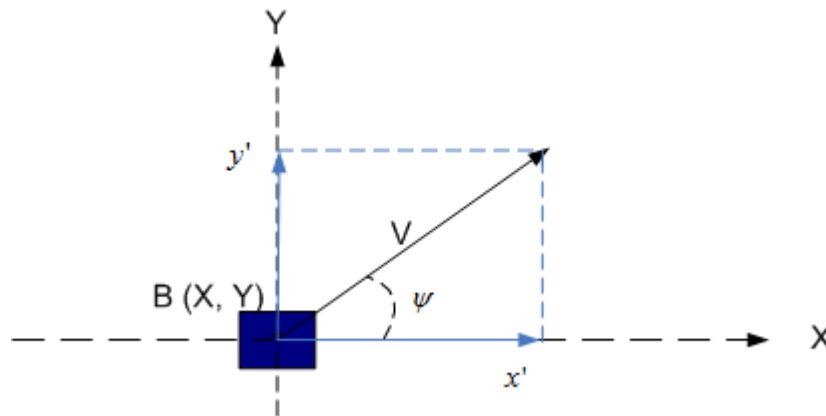


Figura 7: Descomposición Vector Velocidad

## 2.2 Control de Rumbo

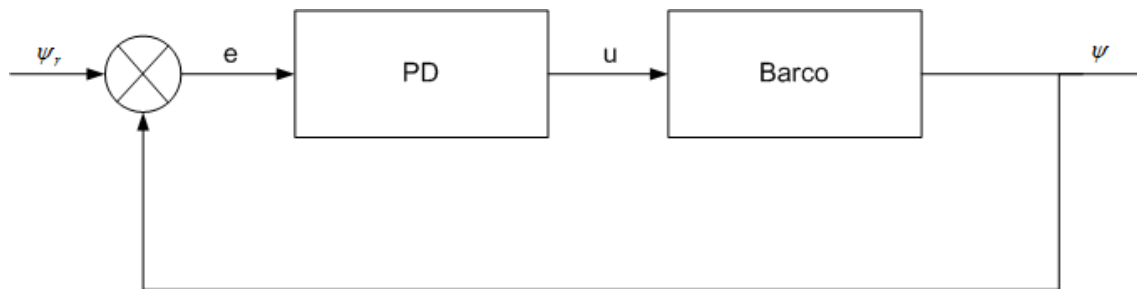


Figura 8: Estructura del Lazo de Control del Rumbo del USV

Para controlar el rumbo del barco se ha utilizado un controlador PD, donde la variable controlada es el rumbo  $\psi$  que sigue el USV (ver Figura 8), que se compara con el rumbo de referencia  $\psi_r$  fijado por el usuario para dar una señal de error  $e = \psi_r - \psi$  que permite calcular la acción proporcional del regulador como  $u_p = K_p \times (\psi_r - \psi)$ , donde

$K_p$  es la ganancia proporcional del regulador PD. La acción derivativa se calcula idealmente derivando la señal de error  $e$  de acuerdo a la siguiente expresión:

$$u_d = K_d \times \frac{de}{dt} .$$

La señal de control  $u$  que proporciona el regulador PD viene dado por

$$h = u_p + u_d = K_p \times (\psi_r - \psi) + K_d \times \frac{de}{dt} = K_p \times \left[ (\psi_r - \psi) + T_d \times \frac{de}{dt} \right]$$

La acción derivativa tiene como efecto más notable el proporcionar una mejora en la estabilidad del sistema en lazo cerrado.

Para todas las pruebas (simulaciones) presentadas en este trabajo se ha utilizado un controlador PD de rumbo con los siguientes parámetros de configuración:

$$K_p = 0.792; \quad K_i = 0; \quad K_d = 2.2161$$

Para todos los experimentos se ha usado un controlador PD de rumbo con los siguientes parámetros de configuración:

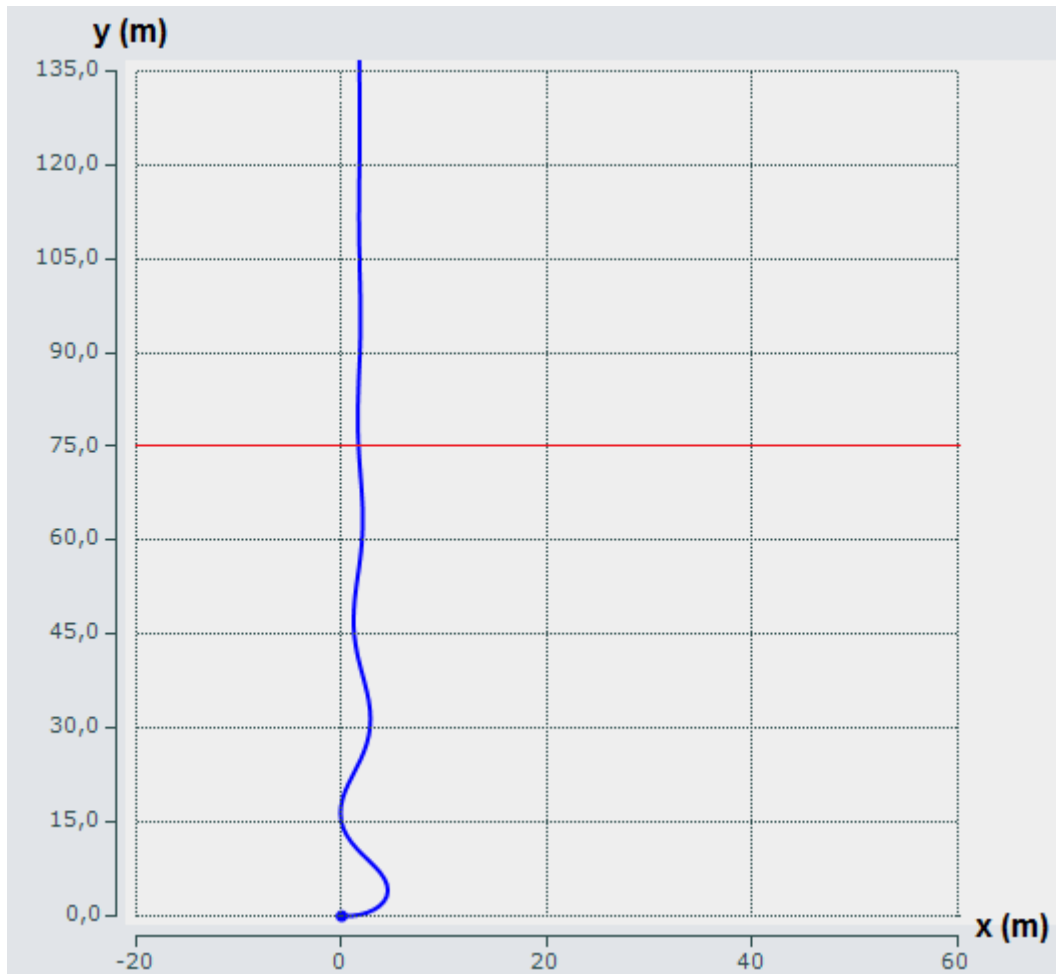
$$K_p = 0.8; \quad K_i = 0; \quad K_d = 1$$

Se ha optado por utilizar parámetros distintos del regulador en las pruebas y en los experimentos, ya que los parámetros óptimos para el modelo de las simulaciones no proporcionaba un comportamiento adecuado durante los experimentos.

### 2.2.1 Simulación Controlador de Rumbo

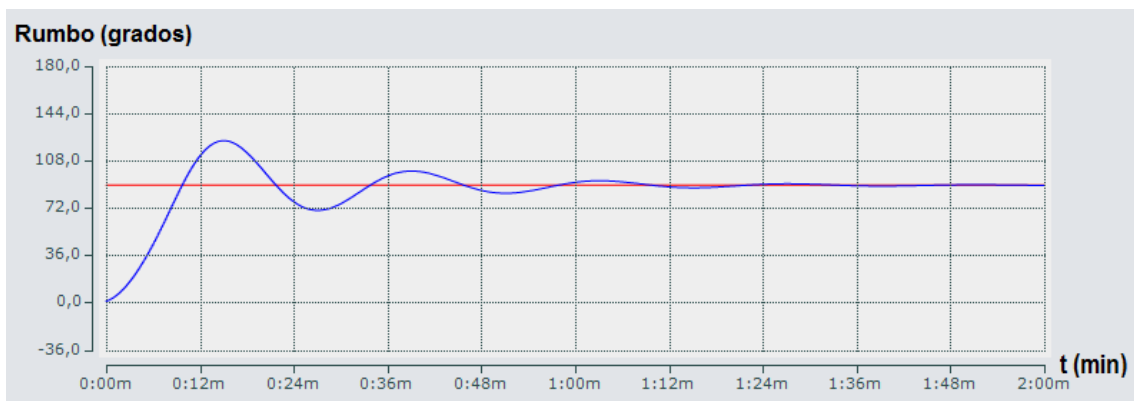
En esta prueba, el barco parte, del punto (0,0) y rumbo 0°, con velocidad constante (se aplica una tensión constante de 4V a la hélice) fijando en el controlador un rumbo de referencia de 90°.

La traza azul que aparece en la Figura 9 representa el recorrido del barco durante esta prueba, mientras que en la Figura 10 se puede comparar el valor de la referencia (90°) que se le va pasando al controlador (rojo) y el rumbo que lleva el barco (azul) durante toda la simulación.



**Figura 9:** Simulación Control de Rumbo – Recorrido Barco (azul)

En la Figura 9 se observa que, efectivamente el barco consigue alcanzar un rumbo de  $90^\circ$  cuando alcanza el valor de 75 metros en el eje de ordenadas, representada en la figura por la línea roja.



**Figura 10:** Simulación Control de Rumbo – Señal de Referencia Rumbo ( $90^\circ$ , rojo) – Rumbo Barco (azul)

En la Figura 10 se observa que tarda entorno a 75 segundos en llegar al estacionario que marca la línea roja.

## 2.3 Sistema de Propulsión

A pesar de que existe también un controlador PID para gobernar el sistema de propulsión ó velocidad del barco, éste no ha sido incluido en el trabajo, puesto que todas las pruebas y experimentos realizados fueron llevados a cabo con una velocidad constante del barco, obtenida aplicándose al motor de la hélice una tensión constante. Se presentan a continuación unas simulaciones que muestran la relación que hay entre la tensión aplicada al motor de la hélice y la velocidad del barco. En concreto se va a analizar la velocidad del barco cuando al motor de la hélice se le aplica 2V (Figura 11), 4V (Figura 12) y 6V (Figura 13). En todos los experimentos y pruebas presentados en este trabajo se aplicó una de estas tres tensiones.

Se observa que:

- Al aplicar tensión de 2V el barco alcanza una velocidad de 0.68 m/s aproximadamente
- Al aplicar tensión de 4V el barco alcanza una velocidad de 1.35 m/s aproximadamente
- Al aplicar tensión de 6V el barco alcanza una velocidad de 2 m/s aproximadamente

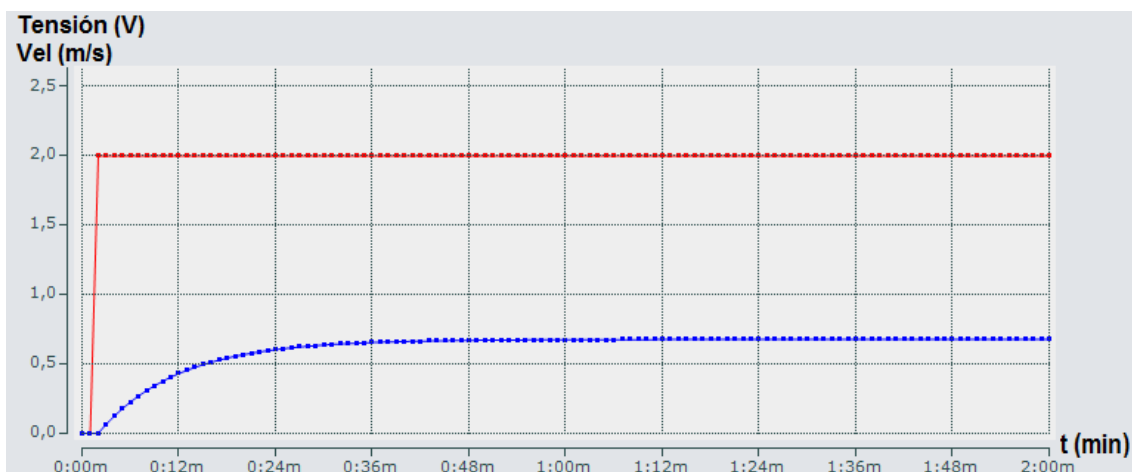


Figura 11: Simulación Velocidad – Tensión Hélice (rojo): 2V – Velocidad Barco (azul)

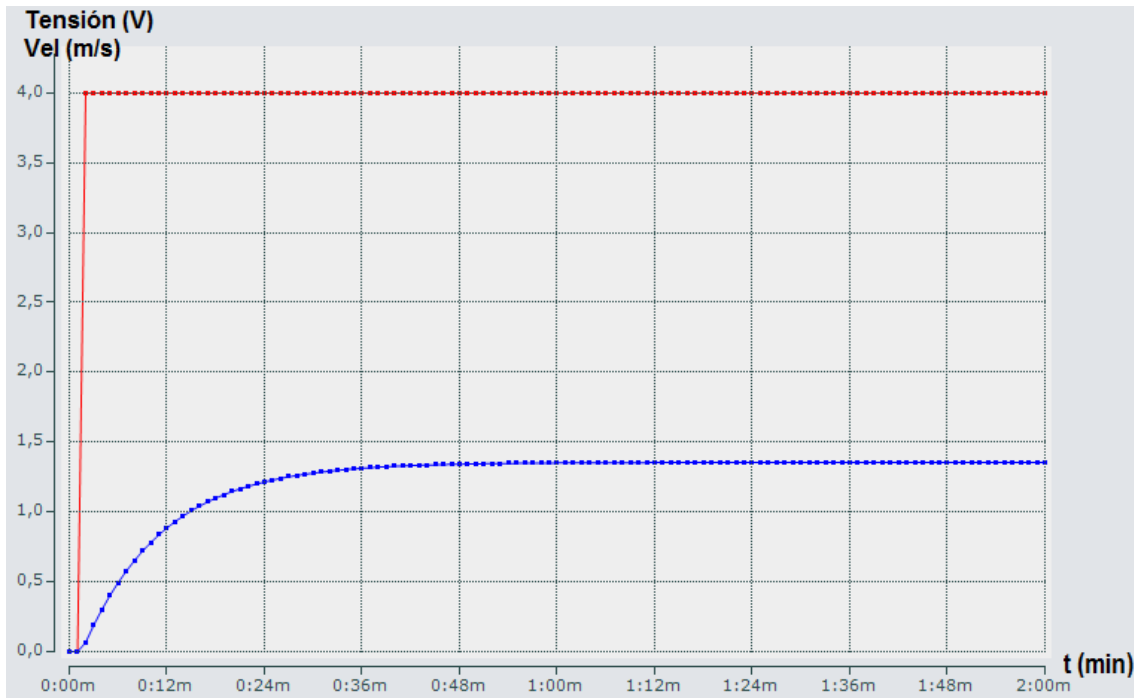


Figura 12: Simulación Velocidad – Tensión Hélice (rojo): 4V – Velocidad Barco (azul)

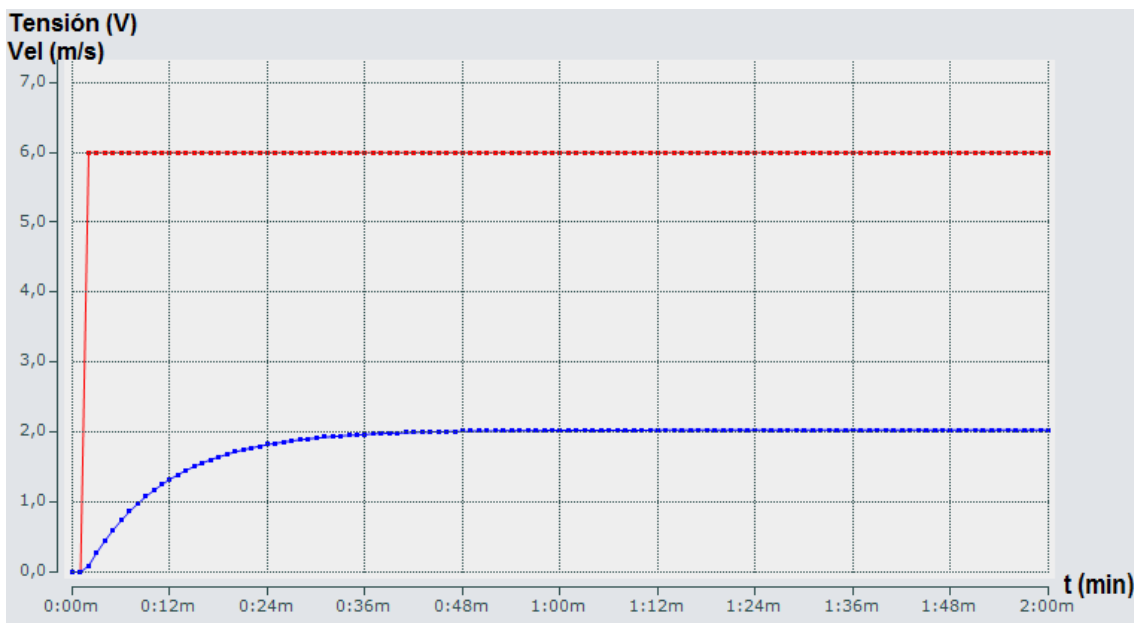


Figura 13: Simulación Velocidad – Tensión Hélice (rojo): 6V – Velocidad Barco (azul)

En todos los casos el barco alcanza la velocidad de crucero a los 40 segundos aproximadamente. Hasta ese momento se puede medir la aceleración que presenta el vehículo en cada instante calculando la pendiente de la curva de velocidad, representada en azul.

## Capítulo 3: Planificación y Seguimiento de Maniobras Compuestas

En este capítulo se explica la maniobra de seguimiento denominada Maniobra Compuesta y el proceso a seguir para su ejecución. Durante la ejecución de las Maniobras Compuestas el vehículo recorre trayectorias formadas por tramos/segmentos rectos y circulares. Dichas trayectorias se calculan mediante el planificador que se describe, a nivel funcional, en la sección 3.2, y a nivel software en el capítulo 5 y anexo 1.

### 3.1 Estructura de Datos de la Trayectoria Planificada

Se define a continuación la estructura de datos utilizada para representar las trayectorias de la Maniobra Compuesta. La trayectoria se representa mediante un conjunto de filas, cada una de las cuales representa un segmento lineal o circular. Cada fila o segmento contiene los siguientes datos:

[Pto. Inicial, Pto. Final, Centro, Longitud, Radio, Ángulo, Giro]

Pto. Inicial: Punto inicial del tramo

Pto. Final: Punto final del tramo

Centro: Centro de la circunferencia del tramo

Longitud: Longitud del tramo

Radio: Radio de la circunferencia del tramo

Ángulo: Rumbo inicial del tramo (ángulo del vector tangente)

Giro: Sentido del giro: +1 (sentido antihorario); -1 (sentido horario); 0 (recto)

En los tramos rectos, al no intervenir ninguna circunferencia, se fijan (al no tener significado) los siguientes valores:

- Centro: (0, 0)
- Radio: -1
- Ángulo: ángulo en radianes del vector tangente de la recta
- Giro: 0

El módulo Planificador, desarrollado en Java, es el encargado generar esta estructura de datos de acuerdo a unos parámetros de entrada necesarios para el cálculo de la trayectoria. Estos parámetros, introducidos por el usuario, son los siguientes:

- Lista y orden de Waypoints de paso. Conjunto de puntos por los que debe pasar la trayectoria.

- Radio de la circunferencia en los tramos circulares
- Distancia máxima de paso para validar el Giro Interno. En la sección 3.2.2 de esta memoria se explica en qué consiste dicho movimiento.
- Ángulo de rumbo. Es el rumbo con el que se desea que finalice la trayectoria.

### 3.2 Planificación de la Trayectoria y Tipos de Giro

En esta sección se explica, mediante un caso práctico, cómo el planificador compuesto calcula la estructura de datos de una trayectoria definida por el usuario. Sea  $T_r$  la trayectoria declarada a partir de los datos <sup>1</sup> contenidos en la Tabla 1 y representada en la Figura 14.

Lista y Orden Waypoints	Radio	Distancia máxima	Angulo de rumbo
A = (0, 0) B = (0, 500) D = (500, 500) E = (500, 0) A = (0, 0) D = (500, 500) B = (0, 500) F = (400, 100)	radio = 100	distancia = 100	90°

Tabla 1: Planificación Ejemplo de Trayectoria

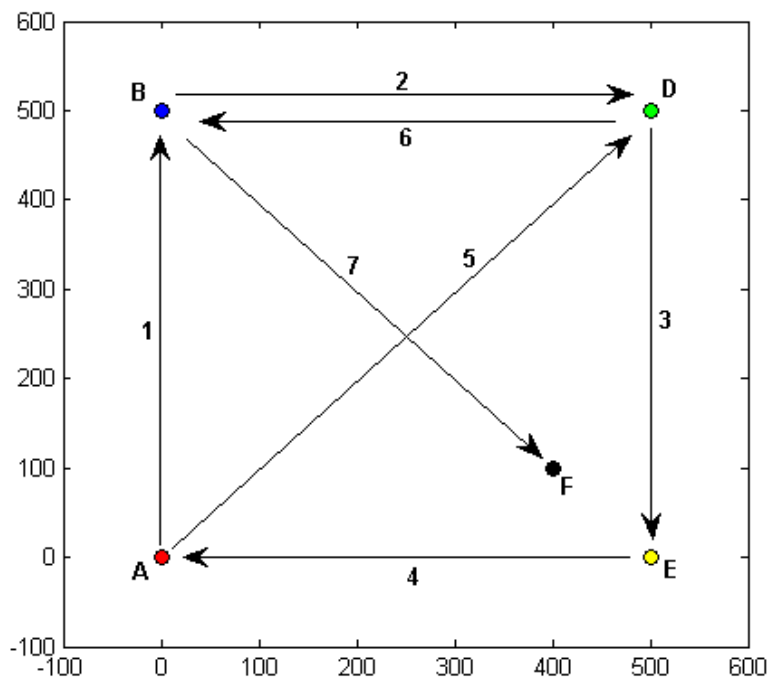


Figura 14: Recorrido Ejemplo

1 No se utiliza la letra C para etiquetar ningún Waypoint, ya que será usada para referirse a los centros de circunferencias

Desde el punto de vista de los waypoints, el recorrido del vehículo es  $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow A \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow F$ . A lo largo de la trayectoria, los tramos circulares tendrán un radio de giro de 100, una distancia máxima de validación para Giros Internos igual a 100 y ángulo de rumbo igual a  $90^\circ$ .

El resultado gráfico de la trayectoria  $T_r$  (Figura 16) se puede obtener mediante la interfaz gráfica (anexo 1) del planificador, cumplimentando los datos de acuerdo a la Figura 15.

	Coord X	Coord Y	Coord X	Coord Y	
Wp 1	0.0	0.0	Wp 2	0.0	Ángulo
Wp 3	500.0	500.0	Wp 4	500.0	Radio
Wp 5	0.0	0.0	Wp 6	500.0	Distancia
Wp 7	0.0	500.0	Wp 8	400.0	100.0
Wp 9			Wp 10		
Wp 11			Wp 12		
Wp 13			Wp 14		
Wp 15			Wp 16		
Wp 17			Wp 18		
Wp 19			Wp 20		

Figura 15: Ventana Planificador Recorrido Ejemplo

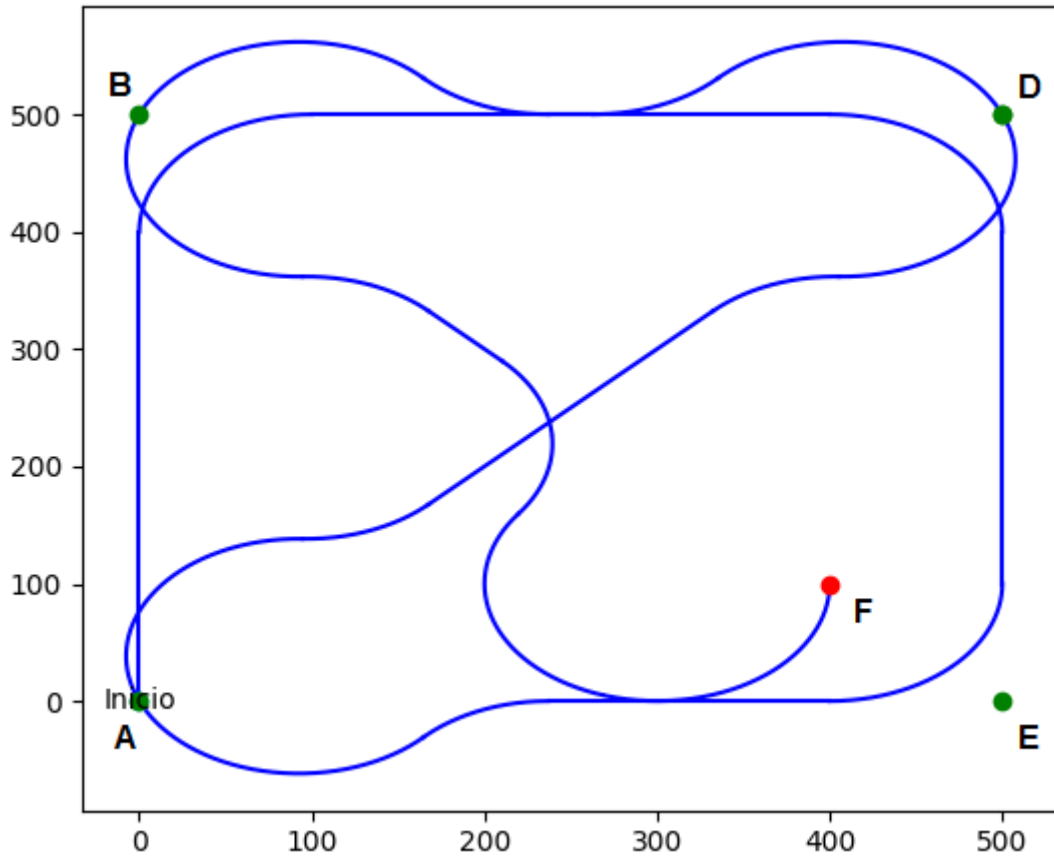


Figura 16: Trayectoria del Recorrido Ejemplo

Para calcular los segmentos de la estructura de datos de la trayectoria, el planificador utiliza unas operaciones de descomposición de tramos denominadas Giros. Un giro devuelve el conjunto de segmentos que unen 3 waypoints consecutivos del recorrido. En el ejemplo de  $T_r$ , el primer giro está definido por los waypoints  $A \rightarrow B \rightarrow D$ .

En las siguientes secciones, se detallan los tipos de giro que el planificador puede ejecutar. Para concluir la sección 3.2, relacionada con la planificación de la trayectoria, se presenta la estructura de datos resultante para la trayectoria  $T_r$ .

### 3.2.1 Giro Recto Continuo

Un giro Recto Continuo queda definido por los siguientes datos:

- **A**: Waypoint inicial
- **B**: Waypoint intermedio
- **D**: Waypoint destino

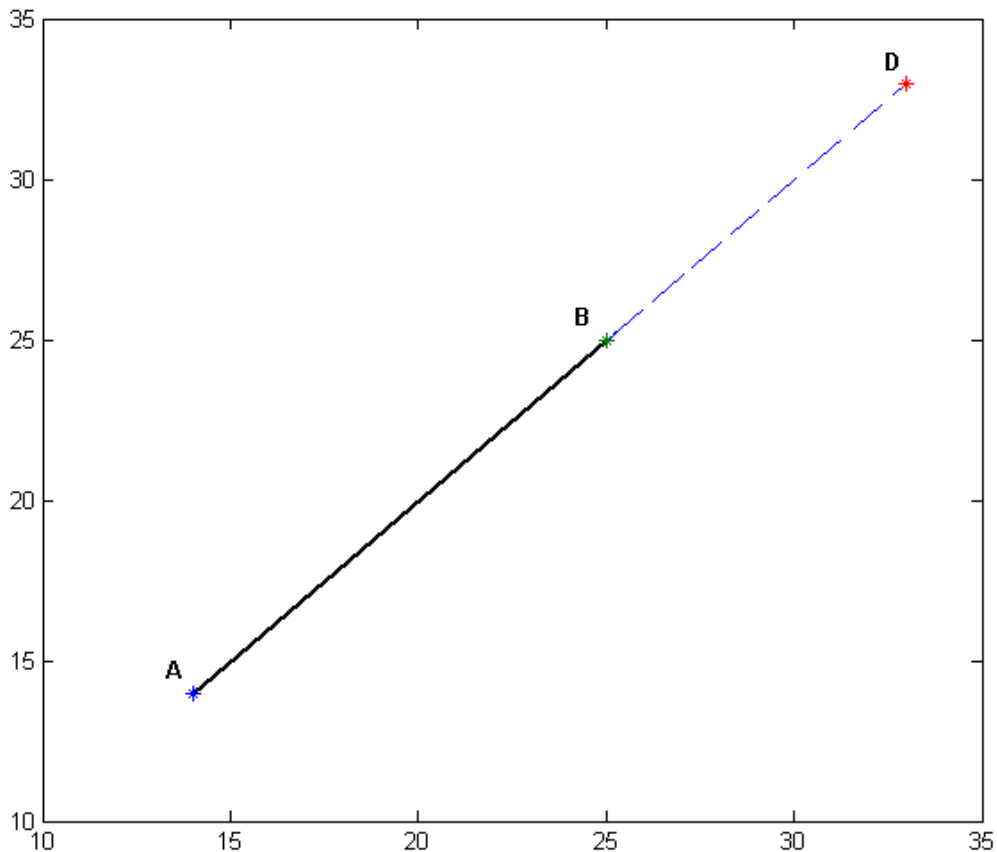


Figura 17: Movimiento Recto Continuo

En la Figura 17 se puede observar el resultado (línea negra gruesa) de aplicar un giro Recto Continuo sobre los Waypoints A(\*), B(\*) y D(\*).

El giro Recto Continuo se caracteriza porque su primer y único movimiento corresponde a un segmento recto desde el punto de partida del giro (A) hasta el punto intermedio (B).

Para determinar que un giro es Recto Continuo, se comprueba que el punto B pertenece al segmento  $\overline{AD}$ . Si es así, se aplica el Giro Recto Continuo. En caso contrario, en vez de realizar el giro Recto Continuo, el planificador intentará realizar el Giro Interno que se describe en la sección 3.2.2.

Para completar el campo Ángulo del segmento, se calcula la pendiente del segmento recto A-B.

Para todo giro Recto Continuo, su array movimientos estará compuesto por:

- i. Segmento rectilíneo A-B

siempre y cuando la longitud del segmento A-B sea mayor que 0.

Para este tipo de giros, al no existir circunferencias de giro, no existen patologías que hagan inviable la ejecución del mismo.

### 3.2.2 Giro Interno

Un giro Interno queda definido por los siguientes datos:

- **A**: Waypoint inicial
- **B**: Waypoint intermedio
- **D**: Waypoint destino
- **C**: Centro de la circunferencia inscrita a las rectas  $\overline{AB}$  y  $\overline{BD}$
- **P1**: Punto de la recta  $\overline{AB}$  tangente a la circunferencia
- **PF**: Punto de la recta  $\overline{BD}$  tangente a la circunferencia (Punto final del giro)
- **R**: Radio de la circunferencia de giro
- **d**: Distancia de B a la circunferencia de giro

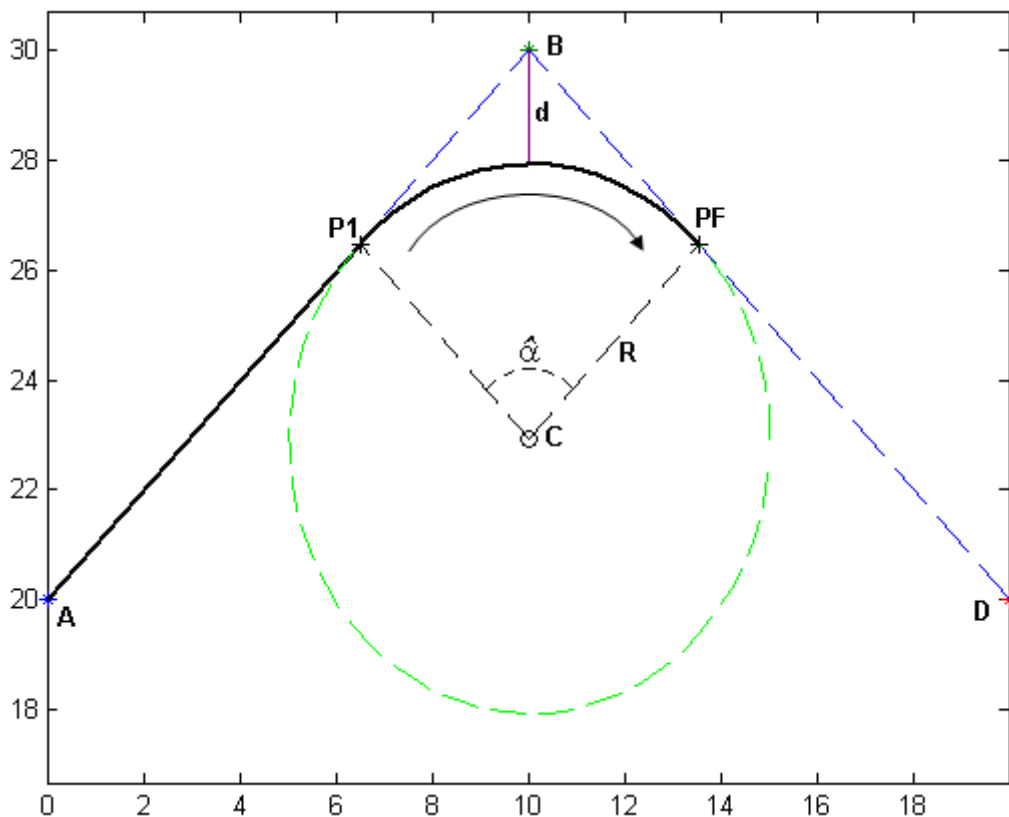


Figura 18: Giro Interno

En la Figura 18 se puede observar el resultado (línea negra gruesa) de aplicar un giro Interno de radio R sobre los Waypoints A(\*), B(\*) y D(\*).

El giro Interno consta de 1 circunferencia de giro y se descompone en 2 segmentos: Uno recto y otro circular.

Los pasos para calcular los datos de los segmentos son los siguientes:

1. Se halla la circunferencia de radio R y centro C tangente a las rectas  $\overline{AB}$  y  $\overline{BD}$ , obteniendo los puntos P1 y PF respectivamente. En la Figura 18 corresponde a la circunferencia de trazos verdes. El centro C se encuentra sobre la bisectriz del ángulo formado por las rectas  $\overline{AB}$  y  $\overline{BD}$ .
2. Se calcula el ángulo de giro ( $\alpha$ ), que es el formado por las rectas  $\overline{P1-C}$  y  $\overline{PF-C}$ .
3. Conocido  $\alpha$  y R, se halla la longitud del arco desde P1 hasta PF y la distancia de B hasta la circunferencia (d).
4. Se calcula el sentido de giro. En el ejemplo de la figura el sentido es horario.

Determinados todos estos datos, y para completar el campo Ángulo de los segmentos, calculamos también la pendiente del segmento recto A-P1 y el rumbo inicial del tramo circular P1-PF.

Se determina que todo giro Interno se descompone en:

- i. Segmento rectilíneo A-P1 +
- ii. Segmento circular P1-PF (Centro C y radio R)

### 3.2.2.1 Patologías Giro Interno

Existen 3 situaciones que impiden la ejecución de un giro Interno, y son las siguientes:

- *Caso 1.* Cuando P1 se encuentra más alejado de B que A

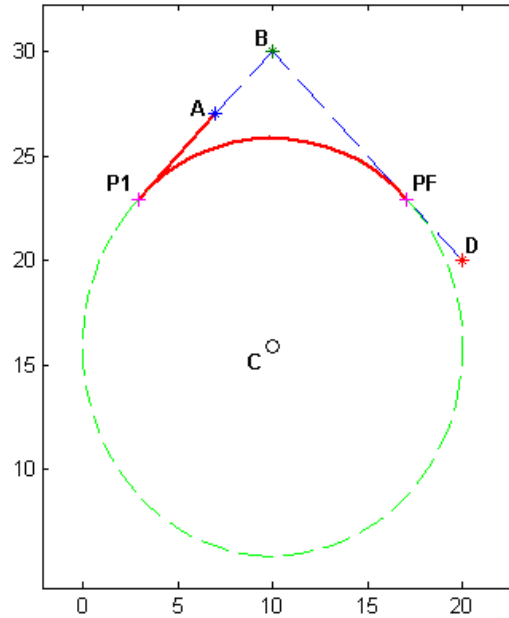


Figura 19: Patología Giro Interno I

- *Caso 2.* Cuando PF se encuentra más alejado de B que D

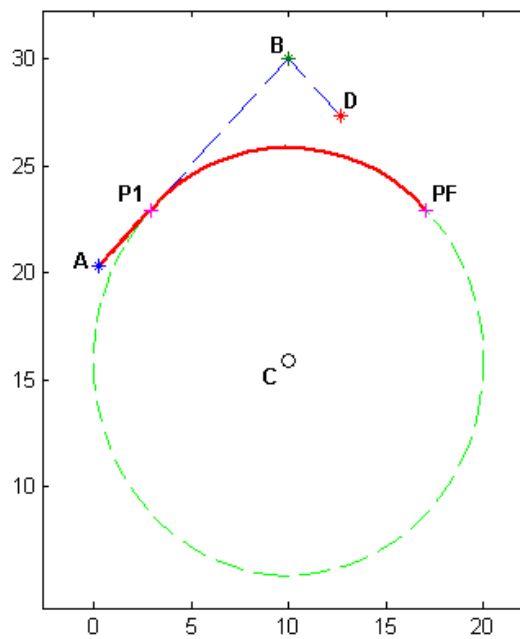


Figura 20: Patología Giro Interno II

- *Caso 3.* Cuando P1 se encuentra más alejado de B que A y PF se encuentra más alejado de B que D

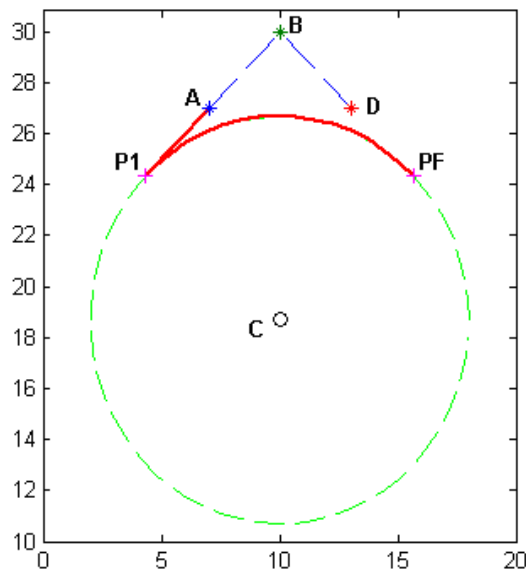


Figura 21: Patología Giro Interno III

En dichos casos, en vez de realizar un Giro Interno, el planificador intentará realizar el Giro Externo que se describe a continuación.

### 3.2.3 Giro Externo

Un giro Externo queda definido por los siguientes datos:

- **A:** Waypoint inicial
- **B:** Waypoint intermedio
- **D:** Waypoint destino
- **C:** Centro de la circunferencia que pasa por B (circunferencia interior 1)
- **C2:** Centro de la circunferencia exterior 2
- **P1:** Punto de la recta  $\overline{AB}$  tangente a la circunferencia exterior 2
- **P2:** Punto de la circunferencia exterior 1 tangente a la circunferencia exterior 2
- **C3:** Centro de la circunferencia exterior 3
- **P3:** Punto de la circunferencia exterior 1 tangente a la circunferencia exterior 3
- **PF:** Punto de la recta  $\overline{BD}$  tangente a la circunferencia exterior 3 (Punto final del giro)
- **R:** Radio de las circunferencias de giro

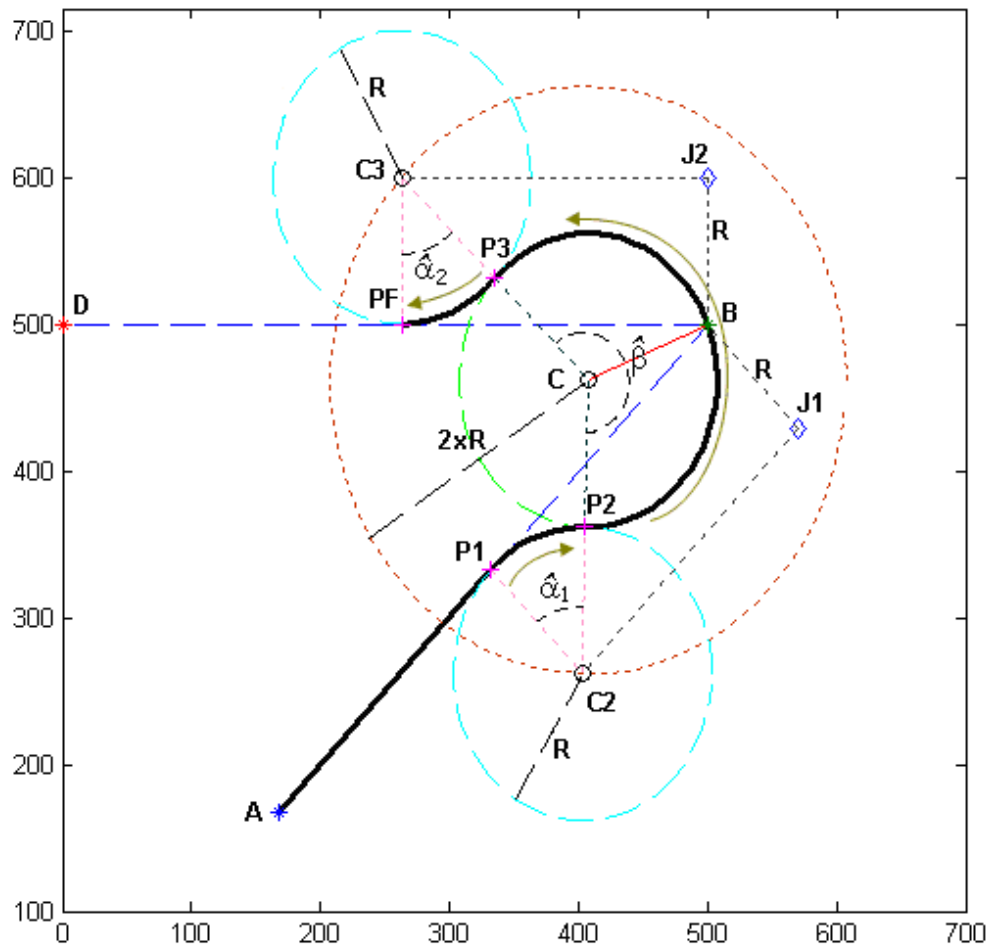


Figura 22: Giro Externo

En la Figura 22 se puede observar el resultado (línea negra gruesa) de aplicar un giro Externo de radio  $R$  sobre los Waypoints A(\*), B(\*) y D(\*).

El giro Externo consta de 3 circunferencias de giro y se descompone en 4 segmentos: Uno recto y tres circulares. Se caracteriza por conseguir un camino que pasa por B.

Dentro del giro Externo se pueden distinguir los siguientes elementos:

- 2 circunferencias externas de radio  $R$  (color cian, de línea discontinua) con centros en  $C2$  y  $C3$ .
- 1 circunferencia interior de radio  $R$  (color verde, de línea discontinua) con centro en  $C$ .
- 1 circunferencia de corte de radio  $2 \times R$  (color naranja discontinuo) con centro en  $C$ .
- 2 puntos exteriores (forma de diamante de color azul denotados como  $J1$  y  $J2$  en la figura).
- 4 puntos tangentes de trayectoria (forma de cruz de color magenta denotados como  $P1$ ,  $P2$ ,  $P3$  y  $PF$  en la figura).

Los pasos para calcular los datos de los segmentos son los siguientes:

1. Se calcula la circunferencia interior. El centro de esta circunferencia se puede calcular gracias a que:
  - i. se sitúa sobre la bisectriz (línea roja en la figura) del ángulo que forman las rectas  $\overline{AB}$  y  $\overline{BD}$ ;
  - ii. se encuentra a una distancia  $R$  de  $B$ .

Una vez conocido  $C$ , se traza la circunferencia de corte ( $\text{radio} = 2 \times R$ )

2. Se halla la primera circunferencia externa de centro  $C_2$ , que corresponde a la primera circunferencia que interviene en el giro y se encuentra entre  $A$  y  $B$ . Para calcular  $C_2$  se siguen los siguientes pasos:
  - i. Se calcula el punto exterior  $J_1$ . Es el punto de la recta perpendicular a  $\overline{AB}$ , que pasa por  $B$  y se encuentra a una distancia  $R$  de dicho punto.
  - ii. Trazando por  $J_1$  la paralela a la recta  $\overline{AB}$ , se obtienen 2 puntos de corte con la llamada circunferencia de corte. De entre estos 2 puntos de corte, si se escoge el punto más cercano a  $A$ , se obtiene  $C_2$ .
3. Trazando la circunferencia de radio  $R$  con en centro  $C_2$ , se obtienen los puntos  $P_1$  (punto tangente con la recta  $\overline{AB}$ ) y  $P_2$  (punto tangente con la circunferencia interior). Se calcula:
  - i. el ángulo de giro ( $\alpha_1$ ), que es el formado por las rectas  $\overline{P_1-C_2}$  y  $\overline{C_2-P_2}$ ;
  - ii. la longitud del arco desde  $P_1$  hasta  $P_2$ ;
  - iii. el sentido de giro (en el ejemplo de la figura es sentido horario)
4. Se halla la segunda circunferencia externa de centro  $C_3$ , que corresponde a la tercera circunferencia que interviene en el giro y se encuentra entre  $B$  y  $D$ . De forma similar al cálculo de  $C_2$ , para hallar  $C_3$  se siguen los siguientes pasos:
  - i. Se calcula el punto exterior  $J_2$ . Es el punto de la recta perpendicular a  $\overline{BD}$ , que pasa por  $B$  y se encuentra a una distancia  $R$  de dicho punto.
  - ii. Trazando por  $J_2$  la paralela a la recta  $\overline{BD}$ , se obtienen 2 puntos de corte con la llamada circunferencia de corte. De entre estos 2 puntos, si se escoge el punto más cercano a  $D$ , se obtiene  $C_3$ .
5. Trazando la circunferencia de radio  $R$  con centro en  $C_3$ , se obtienen los puntos  $P_3$  (punto tangente con la circunferencia interior) y  $P_4$  (punto tangente con la recta  $\overline{BD}$ ). Se calcula:

- i. el ángulo de giro ( $\alpha_2$ ), que es el formado por las rectas  $\overline{P3-C3}$  y  $\overline{C3-PF}$ ;
  - ii. la longitud del arco desde P3 hasta PF;
  - iii. el sentido de giro (en el ejemplo de la figura es sentido horario)
6. Una vez se tiene toda la información relativa a los giros de las circunferencias externas, se calcula la información del giro de la circunferencia interior:
- i. el ángulo de giro ( $\beta$ ), que es el formado por las rectas  $\overline{P2-C}$  y  $\overline{C-P3}$ ;
  - ii. la longitud del arco desde P2 hasta P3;
  - iii. el sentido de giro (en el ejemplo de la figura es sentido antihorario)

Determinados todos estos datos, y para completar el campo Ángulo de los segmentos, se calculan también la pendiente del segmento recto A-P1 y el rumbo inicial de los tramos circulares P1-P2, P2-P3 y P3-PF.

Se determina que todo giro Externo se descompone en:

- iii. Segmento rectilíneo A-P1 +
- iv. Segmento circular P1-P2 (Centro C1 y radio R) +
- v. Segmento circular P2-P3 (Centro C y radio R) +
- vi. Segmento circular P3-PF (Centro C2 y radio R)

### 3.2.3.1 Patologías Giro Externo

Existen 3 situaciones que impiden la ejecución de un giro Externo, y son las siguientes:

- *Caso 1.* Cuando P1 no pertenece al segmento  $\overline{AB}$

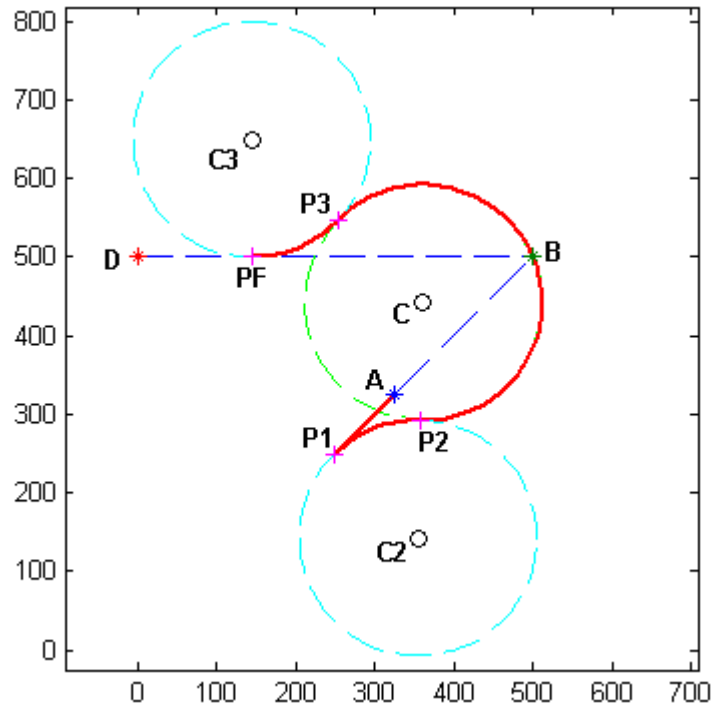


Figura 23: Patología Giro Externo I

- *Caso 2.* Cuando PF no pertenece al segmento  $\overline{BD}$

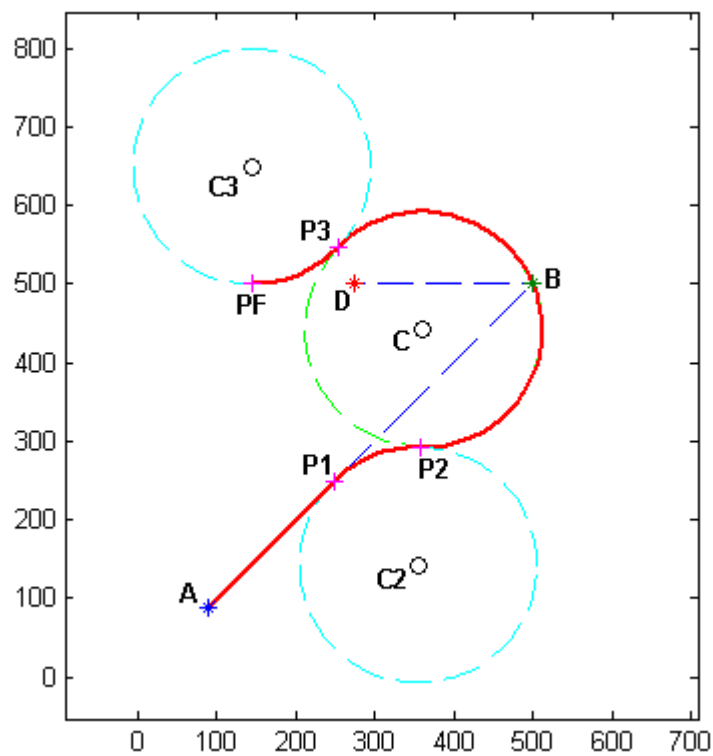


Figura 24: Patología Giro Externo II

- *Caso 3.* Cuando P1 no pertenece al segmento  $\overline{AB}$  y PF al segmento  $\overline{BD}$

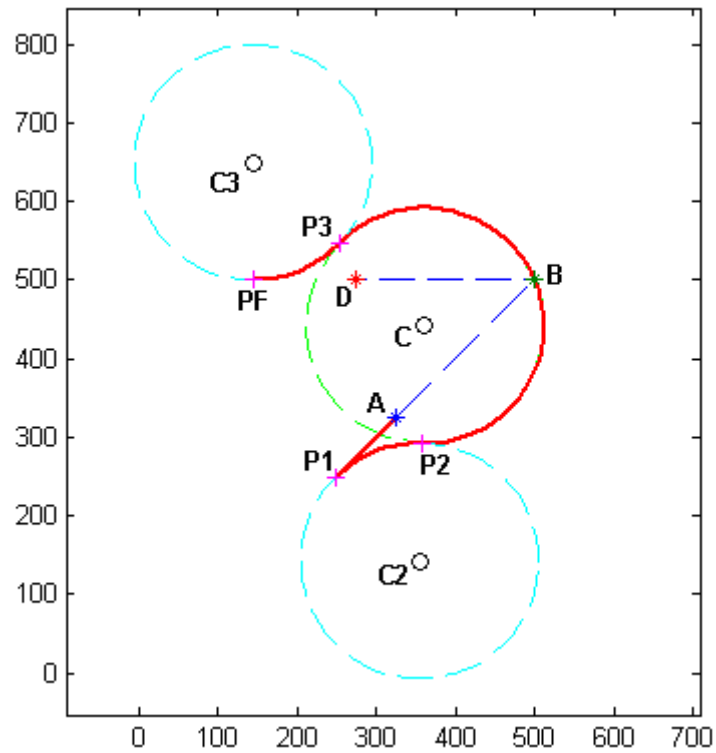


Figura 25: Patología Giro Externo III

En los casos anteriores, el planificador intentará realizar el Giro Interno-Externo que se describe a continuación.

### 3.2.4. Giro Interno-Externo

Un giro Interno-Externo queda definido por los siguientes datos:

- **A**: Waypoint inicial
- **B**: Waypoint intermedio
- **D**: Waypoint destino
- **C**: Centro de la circunferencia interior 1 tangente a la recta  $\overline{AB}$  en A
- **C2**: Centro de la circunferencia exterior 2
- **P1**: Punto de la circunferencia interior 1 tangente con la circunferencia exterior 2
- **PF**: Punto de la circunferencia exterior 2 tangente con la recta  $\overline{BD}$  (Punto final del giro)
- **R**: Radio de las circunferencias de giro

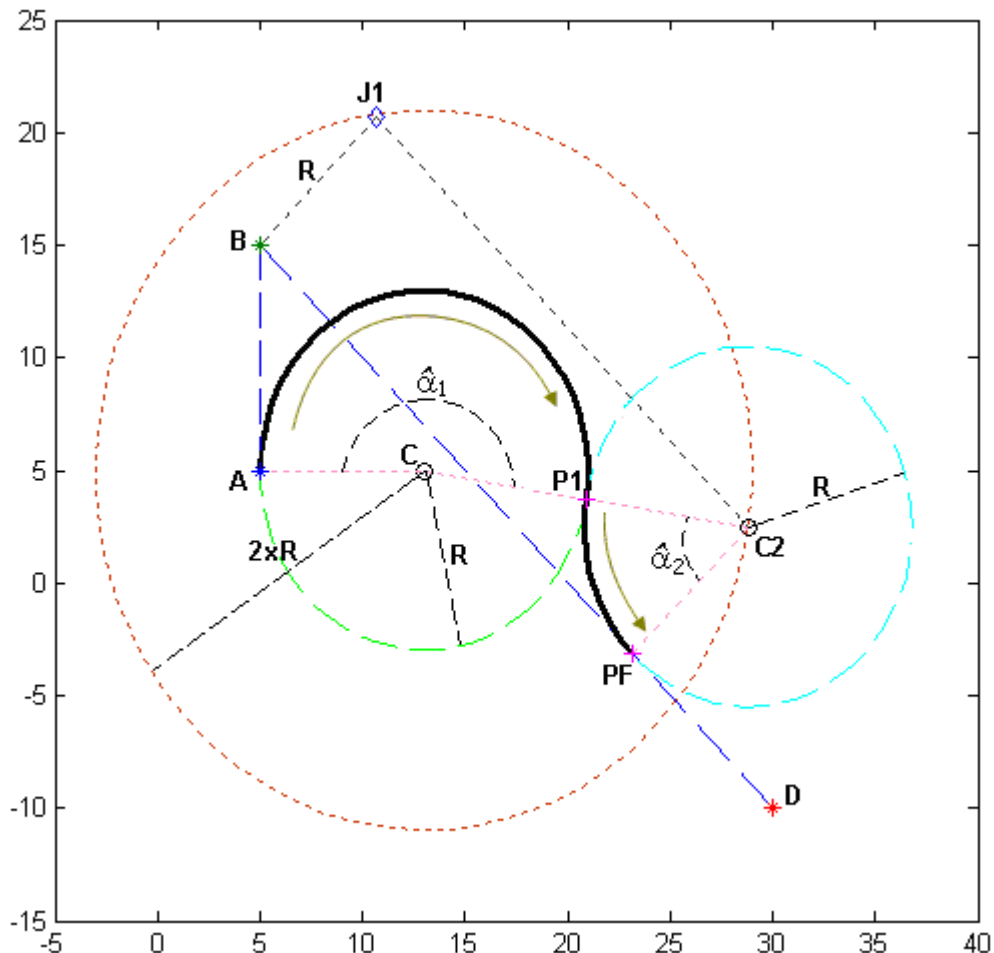


Figura 26: Giro Interno-Externo

En la Figura 26 se puede observar el resultado (línea negra gruesa) de aplicar un giro Interno-Externo de radio R sobre los Waypoints A(\*), B(\*) y D(\*).

El giro Interno-Externo consta de 2 circunferencias de giro y se descompone en 2 segmentos circulares.

Dentro del giro Interno-Externo se pueden distinguir los siguientes elementos:

- 1 circunferencia externa de radio  $R$  (color cyan, de línea discontinua) con centro en  $C2$
- 1 circunferencia interna de radio  $R$  (color verde, de línea discontinua) con centro en  $C$
- 1 circunferencia de corte de radio  $2 \times R$  (color naranja discontinuo) con centro en  $C$
- 1 punto exterior (forma de diamante de color azul denotado como  $J1$  en la figura)
- 2 puntos tangentes de trayectoria (forma de cruz de color magenta denotados como  $P1$  y  $PF$  en la figura)

Los pasos para calcular los datos de los segmentos son los siguientes:

1. Se halla la circunferencia interna (1ª circunferencia que interviene en el giro Interno-Externo). El centro de esta circunferencia se puede obtener trazando la perpendicular a la recta  $\overline{AB}$  que pasa por  $A$ , y calculando el punto perteneciente a esta perpendicular que se encuentra a la distancia  $R$  de  $A$ . De esta forma el waypoint  $A$  se convierte en el punto de la recta  $\overline{AB}$  tangente a la circunferencia interna. Una vez conocido  $C$ , se traza la circunferencia de corte (radio =  $2 \times R$ )
2. Se halla la circunferencia externa de centro  $C2$ , que corresponde a la segunda circunferencia que interviene en el giro y que se encuentra entre  $B$  y  $D$ . Para calcular  $C2$  se siguen los siguientes pasos:
  - iv. Se calcula el punto exterior  $J1$ . Es el punto de la recta perpendicular a  $\overline{BD}$ , que pasa por  $B$  y se encuentra a una distancia  $R$  de dicho punto.
  - v. Trazando por  $J1$  la paralela a la recta  $\overline{BD}$ , se obtienen 2 puntos de corte con la llamada circunferencia de corte. De entre estos 2 puntos de corte, si se escoge el punto más cercano a  $D$ , se obtiene  $C2$ .
3. Trazando la circunferencia de radio  $R$  con centro en  $C2$ , se obtienen los puntos  $P1$  (punto tangente con la circunferencia interna) y  $PF$  (punto tangente con la recta  $\overline{BD}$ ). Calculamos:
  - i. el ángulo de giro ( $\alpha_2$ ), que es el formado por las rectas  $\overline{P1-C2}$  y  $\overline{C2-P2}$ ;
  - ii. la longitud del arco desde  $P1$  hasta  $PF$ ;
  - iii. el sentido de giro (en el ejemplo de la figura es sentido antihorario)

4. Una vez se tiene toda la información relativa al giro de la circunferencia externa, se calcula la información del giro de la circunferencia interna:
  - i. el ángulo de giro ( $\alpha_1$ ), que es el formado por las rectas  $\overline{AC}$  y  $\overline{C-P1}$ ;
  - ii. la longitud del arco desde A hasta P1;
  - iii. el sentido de giro (en el ejemplo de la figura es sentido horario)

Para completar el campo Ángulo de los segmentos, se calcula también la pendiente del segmento recto A-P1 y el rumbo inicial del tramo circular P1-PF.

Se determina que todo giro Interno-Externo se descompone en:

- i. Segmento circular A-P1 (Centro C y radio R) +
- ii. Segmento circular P1-PF (Centro C2 y radio R)

### 3.2.4.1 Patologías Giro Interno-Externo

Existen 2 situaciones que impiden la ejecución de un giro Interno-Externo, y son las siguientes:

- *Caso 1.* Cuando no existe circunferencia exterior válida (que sea tangente a la circunferencia interior y a la recta  $\overline{BD}$ )

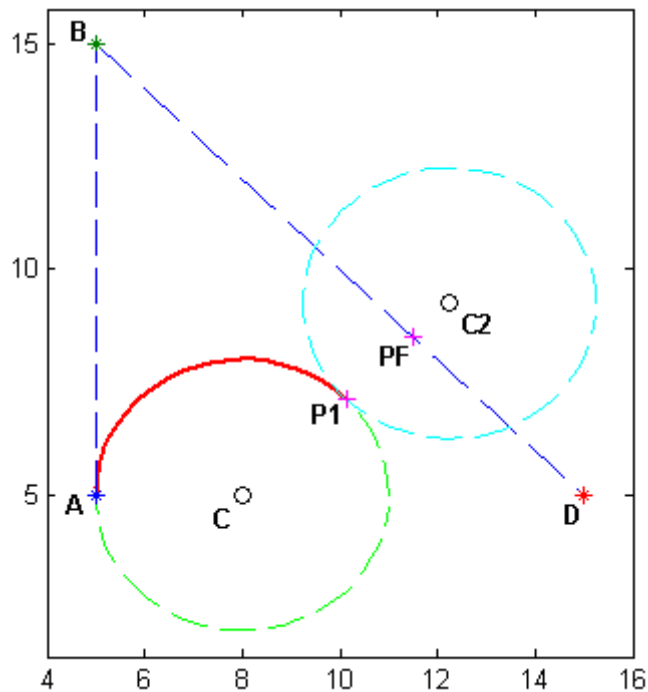


Figura 27: Patología Giro Interno-Externo I

- *Caso 2.* Cuando hay circunferencia exterior válida, pero PF se encuentra más alejado de B que D

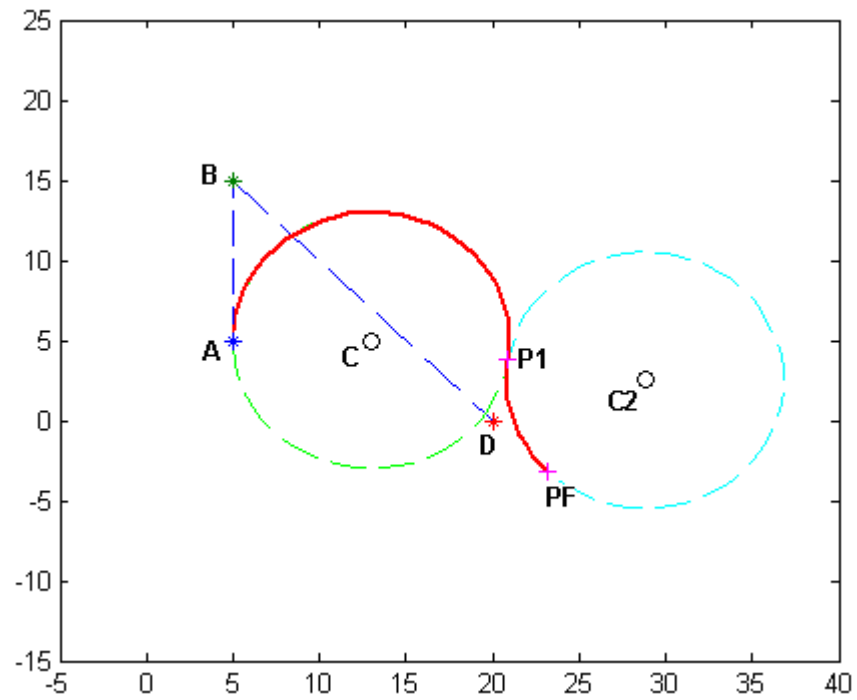


Figura 28: Patología Giro Interno-Externo II

En estos casos, al no poder aplicar ningún tipo de giro, el planificador determina que la trayectoria definida no puede ser resuelta.

### 3.2.5 Giro Rumbo

Un giro Rumbo (último giro de una trayectoria) queda definido por los siguientes datos:

- **A**: Waypoint inicial
- **B**: Waypoint final
- **C1**: Centro de la circunferencia 1
- **C**: Centro de la circunferencia 2 tangente a B
- **P1**: Punto tangente de la recta AB con la circunferencia 1
- **P2**: Punto de la circunferencia 1 tangente con la circunferencia 2
- **R**: Radio de las circunferencias de giro
- $\alpha_r$ : Ángulo de rumbo

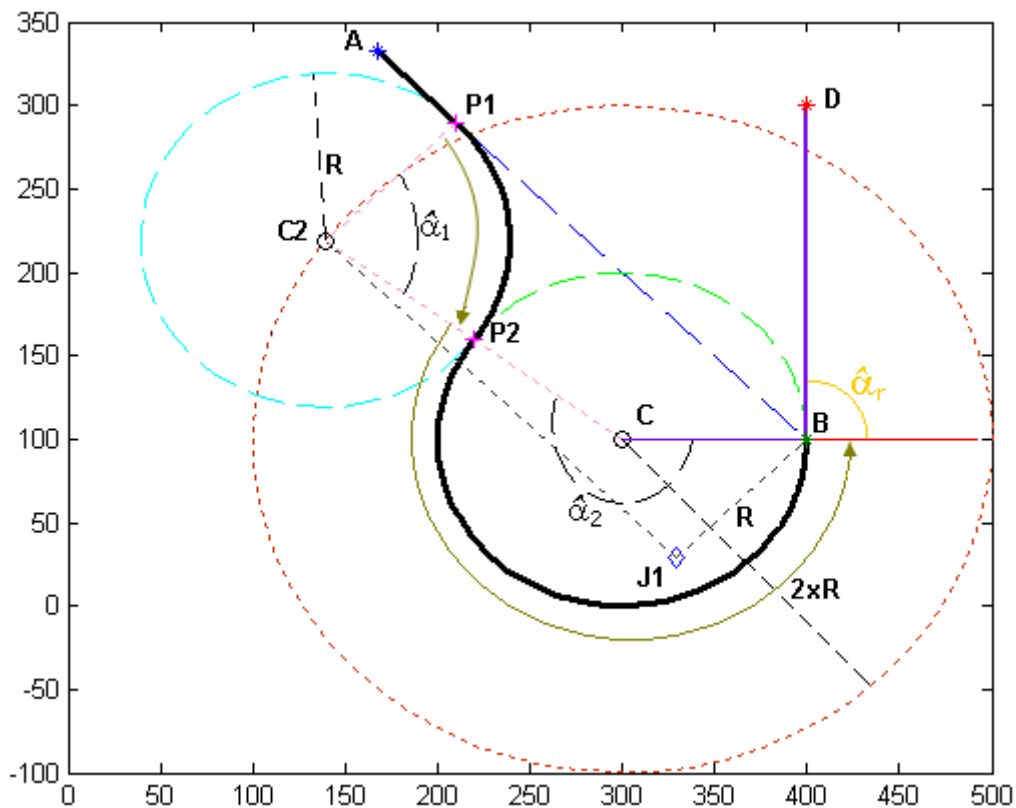


Figura 29: Giro Rumbo

En la Figura 29 se puede observar el resultado (línea negra gruesa) de aplicar un giro Rumbo con ángulo  $\alpha_r = 90^\circ$  y radio  $R$  sobre los Waypoints  $A(*)$  y  $B(*)$ .

Además de por ser el último giro que se aplica en la trayectoria, el giro Rumbo se caracteriza por ser el único que se define sólo con 2 waypoints (A y B) y 1 ángulo de rumbo ( $\alpha_r$ ) (El resto de giros necesitan de 3 waypoints para quedar definidos). El giro

Rumbo consta de 2 circunferencias de giro y se descompone en 3 segmentos: Uno recto y dos circulares.

Dentro del giro Rumbo se pueden distinguir los siguientes elementos:

- 1 circunferencia inicial de radio  $R$  (color cyan, de línea discontinua) con centro en  $C2$
- 1 circunferencia final de radio  $R$  (color verde, de línea discontinua) con centro en  $C$
- 1 circunferencia de corte de radio  $2 \times R$  (color naranja discontinuo) con centro en  $C$
- 1 punto exterior (forma diamante de color azul denotado como  $J1$  en la figura)
- 2 puntos tangentes de trayectoria (forma de cruz de color magenta denotados como  $P1$  y  $P2$  en la figura)
- 1 punto auxiliar (forma asterisco de color rojo denotado como  $D$ )

Los pasos para calcular los datos de los segmentos son los siguientes:

1. Se halla un punto auxiliar  $D$ , que es al que apuntará el vehículo cuando pare en el waypoint  $B$ , de acuerdo al ángulo de rumbo ( $\alpha_r$ ) que se le haya indicado.
2. Se halla la circunferencia final (2ª circunferencia que interviene en el giro Rumbo). El centro de esta circunferencia se puede obtener trazando la perpendicular a la recta  $\overline{BD}$  que pasa por  $B$ , y calculando el punto perteneciente a esta perpendicular que se encuentra a la distancia  $R$  de  $B$ . De esta forma el waypoint  $B$  se convierte en el punto de la recta  $\overline{BD}$  tangente a la circunferencia. Una vez conocido  $C$ , se traza la circunferencia de corte (radio =  $2 \times R$ ).
3. Se halla la circunferencia inicial de centro  $C2$ , que corresponde a la primera circunferencia que interviene en el giro y que se encuentra entre  $A$  y  $B$ . Para calcular  $C2$  se siguen los siguientes pasos:
  - i. Se calcula el punto exterior  $J1$ . Es el punto de la recta perpendicular a  $\overline{AB}$ , que pasa por  $B$  y se encuentra a una distancia  $R$  de dicho punto.
  - ii. Trazando por  $J1$  la paralela a la recta  $\overline{AB}$ , se obtienen 2 puntos de corte con la llamada circunferencia de corte. De entre estos 2 puntos de corte, si se escoge el punto más cercano a  $A$ , se obtiene  $C2$ .
4. Trazando la circunferencia de radio  $R$  con centro en  $C2$ , se obtienen los puntos  $P1$  (punto tangente con el segmento  $\overline{AB}$ ) y  $P2$  (punto tangente con la circunferencia final). Se calcula:
  - i. el ángulo de giro ( $\alpha_1$ ), que es el formado por las rectas  $\overline{P1-C2}$  y  $\overline{C2-P2}$ ;

- ii. la longitud del arco desde P1 hasta P2;
  - iii. el sentido de giro (en el ejemplo de la figura es sentido horario)
5. Una vez se tiene toda la información relativa al tramo de la circunferencia inicial, se calcula la información del segmento de la circunferencia final:
- i. el ángulo de giro ( $\alpha_2$ ), que es el formado por las rectas  $\overline{P2-C}$  y  $\overline{CB}$ ;
  - ii. la longitud del arco desde P2 hasta B;
  - iii. el sentido de giro (en el ejemplo de la figura es sentido antihorario)

Para completar el campo Ángulo de los segmentos, se calculan también la pendiente del segmento recto A-P1 y el rumbo inicial de los tramos circulares P1-P2 y P2-B.

Se determina que todo giro Rumbo se descompone en:

- i. Segmento rectilíneo A-P1 +
- ii. Segmento circular P1-P2 (Centro C2 y radio R) +
- iii. Segmento circular P2-B (Centro C y radio R)

### 3.2.5.1 Patología Giro Rumbo

Existe 1 situación que impide la ejecución de un giro Rumbo, y es la siguiente:

- *Caso 1.* Cuando P1 no pertenece al segmento  $\overline{AB}$  (No existe circunferencia inicial válida)

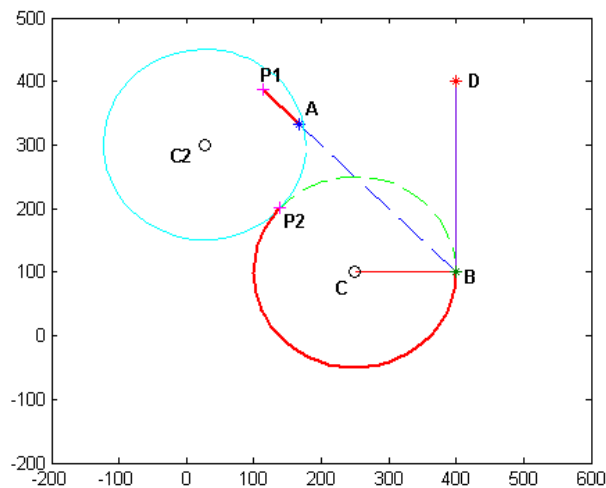


Figura 30: Patología Giro Rumbo I

En este caso, al no poder aplicar el último giro de la trayectoria, el planificador determina que la trayectoria definida no puede ser resuelta.

### 3.3 Análisis de la Estructura de Datos de la Trayectoria Planificada

La siguiente tabla muestra el conjunto de segmentos que ha calculado el planificador para la trayectoria  $T_r$  del caso práctico (Tabla 1) cuyo resultado gráfico aparece en la Figura 16. Cada fila de la Tabla 2 corresponde a un segmento, y cada columna a un parámetro del segmento. El planificador ha devuelto la siguiente estructura:

$P_{in\_x}$	$P_{in\_y}$	$P_{fin\_x}$	$P_{fin\_y}$	$C_x$	$C_y$	Long	Radio	Angulo	Giro
0.0,	0.0,	0.0,	400.0,	0.0,	0.0,	400.0,	-1.0,	1.57,	0.0
0.0,	400.0,	100.0,	500.0,	100.0,	400.0,	157.08,	100.0,	3.14,	-1.0
100.0,	500.0,	400.0,	500.0,	0.0,	0.0,	300.0,	-1.0,	0.0,	0.0
400.0,	500.0,	500.0,	400.0,	400.0,	400.0,	157.08,	100.0,	1.57,	-1.0
500.0,	400.0,	500.0,	100.0,	0.0,	0.0,	300.0,	-1.0,	-1.57,	0.0
500.0,	100.0,	400.0,	0.0,	400.0,	100.0,	157.08,	100.0,	0.0,	-1.0
400.0,	0.0,	236.89,	0.0,	0.0,	0.0,	163.11,	-1.0,	-3.14,	0.0
236.89,	0.0,	164.64,	-30.87,	236.89,	-100.0,	80.75,	100.0,	1.57,	1.0
164.64,	-30.87,	94.59,	138.24,	92.39,	38.27,	397.11,	100.0,	-0.76,	-1.0
94.59,	138.24,	167.51,	167.51,	96.8,	238.22,	80.75,	100.0,	-1.59,	1.0
167.51,	167.51,	332.49,	332.49,	0.0,	0.0,	233.32,	-1.0,	0.79,	0.0
332.49,	332.49,	405.41,	361.76,	403.2,	261.78,	80.75,	100.0,	2.36,	-1.0
405.41,	361.76,	335.36,	530.87,	407.61,	461.73,	397.11,	100.0,	-1.59,	1.0
335.36,	530.87,	263.11,	500.0,	263.11,	600.0,	80.75,	100.0,	-0.76,	-1.0
263.11,	500.0,	236.89,	500.0,	0.0,	0.0,	26.21,	-1.0,	3.14,	0.0
236.89,	500.0,	164.64,	530.87,	236.89,	600.0,	80.75,	100.0,	-1.57,	-1.0
164.64,	530.87,	94.59,	361.76,	92.39,	461.73,	397.11,	100.0,	0.76,	1.0
94.59,	361.76,	167.51,	332.49,	96.8,	261.78,	80.75,	100.0,	1.59,	-1.0
167.51,	332.49,	210.1,	289.9,	0.0,	0.0,	60.24,	-1.0,	-0.79,	0.0
210.1,	289.9,	219.7,	159.59,	139.39,	219.19,	142.38,	100.0,	0.79,	-1.0
219.7,	159.59,	400.0,	100.0,	300.0,	100.0,	378.0,	100.0,	2.5,	1.0

Tabla 2: Estructura de Datos de la Trayectoria Ejemplo

A continuación se analizan algunas líneas relevantes de la trayectoria.

Las 2 primeras líneas

0.0, 0.0, 0.0, 400.0, 0.0, 0.0, 400.0, -1.0, 1.57, 0.0  
 0.0, 400.0, 100.0, 500.0, 100.0, 400.0, 157.08, 100.0, 3.14, -1.0

corresponden al giro Interno que se produce al realizar el tramo A → B → D. La línea en verde es el tramo recto de A hasta P1 (0, 400) del giro Interno. La línea en azul corresponde al movimiento circular en sentido horario de P1 a P2 (100, 500).

Desde la 7ª hasta la 11ª línea,

400.0, 0.0, 236.89, 0.0, 0.0, 0.0, 163.11, -1.0, -3.14, 0.0  
 236.89, 0.0, 164.64, -30.87, 236.89, -100.0, 80.75, 100.0, 1.57, 1.0  
 164.64, -30.87, 94.59, 138.24, 92.39, 38.27, 397.11, 100.0, -0.76, -1.0  
 94.59, 138.24, 167.51, 167.51, 96.8, 238.22, 80.75, 100.0, -1.59, 1.0

se corresponde con el 1<sup>er</sup> giro externo que se practica (tramo E → A → D). La línea en verde es el tramo recto de E hasta P1 (236.89, 0) del giro Externo. La línea en azul corresponde al movimiento circular en sentido antihorario de P1 a P2 (164.64, -30.87). La línea en rojo corresponde al movimiento circular en sentido horario de P2 a P3 (94.59, 138.24) y la línea naranja corresponde al movimiento circular en sentido antihorario de P3 a P4 (167.51, 167.51).

Las 3 últimas líneas de la ruta

167.51,	332.49,	210.1,	289.9,	0.0,	0.0,	60.24,	-1.0,	-0.79,	0.0
210.1,	289.9,	219.7,	159.59,	139.39,	219.19,	142.38,	100.0,	0.79,	-1.0
219.7,	159.59,	400.0,	100.0,	300.0,	100.0,	378.0,	100.0,	2.5,	1.0

se corresponden con el giro Rumbo que se práctica (tramo B → F). La línea en verde es el tramo recto de B hasta P1 (210.1, 289.9) del giro Rumbo. La línea en azul corresponde al movimiento circular en sentido horario de P1 a P2 (219.7, 159.59). La línea en rojo corresponde al movimiento circular en sentido antihorario de P2 a F.

### 3.4 Seguimiento de Maniobras Compuestas

La Maniobra Compuesta se caracteriza por llevar un control de rumbo, mientras que el control de velocidad es opcional. El seguimiento de una trayectoria se realiza generando los cambios de rumbo adecuados. En la maniobra el USV seguirá a un punto virtual de referencia, que recorre una trayectoria ya planificada (sección 3.2), a una distancia  $L$ . Como ya se ha explicado, estas trayectorias están compuestas de tramos rectos y circulares, y para el análisis del seguimiento de los mismos se ha aplicado el método descrito en el artículo [11].

Para poder ejecutar la Maniobra Compuesta es necesario definir sus parámetros de entrada, los cuales son:

- La velocidad de recorrido
- La distancia entre el punto virtual y el barco ( $L$ )
- El conjunto de segmentos de la trayectoria planificada

El final de un segmento de la trayectoria y el comienzo de otro se detecta viendo cuando se ha alcanzado la longitud del tramo. Cuando eso ocurre se cambia de segmento de la trayectoria y se resetea el estado de la longitud para iniciar la medida del siguiente tramo. Por ello es necesario integrar y detectar el evento de alcance de la longitud del segmento.

### 3.4.1 Estado para el Recorrido de un Punto Virtual por la Trayectoria

Para cada segmento el estado del punto virtual se describe mediante un vector con cuatro componentes:

$X[1]$ : Posición en eje X

$X[2]$ : Posición en eje Y

$X[3]$ : Ángulo de la tangente de la trayectoria

$X[4]$ : Longitud segmento

Las condiciones iniciales para cada segmento son:

$(X[1], X[2])$ : Posición inicial segmento

$X[3]$ : Si es un segmento recto ( $Radio = -1$ ), el valor en ángulo.

Si es un segmento circular, el ángulo con que se finalizó el segmento anterior.

$X[4]$ : 0

Las ecuaciones que deben integrarse para calcular el estado son:

$$dX[1] = Tpt[1] \times ds$$

$$dX[2] = Tpt[2] \times ds$$

$$dX[3] = ds \times giro \times curvatura$$

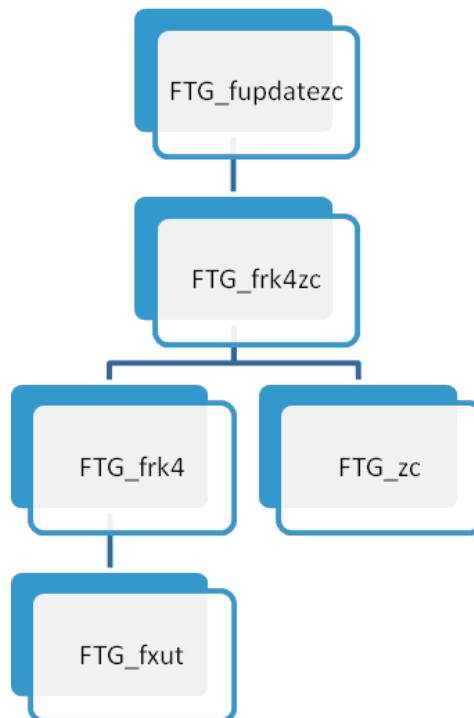
$$dX[4] = ds$$

donde:  $ds \geq 0$ , es la velocidad del punto virtual;  $(Tpt[1], Tpt[2])$  es el vector tangente a la trayectoria en el punto actual;  $curvatura = \frac{1}{Radio}$ .

Integrando las ecuaciones de estado para un valor inicial del estado y valores de  $ds$  permite ver la evolución del punto sobre la trayectoria.

### 3.4.2 Funciones para la Integración de la Trayectoria

El siguiente diagrama muestra el árbol de funciones implementadas en el PLC para el recorrido de trayectorias en las Maniobras Compuestas.



**Figura 31:** Funciones PLC – Maniobra Compuesta

La función *FTG\_fxut* implementa la ecuación de estado anterior. Necesita como entradas:  $t$ ,  $X$ ,  $ds$ ; y devuelve como salida el vector derivada  $dX$ .

Esta función es llamada por *FTG\_frk4* que se encarga de realizar la integración numérica en el intervalo de tiempo que se dé como entrada. Si el estado actual es  $X(t)$ , y se desea integrar hasta  $t + dt$ , *FTG\_frk4* devuelve el valor en  $X(t + dt)$ . Para ello es necesario especificar también el valor de  $ds$  durante dicho intervalo. Actualmente estamos integrando con  $dt = 0.1$  segundos.

La función *FTG\_frk4zc* realiza la integración del vector de estado entre los instantes  $t$  y  $t + dt$  detectando si en ese intervalo se ha sobrepasado la longitud del segmento, y en ese caso determina el instante de cruce y devuelve el valor del vector de estado en el instante de cruce y el valor de  $t$  en el que se ha producido el cruce. Para determinar el instante de cruce utiliza un algoritmo de búsqueda de la sección dorada. Se necesita especificar una precisión épsilon del instante de cruce. Estamos tomando  $\varepsilon = 0.01$ , que es menor que período de muestreo que es de 0.1 segundos.

*FTG\_frk4zc* utiliza la función *FTG\_frk* y la función *FTG\_zc* para determinar el evento de cruce.

*FTG\_zc* recibe como entrada los valores del vector de estado  $X(t)$ ,  $X(t + dt)$  y la longitud a recorrer. Devuelve los valores de las longitudes recorridas hasta  $t$  y  $t + dt$ , y un valor con: 1 si se ha cambiado el signo decreciendo; 0 si no cambia el signo; -1 se cambia el signo creciendo.

$FTG\_updatezc$  es la función encargada de actualizar el estado de la trayectoria desde un instante de tiempo  $t$  al instante siguiente  $t + dt$ . En un ciclo normal determinará el nuevo estado y quedará listo para una nueva iteración. Si se detecta un cambio de tramo procede a:

- determinar el nuevo tramo* calculando su estado inicial e integrando desde el instante de cruce al instante  $t + dt$  o
- añadir un último tramo a la trayectoria* calculando su estado inicial e integrando desde el instante de cruce al instante  $t + dt$  o
- parar* si se ha recorrido la trayectoria

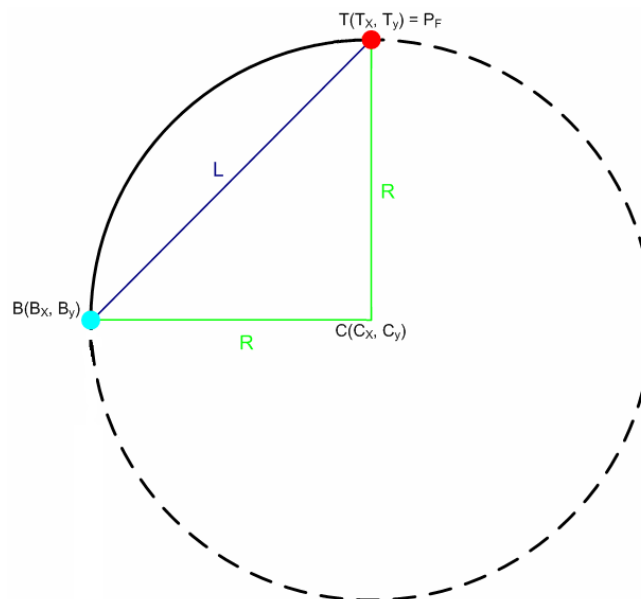
El objetivo de añadir un último tramo a la trayectoria es conseguir que sea el vehículo quien alcance el punto final de la trayectoria y no el punto virtual. En la sección 3.4.2.1 se explica cómo calcular este último segmento de la ruta.

#### 3.4.2.1 Cálculo del Último Segmento

El último segmento se calcula dependiendo de la naturaleza (recto ó circular) del último tramo recorrido. Así:

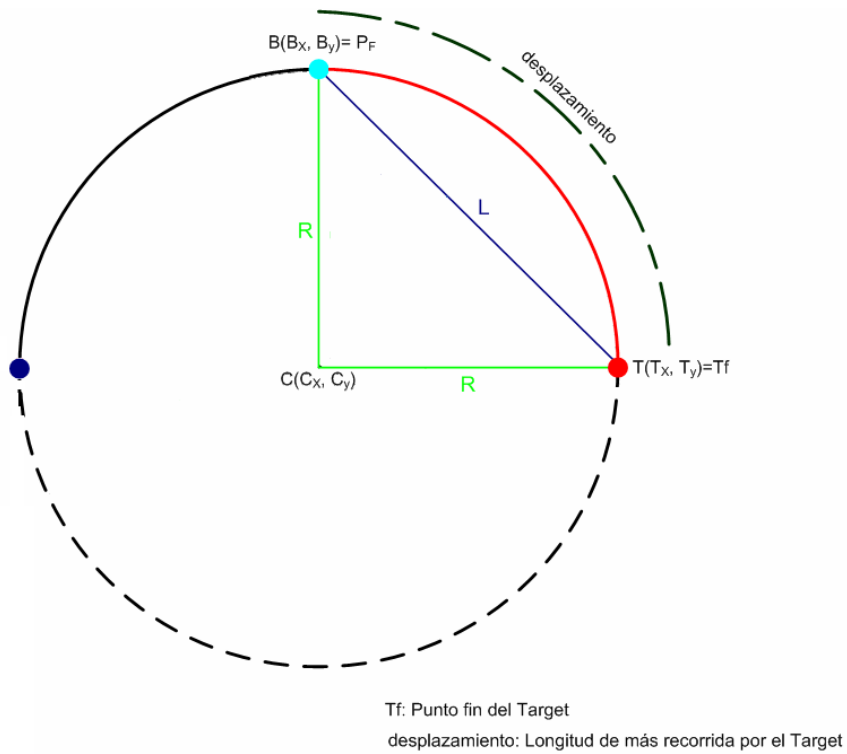
- *Último tramo: Circular*

En el instante en el que el punto virtual  $T$  (punto rojo de la Figura 32) alcanza el punto final de la trayectoria  $P_F$  recorriendo un tramo circular de radio  $R$  y centro  $C$ , el barco  $B$  (punto azul de la Figura 32) se encuentra a una distancia  $L$  de alcanzar  $P_F$ .



**Figura 32:** Cálculo del Último Tramo Circular (I)

Para conseguir que  $B$  alcance  $P_F$ , el punto virtual debe recorrer un tramo circular de radio  $R$ , centro  $C$ , longitud *desplazamiento* y sentido de giro el mismo del tramo anterior. De esta forma el punto virtual  $T$  termina en el punto  $T_f$  alcanzándose el estado de la Figura 33.



**Figura 33:** Cálculo del Último Tramo Circular (II)

Mediante cálculos geométricos y trigonométricos se puede obtener el valor de *desplazamiento*, que no es más que el arco de circunferencia cuya cuerda es  $L$ .

Sea  $\alpha$  el ángulo del arco de circunferencia y el ángulo  $\beta = \frac{\alpha}{2}$ . Si  $\sin \beta = \frac{L}{2R}$ ,

entonces  $\beta = \arcsin \frac{L}{2R}$ .

Como  $\text{desplazamiento} = \alpha \times R$ , se puede despejar el valor de  $\alpha$ .

$$\text{desplazamiento} = \alpha \times R = 2 \times \beta \times R = 2 \times \left( \arcsin \frac{L}{2R} \right) \times R$$

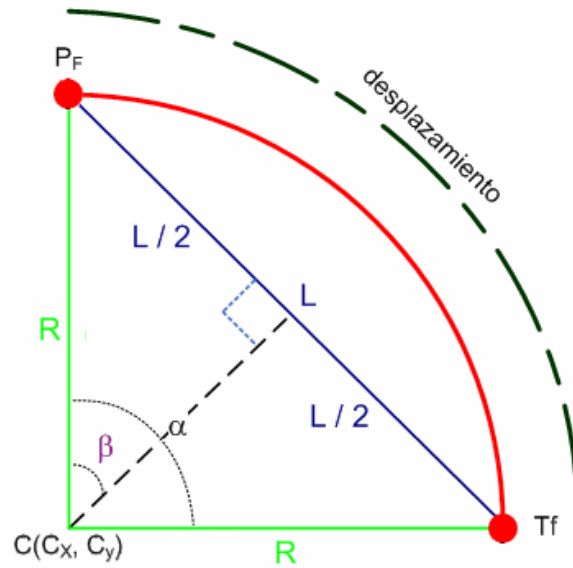


Figura 34: Cálculo del Último Tramo Circular (III)

Dependiendo del sentido de giro, el valor de  $T_f$  viene definido por las siguientes expresiones:

Sentido Horario

$$\begin{pmatrix} Tf_x \\ Tf_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos 2\beta & \sin 2\beta \\ -\sin 2\beta & \cos 2\beta \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} P_{Fx} - C_x \\ P_{Fy} - C_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} C_x \\ C_y \end{pmatrix}, \text{ siendo}$$

$$\begin{pmatrix} \cos 2\beta & \sin 2\beta \\ -\sin 2\beta & \cos 2\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2R^2 - L^2}{2R^2} & \frac{L\sqrt{4R^2 - L^2}}{2R^2} \\ -\frac{L\sqrt{4R^2 - L^2}}{2R^2} & \frac{2R^2 - L^2}{2R^2} \end{pmatrix}$$

Sentido Antihorario

$$\begin{pmatrix} Tf_x \\ Tf_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos 2\beta & -\sin 2\beta \\ \sin 2\beta & \cos 2\beta \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} P_{Fx} - C_x \\ P_{Fy} - C_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} C_x \\ C_y \end{pmatrix}, \text{ siendo}$$

$$\begin{pmatrix} \cos 2\beta & -\sin 2\beta \\ \sin 2\beta & \cos 2\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2R^2 - L^2}{2R^2} & -\frac{L\sqrt{4R^2 - L^2}}{2R^2} \\ \frac{L\sqrt{4R^2 - L^2}}{2R^2} & \frac{2R^2 - L^2}{2R^2} \end{pmatrix}$$

Por tanto, en este caso el nuevo tramo a añadir es:

[Pto. Inicial, Pto. Final, Centro, Longitud, Radio, Ángulo, Giro]

Pto. Inicial:  $P_F$

Pto. Final:  $T_F$

Centro:  $C$

Longitud: *desplazamiento*

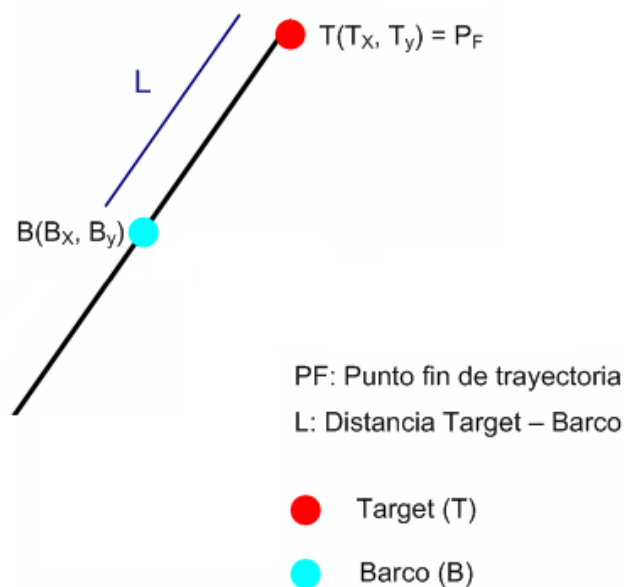
Radio:  $R$

Ángulo: Ángulo con que se finalizó el segmento anterior ( $= \pi/2$ )

Giro: Giro del segmento anterior ( $= -1$ )

- *Último tramo: Recto ó Lineal*

En el instante en el que el punto virtual  $T$  (punto rojo de la Figura 35) alcanza el punto final de la trayectoria  $P_F$  recorriendo un tramo recto, el barco  $B$  (punto azul de la Figura 35) se encuentra a una distancia  $L$  de alcanzar  $P_F$ .



**Figura 35:** Cálculo del Último Tramo Recto (I)

Para conseguir que  $B$  alcance  $P_F$ , el punto virtual debe recorrer un tramo recto de longitud  $L$  y ángulo  $\alpha$  el mismo que el del tramo anterior. De esta forma el punto virtual  $T$  termina en el punto  $T_f$  alcanzándose el estado de la Figura 36.

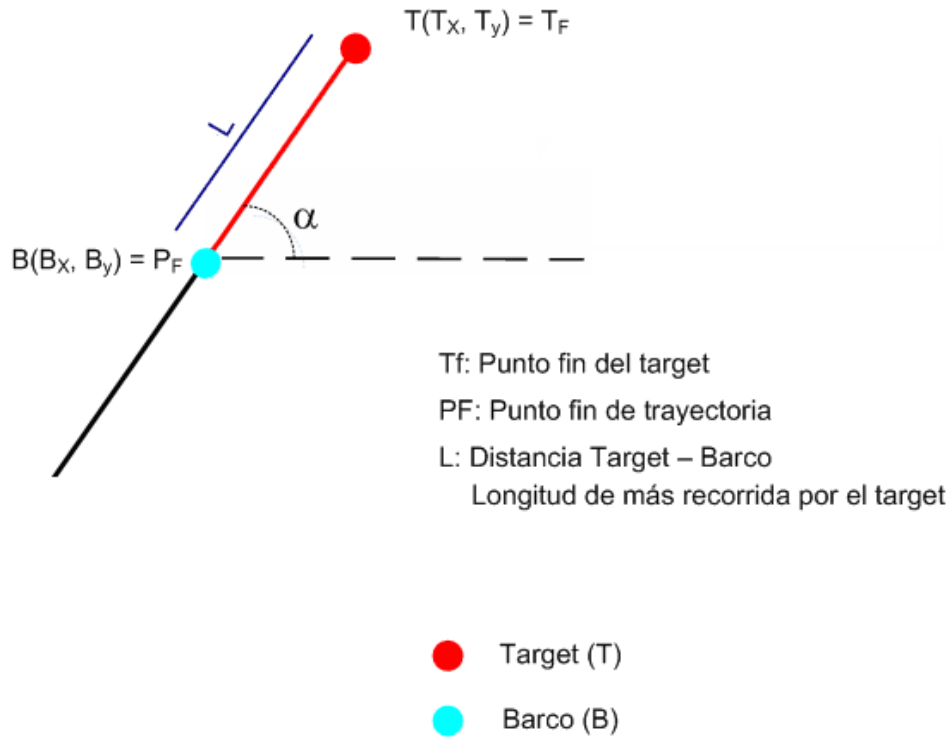


Figura 36: Cálculo del Último Tramo Recto (II)

Las coordenadas del punto  $T_f$  alcanzado por el punto virtual  $T$  vienen definidas por las siguientes expresiones:

$$T_{Fx} = L \times \cos \alpha$$

$$T_{Fy} = L \times \sin \alpha$$

Por tanto, en este caso el nuevo tramo a añadir es:

[Pto. Inicial, Pto. Final, Centro, Longitud, Radio, Ángulo, Giro]

Pto. Inicial:  $P_f$

Pto. Final:  $T_f$

Centro:  $(0, 0)$

Longitud:  $L$

Radio:  $-1$

Ángulo:  $\alpha$

Giro:  $0$

### 3.5 Pruebas Maniobra Compuesta

En este apartado se detallan las pruebas realizadas para las Maniobras Compuestas, así como los resultados obtenidos en la simulación.

#### 3.5.1 Prueba 1. Cuadrado

Se ha realizado una prueba en la que el barco recorre las esquinas de un cuadrado de lado 150 siendo el punto (0,0) el inicio y fin del recorrido. Se fijaron, para la velocidad del barco una tensión constante de 6V a la hélice (velocidad  $\approx 2m/s$ ), y un valor de  $L=30$  para la distancia entre el punto virtual y el barco. El barco finaliza con un rumbo de  $90^\circ$ . En el momento de arrancar el barco, éste está situado en la posición (0, 0) y tiene un rumbo de  $-44.63^\circ$ .

En primer lugar, se utiliza el planificador para obtener los segmentos rectos y circulares de la trayectoria planificada a partir de los datos contenidos en la Tabla 3, y esquematizada en la Figura 37.

Lista y Orden Waypoints	Radio	Distancia máxima	Angulo de rumbo
A = (0, 0) B = (0, -150) D = (-150, -150) E = (-150, 0) A = (0, 0)	radio = 30	distancia = 100	$90^\circ$

Tabla 3: Maniobra Compuesta - Planificación Trayectoria Prueba Cuadrado

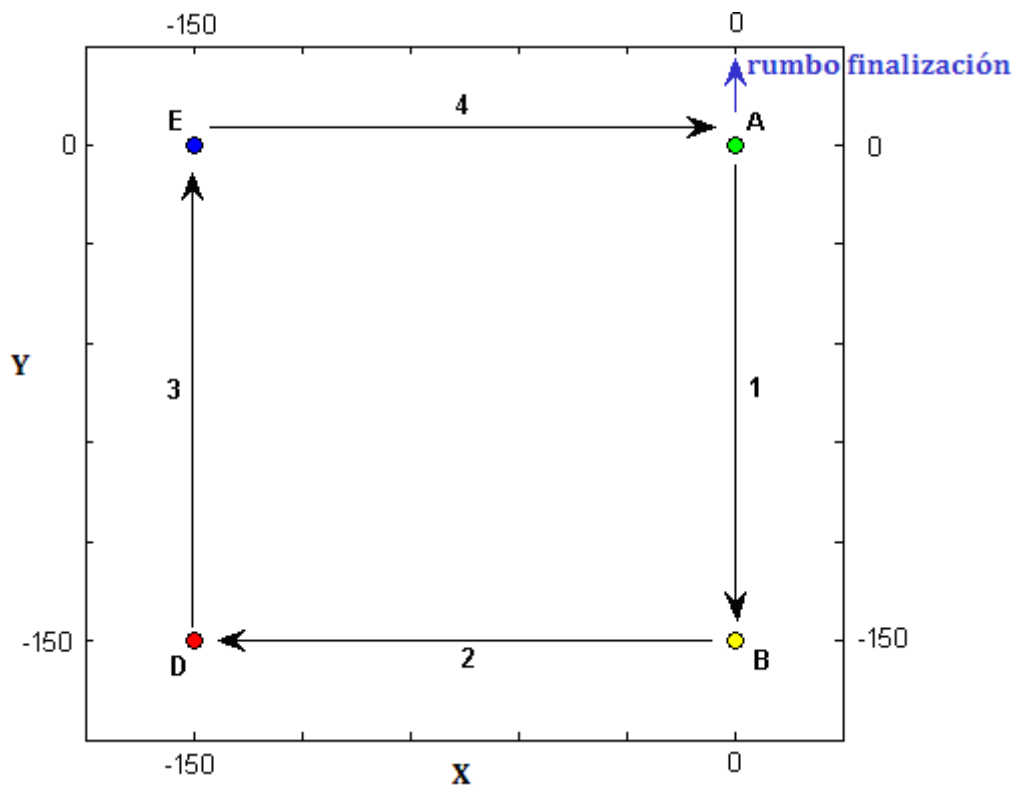
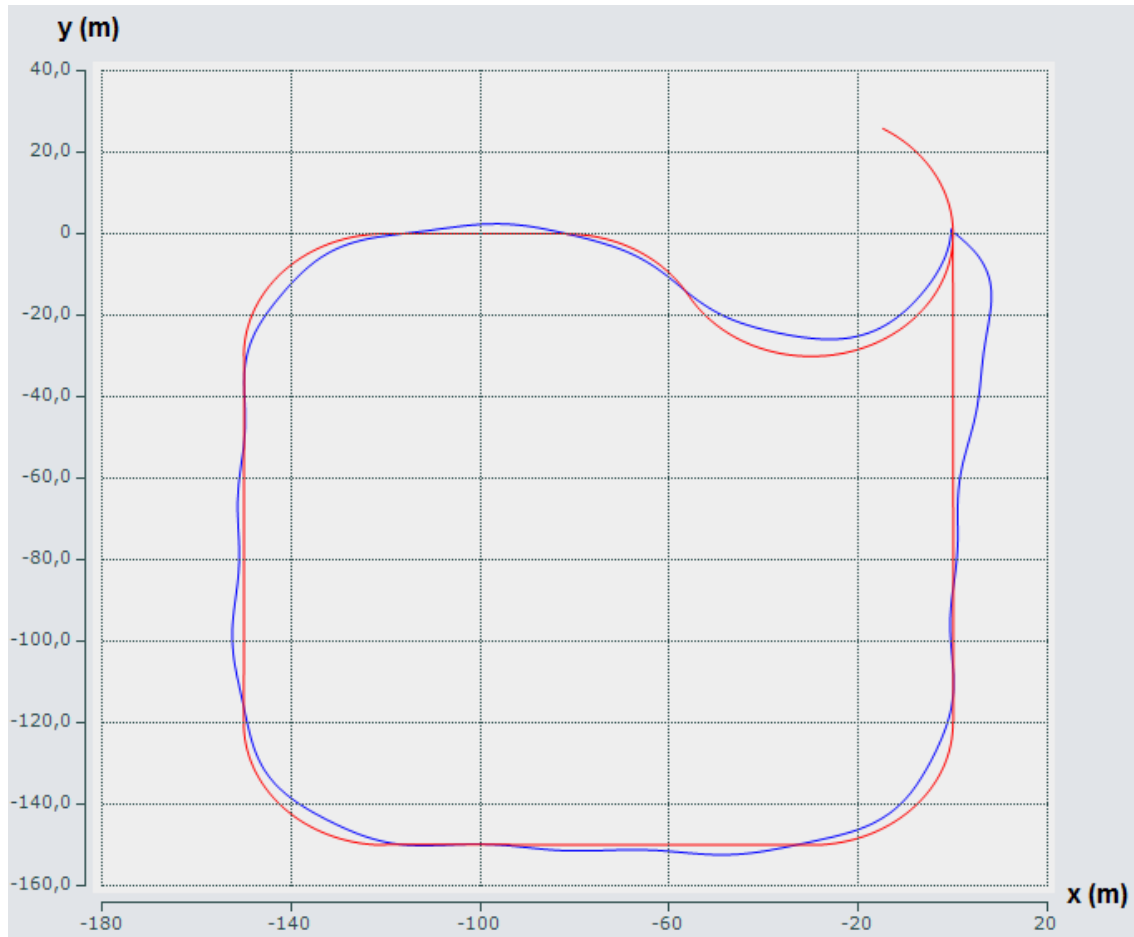


Figura 37: Maniobra Compuesta - Recorrido Prueba Cuadrado

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para esta prueba (simulación).

En la siguiente figura aparece la simulación del recorrido del punto virtual (rojo) y del barco (azul). Se aprecia que los mayores niveles de error se producen en el seguimiento de los tramos circulares. Aproximadamente la separación entre la trayectoria descrita por el punto virtual y la trayectoria descrita por el barco es de unos 5 m.



**Figura 38:** Maniobra Compuesta - Recorrido Prueba Cuadrado: Punto Virtual (rojo); Barco (azul)

En la Figura 39 se compara el valor de la referencia del rumbo que se le va pasando al controlador (rojo) y el rumbo que lleva el barco (azul) en la parte final de la simulación. Se aprecia la variación del rumbo, a lo largo del giro Rumbo de la trayectoria. Los mayores niveles de error se producen en los máximos y mínimos, es decir, cuando la señal de referencia pasa de ser creciente a decreciente o viceversa. En esos casos, aproximadamente la diferencia entre la señal de referencia y el rumbo del barco 10 °.

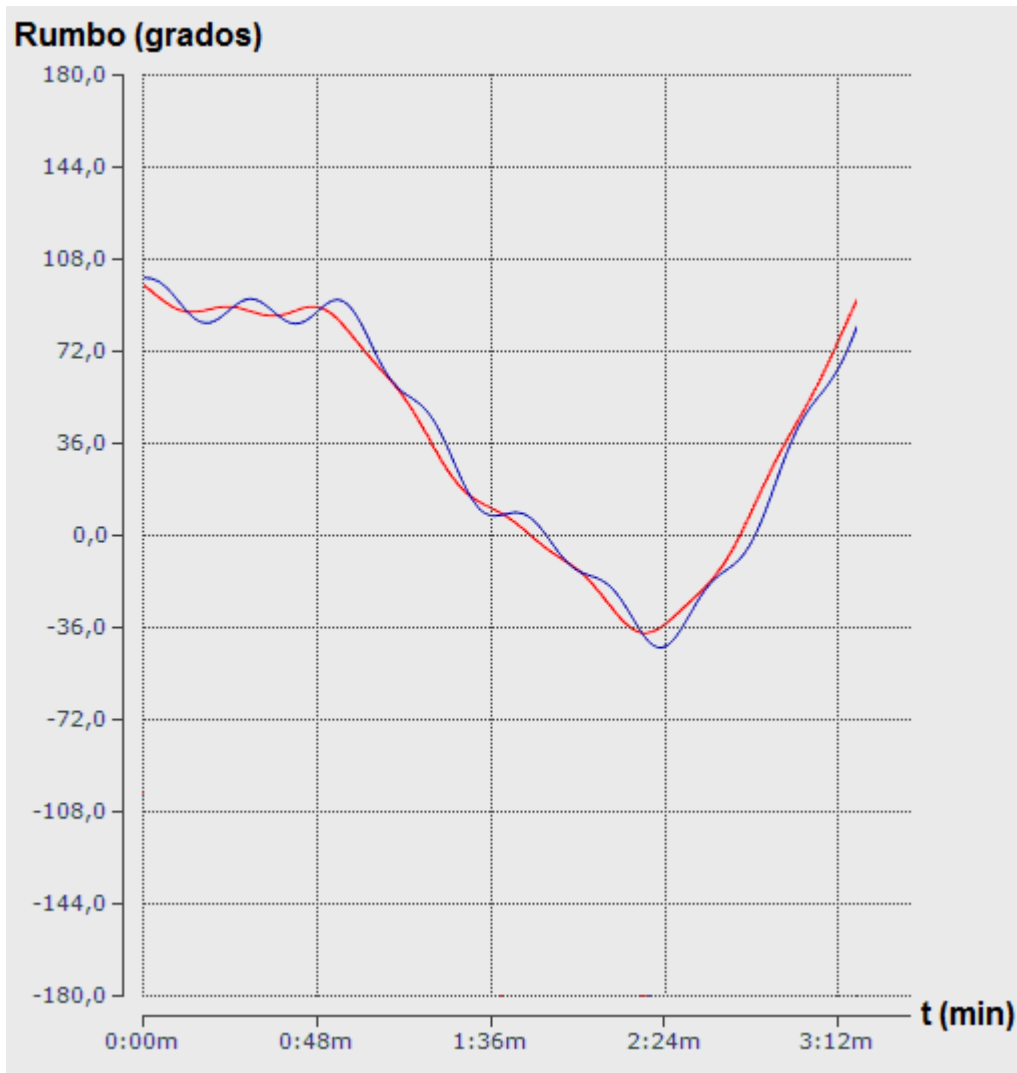


Figura 39: Maniobra Compuesta - Rumbo Prueba Cuadrado: Señal de Referencia (rojo); Barco (azul)

### 3.6 Experimentos Maniobra Compuesta

En este apartado se detallan los experimentos realizados para las Maniobras Compuestas, así como los resultados obtenidos en el entorno real en el que se ha desarrollado.

#### 3.6.1 Experimento 1. Cuadrado

Se ha realizado un experimento que consiste en ejecutar en un entorno real la misma trayectoria definida en la prueba anterior (sección 3.5.1).

En primer lugar, se utiliza el planificador para obtener los segmentos rectos y circulares de la trayectoria planificada a partir de los datos contenidos en la Tabla 4,

Lista y Orden Waypoints	Radio	Distancia máxima	Angulo de rumbo
A = (0, 0) B = (0, -150) D = (-150, -150) E = (-150, 0) A = (0, 0)	radio = 30	distancia = 100	90°

Tabla 4: Maniobra Compuesta - Planificación Trayectoria Experimento Cuadrado

A continuación, se muestran los resultados del experimento a partir de los datos obtenidos durante la ejecución del mismo.

En la siguiente figura aparece el recorrido del punto virtual (rojo) y el del barco (azul).

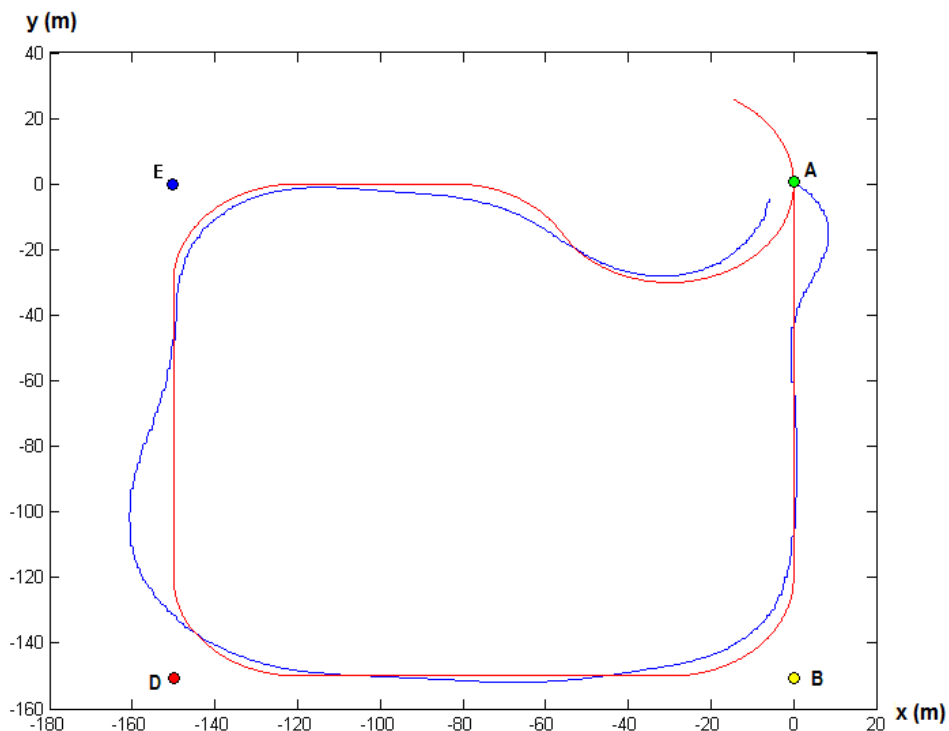
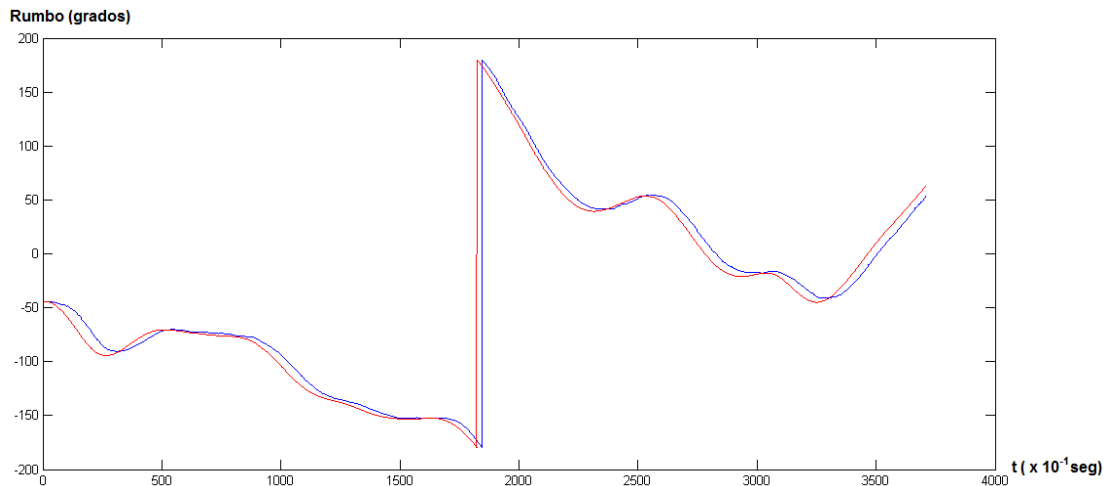


Figura 40: Maniobra Compuesta - Recorrido Experimento Cuadrado: Punto Virtual (rojo); Barco (azul)

A continuación, se comentan el comportamiento del barco en algunos tramos de interés de la trayectoria. En el arranque de la maniobra el barco debe adoptar el rumbo de  $-90^\circ$  a fin de recorrer el tramo recto que le acerca al punto B. El vehículo consigue alcanzar el rumbo de  $-90^\circ$  a los 40 metros de recorrido (punto  $(0, -40)$ ) habiéndose desplazado para ello unos 10 metros de la recta  $\overline{AB}$ . Se observa que el mayor nivel de error en el seguimiento de la trayectoria se produce a la salida del tramo circular próximo al waypoint  $D$ . Aproximadamente, en ese instante, el barco llega a transitar a unos 10 m de la trayectoria que ha descrito el punto virtual. Como se observa, los tramos circulares son los que más dificultad le presentan al vehículo a la hora de recorrerlos. Por último el barco concluye su trayectoria en un punto próximo al punto  $A$  con un rumbo cercano a los  $90^\circ$ , lo cual confirma que el último tramo añadido acerca el barco al punto final de la trayectoria con el rumbo deseado.

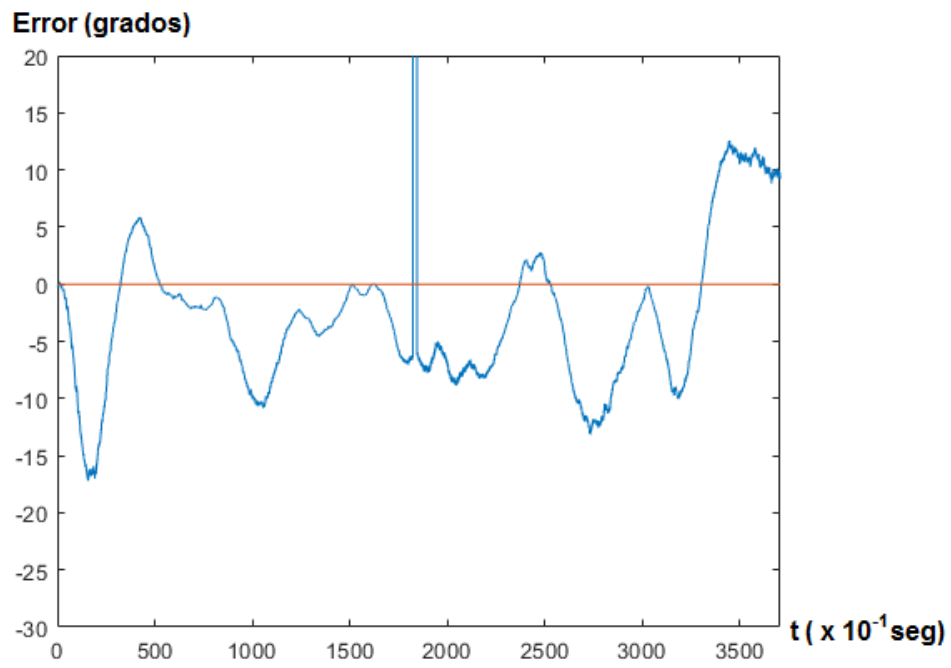
En la Figura 41 se compara el valor de la referencia del rumbo que se le va pasando al controlador (rojo) y el rumbo que lleva el barco (azul) a lo largo de todo el experimento.



**Figura 41:** Maniobra Compuesta - Rumbo Experimento Cuadrado: Señal de Referencia (rojo); Barco (azul)

En la figura se aprecia la variación del rumbo, a lo largo del experimento. En la gráfica se puede ver un salto de valor desde  $-180$  a  $180$ . Esto es debido a que el rumbo está limitado al rango  $[180, -180]$  grados, por lo que la gráfica presenta un salto al alcanzar cualquiera de estos valores frontera ( $-180$  o  $180$ ). Este fenómeno se repite en el resto de experimentos llevados a cabo en este trabajo.

Para un mejor análisis, se muestra la Figura 42, en la que la línea azul representa la evolución del error del rumbo respecto al valor de referencia a lo largo del experimento. Dicho error se calcula restando al valor de referencia el valor del rumbo. La línea roja representa un error ideal de  $0^\circ$ . Durante el experimento se observa que el error permanece entre  $-15$  y  $10^\circ$  aproximadamente, aunque el mayor nivel de error se comete al comienzo del experimento superando el valor de  $-15^\circ$ .



**Figura 42:** Maniobra Compuesta - Rumbo Experimento Cuadrado: Evolución Error

## Capítulo 4: Definición y Seguimiento de Maniobras Paramétricas

La Maniobra Paramétrica se caracteriza por llevar un control de rumbo, mientras que el control de velocidad es opcional. El seguimiento de una trayectoria paramétrica se realiza generando los cambios de rumbo adecuados. En la maniobra, el USV seguirá a un punto virtual de referencia, que recorre la trayectoria, a una distancia  $L$ .

### 4.1 Definición de Curva Paramétrica

Sea una curva plana dada por sus ecuaciones paramétricas cartesianas

$$x = x(\theta)$$

$$y = y(\theta)$$

El conocimiento de estas ecuaciones paramétricas permite calcular su primera y segunda derivada con respecto al parámetro  $\theta$  obteniendo  $x'$ ,  $y'$ ,  $x''$ ,  $y''$ .

Sea  $s$  la longitud del arco de la curva y  $\phi$  la tangente del ángulo se obtiene:

$$d\theta = \sqrt{x'^2 + y'^2}$$

$$ds = \sqrt{dx^2 + dy^2} = \sqrt{\left(\frac{dx}{d\theta}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\theta}\right)^2}$$

$$\phi = \tan(\theta) = \frac{dy}{dx} = \frac{dy/d\theta}{dx/d\theta} = \frac{y'}{x'}$$

La curvatura  $\kappa(\theta)$  se define como la derivada de la tangente del ángulo  $\phi$  con respecto a la longitud del arco  $s$ .

$$\kappa(\theta) \equiv \frac{d\phi}{ds} = \frac{d\phi/d\theta}{ds/d\theta} = \frac{x'y'' - y'x''}{x'^2 + y'^2} \frac{1}{(x'^2 + y'^2)^{1/2}} = \frac{x'y'' - y'x''}{(x'^2 + y'^2)^{3/2}}$$

Las derivadas de la longitud del arco  $s$  y del parámetro  $\theta$  con respecto al tiempo son:

$$\frac{ds}{dt} = \sqrt{x'^2 + y'^2} \frac{d\theta}{dt} \rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{\sqrt{x'^2 + y'^2}} \frac{ds}{dt}$$

Conociendo la velocidad  $\frac{ds}{dt}$  de un punto a lo largo de la curva se puede calcular el valor del parámetro  $\theta$  como:

$$\theta(t) = \theta(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{1}{\sqrt{x'^2 + y'^2}} \frac{ds}{dt} dt$$

Una vez calculado  $\theta(t)$  se pueden obtener los vectores  $[x(\theta), y(\theta)]^T$ ,  $[x'(\theta), y'(\theta)]^T$  y  $\kappa(\theta)$ .

Considerando que algunas curvas paramétricas son susceptibles a rotaciones o desplazamientos, se les aplica una rotación  $\psi$  (positiva o negativa) en el rango  $[-\pi, \pi]$

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} = [\vec{t}(\psi), \vec{n}(\psi)]$$

donde  $\vec{t}(\psi)$  es el vector tangente unitario del ángulo  $\psi$  y  $\vec{n}(\psi)$  su vector normal unitario.

## 4.2 Curvas Implementadas

Para la Maniobra Paramétrica se han implementado las siguientes trayectorias: 1) Recta; 2) Círculo; 3) Elipse; 4) Lemniscata y 5) Sinusoide.

A continuación se explica en detalle cómo obtener la curvatura  $\kappa(\theta)$  y la tangente del ángulo  $\phi$  para cada trayectoria paramétrica:

### 4.2.1 Recta. Cálculo de la Curvatura y Tangente del Ángulo

Teniendo en cuenta que

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta \\ 0 \end{bmatrix}$$

Aplicando una rotación  $R(\psi)$  y una traslación  $[x(\theta), y(\theta)]^T$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = R(\psi) \begin{bmatrix} \theta \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta \cos \psi \\ \theta \sin \psi \end{bmatrix} = \theta \vec{t}(\psi)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 + \theta \cos \psi \\ y_0 + \theta \sin \psi \end{bmatrix}$$

Se calcula la primera y segunda derivada, así como su parámetro  $\theta(t)$  obteniendo las siguientes expresiones:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi \\ \sin \psi \end{bmatrix} = \vec{t}(\psi)$$

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\theta(t) = \theta(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{1}{R} \frac{ds}{dt} dt = \theta(t_0) + \frac{s(t) - s(t_0)}{R}$$

De este modo se identifica el parámetro de la curva con su longitud, siendo la curvatura  $\kappa(\theta)$  y la tangente del ángulo  $\phi$ :

$$\kappa = 0$$

$$\phi = \psi$$

La Figura 43 muestra la trayectoria (rojo) de una recta paramétrica que parte del punto  $(50, 30)$  y a la que se le aplica una rotación de  $90^\circ$ .

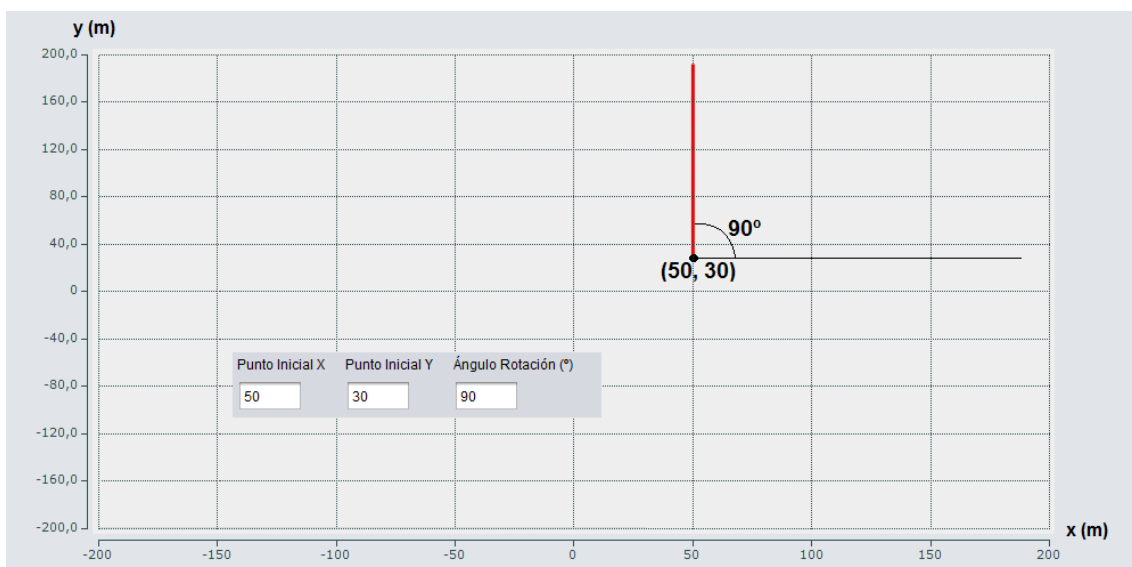


Figura 43: Recta Paramétrica

#### 4.2.2 Círculo. Cálculo de la Curvatura y Tangente del Ángulo

Para este caso, se considera un punto fijo

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \\ 0 \end{bmatrix}$$

Si se aplica una rotación  $R(\theta)$  en sentido antihorario, el parámetro de la curva es el ángulo de rotación

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ 0 \end{bmatrix} = [\vec{t}(\theta), \vec{n}(\theta)] \begin{bmatrix} R \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \cos \theta \\ R \sin \theta \end{bmatrix} = R \vec{t}(\theta)$$

Si la rotación es en sentido horario, se debe sustituir  $\theta$  por  $-\theta$

Aplicando una traslación  $[x_0 \ y_0]^T$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 + R \cos \theta \\ y_0 + R \sin \theta \end{bmatrix}$$

Se calcula la primera y segunda derivada, así como su parámetro  $\theta(t)$  obteniendo las siguientes expresiones:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R \sin \theta \\ R \cos \theta \end{bmatrix} = R \vec{n}(\theta)$$

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R \cos \theta \\ -R \sin \theta \end{bmatrix} = -R \vec{t}(\theta)$$

$$\theta(t) = \theta(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{1}{R} \frac{ds}{dt} dt = \theta(t_0) + \frac{s(t) - s(t_0)}{R}$$

De este modo el parámetro de la curva se corresponde con el ángulo. La curvatura  $\kappa(\theta)$  y la tangente del ángulo  $\phi$  son:

$$\kappa = 1/R$$

$$\phi = \theta$$

En esta figura, el parámetro  $\theta$  puede ser positivo o negativo dependiendo de la dirección de la rotación que se considere.

La Figura 44 muestra la trayectoria (rojo) de un círculo paramétrico de centro  $C = (40, 40)$ ,  $Radio = 100$  y un ángulo inicial de  $45^\circ$  con respecto a la horizontal.

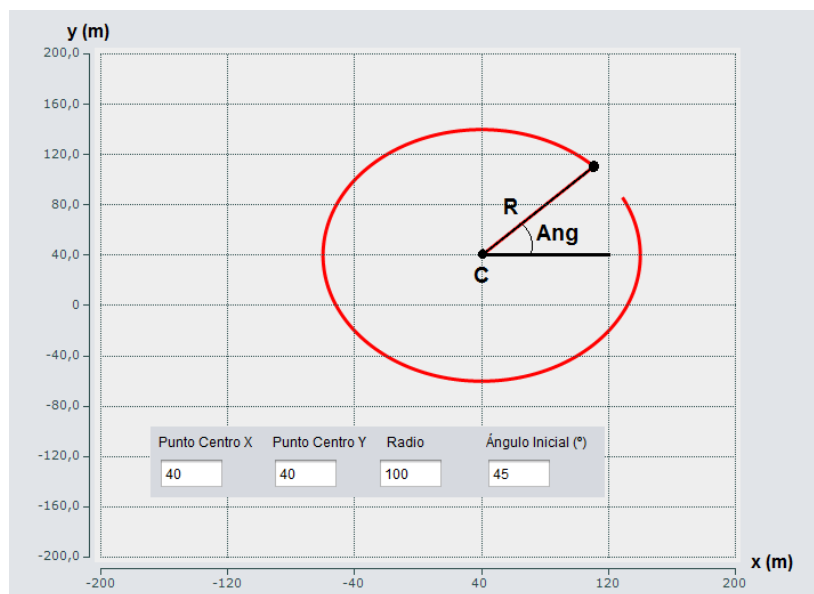


Figura 44: Círculo Paramétrico

### 4.2.3 Elipse. Cálculo de la Curvatura y Tangente del Ángulo

La curva paramétrica en una elipse se puede representar de forma análoga a la de un círculo, pero con las coordenadas  $x$  e  $y$  en diferentes escalas.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \cos \theta \\ B \sin \theta \end{bmatrix}$$

Si se aplica una rotación  $\psi$  en sentido antihorario ( $-\psi$  en sentido horario)

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = R(\psi) \begin{bmatrix} A \cos \theta \\ B \sin \theta \end{bmatrix}$$

Si la rotación es en sentido horario, se debe sustituir  $\theta$  por  $-\theta$

Aplicando una traslación  $[x_0 \quad y_0]^T$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + R(\psi) \begin{bmatrix} A \cos \theta \\ B \sin \theta \end{bmatrix}$$

Se calcula la primera y segunda derivada, así como su parámetro  $\theta(t)$  obteniendo las siguientes expresiones:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = R(\psi) \begin{bmatrix} -A \sin \theta \\ B \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \end{bmatrix} = R(\psi) \begin{bmatrix} -A \cos \theta \\ -B \sin \theta \end{bmatrix}$$

$$\theta(t) = \theta(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{1}{\sqrt{x'^2 + y'^2}} \frac{ds}{dt} dt$$

La curvatura  $\kappa(\theta)$ , que no cambia con la rotación, y la tangente del ángulo  $\phi$  son:

$$\kappa(\theta) = \frac{x' y'' - y' x''}{(x'^2 + y'^2)^{3/2}} = \frac{AB}{(A^2 \sin^2(\theta) + B^2 \cos^2(\theta))^{3/2}}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{y'}{x'} \right)$$

El perímetro total de la elipse viene dado por  $\theta = 2\pi$ , lo cual es equivalente a 4 veces la longitud de un cuadrante de la elipse.

En esta figura, el parámetro  $\theta$  puede ser positivo o negativo dependiendo de la dirección de la rotación que se considere.

La Figura 45 muestra la trayectoria (rojo) de una elipse paramétrica de centro  $C = (0, 0)$ , Radio Eje X = 100, Radio Eje Y = 60, un ángulo de rotación de  $45^\circ$  y un ángulo inicial de  $0^\circ$  con respecto a su horizontal ya rotada en este caso.

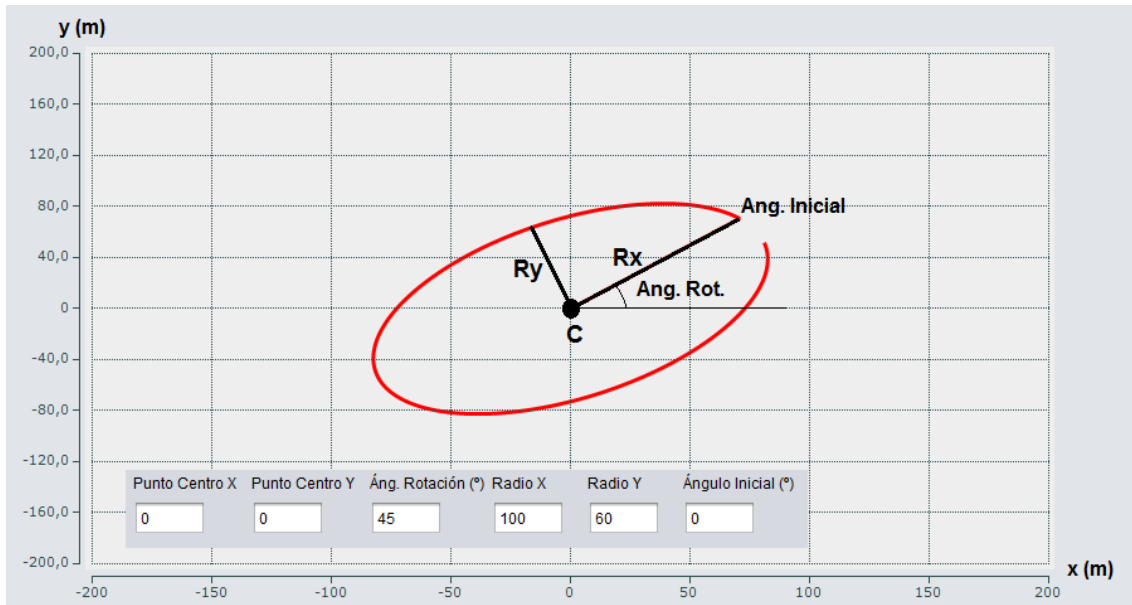


Figura 45: Elipse Paramétrica

#### 4.2.4 Lemniscata. Cálculo de la Curvatura y Tangente del Ángulo

La ecuación para trazar la figura lemniscata en función de su amplitud  $A$  es:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A \cos \theta}{1 + \sin^2 \theta} \\ \frac{A \sin \theta \cos \theta}{1 + \sin^2 \theta} \end{bmatrix}$$

Se puede aplicar una rotación  $R(\psi)$  en sentido antihorario mediante la ecuación:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = R(\psi) \begin{bmatrix} \frac{A \cos \theta}{1 + \sin^2 \theta} \\ \frac{A \sin \theta \cos \theta}{1 + \sin^2 \theta} \end{bmatrix}$$

Si la rotación es en sentido horario, se debe sustituir  $\psi$  por  $-\psi$

Aplicando una traslación  $[x_0 \ y_0]^T$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + R(\psi) \begin{bmatrix} \frac{A \cos \theta}{1 + \sin^2 \theta} \\ \frac{A \sin \theta \cos \theta}{1 + \sin^2 \theta} \end{bmatrix}$$

La curvatura  $\kappa(\theta)$ , que no cambia con la rotación, y la tangente del ángulo  $\phi$  son:

$$\kappa(\theta) = \frac{x'y'' - y'x''}{(x'^2 + y'^2)^{3/2}} = \frac{3\sqrt{2} \cos(\theta)}{A\sqrt{3 - \cos(2\theta)}}$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{y'}{x'}\right)$$

En esta figura, el parámetro  $\theta$  puede ser positivo o negativo dependiendo de la dirección de la rotación que se considere.

La Figura 46 muestra la trayectoria (rojo) de una lemniscata paramétrica de centro  $C = (0, 0)$ , *Amplitud* = 150, un ángulo de rotación de  $0^\circ$  y un ángulo inicial de  $45^\circ$  con respecto a su horizontal.

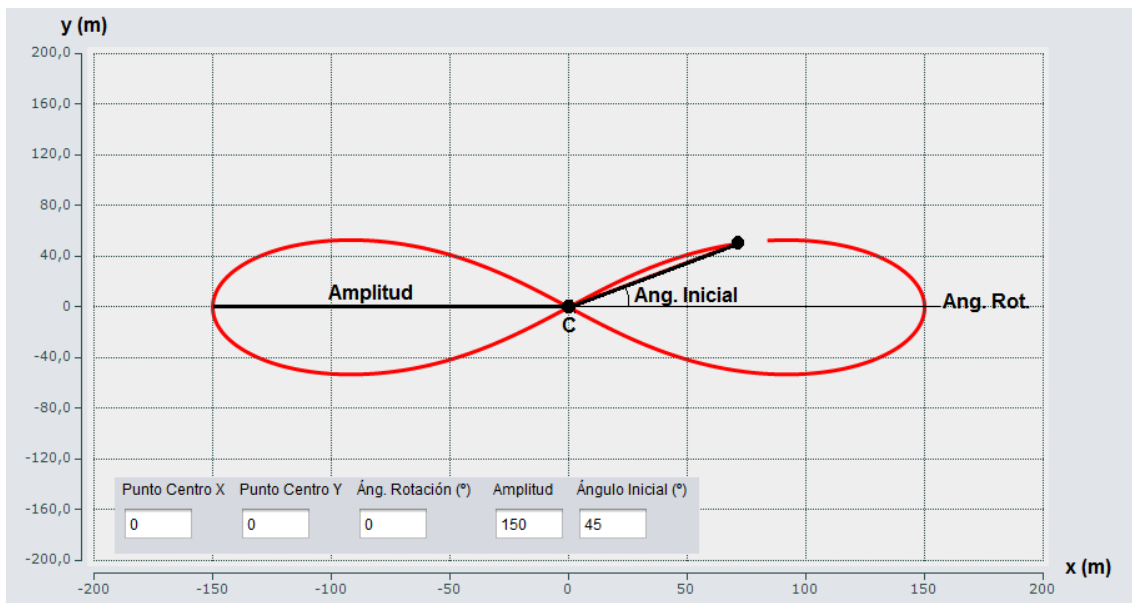


Figura 46: Lemniscata Paramétrica

#### 4.2.5 Sinusoidal. Cálculo de la Curvatura y Tangente del Ángulo

La curva, de forma paramétrica, se representa como:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta \\ A \sin(\omega\theta) \end{bmatrix}$$

Siendo  $\omega$  la frecuencia de la senoide. Si se aplica una rotación  $\psi$  en sentido antihorario ( $-\psi$  en sentido horario)

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = R(\psi) \begin{bmatrix} \theta \\ A \sin(\omega\theta) \end{bmatrix}$$

Si la rotación es en sentido horario, se debe sustituir  $\theta$  por  $-\theta$

Aplicando una traslación  $[x_0 \ y_0]^T$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + R(\psi) \begin{bmatrix} \theta \\ A \sin(\omega\theta) \end{bmatrix}$$

Se calcula la primera y segunda derivada, así como su parámetro  $\theta(t)$  obteniendo las siguientes expresiones:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = R(\psi) \begin{bmatrix} 1 \\ A\omega \cos(\omega\theta) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \end{bmatrix} = R(\psi) \begin{bmatrix} 0 \\ -A\omega^2 \sin(\omega\theta) \end{bmatrix}$$

$$\theta(t) = \theta(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{1}{\sqrt{x'^2 + y'^2}} ds dt$$

La curvatura  $\kappa(\theta)$ , que no cambia con la rotación, y la tangente del ángulo  $\phi$  son:

$$\kappa(\theta) = \frac{x' y'' - y' x''}{(x'^2 + y'^2)^{3/2}} = \frac{-A\omega^2 \sin(\omega\theta)}{(1 + A^2 \omega^2 \cos^2(\omega\theta))^{3/2}}$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{y'}{x'}\right)$$

La Figura 47 muestra la trayectoria (rojo) de una sinusoidal paramétrica cuyo punto inicial es  $(0, 0)$ , *Amplitud* = 200, un ángulo de rotación de  $0^\circ$  y un período de  $T = 400 \text{ seg}$  que equivale a una frecuencia de  $f = 2\pi/T = 2\pi/400 = 0.01570 \text{ seg}^{-1}$ .

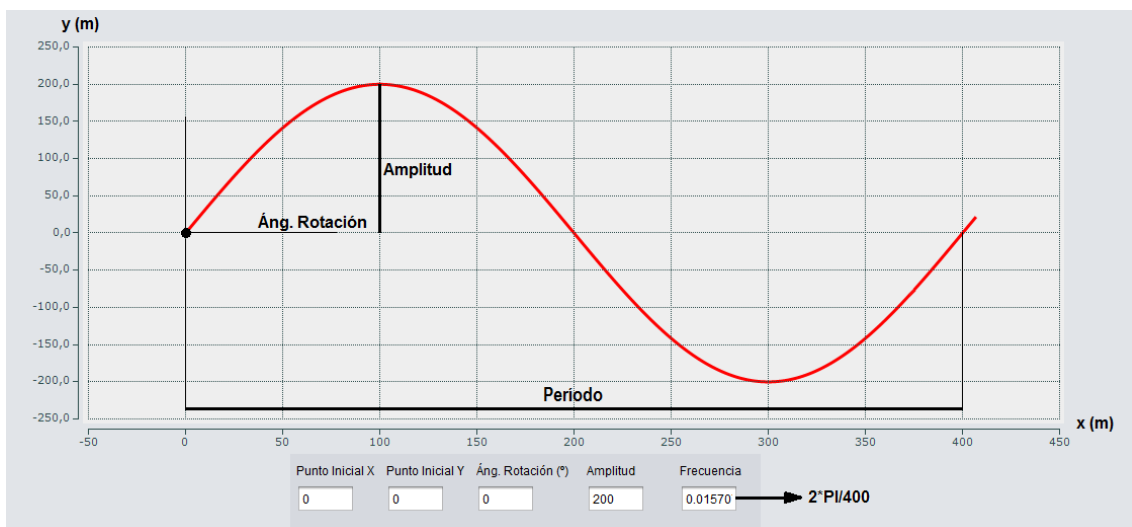


Figura 47: Sinusoidal Paramétrico

### 4.3 Seguimiento Trayectoria Paramétrica

Para cada una de las trayectorias paramétricas, finalmente se genera el vector *out* compuesto por la posición  $[x, y]$ , el vector velocidad  $[x', y']$ , el ángulo tangente  $\phi$  y la curvatura  $\kappa(\theta)$  :

$$out = [x, y, x', y', \phi, \kappa(\theta)]$$

Calculando el control no lineal para seguimiento de trayectorias que utiliza el algoritmo de guiado de [12] y [13], se obtiene la velocidad angular del timón ( $\omega$ ). A partir de la velocidad angular del timón, se calcula la nueva posición del timón (ángulo) mediante la expresión  $angulo = \omega \times t$ .

### 4.4 Pruebas Maniobra Paramétrica

En esta sección se presentan los resultados simulados de diversas Maniobras Paramétricas. Las pruebas que se analizarán son los seguimientos de las trayectorias de un círculo, una elipse y una lemniscata.

#### 4.4.1 Prueba 1. Círculo

En esta simulación, el barco recorre una circunferencia con centro en el punto (50, 30) y radio 100. El ángulo inicial de partida es  $45^\circ$ . Se fijaron, para la velocidad del barco una tensión constante de 4V a la hélice (velocidad  $\approx 1.35 m/s$ ), y un valor de  $L=40$  para la distancia entre el punto virtual y el barco. En el momento de arrancar la prueba, el barco parte desde el punto (0, 0) con un rumbo de  $0^\circ$ .

En la Figura 48 se representa el recorrido del punto virtual (rojo) y el del barco (azul) para esta simulación. El punto virtual parte desde el punto verde y el barco desde el punto azul.

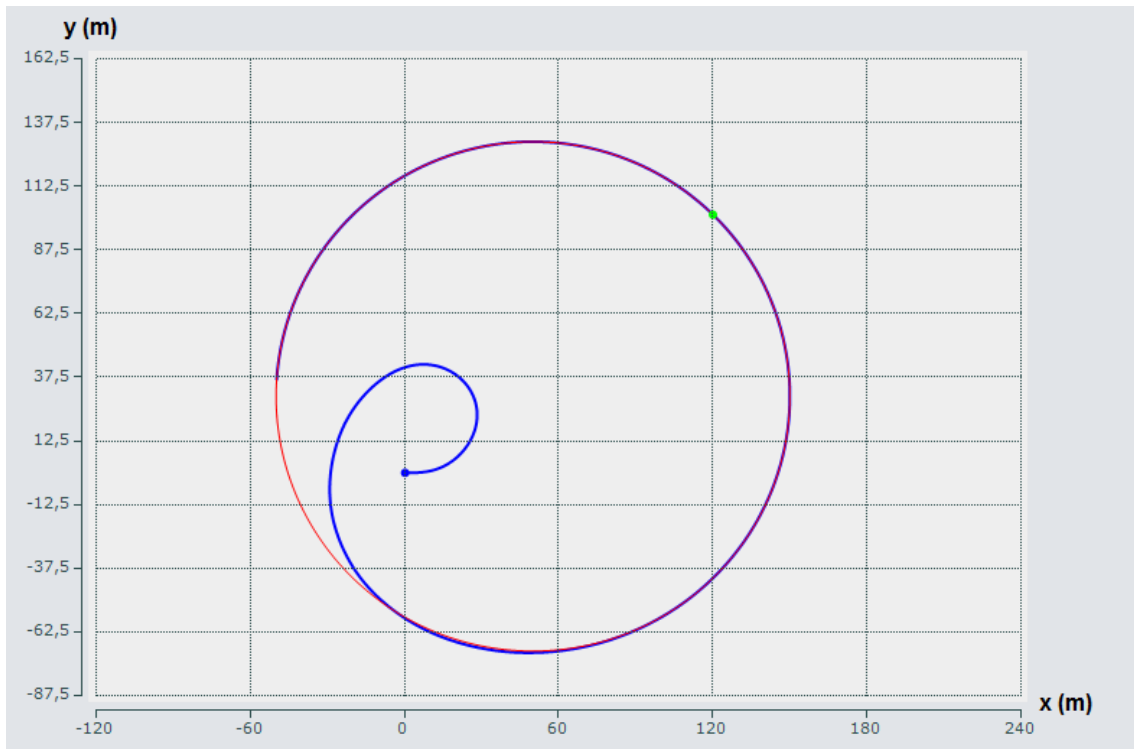


Figura 48: Maniobra Paramétrica - Recorrido Prueba Círculo: Punto Virtual (rojo); Barco (azul)

En la Figura 49 se compara el valor de la referencia del rumbo que se le va pasando al controlador (rojo) y el rumbo que lleva el barco (azul) a lo largo de toda la simulación.

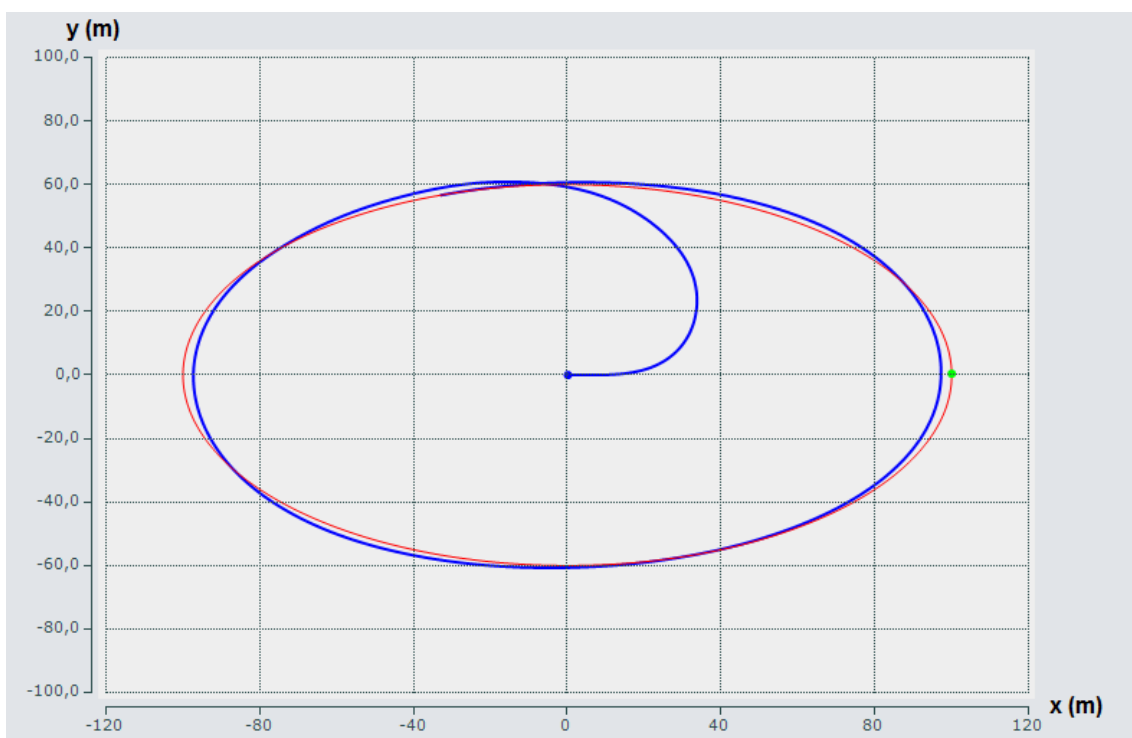


Figura 49: Maniobra Paramétrica - Rumbo Prueba Círculo: Señal de Referencia (rojo); Barco (azul)

#### 4.4.2 Prueba 2. Elipse

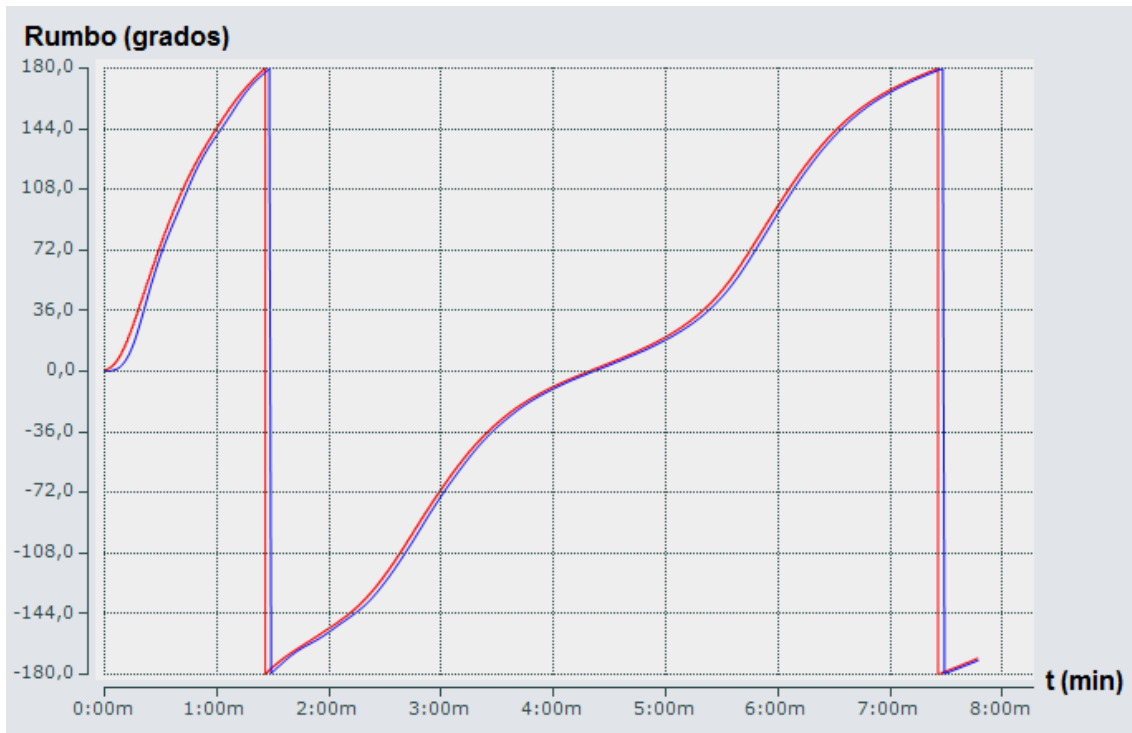
En esta simulación, el barco recorre una elipse con centro en el punto (0, 0), un ángulo de rotación de  $0^\circ$ , un radio según el eje X de 100, un radio según el eje Y de 60 y un ángulo inicial de partida de  $0^\circ$ . Se fijaron, para la velocidad del barco una tensión constante de 4V a la hélice (velocidad  $\approx 1.35\text{ m/s}$ ), y un valor de  $L=40$  para la distancia entre el punto virtual y el barco. En el momento de arrancar la prueba, el barco parte desde el punto (0, 0) con un rumbo de  $0^\circ$ .

En la Figura 50 se representa el recorrido del punto virtual (rojo) y el del barco (azul) para esta simulación. El punto virtual parte desde el punto verde y el barco desde el punto azul.



**Figura 50:** Maniobra Paramétrica - Recorrido Prueba Elipse: Punto Virtual (rojo); Barco (azul)

En la Figura 51 se compara el valor de la referencia del rumbo que se le va pasando al controlador (rojo) y el rumbo que lleva el barco (azul) a lo largo de toda la simulación.



**Figura 51:** Maniobra Paramétrica - Rumbo Prueba Elipse: Señal de Referencia (rojo); Barco (azul)

#### 4.4.3 Prueba 3. Lemniscata

En esta simulación, el barco simulado recorre una figura lemniscata con centro en el punto (10, -10), un ángulo de rotación de  $0^\circ$ , una amplitud de 150 y un ángulo inicial de partida de  $0^\circ$ . Se fijaron, para la velocidad del barco una tensión constante de 4V a la hélice (velocidad  $\approx 1.35 m/s$ ), y un valor de  $L=40$  para la distancia entre el punto virtual y el barco. En el momento de arrancar la prueba, el barco parte desde el punto (0, 0) con un rumbo de  $0^\circ$ .

En la Figura 52 se representa el recorrido del punto virtual (rojo) y el del barco (azul) para esta simulación. El punto virtual parte desde el punto verde y el barco desde el punto azul.

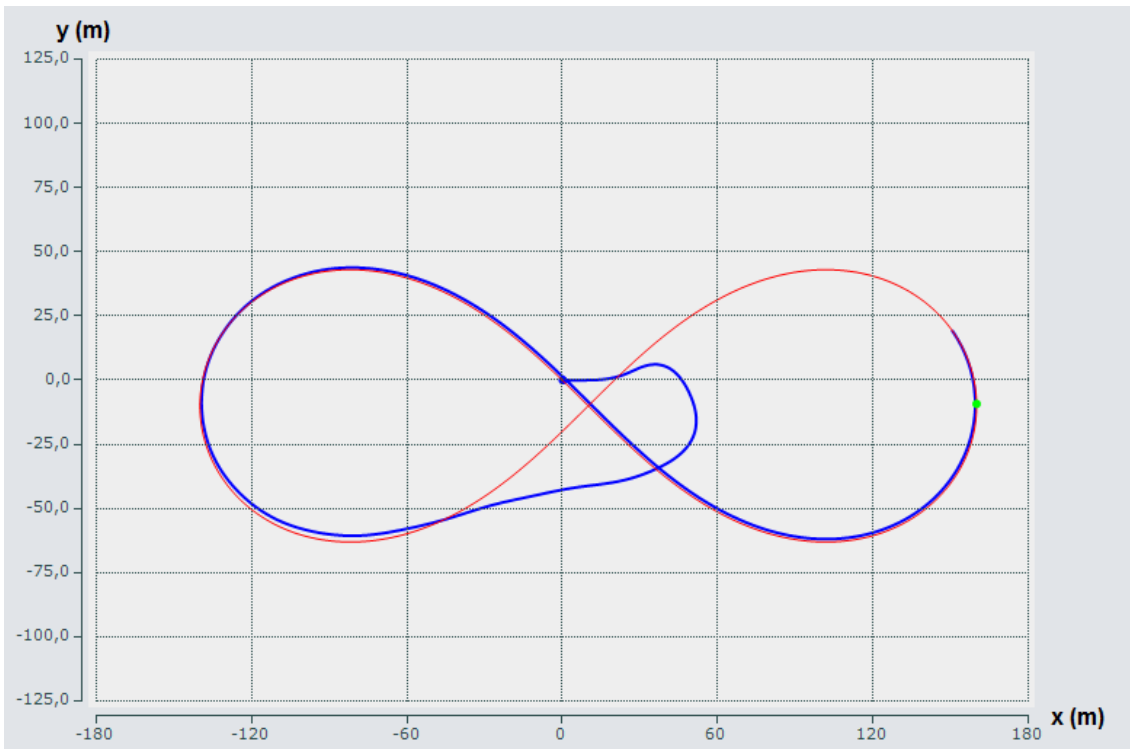


Figura 52: Maniobra Paramétrica - Recorrido Prueba Lemniscata: Punto Virtual (rojo); Barco (azul)

En la Figura 53 se compara el valor de la referencia del rumbo que se le va pasando al controlador (rojo) y el rumbo que lleva el barco (azul) a lo largo de toda la simulación.

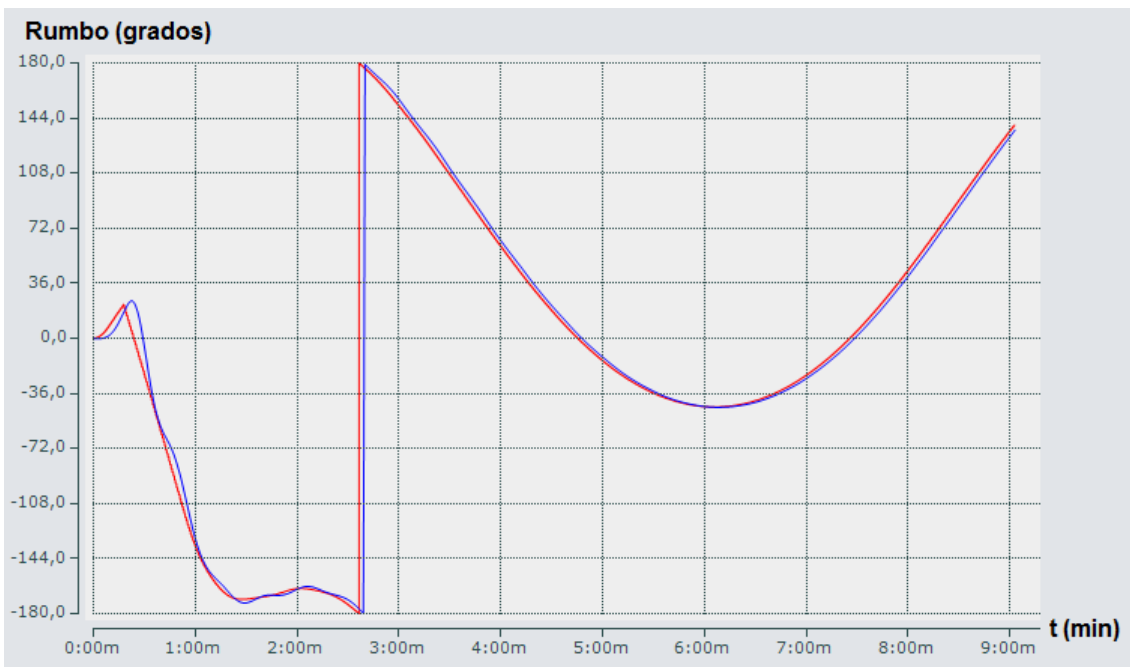


Figura 53: Maniobra Paramétrica - Rumbo Prueba Lemniscata: Señal de Referencia (rojo); Barco (azul)

## 4.5 Experimentos Maniobra Paramétrica

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en la ejecución de diversas Maniobras Paramétricas (círculo, lemniscata y elipse) llevadas a cabo en el pantano de El Atazar con el prototipo real del barco.

### 4.5.1 Experimento 1. Círculo

En este experimento, el barco recorrió una circunferencia con centro en el punto (0, 0) y radio 50. El ángulo inicial de partida es  $0^\circ$ . Se fijaron, para la velocidad del barco una tensión constante de 2V a la hélice (velocidad  $\approx 0.68\text{m/s}$ ), y un valor de  $L=30$  para la distancia entre el punto virtual y el barco. En el momento de arrancar el experimento, el barco parte desde el punto (0.42, 0.30) con un rumbo de  $-67.79^\circ$ .

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para este experimento a partir de los datos recogidos durante el mismo.

En la Figura 54 se representa el recorrido del punto virtual (rojo) y el del barco (azul). El punto virtual parte desde el punto verde y el barco desde el punto azul. En el arranque de la maniobra, el barco llega a alejarse unos 20 metros del círculo (aproximadamente punto (-20, 55)) para comenzar a acercarse a la trayectoria del mismo. En este experimento, aunque no se siga fielmente la trayectoria del círculo, sí que se observa que el barco recorre gran parte del círculo transitando a unos 5 m de la trayectoria que ha descrito el punto virtual.

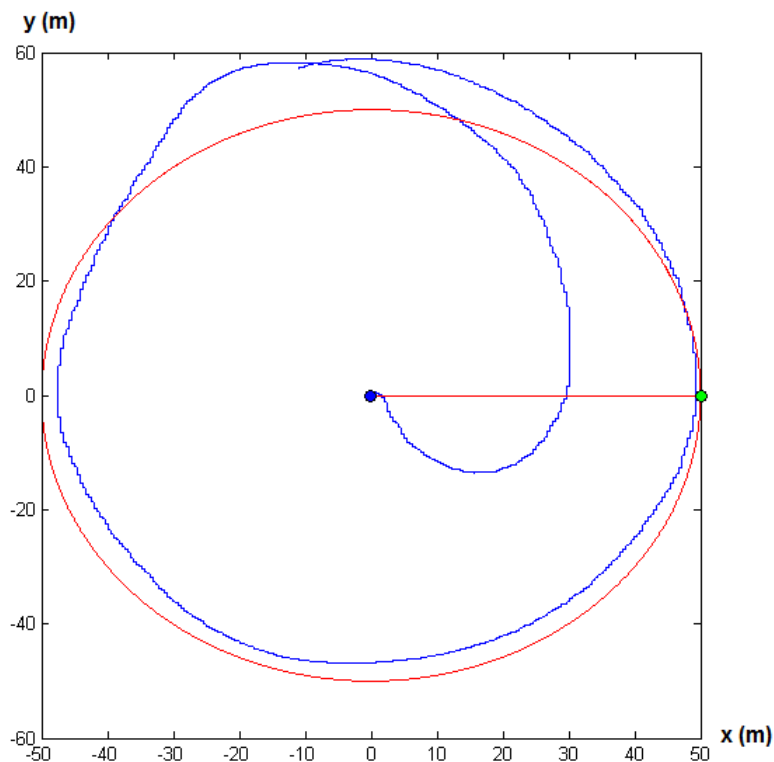
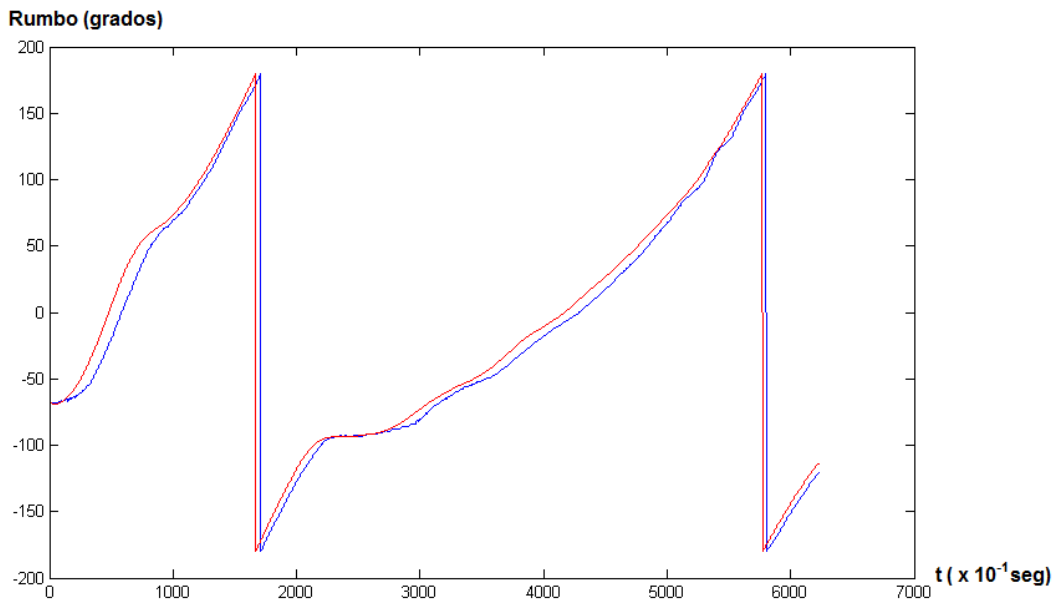


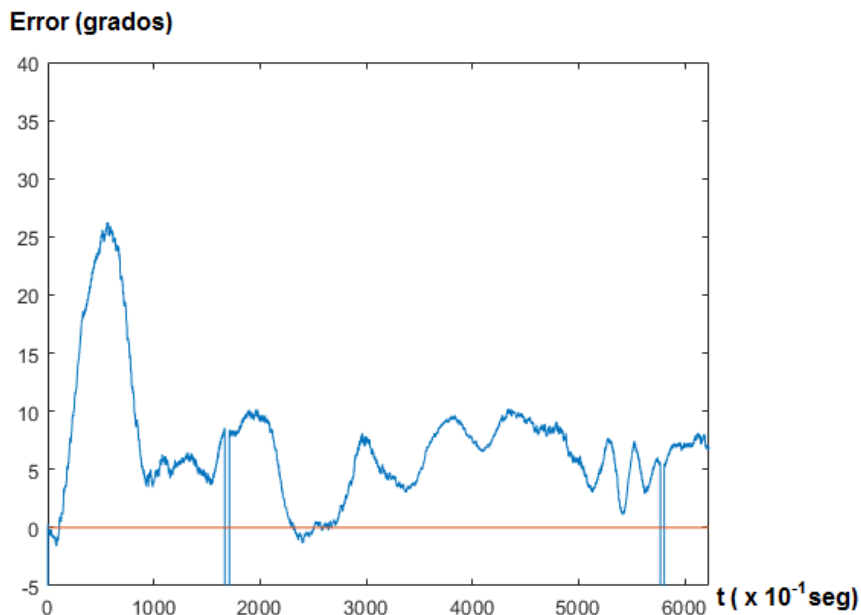
Figura 54: Maniobra Paramétrica - Recorrido Experimento Círculo: Punto Virtual (rojo); Barco (azul)

En la Figura 55 se compara el valor de la referencia del rumbo que se le va pasando al controlador (rojo) y el rumbo que lleva el barco (azul) a lo largo de todo el experimento.



**Figura 55:** Maniobra Paramétrica - Rumbo Experimento Círculo: Señal de Referencia (rojo); Barco (azul)

En la figura se aprecia la variación del rumbo, a lo largo del experimento. Para un mejor análisis, se presenta la Figura 56, en la que la línea azul representa la evolución del error del rumbo respecto al valor de referencia a lo largo del experimento. Dicho error se calcula restando al valor de referencia el valor del rumbo. La línea roja representa un error ideal de  $0^\circ$ . Durante el experimento se observa que el error permanece entre  $0$  y  $10^\circ$  aproximadamente.



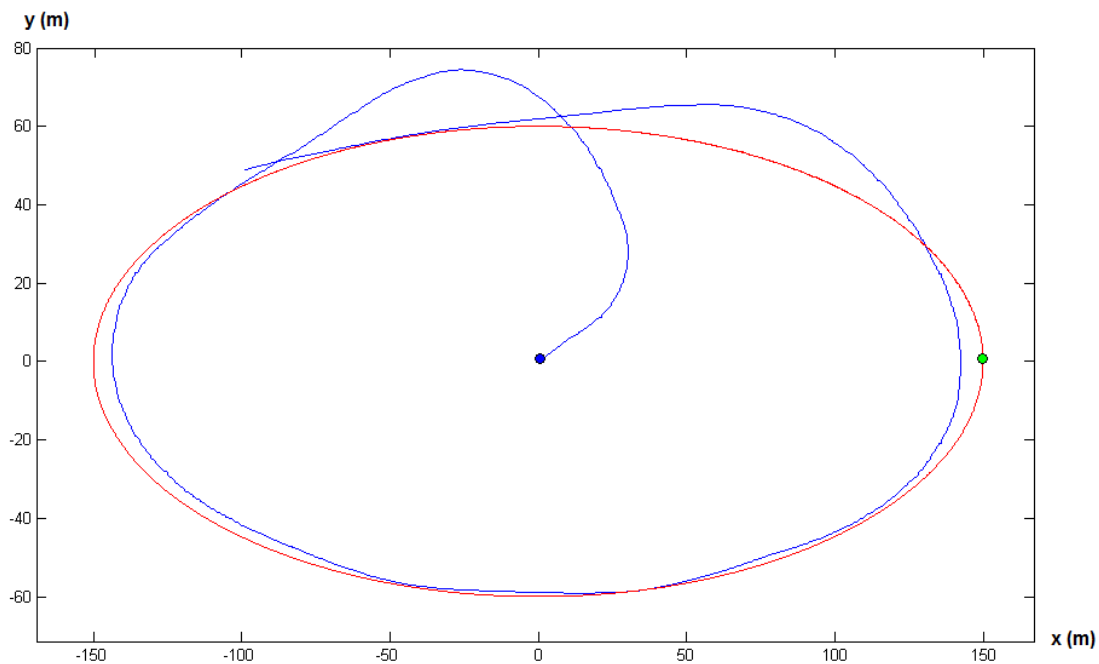
**Figura 56:** Maniobra Paramétrica - Rumbo Experimento Círculo: Evolución Error

### 4.5.2 Experimento 2. Elipse

En este experimento, el barco recorrió una elipse con centro en el punto  $(0, 0)$ , un ángulo de rotación de  $0^\circ$ , un radio según el eje X de 150, un radio según el eje Y de 60 y un ángulo inicial de partida de  $0^\circ$ . Se fijaron, para la velocidad del barco una tensión constante de  $4V$  a la hélice (velocidad  $\approx 1.35\text{ m/s}$ ), y un valor de  $L=40$  para la distancia entre el punto virtual y el barco. En el momento de arrancar el experimento, el barco parte desde el punto  $(0.84, 0.22)$  con un rumbo de  $8^\circ$ .

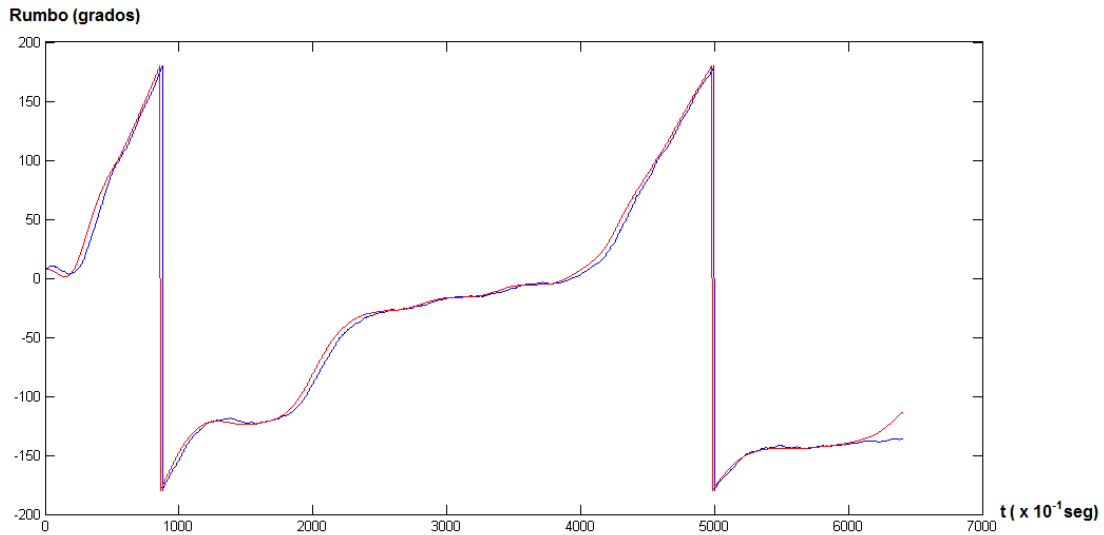
A continuación, se muestran los resultados obtenidos para este experimento a partir de los datos recogidos durante el mismo.

En la Figura 57 se representa el recorrido del punto virtual (rojo) y el del barco (azul). El punto virtual parte desde el punto verde y el barco desde el punto azul. Como se observa en la gráfica, el barco por lo general sigue bastante bien el recorrido de la elipse. Su mayor dificultad coincide con el seguimiento de la trayectoria en los vértices del eje X de la figura, que corresponden a los puntos  $(-150, 0)$  y  $(150, 0)$ , debido a que el giro es más pronunciado en dichos puntos. Se observa que en estos vértices el barco recorre la elipse transitando a unos 10 m de la trayectoria que ha descrito el punto virtual.



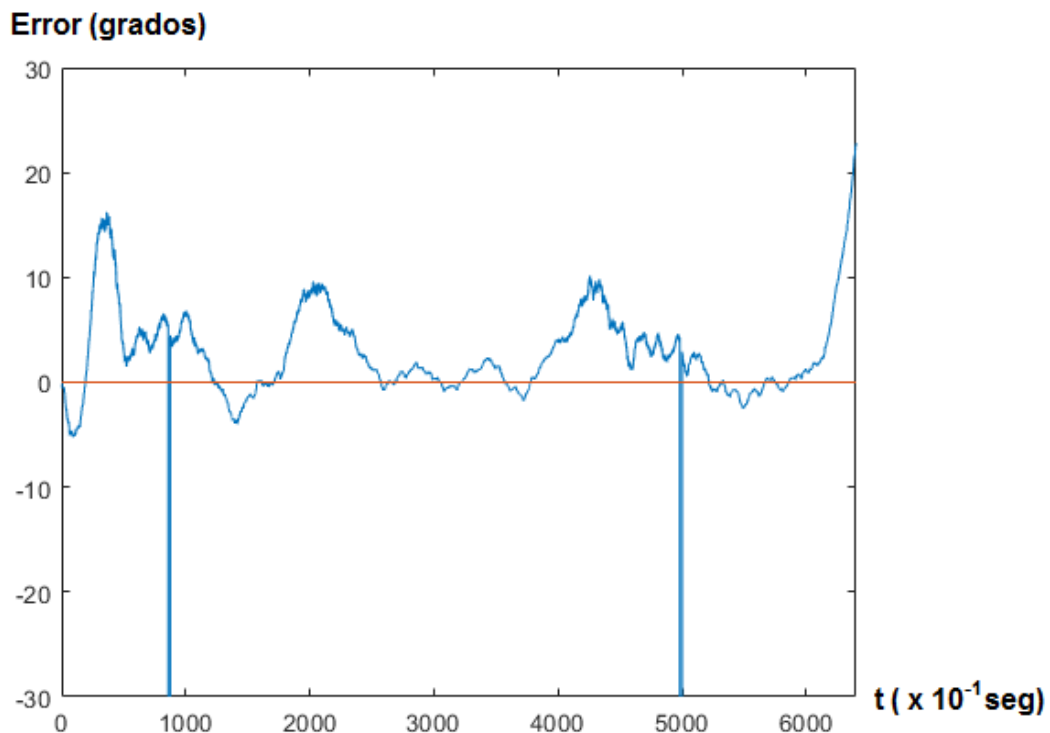
**Figura 57:** Maniobra Paramétrica - Recorrido Experimento Elipse: Punto Virtual (rojo); Barco (azul)

En la Figura 58 se compara el valor de la referencia del rumbo que se le va pasando al controlador (rojo) y el rumbo que lleva el barco (azul) a lo largo de todo el experimento.



**Figura 58:** Maniobra Paramétrica - Rumbo Experimento Elipse: Señal de Referencia (rojo); Barco (azul)

En la figura se aprecia la variación del rumbo, a lo largo del experimento. Para un mejor análisis, se presenta la Figura 59, en la que la línea azul representa la evolución del error del rumbo respecto al valor de referencia a lo largo del experimento. Dicho error se calcula restando al valor de referencia el valor del rumbo. La línea roja representa un error ideal de 0°. Durante el experimento se observa que el error permanece entre -5 y 10° aproximadamente.



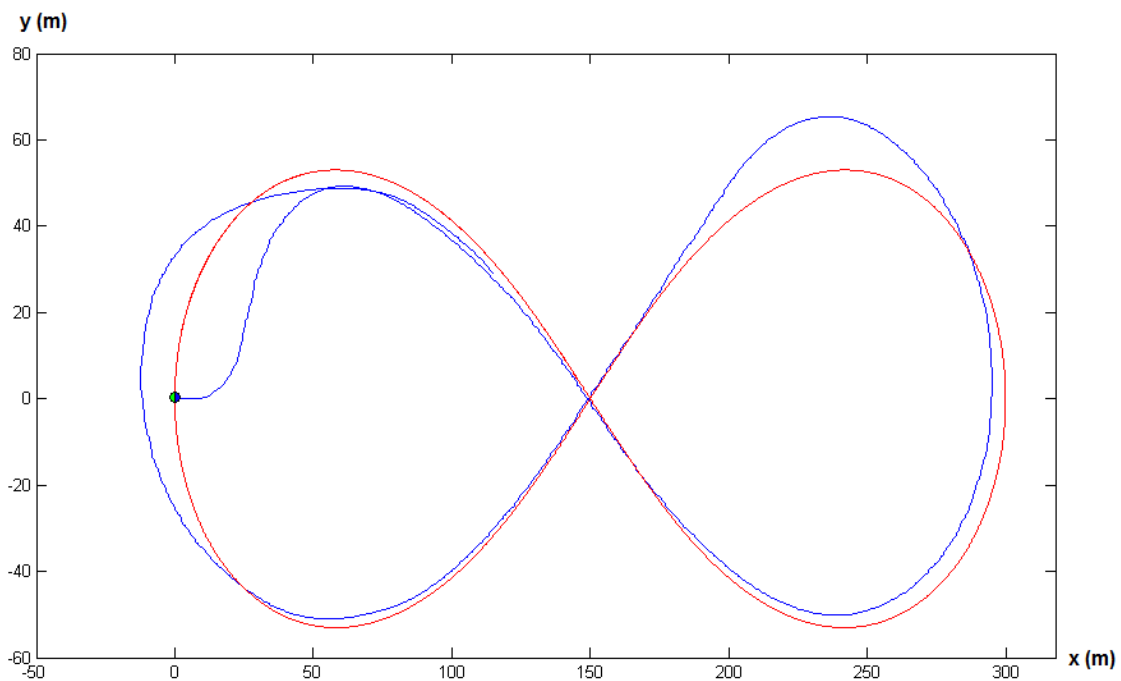
**Figura 59:** Maniobra Paramétrica - Rumbo Experimento Elipse: Evolución Error

### 4.5.3 Experimento 3. Lemniscata

En este experimento, el barco recorrió una figura lemniscata con centro en el punto (150, 0), un ángulo de rotación de  $0^\circ$ , una amplitud de 150 y un ángulo inicial de partida de  $180^\circ$ . Se fijaron, para la velocidad del barco una tensión constante de 4V a la hélice (velocidad  $\approx 1.35 \text{ m/s}$ ), y un valor de  $L=40$  para la distancia entre el punto virtual y el barco. En el momento de arrancar el experimento, el barco parte desde el punto (0, 0.02) con un rumbo de  $-20.73^\circ$ .

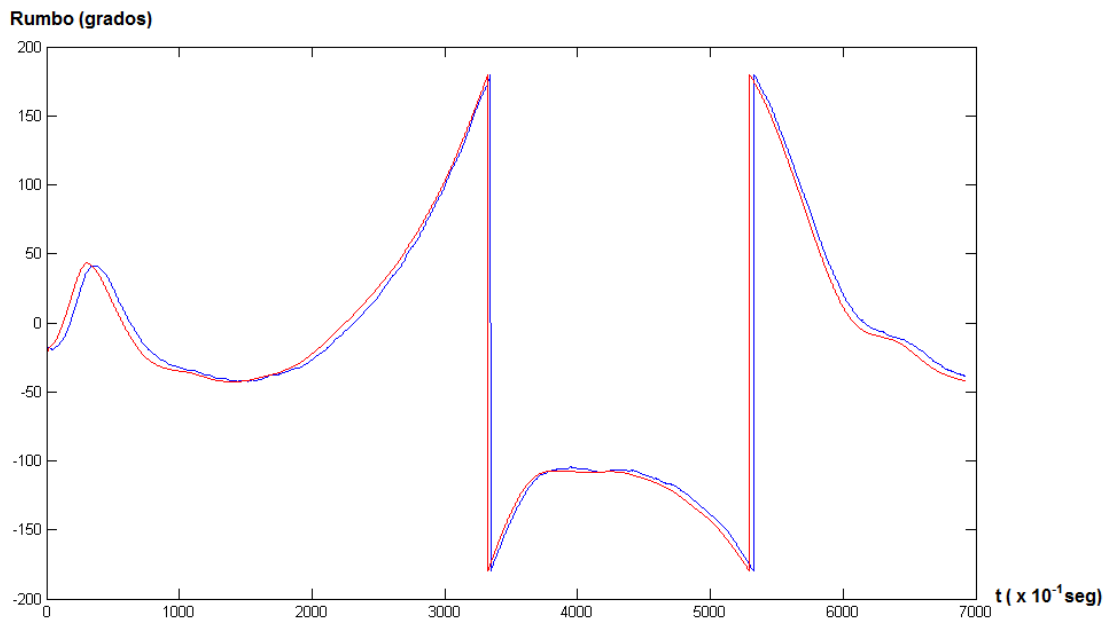
A continuación, se muestran los resultados obtenidos para este experimento a partir de los datos recogidos durante el mismo.

En la Figura 60 se representa el recorrido del punto virtual (rojo) y el del barco (azul). El punto virtual parte desde el punto verde y el barco desde el punto azul. Como se aprecia en la figura, ambos puntos coinciden. Como se observa en la gráfica, el barco por lo general sigue bastante bien el recorrido de la lemniscata en las proximidades del centro de la figura, donde su curvatura es próxima a 0. Su mayor dificultad coincide cuando el punto virtual se encuentra en los tramos casi rectos que cruzan el centro de la lemniscata y el barco se encuentra en pleno giro. Por ejemplo, en el punto (250, 60) aproximadamente, el barco recorre la figura lemniscata transitando a unos 15 m de la trayectoria que ha descrito el punto virtual.



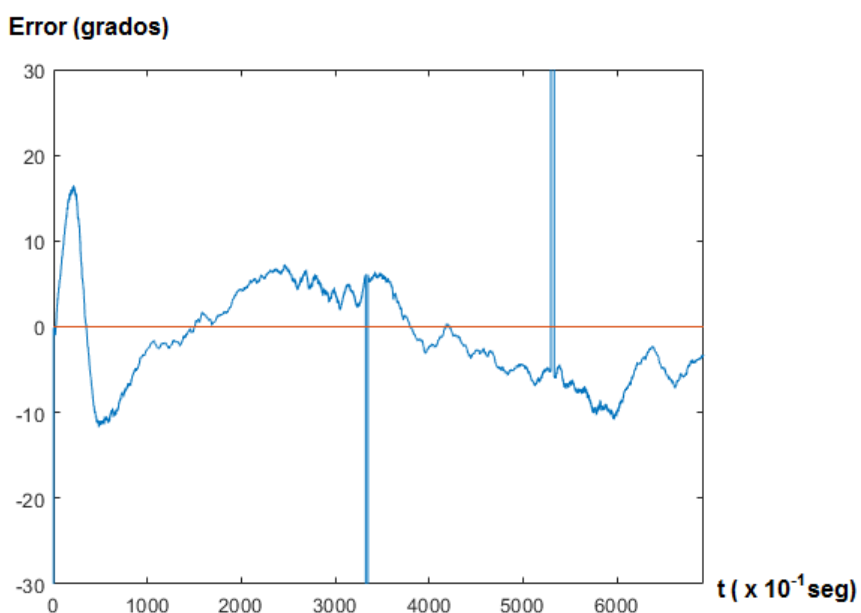
**Figura 60:** Maniobra Paramétrica - Recorrido Experimento Lemniscata: Punto Virtual (rojo); Barco (azul)

En la Figura 61 se compara el valor de la referencia del rumbo que se le va pasando al controlador (rojo) y el rumbo que lleva el barco (azul) a lo largo de todo el experimento.



**Figura 61:** Maniobra Paramétrica - Rumbo Experimento Lemniscata: Señal de Referencia (rojo); Barco (azul)

En la figura se aprecia la variación del rumbo, a lo largo del experimento. Para un mejor análisis, se presenta la Figura 63, en la que la línea azul representa la evolución del error del rumbo respecto al valor de referencia a lo largo del experimento. Dicho error se calcula restando al valor de referencia el valor del rumbo. La línea roja representa un error ideal de  $0^\circ$ . Durante el experimento se observa que el error permanece entre  $-10$  y  $10^\circ$  aproximadamente.



**Figura 62:** Maniobra Paramétrica - Rumbo Experimento Lemniscata: Evolución Error

## Capítulo 5: Implementación Software

Una visión muy esquemática y conceptualmente simple del software utilizado para controlar el barco desde tierra en el proyecto SALACOM se puede ver en la Figura 63.

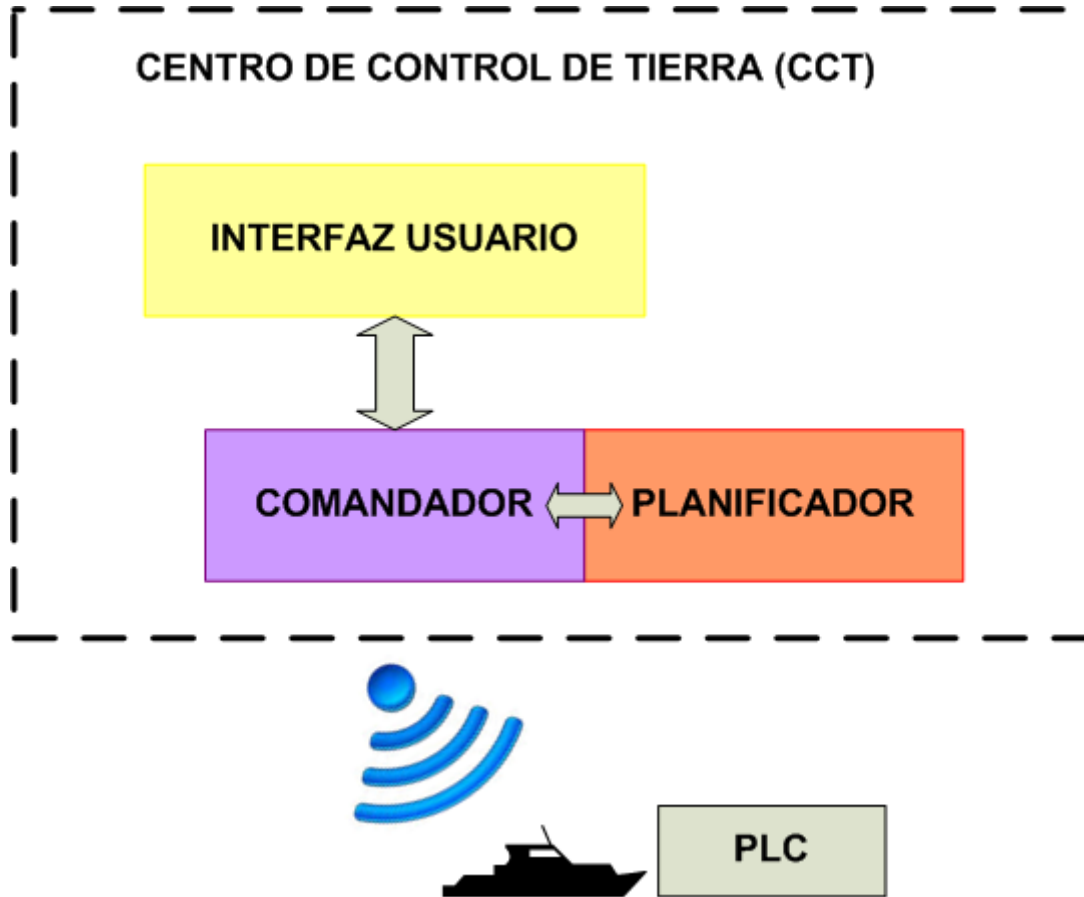


Figura 63: Arquitectura del Proyecto SALACOM

Desde el punto de vista de este Trabajo fin de Master cabe reseñar las siguientes unidades funcionales en esta arquitectura:

- 1) *PLC*: El control en los USV se lleva a cabo mediante un PC industrial de la familia Beckhoff (modelo C6920-0010 con placa madre CB3051-0005 - CPU: Core Duo 2GHz FCBGA-479) que se encuentra a bordo del vehículo. En este PLC residen los algoritmos de control para el seguimiento de rutas y el modelo utilizado para simular el comportamiento del barco. Se ha desarrollado en el lenguaje estructurado dentro del sistema TwinCAT de Beckhoff.
- 2) *Interfaz de Usuario*: Este módulo permite al operador visualizar el estado y otros datos del vehículo (posición sobre el mapa, datos de telemetría, gráficas temporales, etc.) proporcionados por el módulo Comandador. Para visualizar los vehículos y su entorno en tiempo real se utilizan librerías de Open Street Maps que han sido modificadas para adaptarse a las necesidades del proyecto.

- 3) *Comandador*: Este módulo, que está desarrollado en Java, se encarga de:
- Comunicar con el PLC del USV mediante TCP/IP para ejecutar las maniobras. Utiliza el protocolo ADS (Automation Device Specification) para conectar este módulo con el PLC. ADS es la capa de transporte que proporciona el sistema Twincat para que aplicaciones desarrolladas en otros lenguajes tengan acceso a las variables del PLC.
  - Proporcionar datos del vehículo a la Interfaz de Usuario.
  - Integrar el módulo Planificador.
- 4) *Planificador*: Es un módulo desarrollado en Java e integrado en el Comandador que se encarga de calcular la ruta definida por el operador del USV. Su funcionalidad fue expuesta en el capítulo 3 de esta memoria, y su implementación es analizada a lo largo de la sección 5.1 de este trabajo.

## **5.1 Planificador**

Esta sección contiene información sobre la implementación software llevada a cabo para la creación del módulo Planificador para las Maniobras Compuestas. A partir del diseño de clases creado para el planificador, se analizarán de cada clase sus propiedades y métodos.

### 5.1.1 Diseño de Clases

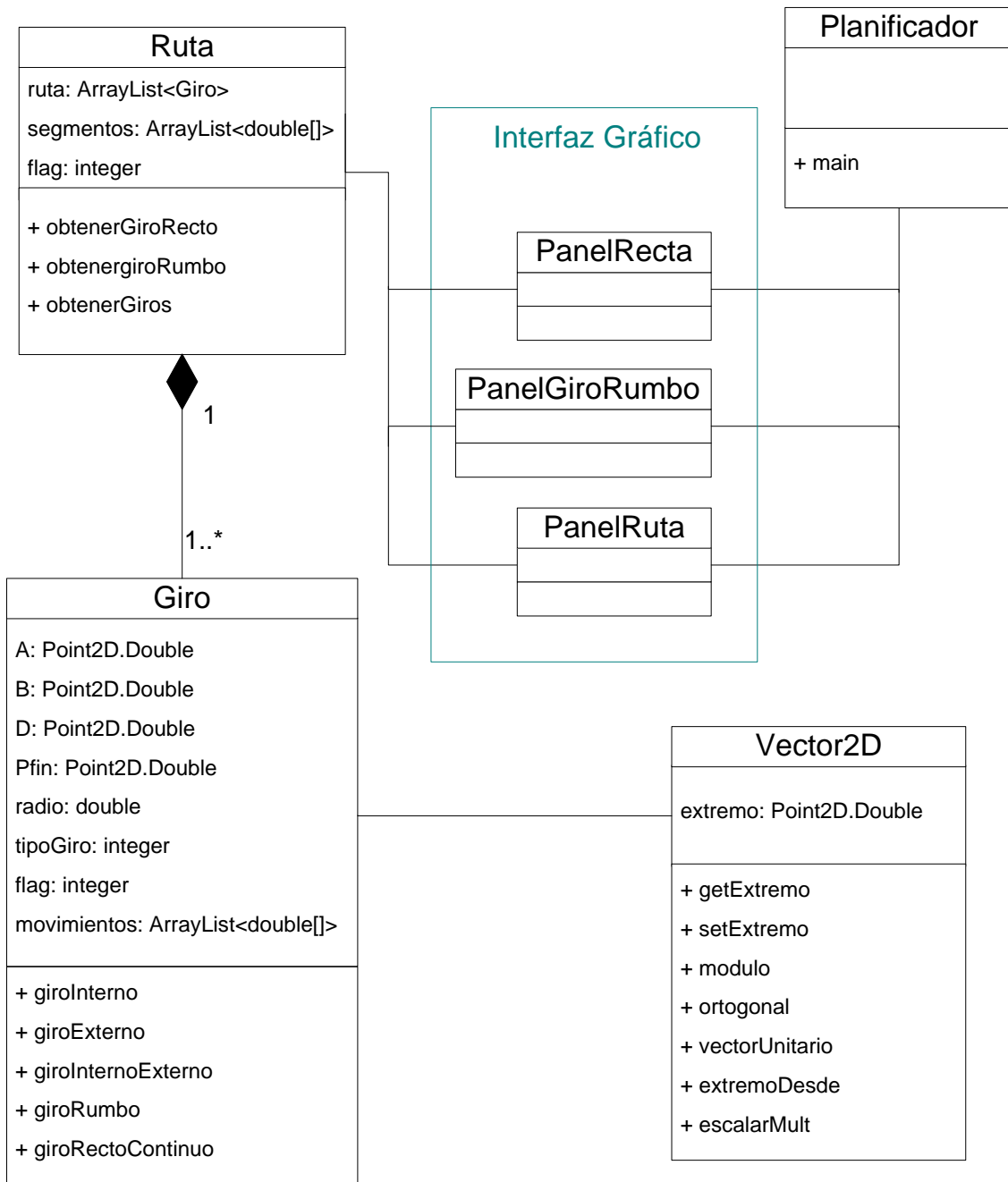


Figura 64: Planificador - Diseño de Clases

La clase Planificador es la clase principal que contiene a los paneles, que forman el interfaz gráfico, con los que el usuario interactúa. Las clases que forman el interfaz son PanelRecta, PanelGiroRumbo y PanelRuta. Cada una de ellas llama a su método correspondiente en la clase Ruta, la cual está compuesta de Giros. La clase Giro es la clase que se encarga de calcular los tramos rectos y circulares que forman los giros de la ruta, con ayuda de la clase auxiliar Vector2D.

A continuación se analizan cada una de las clases que no forman parte del interfaz gráfico.

### 5.1.2 Clase Vector2D

La clase Vector2D se utiliza, dentro de la clase Giro, para calcular el rumbo inicial de los tramos y los puntos auxiliares de los giros Externo (sección 3.2.2), Interno-Externo (sección 3.2.3) y Rumbo (sección 3.2.5). A continuación se repasa sus propiedades y métodos:

Vector2D	
extremo: Point2D.Double	
+ getExtremo () → Point2D.Double + setExtremo (Point2D.Double extremo) → void + modulo () → double + ortogonal () → Vector2D + vectorUnitario () → Vector2D + extremoDesde (Point2D.Double pto) → Point2D.Double + escalarMult (double scalar) → Vector2D	

#### 5.1.2.1 Propiedades

Nombre	Tipo	Descripción
<b>extremo</b>	Point2D.Double	Punto extremo del vector

Define el extremo del vector siendo el inicio del mismo el punto (0,0).

#### 5.1.2.2 Métodos

La clase Vector2D consta de los siguientes métodos:

Cabecera	Resultado
<b>getExtremo ()</b>	Point2D.Double
<b>setExtremo (Point2D.Double extremo)</b>	void
<b>modulo ()</b>	double
<b>ortogonal ()</b>	Vector2D
<b>vectorUnitario ()</b>	Vector2D
<b>extremoDesde (Point2D.Double pto)</b>	Point2D.Double
<b>escalarMult (double scalar)</b>	Vector2D

- `getExtremo ()` → Accesor de la propiedad `extremo`. Devuelve el punto extremo del vector.
- `setExtremo (Point2D.Double extremo)` → Mutador de la propiedad `extremo`. Establece el extremo del vector con el punto extremo que se le pasa como parámetro.
- `modulo ()` → Devuelve el módulo del vector.
- `ortogonal ()` → Devuelve el vector ortogonal.
- `vectorUnitario ()` → Devuelve el vector unitario.
- `extremoDesde (Point2D.Double pto)` → Devuelve el punto resultante de sumar `pto` con el extremo del vector.
- `escalarMult (double scalar)` → Devuelve el vector resultante de realizar el producto de `scalar` por vector.

### 5.1.3 Clase Giro

La clase `Giro` es la encargada de aplicar los giros sobre los waypoints de la trayectoria. Dados tres puntos de un plano que marcan una trayectoria de un vehículo en la dirección  $A \rightarrow B \rightarrow D$  y el radio de giro, aplica los distintos tipos de giro. A continuación se repasa sus propiedades y principales métodos:

Giro
<p>A: Point2D.Double                      B: Point2D.Double                      D: Point2D.Double                      Pfin: Point2D.Double                      radio: double                      tipoGiro: integer                      flag: integer                      movimientos: ArrayList&lt;double[]&gt;</p>
<p>+ <code>giroInterno (Point2D.Double A, Point2D.Double B, Point2D.Double D, double radio)</code> → Point2D.Double                      + <code>giroExterno (Point2D.Double A, Point2D.Double B, Point2D.Double D, double radio)</code> → Integer                      + <code>giroInternoExterno (Point2D.Double A, Point2D.Double B, Point2D.Double D, double radio)</code> → Integer                      + <code>giroRumbo (Point2D.Double A, Point2D.Double B, Point2D.Double D, double radio, double alfa)</code> → Integer                      + <code>giroRectoContinuo (Point2D.Double A, Point2D.Double B, Point2D.Double D,)</code> → Integer</p>

### 5.1.3.1 Propiedades

Nombre	Tipo	Descripción
<b>A</b>	Point2D.Double	Punto inicial del giro
<b>B</b>	Point2D.Double	Punto intermedio o de paso del giro
<b>D</b>	Point2D.Double	Punto de destino del giro
<b>Pfin</b>	Point2D.Double	Punto final del giro
<b>radio</b>	double	Radio circunferencia/s del giro
<b>tipoGiro</b>	Integer	Tipo de giro aplicado: (0 - Giro Interno) (1 - Giro Externo) (2 - Giro Interno-Externo) (3 - Giro Rumbo) (4 - Recto continuo)
<b>flag</b>	Integer	Estado del giro
<b>movimientos</b>	ArrayList<double[]>	Arrays con la descomposición de movimientos del giro

### 5.1.3.2 Métodos

Mediante los siguientes métodos se aplican los distintos giros (Interno, Externo, Interno-Externo, Rumbo ó Recto) sobre el objeto Giro:

Cabecera	Resultado
<b>giroInterno</b> (Point2D.Double A, Point2D.Double B, Point2D.Double D, double radius)	Point2D.Double: - Coord. x: flag (0 si movimiento OK) - Coord. y: distancia B a circunferencia
<b>giroExterno</b> (Point2D.Double A, Point2D.Double B, Point2D.Double D, double radius)	Integer: flag (0 si movimiento OK)
<b>giroInternoExterno</b> (Point2D.Double A, Point2D.Double B, Point2D.Double D, double radius)	Integer: flag (0 si movimiento OK)
<b>giroRumbo</b> (Point2D.Double A, Point2D.Double B, Point2D.Double D, double radius, double alfarumbo)	Integer: flag (0 si movimiento OK)
<b>giroRectoContinuo</b> (Point2D.Double A, Point2D.Double B, Point2D.Double D)	void

### 5.1.4 Clase Ruta

La clase Ruta es la clase gestora que se encarga de obtener los Giros, y por ende, los segmentos de los mismos, que forman la trayectoria. A continuación se repasa sus propiedades y métodos.

Ruta
ruta: ArrayList<Giro> segmentos: ArrayList<double[]> flag: integer
+ obtenerGiroRecto (Point2D.Double A, Point2D.Double B, String direccion) → Giro + obtenerGiroRumbo (Point2D.Double A, Point2D.Double B, double radio, double alfarumbo, String direccion) → Giro + obtenerGiros (List<Point2D.Double> listWaypoints, double Radio, double Distancia, double alfarumbo, String direccion) → ArrayList<double[]>

#### 5.1.4.1 Propiedades

Nombre	Tipo	Descripción
<b>ruta</b>	ArrayList<Giro>	Array que contiene los Giros de los que consta la Ruta
<b>segmentos</b>	ArrayList<double[]>	Array que contiene los segmentos que forman la Ruta
<b>flag</b>	int	Entero que determina si es ruta viable (=0) o no (≠0)

Para poder obtener la lista de segmentos que forman una ruta, hay que definir los parámetros de entrada de los métodos obtenerGiroRecto, obtenerGiroRumbo u obtenerGiros.

#### 5.1.4.2 Métodos

La clase Ruta consta de los siguientes métodos:

Cabecera	Resultado
<b>obtenerGiroRecto</b> (Point2D.Double A, Point2D.Double B, String direccion)	Giro
<b>obtenerGiroRumbo</b> (Point2D.Double A, Point2D.Double B, double radio, double alfarumbo, String direccion)	Giro
<b>obtenerGiros</b> (List<Point2D.Double> listWaypoints, double Radio, double Distancia, double alfarumbo, String direccion)	ArrayList<double[]>

- a) Método `obtenerGiroRecto`: Devuelve el objeto `Giro` resultante al hacer un movimiento rectilíneo entre los puntos A y B que se pasan como parámetros. Este método crea un archivo de texto resultado en la ruta indicada en el parámetro `direccion` con la estructura de datos de los segmentos de la trayectoria descrita al realizar el movimiento recto. En la aplicación Planificador, su interfaz gráfica corresponde a la que aparece en la Figura 65.

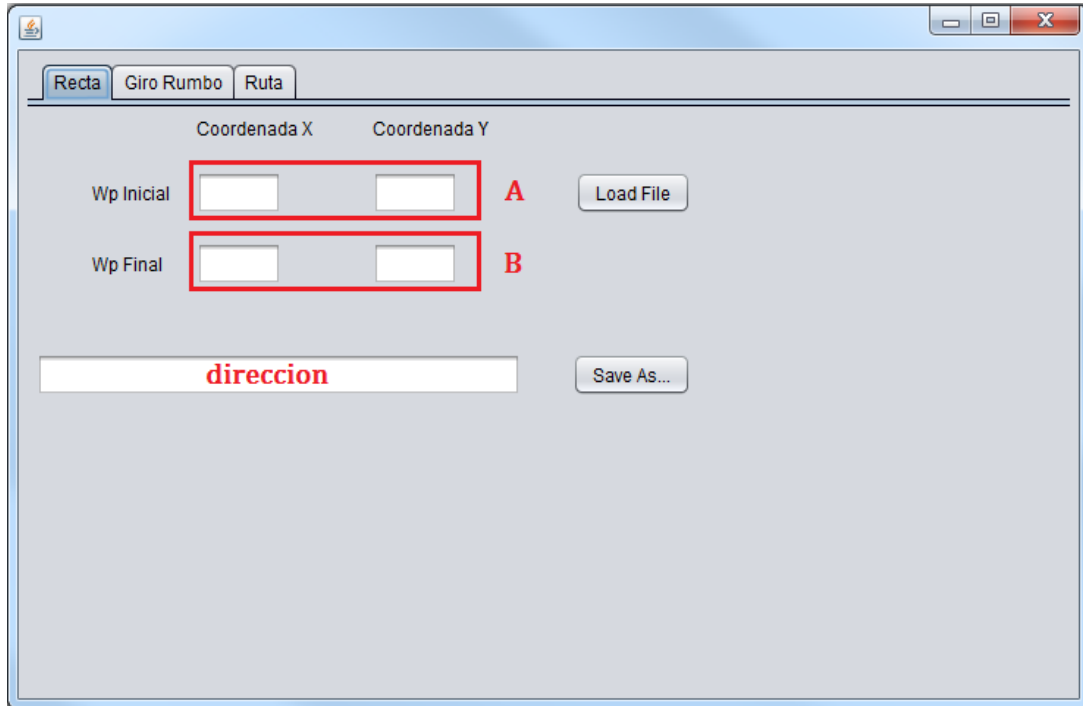


Figura 65: Planificador - Interfaz Gráfico: PanelRecta

- b) Método `obtenerGiroRumbo`: Método que devuelve el objeto Giro resultante al hacer un giro Rumbo entre los puntos A y B siendo `radio`, el radio de giro, y `alpharumbo`, el ángulo de rumbo, parámetros de entrada. Es método crea un archivo de texto resultado en la ruta indicada en el parámetro `direccion` con la estructura de datos de los segmentos de la trayectoria descrita al realizar el giro Rumbo. En la aplicación Planificador, su interfaz gráfica corresponde a la que aparece en la Figura 66.

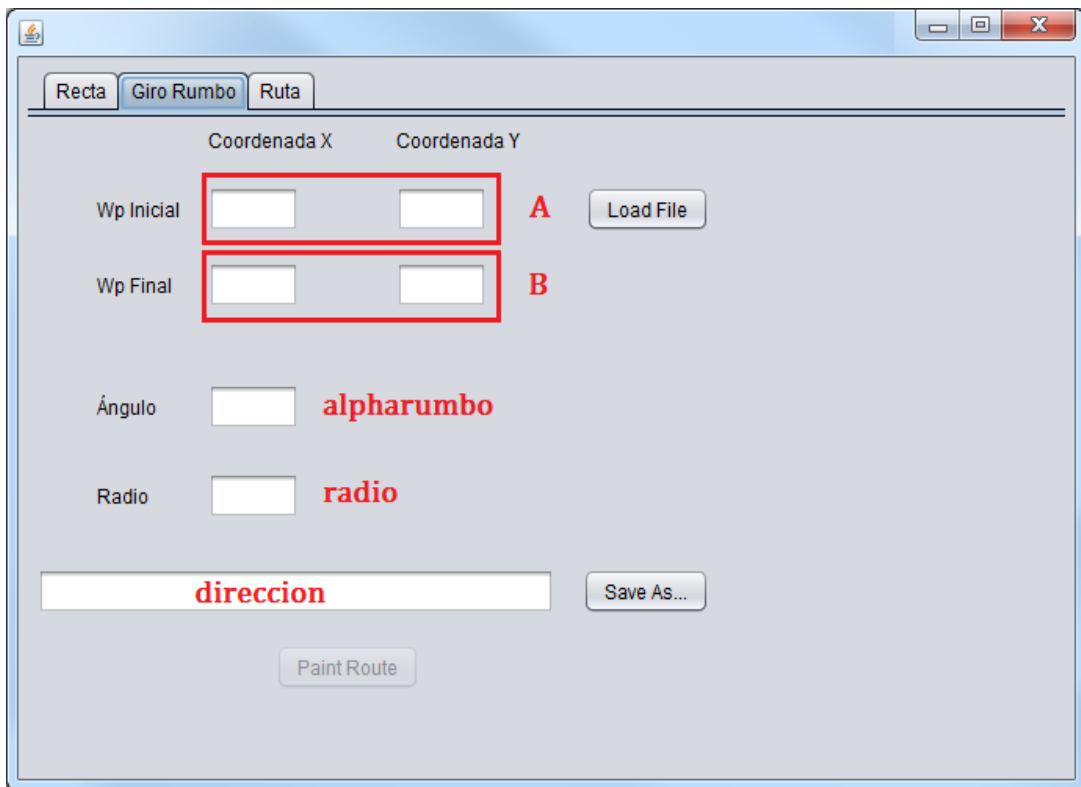


Figura 66: Planificador - Interfaz Gráfico: PanelGiroRumbo

- c) Método `obtenerGiros`: Método “principal” que obtiene la estructura de los segmentos de la trayectoria definida a partir de sus parámetros. Es método crea un archivo de texto resultado en el path indicado en el parámetro `direccion` con la estructura de datos de los segmentos de la trayectoria definida. En la aplicación Planificador, su interfaz gráfica corresponde a la que aparece en la Figura 67.

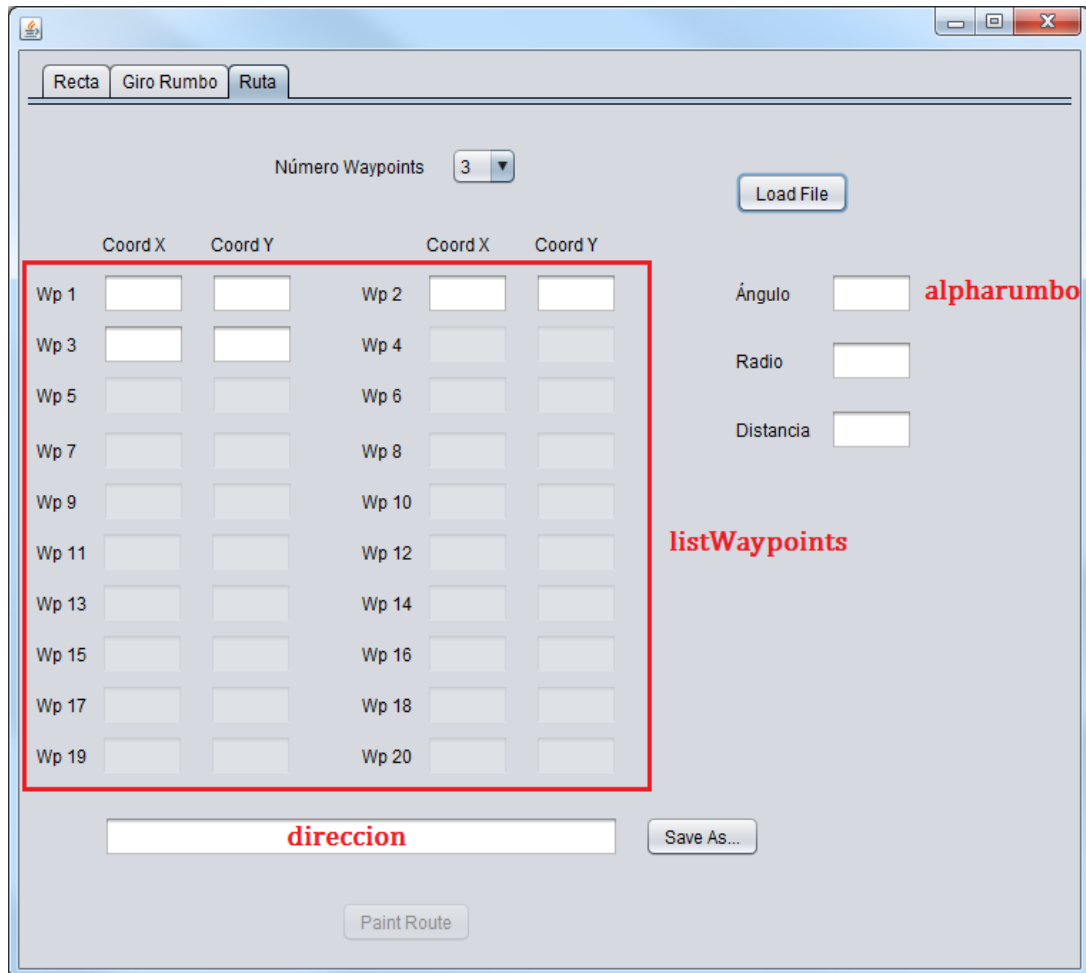


Figura 67: Planificador - Interfaz Gráfico: PanelRuta

### 5.1.5 Clase Planificador

La clase Planificador, al contener el método main, es la clase principal que se ejecuta cuando el usuario arranca la aplicación Planificador.

Planificador
jTabbedPane1: javax.swing.JTabbedPane
+ main (String args[]) → void

#### 5.1.5.1 Propiedades

Nombre	Tipo	Descripción
<b>jTabbedPane1</b>	javax.swing.JTabbedPane	Panel de pestañas gráfico

jTabbedPane1 sirve para contener los paneles PanelRecta, PanelGiroRumbo y PanelRuta con los que el usuario construye las rutas.

#### 5.1.5.2 Métodos

La clase Planificador consta del siguiente método:

Cabecera	Resultado
<b>main (String args[])</b>	void

## Capítulo 6: Conclusiones

En esta memoria de Trabajo Fin de Master se detallan las labores y desarrollos realizados para implementar un sistema de planificación y seguimiento de rutas sobre un vehículo autónomo marino real.

Los aspectos más relevantes son los siguientes:

- Se ha desarrollado un planificador capaz de generar trayectorias compuestas por tramos rectos y circulares a partir de los waypoints, de acuerdo al principio de las curvas de Dubins [14]. Este planificador proporciona el camino más corto entre los waypoints proporcionados, teniendo en cuenta las limitaciones del radio de giro del barco y el rumbo solicitado de finalización de la trayectoria.
- Se han implementado en el controlador (PLC) del barco real algoritmos de seguimiento capaces de recorrer las trayectorias compuestas generadas por el planificador y otras trayectorias paramétricas habitualmente utilizadas en misiones de búsqueda (p.e. círculo, elipse y lemniscata). Estos algoritmos de seguimiento permiten que el barco siga la trayectoria siempre y cuando su curvatura pueda ser recorrida por el barco.
- Se han realizado múltiples simulaciones de las Maniobras Compuestas y Paramétricas. En estas simulaciones se pone de manifiesto la capacidad del algoritmo de seguimiento para comandar el barco y hacerle seguir la trayectoria deseada. Además, se puede observar algunos momentos en los que las trayectorias no pueden ser seguidas fidedignamente debido a las limitaciones del modelo del barco.
- Se han repetido las pruebas anteriores sobre un entorno real en el que se utiliza el prototipo de un barco de 4 metros de eslora propulsado por una hélice y guiado por un timón. En estos experimentos se pone de manifiesto la capacidad del algoritmo de seguimiento para comandar el barco en un entorno real con diferentes tipos de perturbaciones (olas, viento, etc). También se puede observar cómo el método funciona sobre un sistema real, más complejo que el modelado en las simulaciones.

Finalmente, durante las simulaciones y los experimentos también se observa:

- La capacidad del planificador para generar únicamente trayectorias válidas para ser recorridas por el barco. Esta capacidad es soportada por la elección, por parte del planificador, de la combinación más sencilla de círculos y rectas que permitan al barco recorrer la mínima distancia entre dos puntos con radios de giro previamente establecidos. Además es capaz de determinar las patologías en los giros de la trayectoria para descartar aquellas que no son viables.
- Que los algoritmos de seguimiento son capaces de comandar el barco hacia las trayectorias planificadas, a pesar de que éste inicie su recorrido desde un punto

alejado de la misma. Esta aproximación se lleva a cabo dejando fijo el punto virtual que guía al barco sobre la trayectoria planificada mientras que el barco se encuentra situado a distancias elevadas.

- Se observa que existen discrepancias entre el controlador aplicado a las simulaciones y el utilizado en los experimentos, debido a que el modelo del barco no modela todas sus características reales ni las perturbaciones asociadas al entorno real del pantano. Sin embargo, a pesar de estas discrepancias, los algoritmos de seguimiento presentan unos resultados adecuados en ambos casos, y por lo tanto, pueden ser aptos para diferentes vehículos autónomos.

## 6.1 Líneas de Trabajo Futuro

La navegación en las maniobras presentadas se produce dentro de un entorno conocido y libre de obstáculos. Realmente, ésta es una situación ideal que no se produce pues es previsible encontrar obstáculos móviles (vehículos acuáticos) ó estáticos (rocas, boyas,... etc.) que puedan entorpecer la ejecución de maniobras por parte del USV. Una clara mejora en la navegación es la incorporación de un sistema de evasión de obstáculos. Actualmente se está desarrollando y comprobando en modo simulación el método descrito en [15] y [16]. En este método, el sistema de detección de obstáculos establece en cada momento aquel obstáculo que, por las velocidades y los rumbos (del USV y del obstáculo), es susceptible de provocar colisión. Dicho de otra forma, consiste en que el USV navegue contra un obstáculo, estableciéndose zonas de navegación configurables por el usuario en función de la distancia al obstáculo (ver Figura 68).

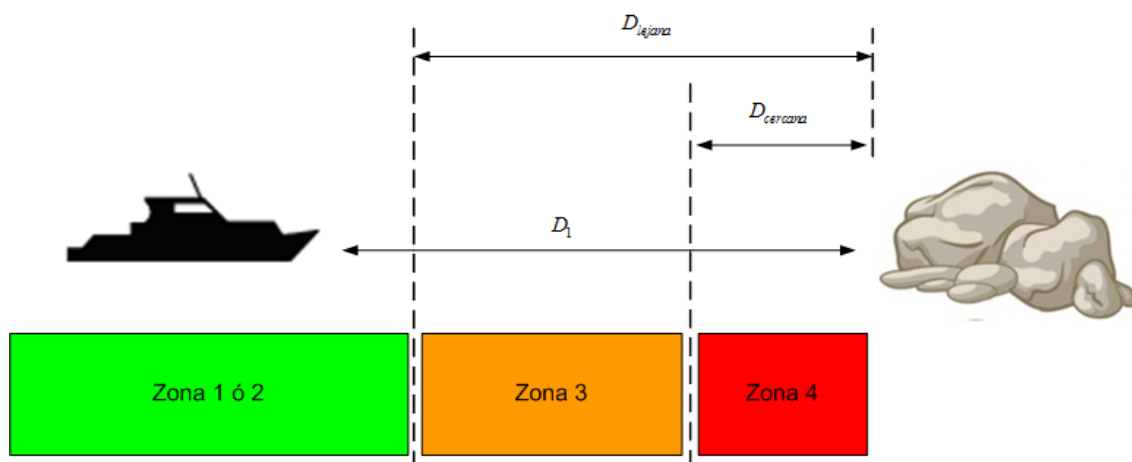


Figura 68: Evasión de Obstáculos

Dependiendo de la zona en la que se encuentre el barco se le mandarían las órdenes de control correspondientes para esquivar el obstáculo.

En el capítulo 2.3 se hace referencia a un controlador PID para gobernar el sistema de propulsión ó velocidad del barco que aún no ha sido probado en experimentos. Otra línea de trabajo futuro es probar el regulador de velocidad de forma correcta.

Otra posible línea de trabajo futuro es el desarrollo de controladores borrosos para determinadas maniobras para el arrastre de barreras. Por ejemplo, puede ser interesante observar el comportamiento del barco utilizando un controlador fuzzy de velocidad, cuya salida (tensión que se aplica al motor de la hélice) dependa de la distancia a la que se encuentre el barco del siguiente waypoint. Además de la distancia al siguiente waypoint, al controlador se le podría añadir también otras funciones de pertenencia como la corriente del agua.

## Capítulo 7: Bibliografía

- [1] [http://wikis.fdi.ucm.es/ELP/Coches\\_Autónomos](http://wikis.fdi.ucm.es/ELP/Coches_Autónomos)
- [2] <https://www.nytimes.com/es/2017/05/18/uber-google-vehiculos-autonomos/>
- [3] <http://www.ejercitos.org/2017/09/13/rheinmetall-presenta-su-vehiculo-autonomo-mm-ugv/>
- [4] Bonache Seco, J.A., Dormido Canto, J., Montalvo Martínez, M., López-Orozco, J.A., Besada Portas, E., de la Cruz García, J.M., “Centro de Control de Tierra para colaboración de vehículos autónomos marinos”, RIAI: Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial 00 (2017) 1–11
- [5] D. Marshall and N. Chambers, “El amanecer del robot,” 2000
- [6] T. Lozano-Pérez, “Automatic Planning of Manipulator Transfer Movements,” IEEE Trans. Syst. Man Cybern., vol. 11, no. 10, pp. 681–698, 1981
- [7] J.-C. Latombe, Robot Motion Planning.pdf. Springer Science & Business Media, 2012, 1991.
- [8] P. Bhattacharya and M. L. Gavrilova, “Roadmap-based path planning - Using the voronoi diagram for a clearance-based shortest path,” IEEE Robot. Autom. Mag., vol. 15, no. 2, pp. 58–66, 2008
- [9] J. Sparbert and E. Hofer, “Numerical Path Optimization for Path Planning With Cell Decomposition Methods,” pp. 1822–1827, 2001
- [10] Y. S. Silveira and P. J. Alsina, “A New Robot Path Planning Method Based on Probabilistic Foam,” 2016 XIII Lat. Am. Robot. Symp. IV Brazilian Robot. Symp., vol. 55, no. 84, pp. 217–222, 2016
- [11] J. M. de la Cruz, J. A. Lopez-Orozco, E. Besada-Portas<sup>3</sup>, J. Aranda-Almansa, “A Streamlined Nonlinear Path Following Kinematic Controller”
- [12] Lapierre, L., Soetanto, D., A. Nonlinear pathfollowing control of an AUV”, Ocean Engineering, Vol. 34, 2007, pp. 1734–1744.
- [13] Park, S., Deyst, J., and How, J.P., “Performance and Lyapunov Stability of a Nonlinear PathFollowing Guidance Method,” Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 30, n. 6, Nov.–Dec. 2007, pp. 1718–1728.
- [14] Dubins, L.E. (July 1957). "On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents". American Journal of Mathematics. 79, 497–516.

- [15] Emmett Lalish and Kristi A. Morgansen “Decentralized Reactive Collision Avoidance for Multivehicle Systems” Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control Cancun, Mexico, Dec. 9-11, 2008
  
- [16] Emmett Lalish, Kristi A. Morgansen and Takashi Tsukamaki “Decentralized Reactive Collision Avoidance for Multiple Unicycle-Type Vehicles” 2008 American Control Conference Westin Seattle Hotel, Seattle, Washington, USA June 11-13, 2008
  
- [17] <https://www.java.com/es/download/>
  
- [18] <https://www.python.org/downloads/>
  
- [19] <https://www.packtpub.com/books/content/installing-numpy-scipy-matplotlib-and-ipython>

## Lista de Siglas

*USV*: Unmanned Surface Vehicle

*AUV*: Autonomous Underwater Vehicle

*UAV*: Unmanned Aerial Vehicle

*CCT*: Centro de Control de Tierra

*IMU*: Inertial Measurement Unit

*PLC*: Programmable Logic Controller

*ADS*: Automation Device Specification

## Anexo 1: Planificador - Manual de Usuario

En este anexo se explica cómo ejecutar y navegar por la aplicación Planificador, disponible en el material adjunto a este trabajo, y que nos permite calcular los segmentos rectos y circulares de la trayectoria que se defina.

Para poder ejecutar la aplicación Planificador, es necesario tener instalado:

- Java versión 1.8 ó posterior, disponible en [17].
- Python con numpy y matplotlib instalados. Numpy y matplotlib son arreglos de C en python que permiten visualizar gráficamente las trayectorias definidas. Python se encuentra disponible en [18] para su descarga. Una vez instalado python, se puede acudir a la dirección [19] que consta de una guía para instalar numpy y matplotlib.

Una vez instalada la máquina virtual de java en nuestro computador, ejecutar en línea de comandos el archivo Planificador.jar, que se encuentra en la carpeta dist, la siguiente sentencia:

```
java -jar Planificador.jar
```

Aparecerá entonces la ventana de la aplicación. El usuario dispone de un panel para definir cada posible maniobra:

1. Panel “Recta” (2 waypoints). Calcula la trayectoria compuesta por un segmento recto que une.

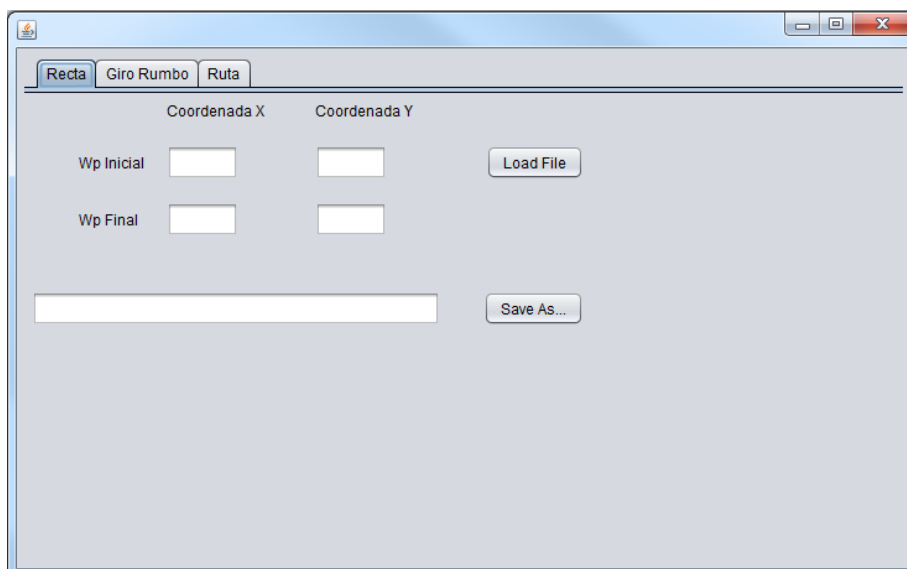


Figura 69: Panel Recta

- Panel “Giro Rumbo” (2 waypoints). Calcula los segmentos que componen la trayectoria del giro Rumbo.

Recta Giro Rumbo Ruta

Coordenada X Coordenada Y

Wp Inicial   Load File

Wp Final

Ángulo

Radio

Save As...

Paint Route

Figura 70: Panel Giro Rumbo

- Panel “Ruta” (>3 waypoints). Calcula los segmentos que componen la trayectoria definida a través del panel.

Recta Giro Rumbo Ruta

Número Waypoints 3 Load File

Coord X	Coord Y	Coord X	Coord Y	Ángulo
Wp 1	<input type="text"/>	Wp 2	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Wp 3	<input type="text"/>	Wp 4	<input type="text"/>	Radio <input type="text"/>
Wp 5	<input type="text"/>	Wp 6	<input type="text"/>	Distancia <input type="text"/>
Wp 7	<input type="text"/>	Wp 8	<input type="text"/>	
Wp 9	<input type="text"/>	Wp 10	<input type="text"/>	
Wp 11	<input type="text"/>	Wp 12	<input type="text"/>	
Wp 13	<input type="text"/>	Wp 14	<input type="text"/>	
Wp 15	<input type="text"/>	Wp 16	<input type="text"/>	
Wp 17	<input type="text"/>	Wp 18	<input type="text"/>	
Wp 19	<input type="text"/>	Wp 20	<input type="text"/>	

Save As...

Paint Route

Figura 71: Panel Ruta

## Ejemplos Prácticos

A continuación, se realizan una serie de ejemplos prácticos que abarcan la ejecución de todos los giros posibles. En el primero de ellos, se realizará un giro recto. En el segundo, se realizará un giro Rumbo. El último ejemplo corresponde al cálculo de una trayectoria compuesta por 5 waypoints.

### Ejemplo I – Movimiento Recto

En este ejemplo, la trayectoria será una recta que va desde el punto (20,0) al (200,0). Así los waypoints que intervienen en la trayectoria son los que aparecen en la Tabla 5:

Waypoints
A = (20, 0)
B = (200, 0)

Tabla 5: Waypoints Ejemplo I

Como se observa en la Figura 72, el camino que recorrerá el vehículo será: A → B

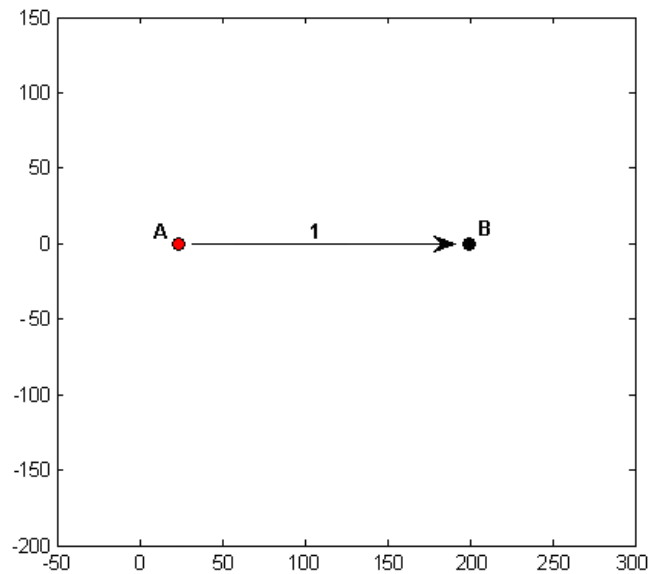


Figura 72: Trayectoria Ejemplo I

Para obtener el segmento de este giro Recto, hay que rellenar el panel “Recta” tal como aparece en la Figura 73. El resultado se guarda a través del botón Save As...

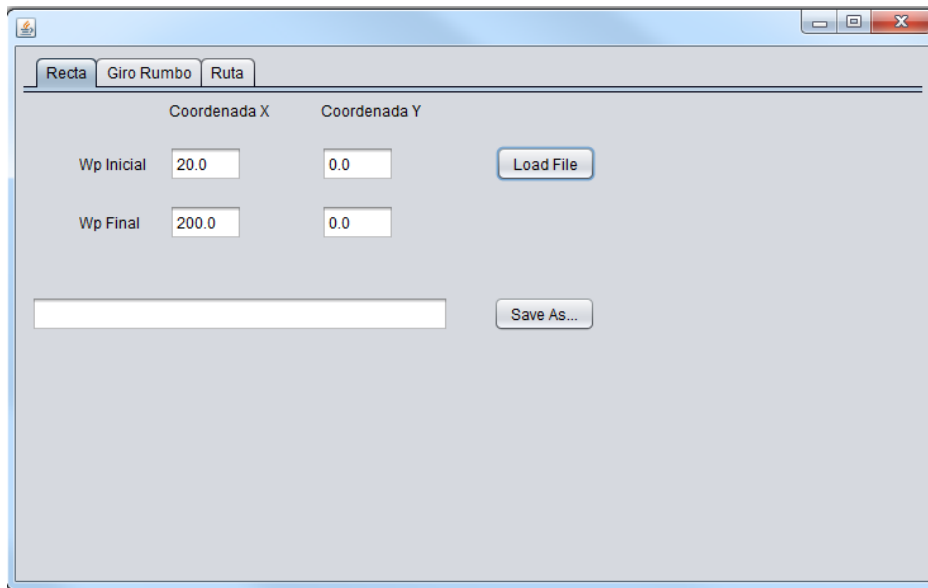


Figura 73: Ejemplo I – Panel Recta

### Ejemplo II – Giro Rumbo

En este ejemplo, la trayectoria es el resultado de aplicar un giro Rumbo partiendo desde el punto (0,0) al (90,0), y utilizando circunferencias de radio=30 para sus tramos circulares. El ángulo de rumbo seleccionado es de  $-90^\circ$ .

En la siguiente tabla, definimos los Waypoints, Radio y ángulo de rumbo para este ejemplo.

Orden Waypoints	Radio	Angulo de rumbo
A = (0, 0) B = (90, 0)	radio = 30	$-90^\circ$

Tabla 6: Planificación Trayectoria Ejemplo I

Como se observa en la Figura 74, el camino que recorrerá el vehículo será:  $A \rightarrow B$  y terminará con el rumbo que indica la flecha morada.

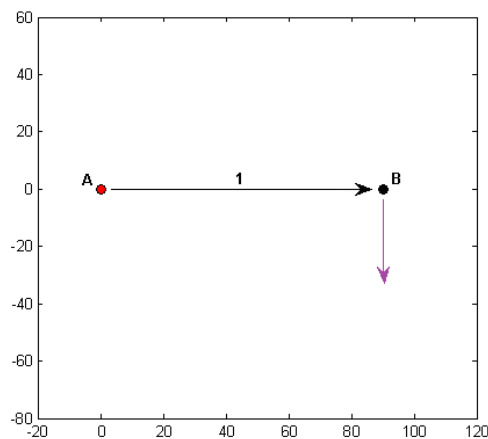


Figura 74: Trayectoria Ejemplo II

Para obtener los segmentos de este giro Rumbo, hay que rellenar el panel “Giro Rumbo” tal como aparece en la Figura 75. El resultado se guarda a través del botón Save As... En la Figura 76 se visualiza gráficamente el resultado de la trayectoria.

The screenshot shows a software window with three tabs: 'Recta', 'Giro Rumbo', and 'Ruta'. The 'Giro Rumbo' tab is selected. The interface includes the following elements:

- Two columns of headers: 'Coordenada X' and 'Coordenada Y'.
- Input fields for 'Wp Inicial' (0.0), 'Wp Final' (90.0), 'Ángulo' (-90.0), and 'Radio' (30.0).
- A 'Load File' button.
- A text box containing the file path 'C:\Rutas\_Ejemplo\EjemploGiroRumbo1.txt'.
- A 'Save As...' button.
- A 'Paint Route' button.

Figura 75: Ejemplo II – Panel Giro Rumbo

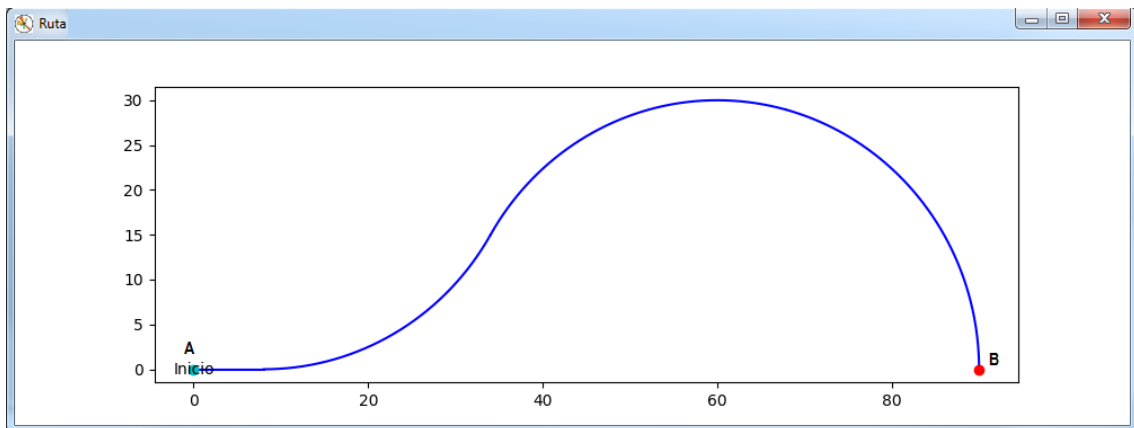


Figura 76: Ejemplo II – Resultado Gráfico

### Ejemplo III – Trayectoria Compuesta (>3 waypoints)

En este ejemplo, la trayectoria es el recorrido de un cuadrado de lado 500 siendo el vértice inferior izquierdo el punto (0,0). El punto de partida de la trayectoria es el punto (0, 450) y conluye en el punto (0,0). Así los waypoints que intervienen en la ruta son los que aparecen en la Tabla 7:

Waypoints
A = (0, 450)
B = (0, 500)
D = (500, 500)
E = (500, 0)
F = (0, 0)

Tabla 7: Waypoints Ejemplo III

Como se observa en la Figura 77, el camino que recorrerá el vehículo será: A → B → D → E → F

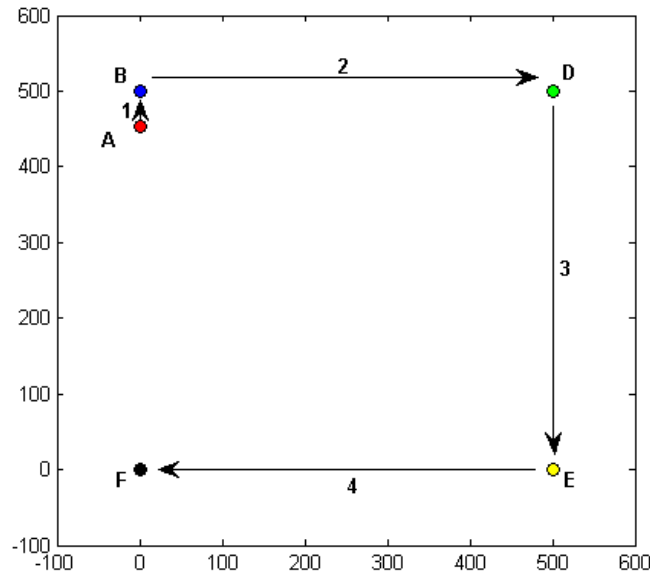


Figura 77: Trayectoria Ejemplo III

Se utilizarán circunferencias de radio 100 para sus tramos circulares. La distancia máxima de paso para aplicar giros Internos también será 100 y el ángulo de rumbo o finalización será 45°. Todos estos datos quedan reflejados en la Tabla 8:

Orden Waypoints	Radio	Distancia máxima	Angulo de rumbo
A = (0, 450)	radio = 100	distancia = 100	45°
B = (0, 500)			
D = (500, 500)			
E = (500, 0)			
F = (0, 0)			

Tabla 8: Planificación Trayectoria Ejemplo III

Para obtener los segmentos de esta trayectoria, hay que rellenar el panel “Ruta” tal como aparece en la Figura 78. El resultado se guarda a través del botón Save As... En la Figura 79 se visualiza gráficamente el resultado de la trayectoria.

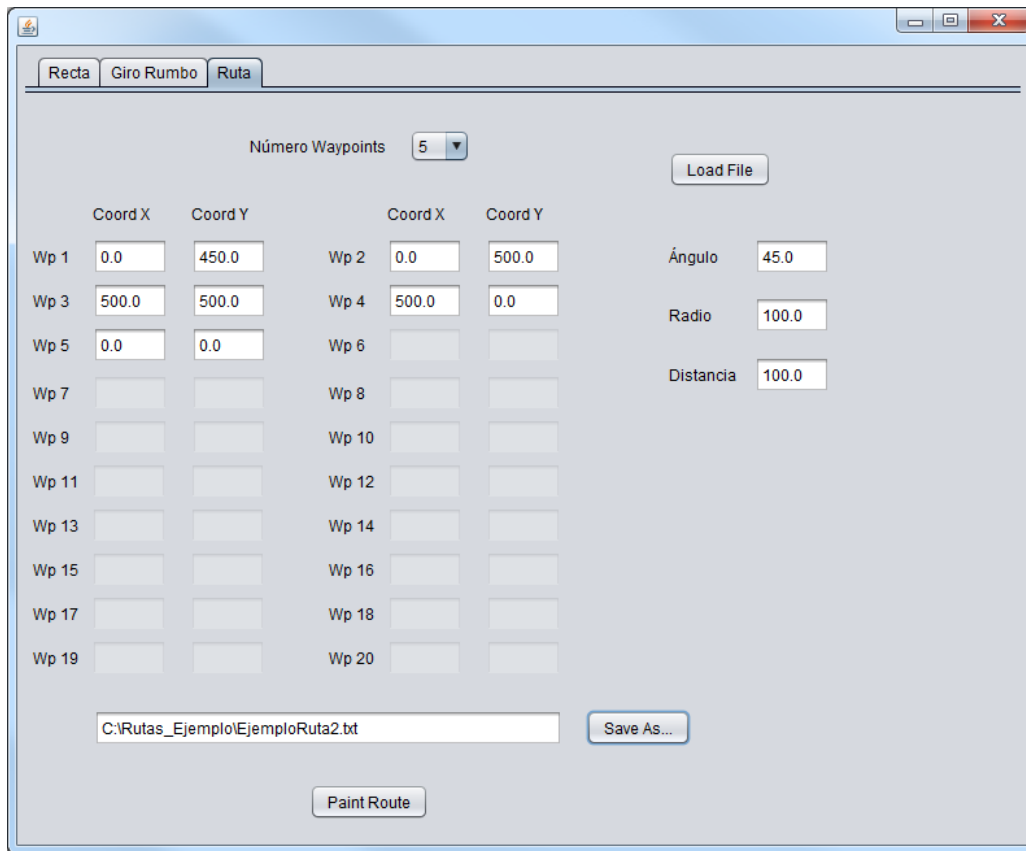


Figura 78: Ejemplo III – Panel Ruta

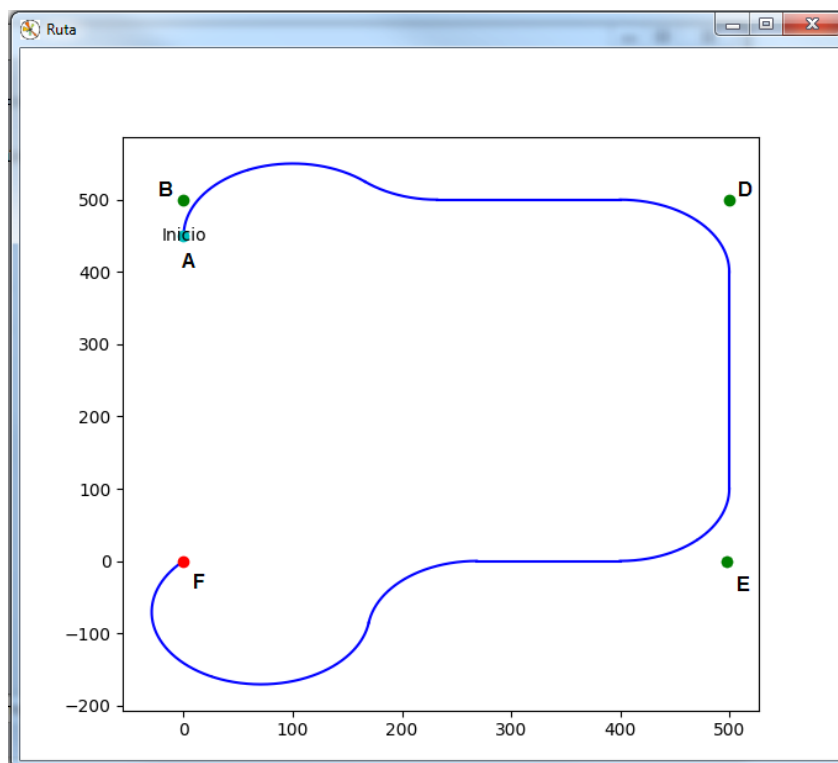


Figura 79: Ejemplo III – Resultado Gráfico