

MÁSTER EN INGENIERÍA DE SISTEMAS Y CONTROL



Modelado, simulación y control cooperativo de USVs para la detección de biocontaminantes en aguas lénticas

Autor:

Óscar Lozano Rosales

Directores:

Juan Jiménez Castellanos

Eva Besada Portas

Junio 2020

MÁSTER EN INGENIERÍA DE SISTEMAS Y CONTROL



Modelado, simulación y control cooperativo de USVs para la detección de biocontaminantes en aguas lénticas

Tipo A: Proyecto específico propuesto por un profesor

Autor:

Óscar Lozano Rosales

Directores:

Juan Jiménez Castellanos

Eva Besada Portas

Junio 2020



AUTORIZACIÓN

Autorizamos a la Universidad Complutense 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: Óscar Lozano Rosales

Firma del alumno

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and a long horizontal stroke that tapers to the right.

*Deseo agradecer
a Juan y Eva la oportunidad de
introducirme en el mundo de los USVs y
por confiar en mí para este proyecto.*

*También deseo
agradecer el amor y apoyo incondicional
de Raquel. Siempre me transmites la fuerza
y la paciencia que necesito.*

*Finalmente, el
agradecimiento más profundo a mis padres.
Sin todos vuestros sacrificios nada de esto
habría sido posible.*

RESUMEN

Este proyecto aborda el diseño de algoritmos de Guiado, Navegación y Control (GNC) para USVs autónomos de superficie (USVs, Unmanned Surface Vehicles) que deben realizar una misión de detección y análisis de biocontaminantes en aguas lénticas. Concretamente, se centrará en la detección de zonas con máxima concentración de contaminantes y la localización de líneas de nivel que permitan conocer la distribución de contaminación en el área de estudio.

Todo el diseño se ha realizado mediante una metodología basada en modelos, en la que se incluye cada una de las partes implicadas en la operación, desde el propio USV y sus subsistemas, hasta el entorno de operación. Todos los modelos han sido implementados en Python. Se han diseñado algoritmos de Guiado, Navegación y Control basados en el control cooperativo de dos USVs. El primero de ellos, denominado USV líder, está a cargo de calcular el rumbo y la velocidad de la trayectoria para cumplir cada una de las tareas. El segundo, denominado USV satélite, mantiene una posición relativa con respecto al USV líder, recolecta información de los sensores y se la transmite a este. Se utiliza el método de los potenciales virtuales como método de cálculo de la magnitud y dirección de la velocidad, lo que permite combinar objetivos relacionados con alcanzar nuevos puntos en la trayectoria con restricciones relacionadas con posibles obstáculos a evitar. Dentro de los algoritmos de navegación se incluye un gestor de tareas del USV que debe ser programado antes de iniciar la misión. El algoritmo de guiado incluye su propio gestor de modo de operación. De forma que el gestor de tareas asigna las tareas a largo plazo mientras que el gestor de modos de operación activa los algoritmos necesarios para cumplir dichas tareas.

Finalmente, se muestran algunos casos de éxito a nivel funcional, en los que se prueban partes concretas del código, y se simula un escenario complejo con varios USVs interactuando en la misma zona.

Palabras clave: USV, barco autónomo, GNC, guiado, control, potenciales virtuales, control cooperativo, modelado, simulación.

ABSTRACT

This project addresses the design of Guidance, Navigation and Control (GNC) algorithms for Unmanned Surface Vehicles (USV). USVs must detect and analyze biocontaminants in lentic waters. They will be specifically focused on the detection of areas with the maximum amount of pollutants and the location of level curves to determine the distribution of contamination in the area.

For the design process, a model based methodology has been followed. Models include all the subsystems in the operation, from the USV to the environment. Python has been used to implement and simulate the models. Guidance, Navigation and Control algorithms based on two cooperating USVs have been designed. One of the USVs, called Leader, is in charge of obtaining the trajectory course and velocity to meet each task. The second USV is called Follower or Satellite and its mission is to collect sensor information and transmit this information to the leader. Virtual fields algorithm is used to calculate magnitude and direction of the required velocity. This allows to combine collision avoidance and target points. A task manager has been included in the navigation algorithm to manage long term tasks. This task manager must be configured before starting the mission. In addition, the guidance algorithm has its own mode manager that is modified according to instantaneous conditions and tasks.

Finally, functional unit tests are simulated to check individually the algorithms. In addition, a full scenario, with several pairs of USV working in the same area, is shown.

Key words: USV, autonomous ship, GNC, guidance, control, virtual fields, cooperative control, modelling, simulation.

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	X
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 CONTEXTO	1
1.2 ESTADO DEL ARTE.....	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.4 HERRAMIENTAS EMPLEADAS	4
1.5 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	4
2. MODELADO Y SIMULACIÓN.....	6
2.1 NECESIDAD DE UN SIMULADOR DE OPERACIÓN DEL USV	6
2.2 ARQUITECTURA DEL SIMULADOR.....	6
2.3 DINÁMICA DEL USV	8
2.4 ACTUADORES.....	11
2.5 SENSORES	11
2.5.1 Posición	12
2.5.1 Rumbo.....	13
2.5.2 Contaminación del agua.....	13
2.5.3 Comunicaciones.....	13
2.6 ENTORNO	14
2.7 DATOS SIMULACIÓN.....	14
3. GUIADO, NAVEGACIÓN Y CONTROL.....	16
3.1 DEFINICIONES Y ELEMENTOS DEL GNC	16
3.2 SENSORES, NAVEGACIÓN Y COMUNICACIONES.....	17
3.3 GUIADO.....	22
3.3.1 Objetivos y cooperación	22
3.3.2 Método de guiado mediante campos virtuales.....	24
3.3.3 Cálculo de gradientes.....	27
3.3.4 Configuración USV líder – USV seguidor.....	29
3.3.5 Modos de operación	29
3.3.6 Navegación en paralelo.....	30
3.3.7 Localización del máximo	33
3.3.8 Seguimiento curva de nivel.....	34
3.3.9 Navegación a un punto fijo.....	38
3.3.10 Esquiva de obstáculos.....	39
3.4 CONTROL	39
3.5 TIEMPO DE CICLO DE LOS ALGORITMOS.....	42
4. PRUEBAS UNITARIAS CON SENSORES IDEALES	44
4.1 NAVEGAR A UN PUNTO FIJO.....	44
4.2 NAVEGAR EN PARALELO	46
4.3 NAVEGACIÓN A UN MÁXIMO DE CONTAMINACIÓN	48
4.4 SEGUIMIENTO DE CURVAS DE NIVEL	50
4.5 OBSTÁCULO	54
5. EFECTOS DE INTRODUCIR SENSORES REALES	58
5.1 POSICIÓN Y RUMBO	58
5.2 MEDIDA DE BIOCONTAMINANTE	60
5.3 COMUNICACIONES	61
5.4 RESUMEN	61

6. PRUEBAS SOBRE UN ESCENARIO COMPLETO	63
7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	70
7.1 CONCLUSIONES	70
7.2 LÍNEAS FUTURAS.....	71
GLOSARIO DE TÉRMINOS	72
BIBLIOGRAFÍA.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 ARQUITECTURA DE SIMULADOR DE USV	7
FIGURA 2 EJES CUERPO	9
FIGURA 3 ESQUEMA DE SENSORES EN EL USV	12
FIGURA 4 FLUJO DE DATOS GNC	17
FIGURA 5 FLUJO DE DATOS GNC INCLUYENDO COMUNICACIONES	17
FIGURA 6 ALGORITMO DETECCIÓN LÍNEAS DE NIVEL	21
FIGURA 7 DETECCIÓN DE PUNTO OBJETIVO	22
FIGURA 8 EJEMPLO DE MANCHA DE BIOCONTAMINANTES	23
FIGURA 9 ESQUEMA DE DETECCIÓN DEL GRADIENTE CON 1 Y 2 USVs.....	23
FIGURA 10 CAMPOS VIRTUALES DE ATRACCIÓN Y REPULSIÓN	25
FIGURA 11 EJEMPLO DE GRADIENTES DE CAMPOS VIRTUALES	26
FIGURA 12 CÁLCULO COOPERATIVO DE GRADIENTES DE CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTE	29
FIGURA 13 ESQUEMA NAVEGACIÓN PARALELO.....	31
FIGURA 14 ESQUEMA NAVEGACIÓN ENCUENTRA MÁXIMO.....	33
FIGURA 15 ZONAS DE TRABAJO SIGUE LÍNEA	35
FIGURA 16 ESQUEMA DE USV EN EL INTERIOR DE LA FRANJA	36
FIGURA 17 ESQUEMA USVs DENTRO DE FRANJA	37
FIGURA 18 RESPUESTA ESCALÓN EN LAZO CERRADO LAZO DE VELOCIDAD	41
FIGURA 19 RESPUESTA ESCALÓN EN LAZO CERRADO LAZO DE RUMBO	42
FIGURA 20 TIEMPO DE CICLO DE CADA LAZO	43
FIGURA 21 RUTA NAVEGACIÓN POR PUNTOS.....	45
FIGURA 22 DETALLE INICIO DE TRAYECTORIA	46
FIGURA 23 TRAYECTORIA NAVEGACIÓN EN PARALELO.....	47
FIGURA 24 DISTRIBUCIÓN DE CONTAMINACIÓN CASO ALCANZAR MÁXIMO	48
FIGURA 25 TRAYECTORIA NAVEGACIÓN A MÁXIMO DE CONCENTRACIÓN.....	49
FIGURA 26 CONFIGURACIÓN MANCHA GRANDE	50
FIGURA 27 TRAYECTORIA CURVA DE NIVEL MANCHA GRANDE.....	51
FIGURA 28 CONFIGURACIÓN CASO DISTRIBUCIÓN ELÍPTICA	52
FIGURA 29 TRAYECTORIA CURVA DE NIVEL ELÍPTICA	53
FIGURA 30 PASO DE USVs POR LA ZONA DE MÁXIMA CURVATURA	53
FIGURA 31 CONFIGURACIÓN MANCHA PEQUEÑA.....	54
FIGURA 32 TRAYECTORIA DISTRIBUCIÓN PEQUEÑA	55
FIGURA 33 SECUENCIA DE ESQUIVA DE OBSTÁCULO FIJO	56
FIGURA 34 ESQUIVA DE OBSTÁCULO MÓVIL	57
FIGURA 35 EJEMPLO ERROR POSICIÓN	58
FIGURA 36 TRAYECTORIA CON ERRORES DE POSICIÓN Y RUMBO	59
FIGURA 37 RESPUESTA ESCALÓN SENSOR DE CONTAMINANTES	60
FIGURA 38 ESCENARIO ERROR SENSOR CONTAMINACIÓN	61
FIGURA 39 TRAYECTORIA COMBINANDO TODOS LOS ERRORES E LOS SENSORES	62
FIGURA 40 DISTRIBUCIÓN DE CONTAMINACIÓN ESCENARIO COMPLETO	63
FIGURA 41 MAPA DE LÍNEAS DE NIVEL A DETECTAR ESCENARIO COMPLETO.....	65
FIGURA 42 PRIMEROS INSTANTES DE LA TRAYECTORIA	66
FIGURA 43 USVs REALIZAN PRIMERAS TAREAS.....	67
FIGURA 44 PAREJA DE USVs 3-4 REALIZANDO TAREAS EN LA MANCHA AISLADA	68
FIGURA 45 ÚLTIMAS TAREAS Y VUELTA AL PUNTO INICIAL.....	69

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 DATOS DEL USV PARA LA SIMULACIÓN	15
TABLA 2 TRAMA DE DATOS TRANSMITIDOS	18
TABLA 3 TIPOS DE TAREAS EN PLANIFICADOR.....	19
TABLA 4 COLUMNAS DEL GESTOR DE TAREAS.....	19
TABLA 5 EJEMPLO DE PLANIFICACIÓN.....	19
TABLA 6 PARÁMETROS PID LAZO DE VELOCIDAD.....	41
TABLA 7 PARÁMETROS PID LAZO DE RUMBO	42
TABLA 8 VALORES SELECCIONADOS PARA LOS PARÁMETROS ERROR DE POSICIÓN	58
TABLA 9 VALORES SELECCIONADOS PARA LOS PARÁMETROS ERROR DE RUMBO	59
TABLA 10 PARÁMETROS BIOSENSOR	60
TABLA 11 DISTRIBUCIÓN CONTAMINACIÓN CASO COMPLETO	63
TABLA 12 TAREAS USV NÚMERO 1	63
TABLA 13 TAREAS USV NÚMERO 2	64
TABLA 14 TAREAS USV NÚMERO 3	64
TABLA 15 TAREAS USV NÚMERO 4	64
TABLA 16 TAREAS USV NÚMERO 5	64
TABLA 17 TAREAS USV NÚMERO 6	64
TABLA 18 TABLA DE IDENTIFICACIÓN DE COLORES USVs	64

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan todos los aspectos formales acerca del proyecto. En primer lugar, se expone el contexto en el que surge este trabajo y la temática seleccionada. A continuación, se comenta el estado del arte relevante para el problema. Se explican los objetivos que debe cumplir el diseño realizado durante el proyecto. Se enumeran las herramientas utilizadas durante el desarrollo del trabajo. Finalmente, se expone como está estructurado el documento.

1.1 Contexto

El presente trabajo constituye el Trabajo Fin de Máster (TFM) del autor en el Máster de Ingeniería de Sistemas y Control. Estos son unos estudios conjuntos entre la Universidad Complutense de Madrid (UCM) y la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED). Este máster permite profundizar en el conocimiento de disciplinas como el Control, la Robótica, el Modelado y la Simulación entre otras.

El trabajo está dirigido por los profesores Juan Jiménez Castellanos y Eva Besada Portas, ambos profesores de la UCM y pertenecientes al grupo de Ingeniería de Sistemas, Control, Automática y Robótica (ISCAR) de dicha Universidad. Entre las investigaciones recientes del grupo ISCAR se pueden encontrar el desarrollo de aplicaciones con vehículos no tripulados, la cooperación de vehículos para vigilancia y rescate, o el desarrollo de sistemas autónomos de visión por computador.

La temática de este TFM surge como parte del proyecto de investigación “Monitorización Automática de Contaminantes en Aguas Embalsadas utilizando Biosensores y Vehículos Autónomos de Superficie” en el que participan varios investigadores del grupo ISCAR y en el que colaboran investigadores del grupo ALBIOTOX de la UCM. Este último grupo se encuentra especializado en el estudio de microalgas y tiene una gran experiencia en la detección y alerta temprana de cianobacterias tóxicas en agua. El objetivo de dicho proyecto es el desarrollo de un sistema autónomo de monitorización de agua, abarcando desde el desarrollo de sensores específicos que permitan el análisis del agua en tiempo real desde el propio USV hasta la generación de algoritmos de planificación y cooperación para recorrer aguas embalsadas de forma autónoma.

El presente TFM está enmarcado dentro de esta segunda parte, en la que se sustituye a los operarios en lanchas por USVs autónomos cooperando para alcanzar el éxito en la misión. Esto permitirá, en primer lugar, mejorar las condiciones de trabajo de los propios operarios evitando tareas tediosas, como la realización de numerosas mediciones a diferentes profundidades y localizaciones dentro de un cuerpo de agua. Además, mejorará la toma de decisiones y la posibilidad de tener un sistema automático de monitorización constantemente en el agua, que asegure la prevención y búsqueda de contaminantes en tiempo real.

1.2 Estado del arte

El agua dulce, es un recurso limitado y frágil, actualmente amenazado por la contaminación ambiental y por una gestión inadecuada. También está sometida a un riesgo creciente por la aparición de nuevas sustancias contaminantes, que en muchos casos escapan al control de las agencias reguladoras o no son tenidas en cuenta en las recomendaciones legales. Además, uno de los efectos esperables del cambio climático es la disminución de los recursos hídricos disponibles (Delpla, et al., 2009).

Por todo ello, es necesario monitorizar la calidad de las aguas, especialmente aquellas embalsadas para consumo humano (Black & McBean, 2018). En particular, es importante la detección temprana y el posterior estudio de los brotes de contaminación de origen biológico, para poder prevenirlos y establecer protocolos de actuación.

La monitorización tradicional de muchos parámetros relevantes para controlar la calidad de las aguas embalsadas combina dos fases: la recogida de muestras y su posterior análisis. La frecuencia del muestreo y la precisión del análisis dependen del uso de las aguas, pero en cualquier caso supone un proceso complejo en el que la recogida, almacenaje y transporte de las muestras deben seguir protocolos estrictos. Una de las limitaciones más importantes es la cantidad de tiempo empleada en el proceso, que influye en la respuesta temporal a un episodio grave de contaminación. Otra limitación es el riesgo que, en determinados escenarios, debe asumir el personal encargado de recoger las muestras. Por todo ello es conveniente desarrollar sistemas autónomos de monitorización de la calidad de las aguas, que sean capaces de detectar y advertir de la presencia de sustancias contaminantes (Boholm & Prutzer, 2011).

Los primeros intentos en esta línea de mejora se desarrollaron en la década de los 40 del siglo XX. Consistían en una ‘red de alerta temprana’, desarrollada por científicos australianos, para monitorizar la presencia de cianobacterias, y que en función del muestreo periódico de un conjunto de variables relevantes permitía establecer la estrategia a seguir o determinar la fecha del siguiente muestreo. Estas redes de alerta temprana han evolucionado hacia sistemas de muestreo y análisis automáticos, como la red de alerta de la Dirección General del Agua del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (SAICA, 2020) formada por 200 estaciones fijas de muestreo y análisis. Aunque estas redes suponen una notable mejora, presentan un problema importante: el muestreo se realiza en posiciones fijas e independientes de la distribución real del contaminante,

Una mejora significativa de la situación actual podría alcanzarse mediante el uso de sensores instalados a bordo de embarcaciones autónomas (Autonomous Surface Vehicles, ASVs), que permitirían realizar los muestreos allí donde son más relevantes, desplazándose de modo autónomo a las regiones de interés y permitiendo una monitorización continuada en el tiempo. Además, sería posible utilizar un equipo de USVs que cooperen para llevar a cabo las tareas de monitorización.

El desarrollo de USVs y su uso ha experimentado un fuerte progreso en los últimos años. Un ejemplo es el desarrollo de cargueros autónomos para transporte transoceánico de mercancías (autónomos) o el uso de USVs para monitorizar, supervisar, vigilar y recoger vertidos contaminantes (Bayat, et al., 2017), (Holland, et al., 2016), (Giron-

1 INTRODUCCIÓN

Sierra, et al., 2015). En la mayoría de los casos, los USVs están provistos de los sensores adecuados, tales como unidades inerciales (IMU), GPS, Sónar y Lidar o cámara para posibilitar una navegación autónoma segura. También suelen ir equipados con un sistema de enlace o red inalámbrica de bajo consumo que permite establecer redes de comunicaciones ad-hoc, para comunicarse entre ellos y con una Estación de Tierra, como por ejemplo los basados en la tecnología Zigbee. Finalmente, también pueden llevar sensores propios de la misión que desean realizar (por ejemplo, para determinar la concentración de alguna sustancia contaminante en el agua).

Los datos recogidos por los sensores de abordo pueden ser utilizados por un sistema de control que permita, además de lograr la navegación segura de los USVs, completar la misión para la que estos han sido diseñados. Entre los distintos paradigmas de control, es particularmente interesante, el conocido como control cooperativo. La idea subyacente es que un sistema formado por múltiple agentes simples es más versátil y eficiente que un único agente más complejo. La literatura sobre control cooperativo es muy extensa. Así por ejemplo el año 2016 la IEEE Control System Magazing (IEEE, 2016) dedicó un número monográfico a Control Cooperativo. Si nos centramos de nuevo en los USVs, algunos trabajos relevantes, entre otros muchos, son los de (Bucknall, 2013) (Almeida, et al., 2012).

En el contexto del presente proyecto, se ha adoptado una aproximación original, basada en control cooperativo, para coordinar el movimiento de USVs que colaboran en la detección y caracterización de la concentración de contaminantes en aguas embalsadas.

1.3 Objetivos

Una vez dado el contexto y el estado del arte, se explican los objetivos del trabajo. Como se ha dicho anteriormente, el trabajo se centra en el desarrollo de los algoritmos de guiado y control para realizar misiones sobre aguas embalsadas de forma autónoma.

En este trabajo, se establecen los siguientes **objetivos principales:**

- Diseñar algoritmos de Guiado, Navegación y Control que permitan a un USV navegar hasta un punto deseado.
- Diseñar algoritmos de Guiado, Navegación y Control que permitan a un USV o flota localizar las zonas de máxima concentración de biocontaminantes.
- Diseñar algoritmos de Guiado, Navegación y Control que permitan a un USV o flota localizar “líneas de nivel” de biocontaminantes. Una vez localizadas, el USV debe ser capaz de recorrerlas.
- Diseñar algoritmos de Guiado, Navegación y Control que eviten las colisiones de los USV contra obstáculos fijos o móviles (incluidos otros USVs que participen en la misión). Dentro de este objetivo no se analizará la capacidad de detección de los objetos, sino la capacidad de modificar la trayectoria de los USVs para que éstos puedan evitar las colisiones.

Dentro de los objetivos anteriormente mencionados, es importante destacar que todos los algoritmos que se desarrollen deben ser:

1 INTRODUCCIÓN

- Escalables a distintos tamaños de la zona a recorrer.
- Implementables en un sistema real.

Adicionalmente, como se verá a lo largo de la memoria, surgen una serie de **objetivos secundarios** que permiten alcanzar los primeros con éxito:

- Desarrollar un entorno de simulación que permita generar escenarios realistas con distintas geometrías del área de interés. Además, este entorno deberá tener la posibilidad de operar con distinto número de USVs y cada USV deberá incluir al menos modelos simplificados para los sensores involucrados en los algoritmos de Guiado, Navegación y Control.
- Analizar la información que se debe transmitir entre los USVs para el control cooperativo.
- Diseñar algoritmos de Guiado, Navegación y Control que permitan a dos USVs navegar con una posición relativa entre ellos.

Finalmente, puesto que aún se desconocen algunos datos acerca de los USVs que serán utilizados en las misiones, así como de sus sensores, y especialmente los relativos a los sensores de los biocontaminantes, éstos serán simulados con funciones genéricas que posteriormente deberán ser sustituidas por las funciones que representen el comportamiento real de los sensores finales.

1.4 Herramientas empleadas

Se ha empleado **Python 3.7** como herramienta principal de simulación.

Además, en el análisis del sistema de control se ha empleado **MATLAB R2018b**.

1.5 Estructura del documento

El primer capítulo describe todos los aspectos formales acerca del proyecto. Presenta el contexto académico en el que se ha desarrollado. Se comenta el estado del arte relevante para el problema y se explican los objetivos que debe cumplir el diseño realizado como parte del proyecto.

El segundo capítulo versa sobre los aspectos del modelado y simulación de los USVs. En primer lugar, se justifica la necesidad del desarrollo de modelos de simulación. Se derivan las ecuaciones del movimiento del USV en los distintos sistemas de referencia que se usan a lo largo del trabajo. Se presenta un modelo matemático para los principales sensores implicados en la simulación. Finalmente, se exponen los parámetros usados en las simulaciones.

El tercer capítulo está centrado en los algoritmos de navegación, guiado y control. Se parte de la definición de cada uno de estos algoritmos, explicando qué parte resuelve la navegación, qué parte el guiado y qué parte el control. A partir de ahí, se exponen los algoritmos empleados durante este trabajo.

En el cuarto capítulo pueden encontrarse algunos ensayos unitarios realizados para verificar que los algoritmos, de forma individual, consiguen resolver las tareas

1 INTRODUCCIÓN

propuestas. Para ello, se diseñan distintos escenarios en los que se modifica la geometría de la mancha de contaminante. También se prueba la capacidad de evitar obstáculos fijos y con movimiento.

El quinto capítulo hace hincapié en el efecto que producen los sensores sobre los algoritmos de guiado, navegación y control. Para esto, se aplican valores realistas a los sensores descritos en la sección número dos, se simula la dinámica de dichos sensores y, se vuelven a pasar algunos de los test unitarios del cuarto capítulo.

El sexto capítulo se realiza una simulación de un escenario complejo que incluye varias manchas en contacto entre sí y un total de 6 USVs, cada uno con sus propias tareas, trabajando en la misma área.

El último capítulo recoge las conclusiones alcanzadas en este trabajo así como propuestas de líneas futuras de trabajo.

2. MODELADO Y SIMULACIÓN

En este capítulo se justifica la necesidad de desarrollar un simulador de la dinámica del USV así como del entorno y operación del mismo. Se comienza explicando la arquitectura del simulador que se ha desarrollado. A continuación, se procede a desarrollar los modelos matemáticos que permiten el análisis y simulación de cada uno de los subsistemas, prestando especial atención al modelo de la dinámica del USV. Finalmente, se presentan los parámetros empleados en cada modelo.

2.1 Necesidad de un simulador de operación del USV

De cara al desarrollo de algoritmos de Guiado, Navegación y Control de cualquier vehículo se hace imprescindible el uso de modelos matemáticos que permitan realizar iteraciones rápidas en el diseño, a bajo coste. Este conjunto de modelos, las interacciones entre ellos, los parámetros que los componen y la capacidad de visualización de resultados son comúnmente denominados simulador.

Un simulador puede tener distintos niveles de complejidad. Aunque habitualmente se habla de simuladores realistas, lo cierto es que en cada fase del diseño las necesidades pueden ser muy diferentes y específicas. Así, en las fases de diseño conceptual y preliminar suele bastar con niveles de complejidad relativamente bajos, que permitan analizar la viabilidad del problema y de las soluciones propuestas. Posteriormente, se va incrementando la complejidad en cada subsistema incluyendo dinámicas más realistas para realizar análisis más detallados. Finalmente, si se demuestra que con el simulador se obtienen los mismos resultados que en experimentos empleando la planta real, este puede ser empleado como método de verificación.

El uso de simuladores no queda exclusivamente ligado a la parte software o firmware de un proyecto. En general, el simulador sirve para mejorar el conocimiento acerca del problema que se desea resolver o del producto que se quiere desarrollar, y permite a los ingenieros conocer qué parámetros tienen una mayor influencia en los resultados finales. Por ejemplo, se puede emplear el simulador para realizar un análisis de sensibilidad de los algoritmos desarrollados a parámetros mecánicos del USV como son la masa, la inercia o la forma.

Por tanto, se considera necesario desarrollar un simulador de USV donde se puedan realizar iteraciones de diseño rápidas y baratas. En el contexto de este proyecto este simulador se empleará como mecanismo de prueba de los algoritmos de guiado y control.

2.2 Arquitectura del simulador

En la Figura 1 se muestra la arquitectura de alto nivel del simulador desarrollado durante el proyecto. Aunque la arquitectura mostrada es para un USV, se pueden generar escenarios para múltiples USVs sin más que replicar algunas de sus partes el número de veces necesario. Los subsistemas principales a tener en cuenta son:

2 MODELADO Y SIMULACIÓN

- Condiciones iniciales y configuración: En esta parte se configuran todas las condiciones iniciales del USV. Entre ellas destacan su posición, velocidad, actitud, identificador, tareas que debe desarrollar, etc.
- Entorno: Este subsistema es el encargado de generar todos los datos relativos al entorno de operación. Para este proyecto se considera que genera la información relativa a la concentración de bacterias en el agua. Como dicha concentración es independiente del tipo y número de USVs, este subsistema no será replicado en los escenarios con múltiples USVs.
- Dinámica del USV: Está a cargo de integrar las ecuaciones dinámicas del USV. Será replicado tantas veces como USVs se simulen.
- Sensores: Simula cada uno de los sensores que lleva el USV y que son utilizados en los algoritmos de guiado, navegación y control. Será replicado tantas veces como USVs se simulen.
- Comunicaciones: Se incluyen en el simulador las ecuaciones necesarias para reproducir las comunicaciones entre USVs. Posteriormente se verá que para los algoritmos de control cooperativo dichas comunicaciones son un elemento esencial.
- Guiado, Navegación y Control: Es el encargado de generar las consignas de bajo nivel que hay que aplicar sobre los actuadores, de forma que se puedan cumplir con éxito las tareas asignadas para el USV.
- Actuadores: Simula el comportamiento de los actuadores de bajo nivel del USV. Será replicado tantas veces como USVs se simulen.
- Visualización de resultados: Genera tablas, datos y gráficas que se utilizan posteriormente en el análisis.

En las secciones 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6 se explica con más detalle los modelos y las características más importantes de los subsistemas más relevantes para el proyecto.

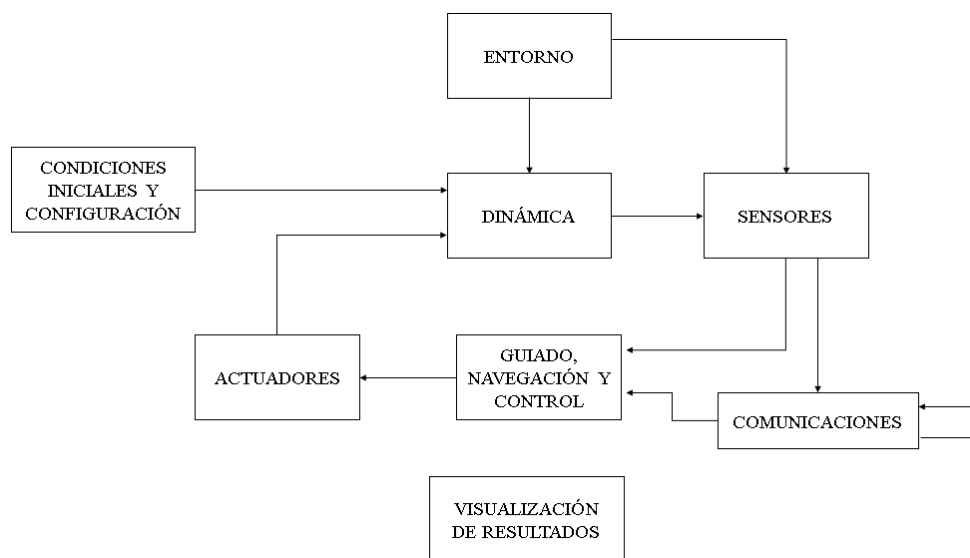


Figura 1 Arquitectura de simulador de USV

2.3 Dinámica del USV

Como se ha explicado en la sección anterior, este subsistema está a cargo del cálculo e integración de las fuerzas y momentos sobre el USV. De esta manera se obtiene la evolución de la posición, velocidad y actitud del USV frente el tiempo.

Para modelar este subsistema, se hace indispensable plantear las ecuaciones matemáticas que gobiernan el comportamiento del USV. Para ello, podemos seguir el proceso que se detalla en (Gómez Tierno, et al., 2012) y que se resume a continuación.

Partiendo del teorema de la cantidad de movimiento y del teorema del momento cinético, se tiene que:

$$\begin{aligned}\bar{F} &= \frac{d(m \cdot \bar{V})}{dt} \\ \bar{G} &= \frac{d\bar{h}}{dt} \\ \bar{h} &= I \cdot \bar{\omega}\end{aligned}\quad (1)$$

Donde:

$\bar{F} \equiv$ Resultante de las fuerzas exteriores.

$\bar{V} \equiv$ Velocidad absoluta del centro de masas del USV. (Ejes inerciales).

$m \equiv$ Masa del USV.

$t \equiv$ Tiempo.

$\bar{G} \equiv$ Resultante de los momentos exteriores alrededor del centro de masas.

$\bar{h} \equiv$ Momento cinético total del USV.

$\bar{\omega} \equiv$ Velocidad angular absoluta del USV.

$I \equiv$ Tensor de inercia del USV.

A continuación, se proyectan ambos teoremas en unos ejes denominados ejes cuerpo, que tienen su origen en el centro de masas del USV y van ligados a su movimiento. Más en concreto, y tal y como se muestra en la imagen de la izquierda de la Figura 2, el eje x_b está contenido en el plano de simetría del USV mirando hacia proa, el eje z_b apunta hacia arriba, y el eje y_b apunta hacia babor. Por tanto, al proyectar se debe tener en cuenta que dichos ejes son no inerciales. Además, se considera que existe simetría en el USV y que la masa es constante, y se obtienen las siguientes ecuaciones

$$\begin{aligned}\bar{F} &= m \cdot \left(\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \bar{\omega} \times \bar{V} \right) \\ \bar{G} &= \frac{d\bar{h}}{dt} + \bar{\omega} \times \bar{h}\end{aligned}\quad (2)$$

Que se pueden se pueden expandir:

$$\begin{aligned}F_{x_b} &= m(\dot{u} - rv + qw) \\ F_{y_b} &= m(\dot{v} + ru - pw)\end{aligned}\quad (3)$$

2 MODELADO Y SIMULACIÓN

$$\begin{aligned}
 F_{z_b} &= m(\dot{w} - qu + pv) \\
 M_{x_b} &= I_x \dot{p} - I_{xz} \dot{r} + (I_z - I_y)qr - I_{xz}pq \\
 M_{y_b} &= I_y \dot{q} - I_{xz} \dot{r} - (I_z - I_y)pr + I_{xz}(p^2 - r^2) \\
 M_{z_b} &= I_z \dot{r} - I_{xz} \dot{p} - (I_z - I_y)pq + I_{xz}qr
 \end{aligned}$$

Donde:

$u, v, w \equiv$ Componentes de la velocidad lineal en ejes cuerpo.

$p, q, r \equiv$ Componentes de la velocidad angular en ejes cuerpo.

Como en este trabajo se desea un simulador de maniobra con tres únicos grados de libertad, que son el movimiento longitudinal, el movimiento lateral y la rotación sobre azimut, se plantean las siguientes simplificaciones:

$$w = p = q = \dot{w} = \dot{q} = 0 \quad (4)$$

Con ellas, las ecuaciones anteriores se pueden reducir y expresar de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 F_{x_b} &= m(\dot{u} - rv) \\
 F_{y_b} &= m(\dot{v} + ru) \\
 M_{z_b} &= I_z \dot{r}
 \end{aligned} \quad (5)$$

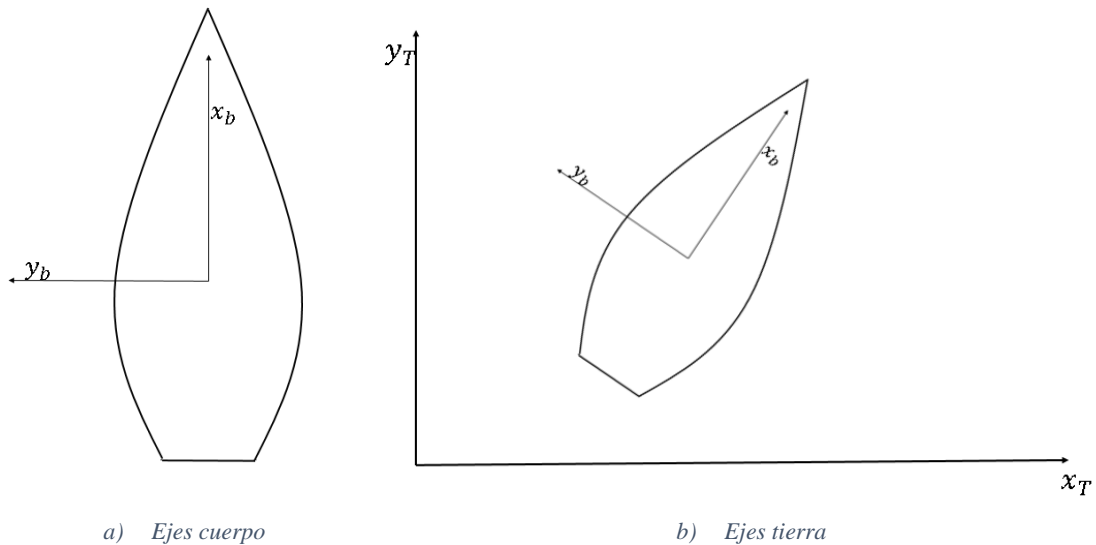


Figura 2 Ejes cuerpo

Aunque los ejes cuerpo se utilizarán posteriormente para el análisis del control de bajo nivel, de cara a la simulación de maniobra es conveniente trasladar las ecuaciones anteriores a los ejes tierra que se muestran a la derecha de la Figura 2.

Con este cambio de ejes, las ecuaciones anteriores quedan:

$$\begin{aligned}
 F_{x_t} &= m \cdot a_{x_t} \\
 F_{y_t} &= m \cdot a_{y_t}
 \end{aligned} \quad (6)$$

$$M_{z_t} = I_z \cdot \ddot{\theta}$$

Llegados a este punto, queda definir las expresiones de las fuerzas y momentos. Cada una de estas fuerzas y momentos se puede separar en los términos relativos a fuerzas hidrodinámicas y en los términos de propulsión y control.

$$\begin{aligned} F_{x_t} &= F_{x_{prop}} + F_{x_H} \\ F_{y_t} &= F_{y_{prop}} + F_{y_H} \\ M_{z_t} &= M_{z_{prop}} + M_{z_H} \end{aligned} \quad (7)$$

Para desarrollar las fuerzas de propulsión y control hay que tener en cuenta que se ha considerado un USV tipo waterjet (ver descripción en 2.4):

$$\begin{aligned} F_{x_{prop}} &= P_b \cdot \cos(\theta + \theta_{wj}) \\ F_{y_{prop}} &= P_b \cdot \sin(\theta + \theta_{wj}) \\ M_{z_{prop}} &= -P_b \cdot l_{wj} \cdot \sin(\theta_{wj}) \end{aligned} \quad (8)$$

Donde:

$\theta_{wj} \equiv$ Ángulo de deflexión del waterjet.

$l_{wj} \equiv$ Distancia entre el centro de masas y el waterjet.

$P_b \equiv$ Fuerza de propulsión neta del waterjet.

A continuación, se desarrollan las fuerzas hidrodinámicas:

$$\begin{aligned} F_{x_H} &= h_{surge} \cdot \cos(\theta) - h_{sway} \cdot \sin(\theta) \\ F_{y_H} &= h_{surge} \cdot \sin(\theta) + h_{sway} \cdot \cos(\theta) \\ h_{surge} &= -\mu_{surge} \cdot l_b \cdot u - \mu_{2_{surge}} \cdot l_b \cdot |u| \cdot u \\ h_{sway} &= -\mu_{sway} \cdot l_b \cdot v - \mu_{2_{sway}} \cdot l_b \cdot |v| \cdot v \end{aligned} \quad (9)$$

Donde:

$$\begin{aligned} u &= v_x \cdot \cos(\theta) + v_y \cdot \sin(\theta) \\ v &= -v_x \cdot \sin(\theta) + v_y \cdot \cos(\theta) \end{aligned} \quad (10)$$

Desarrollando los momentos hidrodinámicos:

$$M_{z_H} = -\mu_{\omega} \cdot l_b \cdot \dot{\theta} - \mu_{\omega_2} \cdot l_b \cdot |\dot{\theta}| \cdot \dot{\theta} \quad (11)$$

Donde:

$h_{surge} \equiv$ Fuerza hidrodinámica en x cuerpo.

$h_{sway} \equiv$ Fuerza hidrodinámica en y cuerpo.

$\mu_{surge} \equiv$ Término lineal de la fuerza hidrodinámica en x cuerpo.

$\mu_{2_{surge}} \equiv$ Término cuadrático de la fuerza hidrodinámica en x cuerpo.

$\mu_{sway} \equiv$ Término lineal de la fuerza hidrodinámica en y cuerpo.

$\mu_{2sway} \equiv$ Término cuadrático de la fuerza hidrodinámica en y cuerpo.

$\mu_{\omega} \equiv$ Término lineal del momento hidrodinámico en z cuerpo.

$\mu_{\omega_2} \equiv$ Término cuadrático del momento hidrodinámico en z cuerpo.

$l_b \equiv$ Longitud del USV

2.4 Actuadores

Como se ha comentado en la sección anterior, el modelo de USV simulado es del tipo waterjet. Este sistema es básicamente un chorro de agua canalizado, situado a popa. De esta manera, toda la energía se concentra en una dirección, lo que permite actuar el USV tanto para ganar velocidad en la dirección del chorro de agua como para generar un par alrededor del centro de masas y hacerlo rotar.

Por tanto, el actuador de bajo nivel puede ser separado en dos partes principales, la cantidad de movimiento generado por el chorro de agua y la propia dirección del chorro. Esto queda reflejado en el modelo matemático por las siguientes dos variables actuadas, cuyos valores son manipulados por el algoritmo de Guiado, Navegación y Control para que la trayectoria del USV cumpla los objetivos de la misión.

- P_b , la fuerza de propulsión neta del waterjet.
- θ_{wj} , el ángulo de deflexión del waterjet.

Por tanto, es necesario modelar la dinámica que existe en estos actuadores de bajo nivel. En este caso se han simulado ambas dinámicas como una ecuación diferencial de primer orden.

$$\dot{P}_b = \frac{P_{bref} - P_b}{\tau_p} \quad (12)$$

$$\dot{\theta}_{wj} = \frac{\theta_{wjref} - \theta_{wj}}{\tau_{wj}} \quad (13)$$

2.5 Sensores

Para modelar el comportamiento de los sensores hay que encontrar las relaciones matemáticas que representen la respuesta de cada uno de los sensores implicados en el algoritmo de guiado y control. Para ello, en la siguiente figura, se procede a mostrar un posible esquema de los sensores del USV. En este caso, se utiliza el color verde para los sensores relevantes para este proyecto y el gris para los sensores que no son utilizados por los algoritmos de GNC.

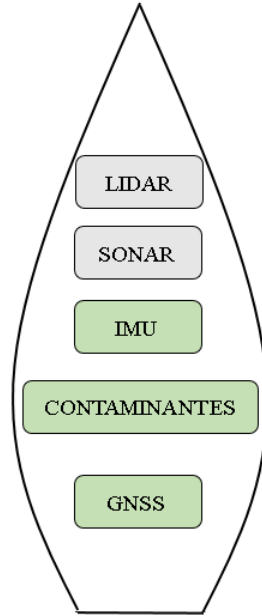


Figura 3 Esquema de sensores en el USV

2.5.1 Posición

El sensor GNSS (Global Navigation Satellite System) está a cargo de obtener la posición del USV, habitualmente en un sistema de coordenadas geodésico denominado WGS84. Sin embargo, como se explicó anteriormente, todo el modelo matemático del USV está referido a un sistema cartesiano denominado ejes tierra.

Sin embargo, en este proyecto no se aborda la conversión entre ambos sistemas de coordenadas, sino que directamente se asume que se obtendrá una señal de posición en el sistema de referencia cartesiano. El modelo matemático utilizado para el sensor de posición está descrito por:

$$\begin{aligned}\bar{x}_m &= \bar{x}_{real} + \overline{random\ walk} + \overline{white\ noise} \\ \overline{random\ walk} &= \bar{x}_{red_n} = \bar{x}_{red_{n-1}} + \omega_{p1} \\ \overline{white\ noise} &= \omega_{p2}\end{aligned}\tag{14}$$

Donde:

$\bar{x}_m \equiv$ Medida de posición en ejes tierra.

$\bar{x}_{real} \equiv$ Posición real del USV.

$\omega_{p1} \equiv$ Ruido blanco utilizado para la generación del random walk.

$\omega_{p2} \equiv$ Ruido blanco de la medida de posición.

Aunque es probable que la posición proporcionada por el sensor GNSS sea hibridada con el sensor de navegación inercial (IMU, Inertial Measurement Unit) para dar una solución de navegación más precisa, se incluye en el modelo de posición del USV

2 MODELADO Y SIMULACIÓN

la posibilidad de incluir un ruido blanco y un ruido rojo alrededor de la posición real del USV, ya que este tipo de errores es típico de los sensores GNSS del mercado.

2.5.1 Rumbo

La expresión que modela el sensor que proporciona la medida de rumbo es:

$$\theta_m = \theta_{real} + \omega_t \quad (15)$$

Donde:

$\theta_m \equiv$ Medida de rumbo del USV.

$\theta_{real} \equiv$ Rumbo real del USV.

$\omega_t \equiv$ Ruido blanco.

2.5.2 Contaminación del agua

Se considera necesario modelar la inercia del sensor que mide la concentración de contaminante en el agua. Esta inercia se aproxima por un sistema de primer orden. Además, se incluye un bias en la medida y un ruido blanco. Por tanto, la medida de contaminación del agua está regida por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \dot{z}_s &= \frac{(z_{real} - z_s)}{\tau_z} \\ z_m &= z_s + b_z + \omega_z \end{aligned} \quad (16)$$

Donde:

$z_{real} \equiv$ Medida real de concentración.

$z_s \equiv$ Medida de concentración sin efectos de bias ni ruido.

$z_m \equiv$ Medida de concentración de contaminación.

$b_z \equiv$ Bias de la medida.

$\omega_z \equiv$ Ruido blanco adicional de la medida.

2.5.3 Comunicaciones

Como se verá posteriormente, el algoritmo de Guiado, Navegación y Control requiere de la cooperación e intercambio de información entre varios USVs para poder realizar algunas de sus funciones. Especialmente, la relacionadas con la detección de contaminantes en el agua.

Por tanto, es imprescindible simular la comunicación entre los USVs para poder posteriormente diseñar el algoritmo de guiado.

Las comunicaciones entre USVs se efectuarán mediante un enlace de radiofrecuencia. Para el modelo de transmisiones se generan dos buffers, uno de transmisión y otro de recepción.

2 MODELADO Y SIMULACIÓN

El buffer de transmisión simplemente se va rellenando con cada uno de los datos transmitidos. Dichos datos varían según la misión que esté realizando el USV.

$$rlink\ t = [dato1, dato2, dato3, \dots] \quad (17)$$

El buffer de recepción se genera agrupando en un vector los buffers de transmisión del resto de USVs. Además, se incluye la posibilidad de generar fallos en la recepción de trama emitida por el resto de USVs.

$$rlink\ r = [rlink\ t1 * (1 - e1), \\ rlink\ t2 * (1 - e2), rlink\ t3 * (1 - e3), \dots] \quad (18)$$

Donde la función de error puede valer 0 o 1 según una probabilidad de fallo seleccionada.

2.6 Entorno

En este módulo se simula todo lo relativo al entorno de operación. En este proyecto solo se modela la concentración de contaminación como una mezcla de distribuciones gaussianas centradas en posiciones arbitrarias (x_{0_i}, y_{0_i}) y una varianza $(\sigma_{x_i}^2, \sigma_{y_i}^2)$.

$$c(x, y) = \sum_{i=1, n} e^{-\frac{(x - x_{0_i})^2}{2\sigma_{x_i}^2} - \frac{(y - y_{0_i})^2}{2\sigma_{y_i}^2}} \quad (19)$$

2.7 Datos simulación

A continuación, se muestran los valores de los parámetros dinámicos del USV que aparecen en los modelos anteriores y que han sido utilizados durante las simulaciones de este proyecto.

Nótese que no aparecen datos relativos a los sensores. Dichos parámetros pueden variar para cada USV en cada experimento. Por tanto, serán especificados en la definición de cada simulación.

2 MODELADO Y SIMULACIÓN

Parámetro	Valor	Unidades
m	3.4	Kg
I_z	0.85	$Kg \cdot m^2$
P_{max}	10.0	N
$\theta_{wj_{max}}$	20	$^\circ$
l_{wj}	0.4	m
l_b	1.0	m
μ_{surge}	0.01	$\frac{N}{m^2}$
$\mu_{2_{surge}}$	1.219	$\frac{N}{m^3}$
μ_{sway}	0.1	$\frac{N}{m^2}$
$\mu_{2_{sway}}$	4.0	$\frac{N}{m^3}$
μ_{ω}	0.0	$\frac{N}{rad}$
μ_{ω_2}	1.0	$\frac{N}{(\frac{rad}{s})^2}$
τ_p	0.1	s
τ_{wj}	0.1	s

Tabla 1 Datos del USV para la simulación

3. GUIADO, NAVEGACIÓN Y CONTROL

En esta sección se describen y justifican todos los algoritmos empleados por los USVs para completar las distintas tareas.

3.1 Definiciones y elementos del GNC

En (Ortega, 2014), Guillermo Ortega, Director de la sección de Guiado; Navegación y Control en la ESA da la siguiente definición para esta disciplina:

“...Guidance, navigation and control (abbreviated GNC) is a branch of engineering dealing with the design of systems to control the movement of space vehicles...”

En primer lugar, esta definición puede ser generalizada para cualquier tipo de vehículo y no sólo vehículos espaciales. Finalmente, es conveniente añadir que dicho movimiento se ejecuta de cara a cumplir una misión determinada.

Esta disciplina se divide en tres grandes secciones, como su nombre indica: Navegación, Guiado y Control. Cada una de estas secciones tiene una definición acorde a su objetivo. Acudiendo de nuevo a (Ortega, 2014) estos objetivos podrían resumirse como:

- **GUIADO**: Establecer la ruta que se debe seguir.
- **NAVEGACIÓN**: Calcular el estado actual y futuro.
- **CONTROL**: Ejecutar las acciones para ir desde el estado actual (Navegación) hasta el estado deseado (Guiado).

Para poder llevar a cabo esos objetivos, los sensores recolectan toda la información necesaria acerca del estado actual del vehículo incluyendo, la posición y la velocidad del USV o las medidas del entorno de operación. Con esta información el algoritmo de navegación calcula el estado real del vehículo y su entorno, de forma que puedan ser utilizados por los algoritmos de guiado y control. El algoritmo de guiado, teniendo en cuenta el objetivo a cumplir durante la misión, calcula cuál o cuáles deberían ser los siguientes estados que debería alcanzar del vehículo para cumplir dicha misión. Finalmente, el algoritmo de control, compara el estado actual con el estado deseado del vehículo y manda a los actuadores las consignas necesarias para disminuir las diferencias existentes. Por supuesto, los actuadores de bajo nivel llevarán sus propios algoritmos de control para poder ejecutar las órdenes comandadas por el algoritmo de GNC.

Además, si el vehículo puede cumplir distintas misiones o tareas durante su operación, se debe incluir un gestor de tareas/misiones. Este gestor puede considerarse parte del algoritmo de navegación o un algoritmo extra al GNC. En el contexto de este proyecto, se incluirá dentro del algoritmo de navegación ya que la tarea a realizar se considera una variable de estado más del USV.

En la Figura 4, se muestra el flujo de datos en los algoritmos de GNC.

3 GUIADO, NAVEGACIÓN Y CONTROL

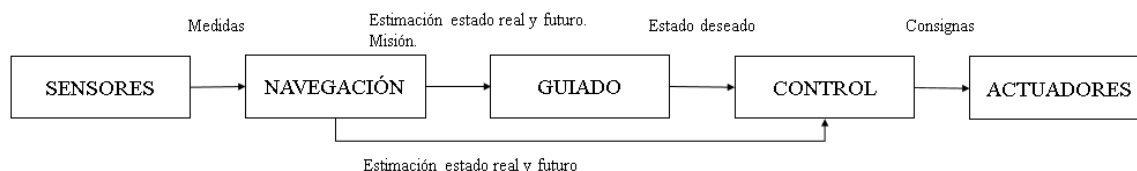


Figura 4 Flujo de datos GNC

Por otro lado, el algoritmo de GNC de este trabajo está basado en un algoritmo de cooperación entre varios USVs. Por tanto, al esquema clásico del GNC representado en la Figura 4 es posible añadirle las comunicaciones por las que el USV recibe la información de sus compañeros. Esto se muestra en la Figura 5.



Figura 5 Flujo de datos GNC incluyendo comunicaciones

3.2 Sensores, navegación y comunicaciones

Aunque los sensores, las comunicaciones y el algoritmo de guiado tienen naturalezas muy distintas, su fin último es común, dotar al USV con la información suficiente para estimar las variables relevantes de cara a los algoritmos de guiado y control.

Cómo se explica en la sección 2.5, los sensores principales para el algoritmo de GNC son:

- GNSS.
- La IMU, constituida por acelerómetros, giróscopos y magnetómetro.
- Sensor de concentración de contaminación.

En el desarrollo de este proyecto no se han implementado algoritmos de tratamiento de señal para los sensores. Es decir, se ha supuesto que esta parte del problema está resuelta, dejando las variables de estado correspondientes, a partir de las medidas de los sensores originales, como una tarea futura del proyecto. Las variables de estado que el algoritmo de guiado recibirá se listan a continuación:

- Posición del USV: Proyectada sobre un sistema de referencia ortogonal con origen en la base de operaciones del USV denominado ejes tierra.
- Velocidad del USV: Expresada en ejes tierra.
- Azimut del USV: Medido en sentido anti-horario con origen en el eje x tierra.

- Medida de la concentración de contaminación.

De cara al algoritmo de cooperación, los USVs intercambian información entre sí sobre sus estados. Aunque cada modo de operación requiere de su propia trama, dicha trama está configurada de forma incremental, de tal forma que la trama más larga que se envía y se recibe contiene la siguiente información:

- Identificador del USV: Es un valor único que identifica cada USV dentro de la misión. Se recomienda usar el tipo de dato UINT8 para esta variable lo que permitiría operar 255 USVs y dejar reservado el 0 para la estación base.
- Posición del USV: Se trata de la posición x e y en ejes tierra. Aunque es posible utilizar floats, se aconseja utilizar datos en formato de punto fijo. Si la misión está contenido en un cuadrado de 65536 metros de lado pueden utilizarse INT16. Esto permitiría tener una precisión de hasta 1 metro en cada una de las direcciones debido al envío.
- Nivel de concentración de contaminación: Se recomienda utilizar un tipo de dato float ya que aún no se conoce exactamente el formato de este dato.
- Azimut de referencia: Como se verá posteriormente, se prevé que los USVs naveguen describiendo una trayectoria paralela. Este dato se refiere al rumbo de dicha trayectoria en cada momento. Emplear un dato UINT16 cuantizando por bits el rumbo permite tener una precisión en el envío de hasta 0.00549°.

Aunque no es objeto de este proyecto analizar el envío y recepción de datos, se han incluido las recomendaciones anteriores del tamaño de dato a utilizar en cada variable transmitida, con el objeto de poder comprimir los datos transmitidos.

La trama final queda:

Identificador	Posición X	Posición Y	Concentración	Azimut
---------------	------------	------------	---------------	--------

Tabla 2 Trama de datos transmitidos

Finalmente, como parte del algoritmo de navegación, se ha incluido el gestor de tareas que debe cumplir cada USV. Dicho gestor tiene la relación de tareas a ejecutar, ordenadas y con los parámetros de configuración que permiten completar cada una de ellas.

En la Tabla 3 se muestran y describen brevemente las tareas que se han contemplado para cada USV.

Cada uno de estos tipos de tareas estará asociado a un modo específico de funcionamiento del GNC.

En la memoria del USV esto es implementado como un conjunto de vectores que conformarán una tabla con las columnas reflejadas en la Tabla 4 y tantas filas como tareas sean necesarias para llevar a cabo una misión completa.

Nombre	Identificador	Descripción	Parámetros adicionales
Navegar a un punto fijo	4	Navegar con el USV hasta un punto fijo y una vez alcanzado quedarse orbitando alrededor del mismo.	Punto objetivo.
Encontrar máximo de concentración	1	Encontrar un máximo de concentración y quedarse orbitando alrededor del mismo.	
Navegar por línea de nivel	2	Encontrar una línea de nivel concreta del nivel de concentración y navegar por ella.	Línea de nivel.

Tabla 3 Tipos de tareas en planificador

Número de tarea	Identificador	Punto objetivo	Línea de nivel
-----------------	---------------	----------------	----------------

Tabla 4 Columnas del gestor de tareas

La Tabla 5 muestra un ejemplo de configuración del gestor de tareas. En este caso, el USV comenzaría navegando hacia el punto con coordenadas [2000.0, 1000.0]. Una vez esta tarea se haya cumplido, se procede a encontrar un máximo de concentración. Cuando este máximo se haya localizado el USV procede a buscar la línea de nivel de concentración 0.5. Una vez se haya terminado esta tarea el USV vuelve a la base.

Número de tarea	Identificador	Punto objetivo	Línea de nivel
0	4	[2000.0, 1000.0]	N/A
1	1	N/A	N/A
2	2	N/A	0.5
3	4	base	N/A

Tabla 5 Ejemplo de planificación

A continuación, se hace imprescindible definir la lógica del planificador de tareas así como los criterios utilizados para cambiar de tarea.

Cada vez que se llama al gestor de tareas, se comprueba qué tarea de la tabla se está realizando y se comprueban las condiciones que se deben cumplir para cambiar de tarea. En caso de cumplirlas, se asignan los nuevos objetivos en la memoria del GNC. Las condiciones de cambio para cada tarea son:

- Para comprobar si se ha encontrado el nivel máximo, se comprueba el nivel de concentración medido, y si la medida es mayor que la medida histórica mientras el USV ha ejecutado la búsqueda del máximo, se resetea el contador de tiempo y se almacena dicha medida. Si la medida es menor se incrementa un contador de tiempo. Cuando dicho contador desborda, se considera que se ha alcanzado el máximo y se lanza un aviso para pasar a la siguiente tarea.

- Para el caso de la línea de nivel, se define una franja de nivel de concentración en la que cuando el USV está dentro se considera que está recorriendo la curva de nivel. La primera vez que el USV se encuentra dentro de la franja, se almacena la posición como punto de referencia. A partir de este instante, se calcula de forma periódica la distancia entre el USV y el punto de referencia. La detección de entrada y salida de la franja no se realiza de forma inmediata. Para evitar que pequeños errores durante la navegación o medidas espúreas pudieran resetear el punto de referencia se obliga a que el USV mantenga la condición de forma sostenida para considerar que ha entrado o salido de la franja. En la primera parte del recorrido dentro de la franja, el algoritmo comprueba que el USV se encuentra a una distancia de seguridad suficientemente alejada del punto de inicio. Una vez supere esta distancia, si el USV vuelve a pasar cerca del punto de inicio, se considera que ha recorrido la curva de nivel. Este es un método muy simplificado y que puede llevar a errores en un sistema final. Se utiliza durante las simulaciones para permitir trabajar con escenarios más complejos pero deberá ser robustecido. Por ejemplo, no se comprueba si, debido a un error en la navegación, realmente la trayectoria seguida por el USV ha cerrado completamente la línea de nivel o si el USV cambió el sentido del recorrido y ha vuelto sobre la trayectoria original.

En la Figura 6, se muestran ejemplos de algunas de las partes clave del algoritmo de detección de líneas de nivel. En la imagen a) se observa el instante en el que el USV determina por primera vez que está dentro de la franja, almacena el punto de inicio y establece el área por la que si vuelve a pasar considerará que ha terminado la tarea. En la imagen b) se muestra el caso de pérdida definitiva de franja mientras que en la imagen c) se observa un caso en el que el USV sale momentáneamente de la franja pero vuelve a entrar sin resetear el punto de inicio.

- Para comprobar si se ha alcanzado el punto de destino prefijado, se establece un área circular en la que si el USV entra se considera que ha llegado al objetivo. Para esto, simplemente basta comprobar la distancia entre el USV y el punto de destino.

La Figura 7 muestra un ejemplo de este algoritmo. El USV de la figura tiene dos puntos por alcanzar, se dirige al primero y una vez que entra en el área definida considera que lo ha alcanzado y cambia su trayectoria hacia el segundo punto definido.

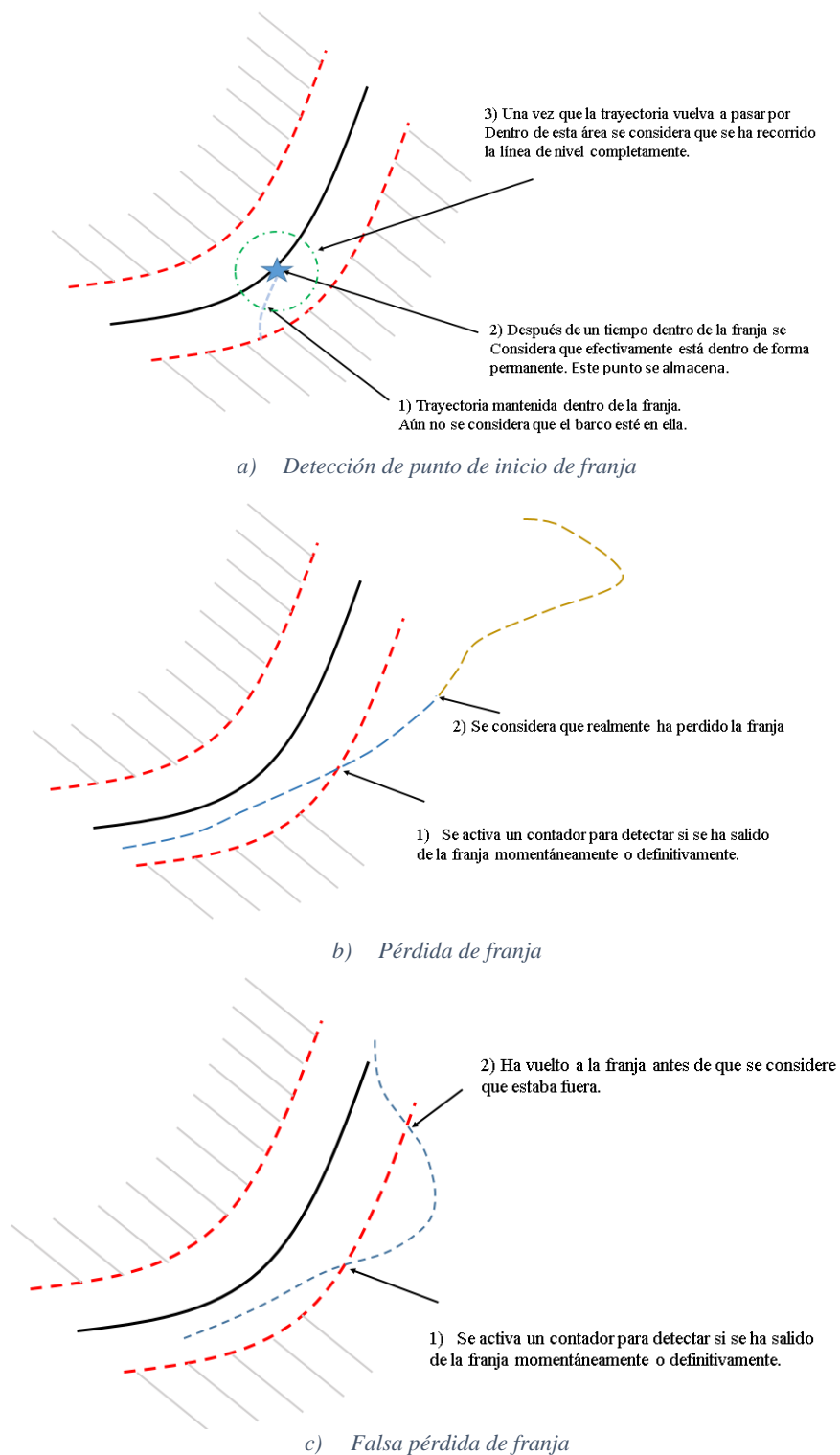


Figura 6 Algoritmo detección líneas de nivel

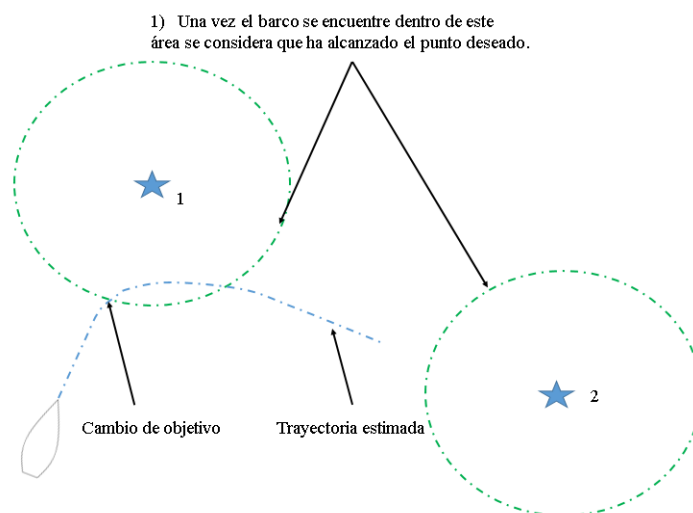


Figura 7 Detección de punto objetivo

3.3 Guiado

En este apartado se desarrollan y justifican los algoritmos utilizados para el guiado del USV. En primer lugar, se describen los objetivos a cumplir y se relacionan con los modos de funcionamiento del algoritmo de guiado, además se justifica la necesidad del uso de control cooperativo. Posteriormente, se explican algunos algoritmos comunes en todos los modos de operación del guiado. Finalmente, se detalla el funcionamiento de cada uno de los modos de operación en el guiado.

3.3.1 Objetivos y cooperación

Tal y como se definió anteriormente, el guiado está a cargo de decidir en cada momento la ruta a seguir para cumplir los objetivos de la misión. Cabe por tanto preguntarse ahora sobre los objetivos o misiones que debe cumplir el USV.

Para un supuesto escenario con aguas embalsadas, en el que hay un cierto tipo de contaminación, este trabajo considera tres objetivos principales posibles, cada uno asociado a una de las posibles tareas del gestor de tareas. Es decir, los objetivos del algoritmo de guiado son:

- Navegar hacia un objetivo predeterminado y una vez alcanzado, orbitar alrededor del mismo.
- Encontrar un punto de máxima concentración de contaminación en el espacio de trabajo.
- Encontrar y navegar sobre una línea de nivel de contaminación que haya sido prefijada por el operador.

En la Figura 8 se puede observar un ejemplo de escenario que el USV debe recorrer y en el que hay una mancha de contaminación. Durante el desarrollo de la misión, y por medio de los objetivos anteriores, se puede hacer que el USV se acerque a dicha zona, encuentre alguno de los máximos y posteriormente navegue sobre una línea de nivel determinada para acotar la zona contaminada.

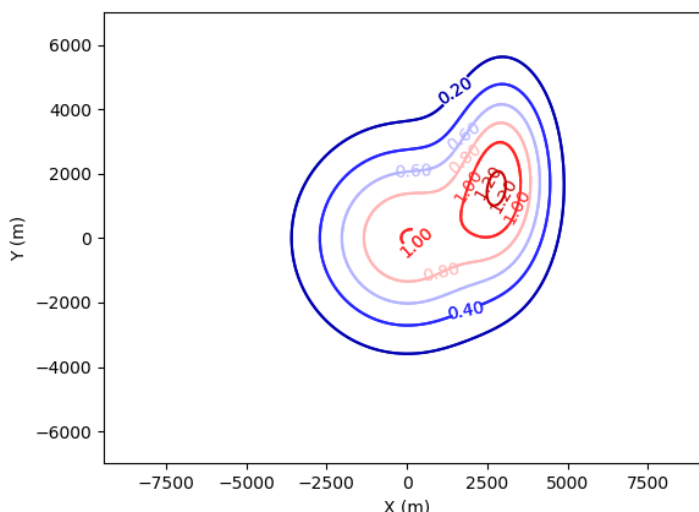


Figura 8 Ejemplo de mancha de biocontaminantes

Dado el ejemplo de la figura anterior, es fácil entender que para un USV en solitario puede conllevar ciertas dificultades medir cómo se distribuye la mancha de contaminación en un espacio bidimensional. Por dicha razón, este proyecto se ha desarrollado en torno al **concepto de cooperación**.

Dicho de otro modo, el problema al que se enfrenta el USV al trabajar en solitario estriba en que el USV únicamente puede ir tomando medidas a lo largo de su trayectoria. Esto le permite conocer, tal y como se esquematiza en la izquierda de la Figura 9, si el nivel de concentración está creciendo o disminuyendo a lo largo de dicha trayectoria, pero no tiene información del comportamiento del contaminante en el resto de direcciones. Sin embargo, y tal y como se esquematiza en la parte derecha de la Figura 9, añadiendo un segundo USV a la misión que pueda intercambiar información con el primero, se puede observar cómo cambia el nivel de contaminación en dos direcciones del plano. Si además, se exige que los USVs naveguen de forma sensiblemente paralela, dichas direcciones serán perpendiculares, lo que facilitará la toma de decisión del rumbo a seguir en función de cada escenario específico de contaminación.

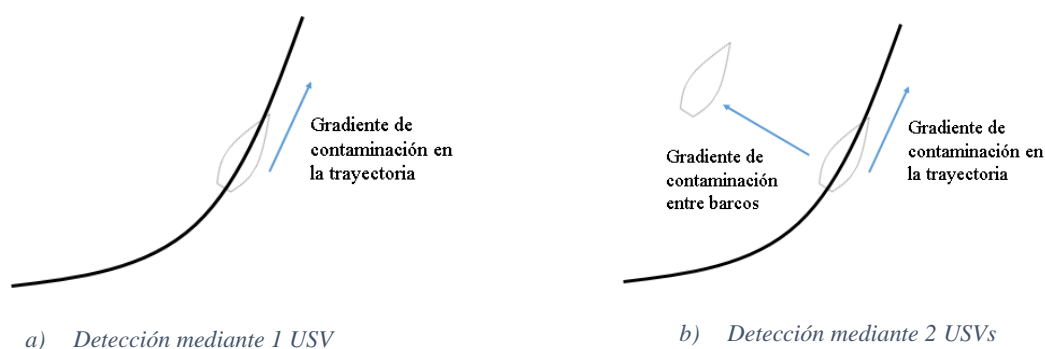


Figura 9 Esquema de detección del gradiente con 1 y 2 USVs

Este modo de trabajo o cooperación requiere que ambos USVs compartan información acerca de su estado actual, posición, rumbo y medida de contaminación. El intercambio de información a través del canal de comunicaciones fue definido en la sección 3.2.

Por tanto, se dispondrá de un sistema con dos USVs entre cuyos objetivos, además de los anteriormente mencionados, habrá que incluir la capacidad de que naveguen en paralelo. Además, ya que ambos USVs pueden operar relativamente cerca, hay que incluir la capacidad de que eviten la colisión en caso de acercarse en exceso.

Por tanto, los objetivos de los USVs como un sistema único son:

- Navegar hacia un objetivo predeterminado y una vez alcanzado orbitar alrededor del mismo.
- Encontrar un punto de máxima concentración de contaminación en el espacio de trabajo.
- Encontrar y navegar sobre una línea de nivel de contaminación que haya sido prefijada por el operador.
- Navegar en paralelo.
- Evitar colisiones y obstáculos.

Conceptualmente, cada uno de estos objetivos puede ser entendido como un modo de operación del algoritmo de guiado. Además, mientras que, generalmente la mayoría de los modos de operación serán comandados por el usuario, el modo de evitar colisiones debe activarse de forma automática cuando exista un riesgo razonable de colisión.

3.3.2 Método de guiado mediante campos virtuales

Como un paso previo al desarrollo de los algoritmos de guiado, se describe en esta sección el mecanismo por el que un punto objetivo se transformará en un rumbo y una velocidad. Para esto, se recurre al método de los campos virtuales, que fue introducido por Khatib en (Khatib & LeMaitre, 1978) y se ha mostrado su uso en USVs autónomos en (Cifuentes Costa).

En este método, cada uno de los puntos objetivo/obstáculo genera un campo central de fuerzas virtuales. Dichas fuerzas pueden ser de atracción o de repulsión, por ejemplo dependiendo de si se trata de un punto objetivo o de un obstáculo a evitar.

Matemáticamente el potencial de cada uno de estos se puede expresar como:

$$\Phi_i(r_i) = a_i r_i^{p_i} \rightarrow f_i(r_i) = -\nabla \Phi_i(r_i) \quad (20)$$

Donde:

$\Phi_i \equiv$ Campo de fuerza virtual.

$r_i \equiv$ Distancia radial al origen del campo virtual.

$a_i \equiv$ Intensidad máxima del campo.

$p_i \equiv$ Exponente que describe el campo.

$f_i \equiv$ Fuerza generada por el campo.

Una ventaja de escoger este método para transformar puntos objetivo en un rumbo y una velocidad es que permite combinar varios objetivos a la vez. Esta situación se vuelve realmente interesante si se desea combinar el efecto de alcanzar un punto objetivo con la esquivada de varios obstáculos. Para ello podemos utilizar la siguiente expresión, donde cada función $\Phi_i(r_i)$ estará relacionada con un elemento diferente.

$$\Phi_{total} = \sum \Phi_i(r_i) \quad (21)$$

Concretamente, en este trabajo:

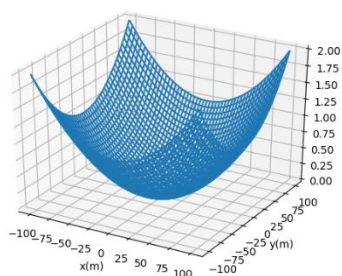
- Para alcanzar los puntos objetivos se ha escogido el siguiente campo atractivo, en el que la r representa la distancia entre el USV y el punto objetivo.

$$\Phi_{objetivo}(r) = a r^2 \quad (22)$$

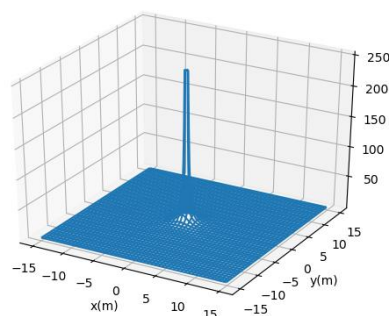
- Para evitar los obstáculos se emplea el siguiente campo repulsivo, en el que la r representa la distancia entre el USV y el obstáculo:

$$\Phi_{obstaculo}(r) = \frac{a}{r^2} \quad (23)$$

La imagen a) de la Figura 10 muestra un ejemplo de campo de atracción y la imagen b) un ejemplo de campo de repulsión alrededor del origen.



a) Campo atractivo



b) Campo repulsivo

Figura 10 Campos virtuales de atracción y repulsión

En este trabajo, el gradiente del campo total está asociado a la dirección y la intensidad de la velocidad deseada para el USV. Por este motivo, además se ha incluido en el propio gradiente la posibilidad de limitar la intensidad de atracción y repulsión, teniendo en cuenta diferentes condiciones de navegación.

3 GUIADO, NAVEGACIÓN Y CONTROL

Así, en la Figura 11 en la imagen a) se muestra el caso estándar de uso para la navegación del USV, cuyo gradiente se escala y limita de forma que a partir de los 50 metros de distancia al punto objetivo siempre se le exija al USV una velocidad máxima de 1 m/s.

Por otra parte, cuando se desea que el USV siga objetivos que se encuentran relativamente cerca del propio USV, se escala el potencial y el gradiente de forma que la distancia de saturación sea mucho más cercana. Por ejemplo, en el caso de la navegación en paralelo, donde habitualmente se le pide al USV capacidad de moverse rápido hacia puntos que se encuentran a pocos metros se usa el gradiente mostrado en la propia Figura 11 en la imagen b).

Además, para el caso del gradiente de repulsión se usa una técnica similar. Se limita la velocidad máxima al USV, obteniéndose el perfil del gradiente respecto a la distancia al obstáculo que se muestra en c). Nótese que el signo menos indica simplemente repulsión.

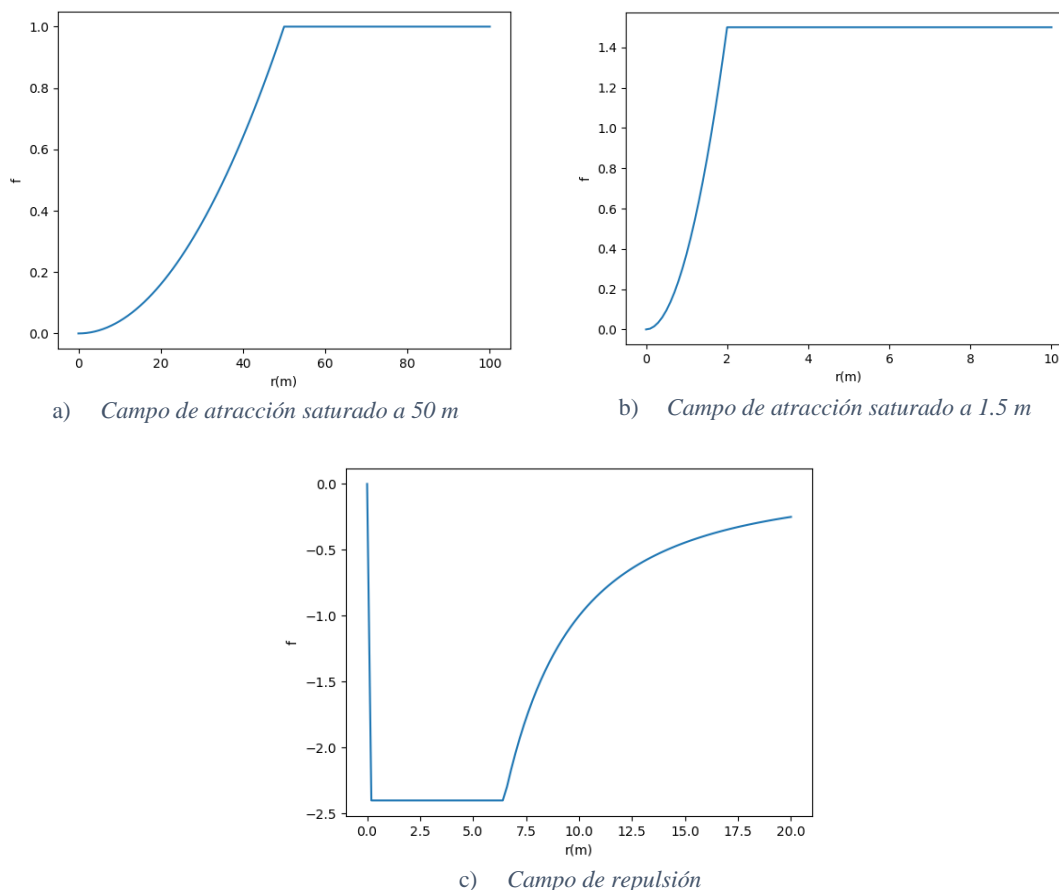


Figura 11 Ejemplo de gradientes de campos virtuales

Finalmente, los gradientes son combinados entre sí para obtener la dirección y la velocidad exigida al USV, tal y como se muestran en la siguiente expresión. En ella también se incluye la capacidad de añadir pesos w_i en el sumatorio de velocidades, ya que aunque es posible regular esto mediante la intensidad de los propios campos, en

ciertas partes del algoritmo es útil poder regular la influencia de cada término sobre la velocidad total con este mecanismo.

$$v_{total} = \sum f_i \cdot w_i \quad (24)$$

3.3.3 Cálculo de gradientes

Tal y como se explicó en la sección 3.3.1, los objetivos principales del sistema están relacionados con encontrar zonas especiales dada su concentración de biocontaminantes. Dado que la flota tendrá que variar su ruta según varíen dichos niveles, parece lógico pensar que estimar cómo varía el nivel de concentración localmente será de gran ayuda de cara al guiado.

También se señaló que el tener información adicional sobre la concentración de la contaminación es una de las principales razones para utilizar un segundo USV que coopere con el primero. El objetivo es que entre ambos USVs puedan estimar como varían localmente el nivel de biocontaminantes o, dicho de otro modo, el gradiente de contaminación.

Para ello, cada USV es capaz de estimar cómo varía el gradiente en su trayectoria. Considerando que entre cada una de las medidas, la variación de la mancha de la concentración es nula y por medio de la siguiente expresión, donde el gradiente se aproxima únicamente como la diferencia entre la medida actual y la medida de la posición anterior. La Figura 12 a) muestra un esquema del cálculo del gradiente a lo largo de la trayectoria.

$$\nabla z_{x_s} \approx \frac{z(s) - z(s - \Delta s)}{\Delta s} \quad (25)$$

Donde:

$\nabla z_{x_b} \equiv$ Gradiente de medida en la dirección de la trayectoria.

$z(s) \equiv$ Medida de concentración en el punto s de la trayectoria.

$\Delta s \equiv$ Distancia recorrida en la trayectoria.

Por otro lado, cada USV es capaz de estimar una segunda dirección del gradiente tomando en consideración la posición y la medida del USV compañero. Esto será posible siempre que el vector que une ambos USVs no sea colineal con la trayectoria. En cualquier caso, el algoritmo de guiado tendrá como objetivo que ambos USVs naveguen sensiblemente perpendiculares a la trayectoria.

$$\nabla z_{tr_b} \approx \frac{z(p_{bcom}) - z(p_b)}{\|p_{bcom} - p_b\|} \quad (26)$$

Donde:

$\nabla z_{tr_b} \equiv$ Gradiente de medida en la dirección que une los USVs.

$z(p_{bcom}) \equiv$ Medida del USV compañero.

$z(p_b) \equiv$ Medida del propio USV.

Por tanto, para conocer la dirección de gradiente máximo, simplemente con los gradientes anteriores se obtiene el sentido positivo de cada uno y se combinan. Un ejemplo gráfico de este proceso se muestra en la Figura 12 en la imagen a).

$$\nabla \bar{z}_{max} \approx \nabla \bar{z}_{x_s}^+ + \nabla \bar{z}_{tr_b}^+ \quad (27)$$

Donde:

$\nabla \bar{z}_{x_s}^+ \equiv$ Gradiente máximo de medida en la dirección de la trayectoria.

$\nabla \bar{z}_{tr_b}^+ \equiv$ Gradiente máximo de medida en la dirección que une los USVs.

$\nabla \bar{z}_{max} \equiv$ Gradiente máximo de medida estimado.

Por el mismo criterio, la dirección de gradiente mínimo se establece como la suma de los dos gradientes en su dirección negativa. Nuevamente, la Figura 12 en la imagen c) muestra gráficamente el cálculo del gradiente mínimo.

$$\nabla \bar{z}_{min} \approx \nabla \bar{z}_{x_s}^- + \nabla \bar{z}_{tr_b}^- \quad (28)$$

Donde:

$\nabla \bar{z}_{x_s}^- \equiv$ Gradiente mínimo de medida en la dirección de la trayectoria.

$\nabla \bar{z}_{tr_b}^- \equiv$ Gradiente mínimo de medida en la dirección que une los USVs.

$\nabla \bar{z}_{min} \equiv$ Gradiente mínimo de medida estimado.

Finalmente, como primera aproximación, se considera que la línea de nivel o de gradiente nulo es perpendicular a la dirección de gradiente máximo de contaminación. Por tanto, una vez obtenida la dirección de la línea de máximo gradiente, mediante una rotación puede ser obtenida la dirección de gradiente nulo. La Figura 12, imagen d) muestra gráficamente el cálculo completo de la dirección máxima, mínima y línea de nivel nula.

Todas estas direcciones serán utilizadas por los algoritmos de guiado para establecer un nuevo rumbo a la trayectoria.

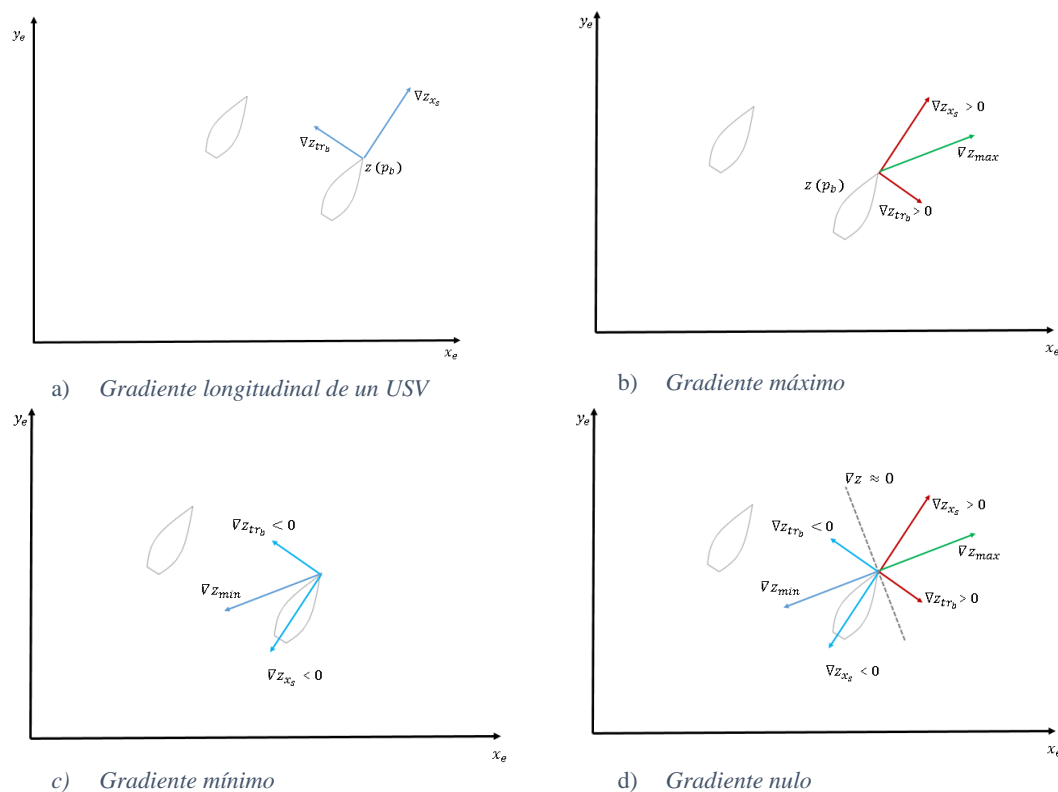


Figura 12 Cálculo cooperativo de gradientes de concentración de contaminante

3.3.4 Configuración USV líder – USV seguidor

Dentro de las opciones del control distribuido y cooperativo existen diversas técnicas para establecer los objetivos de control y de posicionamiento para los USVs dentro de una misma flota.

Si se aborda el problema del posicionamiento dentro de la formación, acorde a (Balch & Arkin, 1998), se pueden establecer al menos tres técnicas diferenciadas para conseguir que los USVs mantengan una geometría relativa, referenciados a un punto central, referenciados a un líder o referenciados al vecindario.

Desde el punto de vista de los objetivos de control, estos se pueden clasificar como objetivos locales o globales. En los objetivos de control local la información y los objetivos se establecen de cara a un corto periodo de tiempo. En los objetivos globales, se utiliza información que permita que se cumplan objetivos generales a largo plazo.

En este trabajo, se ha decidido que el USV utilizado como líder tenga la tarea de modificar la trayectoria de la flota para alcanzar los objetivos de la misión. Es decir, dicho USV tiene un objetivo de control a largo plazo o global. Mientras que, el segundo USV es considerado en todo momento como un sensor satélite y su objetivo de control no va más allá de mantener la posición adecuada respecto al USV líder.

3.3.5 Modos de operación

Tras haber analizado la información necesaria para los diferentes modos de operación del USV, se va a describir dichos modos brevemente.

- Navegación en paralelo: Este modo de operación será asignado al USV satélite (o seguidor) y tiene por objetivo mantener dicho USV auxiliar a una distancia lateral y longitudinal fija del USV principal (o líder).
- Localización del máximo: Este modo está asociado a la misión de encontrar un nivel máximo de biocontaminante. Está asociado al USV líder y requiere de un USV satélite.
- Seguimiento de una curva de nivel: Está asociado a la misión de encontrar y recorrer líneas de nivel a valores prefijados. Tiene distintos submodos de funcionamiento que serán detallados posteriormente. Está asociado al USV líder y requiere de un USV satélite.
- Navegación a un punto fijo: Puede ser asignado a cualquier USV, líder o no. Su único objetivo es mover un USV por el agua hasta un punto fijo.
- Esquiva de obstáculos: Este modo es automático, lo que quiere decir que se activa por encima del resto de modos de operación. Su misión es evitar que un USV tenga una colisión con algún obstáculo u otro USV de la misión.

La ley de guiado final quedará determinada por la combinación de uno o varios de estos modos. Concretamente, los 4 primeros modos son incompatibles entre sí, es decir, activar cualquiera de ellos desactiva el resto.

Cuando se activa el modo de esquiva de obstáculos, este modo adquiere toda la importancia y el modo de guiado que estaba activado previamente pasa a tener un peso del 10% (según la ecuación (24)) Es decir, se ponderan los gradientes obtenidos para el modo original y de esquiva de obstáculos, de forma que la tarea principal del USV sea evitar el choque.

A continuación, se describe en detalle el funcionamiento de cada uno de los cinco modos desarrollados en este TFM.

3.3.6 Navegación en paralelo

Cuando se activa este modo de operación se trata de generar en el USV satélite una trayectoria que asegure que éste se encuentra en una posición relativa concreta con respecto al USV principal. Esto permitirá en el resto de modos de operación que el cálculo del gradiente se realice en direcciones casi perpendiculares.

Se consideran los dos USV navegando en un punto concreto del espacio y con un rumbo de referencia para el USV principal:

$$\begin{aligned} \bar{x}_e^l &= (x_e^l, y_e^l) \\ \theta_{ref}^l &= \theta \\ \bar{x}_e^s &= (x_e^s, y_e^s) \end{aligned} \tag{29}$$

Donde:

$\bar{x}_e^l \equiv$ Posición del USV líder proyectada en ejes tierra.

$\bar{x}_e^s \equiv$ Posición del USV satélite proyectada en ejes tierra.

$\theta_{ref}^l \equiv$ Rumbo de referencia para la flota.

Se desea que el USV seguidor esté posicionado geoméricamente respecto al USV líder a una distancia lateral y a una distancia longitudinal, ambas distancias proyectadas según la dirección del rumbo de referencia, como se puede ver en la Figura 13 . En este caso se ha seleccionado que el USV satélite navegue a 30 metros a la izquierda y 2 metros por detrás del USV principal según este rumbo. Estos valores pueden ser escalados según la precisión de los sensores y la amplitud de la zona a recorrer por la flota.

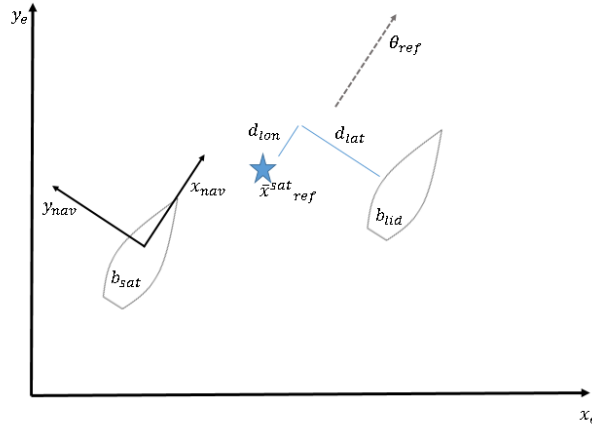


Figura 13 Esquema navegación paralelo

Para lograr el objetivo, es mejor formularlo en unos ejes paralelos al rumbo de referencia y centrado en el USV satélite, en vez de los ejes tierra del sistema.

$$\begin{aligned} \bar{x}_{nav}^l &= (x_{nav}^l, y_{nav}^l) \\ \bar{x}_{nav}^s &= (0, 0) \end{aligned} \quad (30)$$

Donde:

$\bar{x}_{nav}^l \equiv$ Posición del USV líder proyectada en ejes de navegación.

$\bar{x}_{nav}^s \equiv$ Posición del USV seguidor proyectada en ejes de navegación.

En dichos ejes, para cumplir la misión, el USV satélite debe navegar hacia un punto virtual que cumple la geometría exigida con respecto al USV líder. Es decir, se genera un punto objetivo para el USV satélite situado a la distancia lateral y longitudinal deseada del USV líder.

$$\begin{aligned} x_{nav}^{ref\ s} &= (x_{nav}^l, y_{nav}^l) - (d_{lon}, d_{lat}) \\ &= (x_{nav}^l, y_{nav}^l) - (2, -30) \end{aligned} \quad (31)$$

Donde:

$x_{nav}^{ref\ s} \equiv$ Punto de referencia para el USV satélite en ejes de navegación.

$d_{lon} \equiv$ Distancia longitudinal, proyectada según el rumbo de referencia, que debe existir entre el USV líder y el USV seguidor.

$d_{lat} \equiv$ Distancia lateral proyectada según el rumbo de referencia, que debe existir entre el USV líder y el USV seguidor.

Este punto de referencia ha sido obtenido en ejes de navegación. Antes de ser usado por el algoritmo de los campos virtuales para generar las consignas de rumbo y de velocidad se le aplican las siguientes reglas:

- En caso de que el punto de referencia en los ejes de navegación esté por delante del USV seguidor, es decir, el USV seguidor debe avanzar para colocarse en paralelo al USV líder, el punto de referencia longitudinal se mantiene. Si el USV satélite tiene un error inferior a 5 metros con respecto al punto de referencia, se limita a 15° la variación máxima de rumbo que puede realizar dicho USV. En el caso de que el USV satélite se encuentre a mayor distancia de 5 metros, el punto de objetivo lateral es exactamente el punto de referencia calculado. Para regular la velocidad máxima del USV seguidor se incluye una ley proporcional con factor de 0.1 al error entre la posición actual y el punto objetivo.
- Si el USV seguidor se encuentra por delante del USV líder según la dirección de navegación deseada, se disminuye su velocidad máxima a 0.5 m/s y se navega en dirección del rumbo de referencia. Además, mediante una ley integral con factor de -0.01 se comienza la parada total del USV seguidor. De esta manera, el USV seguidor espera al USV líder y, en el caso de que el USV líder haya parado definitivamente, el USV seguidor también se frena definitivamente.

Todo esto se expresa matemáticamente mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 & x(1)_{nav}^{obj s} \begin{cases} x(1)_{nav}^{ref s} & \text{si } x(1)_{nav}^{ref s} > 0 \\ 2 & \text{si } x(1)_{nav}^{ref s} < 0 \end{cases} \\
 x(2)_{nav}^{obj s} & \begin{cases} x(2)_{nav}^{ref s} & \text{si } \|x_{nav}^{ref s}\| > 5 \text{ o } \left| \frac{x(2)_{nav}^{ref s}}{x(1)_{nav}^{ref s}} \right| < 0.25 \\ x(2)_{nav}^{ref s} & \text{si } \|x_{nav}^{ref s}\| > 0 \text{ y } \left| \frac{x(2)_{nav}^{ref s}}{x(1)_{nav}^{ref s}} \right| < 0.25 \\ \text{sign}(x(2)_{nav}^{ref s}) \cdot x(1)_{nav}^{ref s} \cdot 0.25 & \text{si } \|x_{nav}^{ref s}\| > 0 \text{ y } \left| \frac{x(2)_{nav}^{ref s}}{x(1)_{nav}^{ref s}} \right| > 0.25 \\ 0 & \text{si } \|x_{nav}^{ref s}\| < 0 \end{cases} \quad (32) \\
 v_{max} & \begin{cases} 1.0 + 0.1 \cdot \|x_{nav}^{ref s}\| & \text{si } x(1)_{nav}^{ref s} > 0 \text{ y } \|x_{nav}^{ref s}\| < 5 \\ 1.5 & \text{si } x(1)_{nav}^{ref s} > 0 \text{ y } \|x_{nav}^{ref s}\| > 5 \\ 0.5 - 0.01 \cdot \int dt & \text{si } x(1)_{nav}^{ref s} < 0 \end{cases} \\
 & x_e^{obj s} = DCM_{e nav}(\theta_{refl}) \cdot x_{nav}^{obj s}
 \end{aligned}$$

Donde:

$x_{nav}^{ref s} \equiv$ Punto de referencia a alcanzar por el USV seguidor expresado en unos ejes paralelos al rumbo de referencia.

x_{nav}^{obj} \equiv Punto objetivo usado por el algoritmo de los campos virtuales para el USV seguidor expresado en unos ejes paralelos al rumbo de referencia.

x_e^{obj} \equiv Punto objetivo usado por el algoritmo de los campos virtuales para el USV seguidor expresado en ejes tierra.

θ_{refl} \equiv Rumbo de referencia para la flota.

3.3.7 Localización del máximo

Este modo debe ser asignado al USV líder, ya que es el responsable de localizar el punto de máximo nivel de biocontaminantes. Además, el líder está a cargo de recopilar la información del USV satélite, calcular la consigna de su rumbo y enviarle dicha consigna al USV satélite (para que la tenga en cuenta a la hora de calcular su dirección de avance).

Como se puede observar en la Figura 14, para poder realizar este proceso se recurre al algoritmo desarrollado para encontrar el gradiente máximo, que ha sido explicado en la sección 3.3.3.

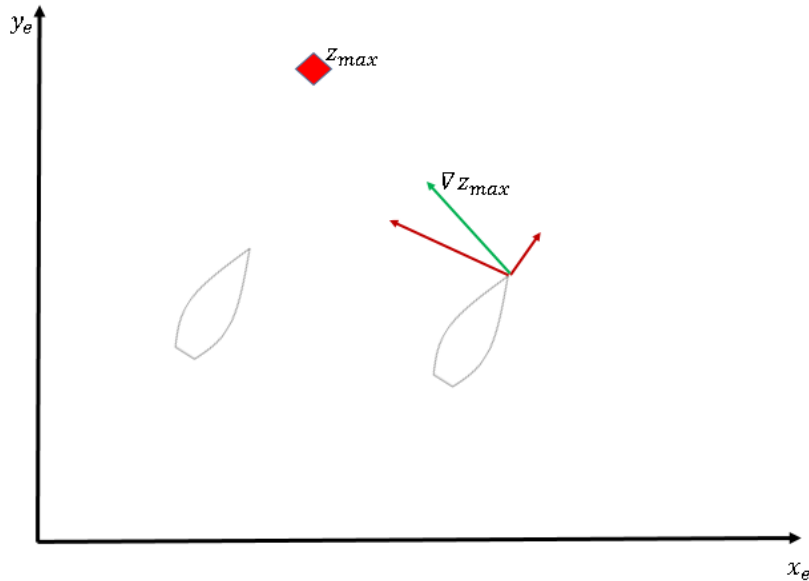


Figura 14 Esquema navegación encuentra máximo

Una vez que se ha obtenido la dirección de gradiente máximo, este es establecido como nuevo rumbo de navegación. Además, para evitar cambios bruscos en la trayectoria que lleven al mal funcionamiento del USV, el máximo cambio de rumbo está limitado a 5°. Sin embargo, se añade la excepción de permitir cambios de dirección a 180° para evitar problemas con los cambios de fase. Por tanto:

$$\Delta\theta = \begin{cases} \theta_{max} - \theta_{actual} & -5.0^\circ < \Delta\theta < 5.0^\circ \\ -5.0^\circ & -165^\circ \leq \Delta\theta \leq -5.0^\circ \\ 5.0^\circ & 165^\circ \geq \Delta\theta \geq 5.0^\circ \\ 180^\circ & abs(\Delta\theta) \geq 165.0^\circ \end{cases} \quad (33)$$

Donde

$\Delta\theta \equiv$ Variación de rumbo.

$\theta_{max} \equiv$ Rumbo de gradiente máximo.

$\theta_{actual} \equiv$ Rumbo actual.

Finalmente, se establece un punto objetivo para el USV a 50.0 metros en la dirección del nuevo rumbo calculado.

$$\bar{x}_{ref}^l = \bar{x}_{pb}^l + 50.0 \cdot (\cos(\theta_{actual}^l + \Delta\theta), \sin(\theta_{actual}^l + \Delta\theta)) \quad (34)$$

Donde:

$\bar{x}_{ref}^l \equiv$ Nuevo punto objetivo para el USV líder.

$\bar{x}_{pb}^l \equiv$ Posición actual del USV líder.

$\theta_{actual}^l \equiv$ Rumbo actual del USV líder.

$\Delta\theta \equiv$ Variación de rumbo calculada por el algoritmo.

3.3.8 Seguimiento curva de nivel

Este modo debe ser asignado al USV líder y tiene como objetivo mantenerse en una línea de nivel. El espacio de trabajo está basado en varias fases diferenciadas acorde a la lectura de ambos USVs. Estas zonas, esquematizadas en la Figura 15, están explicadas brevemente a continuación:

- Zona exterior (en azul): El nivel de biocontaminantes es inferior al de la línea de nivel establecida con un margen.
- Zona interior (en naranja): El nivel de biocontaminantes es superior al de la línea de nivel establecida con un margen.
- Zona franja (en blanco): El nivel de biocontaminantes es igual al nivel de la línea buscada con un margen.

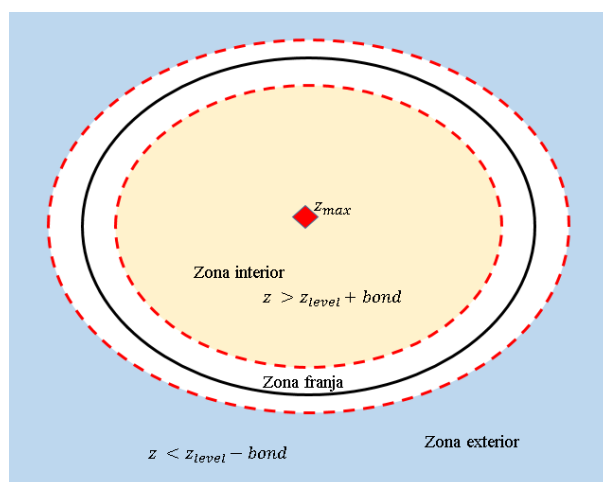


Figura 15 Zonas de trabajo sigue línea

El algoritmo tiene un funcionamiento distinto dependiendo de la posición relativa de los USVs en este espacio de trabajo.

➤ Ambos USVs en zona exterior:

Si ambos USVs se encuentran en la zona exterior, se aplica el mismo algoritmo que se utiliza para localizar el máximo (explicado en la sección 3.3.7), ya que esto permite que los USVs se desplacen hacia una zona con un nivel de contaminación más alto, y por lo tanto, que puedan alcanzar un nivel de contaminación similar a la la curva de nivel consignada.

➤ Ambos USVs en zona interior:

Si ambos USVs se encuentran en la zona interior, se aplica un algoritmo similar al caso anterior pero en lugar de navegar en la dirección del máximo se navega en la dirección del mínimo.

➤ Un USV en franja y el otro fuera de ella:

En este caso, el algoritmo aplica un rumbo en la dirección del USV que está en el interior de la franja. Además, se incluye un factor integral en la variación del rumbo.

El comportamiento es diferente según el USV que se encuentre en la franja.

- USV líder en el interior de la franja, tal y como se muestra a la izquierda de la Figura 16. Puesto que el USV líder siempre navegará a la derecha del USV satélite según el rumbo de referencia, se establece una variación de rumbo que disminuya el valor del rumbo de referencia para la flota.

$$\Delta\theta = -30^\circ - 0.2^\circ \int dt \leq -45^\circ \quad (35)$$

- USV líder en el exterior de la franja, como se muestra a la derecha de la Figura 16. Se establece una variación de rumbo que aumenta el valor del rumbo de referencia de la flota.

$$\Delta\theta = 30^\circ + 0.2^\circ \int dt \leq 45^\circ \quad (36)$$

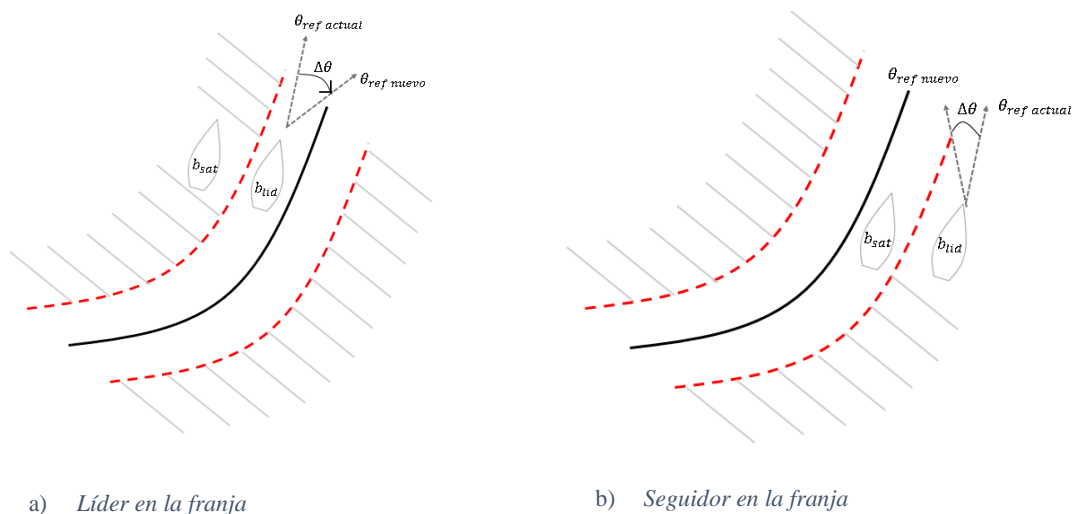


Figura 16 Esquema de USV en el interior de la franja

➤ Ambos USVs en el interior de la franja

Una vez ambos USVs se encuentran en el interior de la franja, el objetivo es mantener a los USVs dentro de la misma. En primer lugar, podría pensarse que bastaría con mantener el rumbo de la trayectoria pero este método se demostró poco eficiente ya que, mediante este mecanismo, los USVs no tienen un método para alinearse con la curva de nivel elegida. Por tanto, si el rumbo inicial de la flota tiene un gran ángulo relativo con la propia dirección principal de la línea de nivel, los USV pueden incluso quedar oscilando de extremo a extremo de la franja.

Por tanto, es necesario que la flota de USV modifique progresivamente el rumbo para mantenerlo paralelo al que marca localmente la propia curva de nivel. Una curva de nivel mantiene un gradiente de contaminación nulo a lo largo de ella. En la sección 3.3.3 se obtuvo la dirección de gradiente nulo y es este algoritmo el que se usa para determinar el rumbo de la curva de nivel.

Nótese además que en este caso, los USVs tienen dos posibles sentidos de navegación. El criterio que sigue el algoritmo es seleccionar el sentido que requiera menos variación de rumbo. Este proceso queda reflejado en la parte superior de la

Figura 17 donde se aprecian los dos sentidos posibles y los respectivos cambios de rumbo a realizar.

Con este mecanismo los USVs ya navegan en el interior de la franja pero, de momento, no hay control sobre la posición que ocupan los USVs dentro de dicha franja. Es decir, los USVs pueden navegar totalmente por el exterior, por el interior o relativamente en el centro de la misma. Aparentemente esto tiene poca importancia, especialmente si el motivo para definir una franja de navegación es que cualquier punto de ella se considera la propia línea de nivel. Aun así, se ha comprobado que, si se fuerza a los USVs a navegar los más centrados posible dentro de la misma, se aumenta la

robustez del algoritmo frente a cambios en la curvatura y se evita que alguno de los USVs se salga pudiendo provocar trayectorias indeseadas. Por esto, se ha incluido una corrección sobre el rumbo a seguir que fuerza al USV principal a dirigirse lentamente a la línea de nivel deseada como se puede apreciar en los dos ejemplos de la parte inferior de la Figura 17. Para ello se recurre de nuevo al cálculo de la dirección de gradiente máximo y mínimo según corresponda.

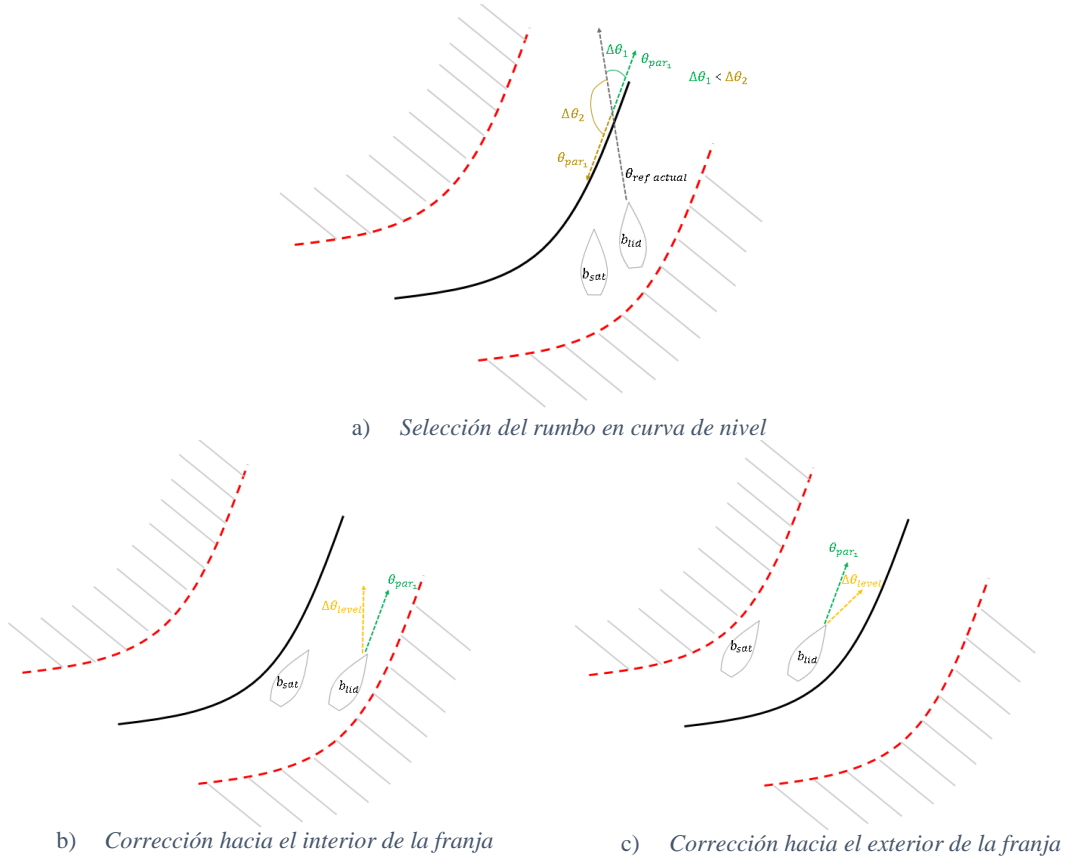


Figura 17 Esquema USVs dentro de franja

Por los motivos anteriormente expuestos, la variación de rumbo que se debe aplicar sobre la flota es una combinación entre navegar paralelos al gradiente cero y centrarse en la propia franja. Además, los cambios de rumbo del líder para navegar en paralelo ($\Delta\theta_{par}$) a la línea de nivel están limitados a 45° , mientras que las correcciones para alcanzar el centro de la franja ($\Delta\theta_{level}$) están limitadas de forma proporcional al error de contaminación entre la curva de nivel seguida y el nivel actual. El factor de proporcionalidad es 15° y se normaliza con la semiamplitud de la franja.

$$\Delta\theta_{par} = \begin{cases} \theta_{par} - \theta_{actual}, & -45^\circ < \theta_{par} - \theta_{actual} < 45^\circ \\ 45^\circ, & \theta_{par} - \theta_{actual} \geq 45^\circ \\ -45^\circ, & \theta_{par} - \theta_{actual} \leq -45^\circ \end{cases}$$

$$\Delta\theta_{level} = \begin{cases} 15^\circ \frac{z_{level} - z}{bond} \text{sign}(\theta_{max} - (\theta_{actual} + \Delta\theta_{par})), & z_{level} - z > 0 \\ 15^\circ \frac{z_{level} - z}{bond} \text{sign}(\theta_{min} - (\theta_{actual} + \Delta\theta_{par})), & z_{level} - z < 0 \end{cases} \quad (37)$$

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{par} + \Delta\theta_{level}$$

Donde:

$\Delta\theta \equiv$ Variación de rumbo total.

$\Delta\theta_{par} \equiv$ Variación de rumbo para mantener dicho rumbo paralelo a la curva de nivel.

$\theta_{par} \equiv$ Rumbo paralelo a la curva de nivel.

$\theta_{actual} \equiv$ Rumbo actual del USV líder.

$\theta_{max} \equiv$ Rumbo de máximo nivel de concentración de contaminante.

$\theta_{min} \equiv$ Rumbo de mínimo nivel de concentración de contaminante.

$\Delta\theta_{level} \equiv$ Variación del rumbo para llevar a la flota al centro de la franja.

$z_{level} \equiv$ Nivel de concentración de la curva de nivel seguida.

$z \equiv$ Nivel de concentración medido.

Como un apoyo adicional al algoritmo, cuando se produce una transición entre el caso de un único USV dentro de la franja al caso de ambos USVs dentro, se prioriza el sentido paralelo al rumbo que estaban siguiendo los USVs. Esto evita que si momentáneamente uno de los USVs se sale de la franja, exista un cambio de rumbo excesivo que haga a la pareja de USVs tomar el rumbo opuesto al que seguían inicialmente.

Finalmente, se establece un punto objetivo para el USV a 50.0 metros en la dirección del nuevo rumbo calculado.

$$\bar{x}_{ref}^l = \bar{x}_{pb}^l + 50.0 \cdot (\cos(\theta_{actual}^l + \Delta\theta), \sin(\theta_{actual}^l + \Delta\theta)) \quad (38)$$

Donde:

$\bar{x}_{ref}^l \equiv$ Nuevo punto objetivo para el USV líder.

$\bar{x}_{pb}^l \equiv$ Posición actual del USV líder.

$\theta_{actual}^l \equiv$ Rumbo actual del USV líder.

$\Delta\theta \equiv$ Variación de rumbo calculada por el algoritmo.

3.3.9 Navegación a un punto fijo

Este modo de navegación puede ser aplicado a cualquier USV sin necesidad de que tenga asignado un compañero. Este algoritmo es tan sencillo como que una vez asignado el punto objetivo se utiliza el método del campo atractivo virtual para obtener una velocidad y dirección de navegación del USV.

3.3.10 Esquiva de obstáculos

Este algoritmo no es asignado como tal a ningún USV. Cada vez que se calcula el algoritmo de GNC, se comprueban los posibles obstáculos. Si se detecta algún USV, objeto o accidente geográfico a una distancia menor de una determinada se activa automáticamente el algoritmo. Dicha distancia ha sido fijada en 25m pero puede ser modificada acorde a la precisión de los sensores de navegación.

Por tanto, para cada obstáculo detectado, se calcula el correspondiente campo de repulsión explicado en la sección 3.3.2. La velocidad y la dirección es la suma de todos los campos de repulsión asociados a los diferentes obstáculos. Finalmente, el resultado de este algoritmo es combinado con el del algoritmo de guiado para cumplir el objetivo que esté siendo comandado en cada momento. Esta combinación, tal y como ya se ha explicado, se hace mediante pesos dándole mayor importancia a evitar colisiones.

3.4 Control

Dadas unas consignas de rumbo y velocidad de avance del USV, es necesario encontrar la posición que deben alcanzar los actuadores del USV para lograr alcanzar estado deseado.

En el USV las variables de control son su rumbo y velocidad, mientras que las variables manipuladas, sobre las que se puede actuar, son la fuerza de empuje del USV y la dirección de dicho empuje. Es por tanto un sistema con múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO, Multiple Input-Multiple Output).

Para analizar el problema de control de una manera sencilla se linealiza el modelo dinámico del USV alrededor un punto de equilibrio. Esto permite encontrar unas expresiones lineales que relacionan las entradas y las salidas, y ajustar los lazos de control necesarios.

Partiendo de las ecuaciones del movimiento en ejes cuerpo e incluyendo la dinámica de los actuadores se tiene el siguiente modelo.

$$\begin{aligned}
 P_b \cos(\theta_{wj}) - \mu_{surge} \cdot l_b \cdot u - \mu_{2surge} \cdot l_b \cdot |u| \cdot u &= m(\dot{u} - rv) \\
 P_b \sin(\theta_{wj}) - \mu_{sway} \cdot l_b \cdot v - \mu_{2sway} \cdot l_b \cdot |v| \cdot v &= m(\dot{v} + ru) \\
 -P_b \cdot l_{wj} \cdot \sin(\theta_{wj}) - \mu_{\omega} \cdot l_b \cdot \dot{\theta} - \mu_{\omega_2} \cdot l_b \cdot |\dot{\theta}| \cdot \dot{\theta} &= I_z \dot{r} \\
 \dot{\theta} &= r \\
 \dot{P}_b &= \frac{P_{bref} - P_b}{\tau_p} \\
 \dot{\theta}_{wj} &= \frac{\theta_{wjref} - \theta_{wj}}{\tau_{wj}}
 \end{aligned} \tag{39}$$

Linealizando el modelo anterior alrededor de un punto de operación:

$$\begin{aligned}
 m\Delta\dot{u} - m(v_0\Delta r + r_0\Delta v) &= \Delta P_b \cos(\theta_{wj_0}) + P_{b_0}(-\sin(\theta_{wj_0}))\Delta\theta_{wj} \\
 - \mu_{surge} l_b \Delta u - \mu_{2surge} l_b 2sign(u_0)\Delta u & \\
 m\Delta\dot{v} + m(u_0\Delta r + r_0\Delta u) &= \Delta P_b \sin(\theta_{wj_0}) + P_{b_0}(\cos(\theta_{wj_0}))\Delta\theta_{wj} \\
 - \mu_{sway} l_b \Delta v - \mu_{2sway} l_b 2sign(v_0)\Delta v &
 \end{aligned} \tag{40}$$

$$I_z \Delta \dot{r} = -\Delta P_b l_{wj} \sin(\theta_{wj_0}) - P_{b_0} l_{wj} \cos(\theta_{wj_0}) \Delta \theta_{wj} - \mu_\omega l_b \Delta \dot{\theta} - \mu_{\omega_2} l_b 2 \text{sign}(\dot{\theta}_0) \Delta \dot{\theta}$$

$$\Delta \dot{\theta} = \Delta r$$

$$\Delta \dot{P}_b = \frac{\Delta P_{b_{ref}} - \Delta P_b}{\tau_p}$$

$$\Delta \dot{\theta}_{wj} = \frac{\Delta \theta_{wj_{ref}} - \Delta \theta_{wj}}{\tau_{wj}}$$

Se selecciona un punto de operación con los siguientes valores:

$$\begin{aligned} u_0 &= 1 \frac{m}{s} \\ v_0 &= 0 \frac{s}{s} \\ r_0 &= 0 \frac{rad}{s} \\ \theta_0 &= 0 \text{ rad} \\ \theta_{wj} &= 0 \text{ rad} \\ P_b &= 1.229 \text{ N} \end{aligned} \quad (41)$$

Obteniéndose finalmente, tras sustituir los valores numéricos de punto de operación y reescribir la expresión matricialmente, la siguiente expresión de la dinámica en variables de estado:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{u} \\ \Delta \dot{v} \\ \Delta \dot{r} \\ \Delta \dot{\theta} \\ \Delta \dot{\theta}_{wj} \\ \Delta \dot{P}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.72 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2941 \\ 0 & -0.02941 & -10 & 0.3615 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.5784 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -10 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \\ \Delta r \\ \Delta \theta \\ \Delta \theta_{wj} \\ \Delta P_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 10 & 0 \\ 0 & 10 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_{wj_{ref}} \\ \Delta P_{b_{ref}} \end{bmatrix} \quad (42)$$

Además, como las variables controladas o salidas del modelo son la velocidad y rumbo del USV, la ecuación de medida es:

$$\begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \\ \Delta r \\ \Delta \theta \\ \Delta \theta_{wj} \\ \Delta P_b \end{bmatrix} \quad (43)$$

Si se transforma el modelo de su representación en variables de estado a su representación matricial en funciones de transferencia, es posible observar fácilmente, como el problema de control multivariable linealizado queda totalmente desacoplado. Es decir, es posible usar un lazo de control independiente por cada par de variables controladas y manipuladas.

$$\begin{bmatrix} \Delta u(s) \\ \Delta \theta(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{2.941}{s^2 + 10.72s + 7.2} \\ \frac{-5.784}{s^3 + 10s^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_{wjref}(s) \\ \Delta P_b(s) \end{bmatrix} \quad (44)$$

Para controlar cada uno de los lazos se sintoniza un controlador Proporcional, Integrativo y Derivativo (PID). Como criterio de sintonización para ambos casos se establece una sobre elongación inferior al 10%, un error en estado estacionario inferior al 2% y un tiempo de subida inferior a 1 segundo.

La Tabla 6 muestra el PID seleccionado para el lazo de velocidad. Además, se aplicará la señal de control sobre el USV cada 0.1s.

K_p	K_i	K_d
15	13	1.8

Tabla 6 Parámetros PID lazo de velocidad

La respuesta en el dominio del tiempo del comportamiento en velocidad del USV se muestra en la Figura 18. Como se puede observar es una respuesta rápida, con un tiempo de subida de 0.25 segundos, una sobre elongación del 9.5% y un error en estado estacionario del 0%. Esta respuesta permite al USV seguir cambios rápidos en la consigna de velocidad.

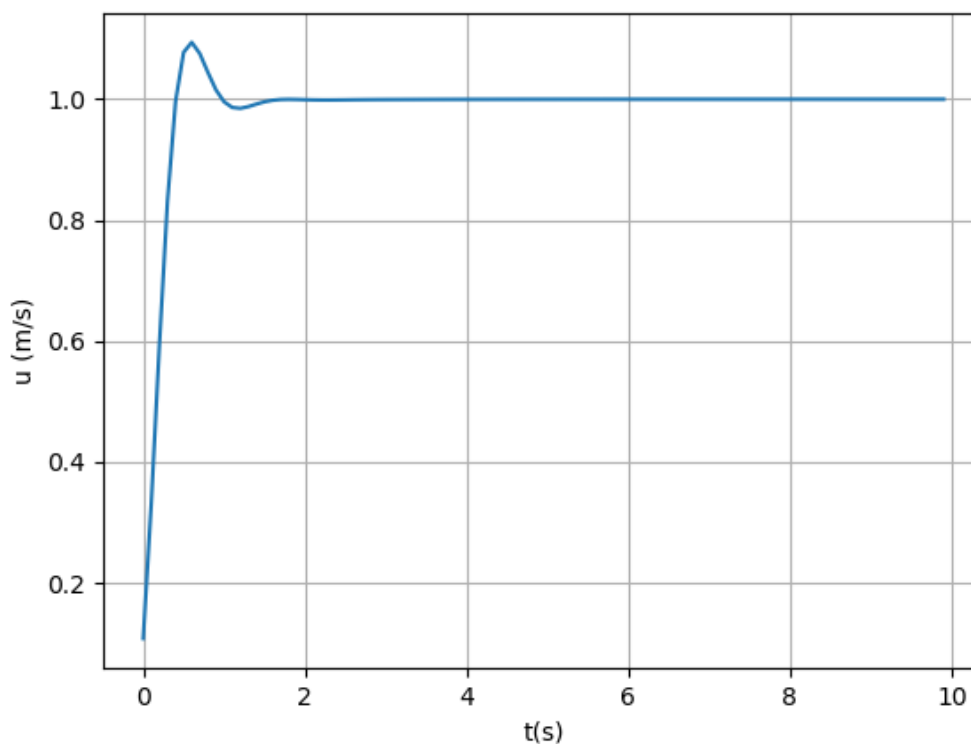


Figura 18 Respuesta escalón en lazo cerrado lazo de velocidad

3 GUIADO, NAVEGACIÓN Y CONTROL

La Tabla 7 muestra el PID seleccionado para el lazo de rumbo. Además, se aplicará la señal de control sobre el USV cada 0.1s. Nótese que todas las ganancias del PID son negativas, esto se debe a que incrementar el ángulo del sistema de propulsión waterjet provoca momento negativo alrededor del eje z del USV. Esto significa que el USV comienza a disminuir su rumbo.

K_p	K_i	K_d
-9	-0.05	-5.5

Tabla 7 Parámetros PID lazo de rumbo

La respuesta en el dominio del tiempo del comportamiento en rumbo del USV se muestra en la Figura 19. Como se puede observar es una respuesta rápida, con un tiempo de subida de 0.66 segundos, una sobre elongación del 9.5% y un error en estado estacionario del 0.3%. Esta respuesta permite al USV seguir cambios rápidos en la consigna de rumbo.

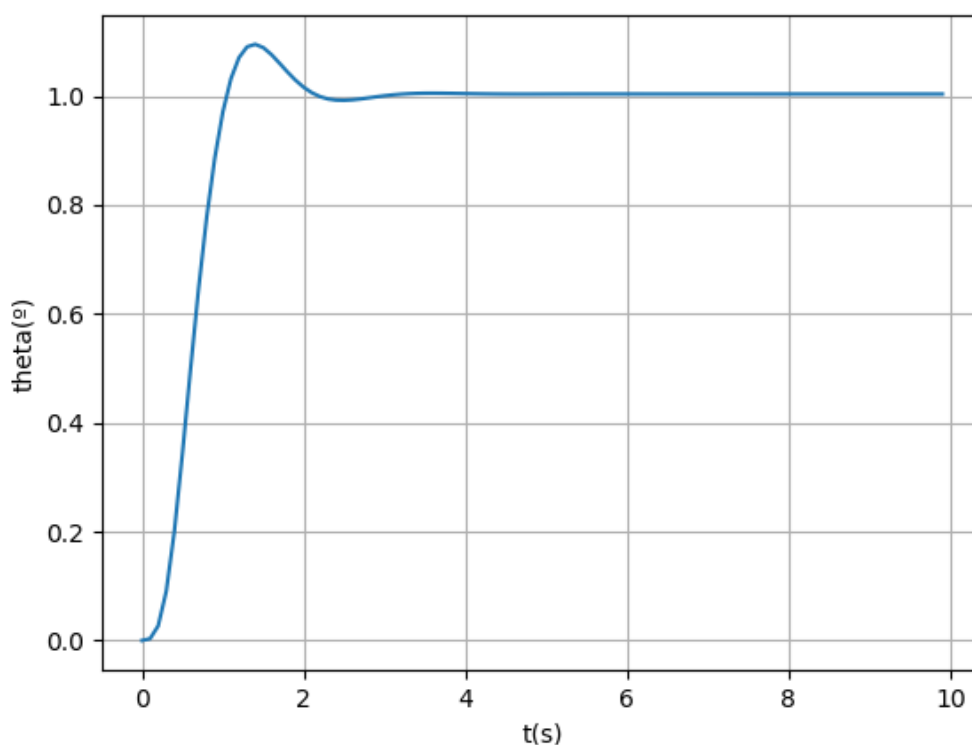


Figura 19 Respuesta escalón en lazo cerrado lazo de rumbo

3.5 Tiempo de ciclo de los algoritmos

Cada uno de los lazos anteriores, el de control, guiado y navegación, es actualizado a una frecuencia distinta.

Como ya se ha mencionado, el lazo interior, de control, es actualizado cada 0.1 segundos.

Por encima de este lazo, los diferentes modos de guiado se integran en un único algoritmo que se ejecuta también cada 0.1 s. El objetivo es que en todos los ciclos de control se actualice el modo de detección de obstáculos. El resto de modos de guiado tienen sus propios contadores de tiempo dentro del algoritmo de guiado. Este contador

3 GUIADO, NAVEGACIÓN Y CONTROL

simula el comportamiento de diferentes timers software de forma que cada vez que uno de los contadores alcanza su valor máximo se ejecuten los cálculos propios del modo de guiado correspondiente. El modo de navegación en paralelo tiene su tiempo de ciclo fijado en 1 s, y el de localización del máximo y de seguimiento de la curva de nivel se ejecutan cada 5 s.

Finalmente, no se debe olvidar el ciclo externo del gestor de tareas, que comprueba cuando se debe cambiar de modo de navegación, y que mantiene un ciclo de aplicación de 0.1 segundos (es decir, igual al de control y de esquivas de obstáculos).

La siguiente figura esquematiza la relación entre los diferentes lazos del sistema completo que han sido desarrollados durante este TFM, y resume los ciclos de trabajo de cada subsistema o modo de navegación.

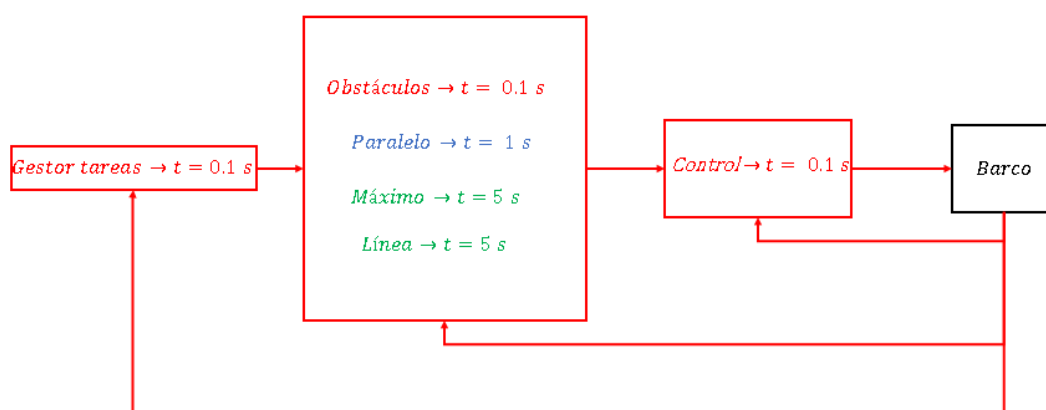


Figura 20 Tiempo de ciclo de cada lazo

4. PRUEBAS UNITARIAS CON SENSORES IDEALES

En este capítulo se realizan pruebas unitarias e independientes sobre cada uno de los modos de operación presentados en los capítulos anteriores. Para ello, se generan escenarios en los que la misión que se debe realizar está formada por un único modo de operación. Además, se incluyen manchas de contaminación de distintas características, para probar la efectividad del sistema desarrollado en diferentes escenarios

Se prueban todos los algoritmos sin incluir efectos realistas en los sensores. Es decir, no se incluyen las dinámicas propias de los sensores ni las diferentes fuentes de error que se modelaron en el capítulo 2.

Nótese que en las figuras que se representan a lo largo del capítulo los USVs están a distinta escala que la trayectoria seguida. Concretamente, se han representado a una escala 5:1 respecto al resto de la figura, esto permite apreciar el rumbo de cada USV durante la trayectoria.

4.1 Navegar a un punto fijo

En esta prueba se solicita al USV que describa un recorrido marcado por una serie de puntos de paso. Además, una vez que el USV esté a menos de 20 m de cada punto de paso, el gestor de tareas solicitará automáticamente que el USV se mueva hacia el punto siguiente, provocando un cambio de su rumbo. Una vez alcanzado el último punto, el USV deberá permanecer ahí. En la

Figura 21 se observan distintos instantes de la trayectoria solicitada. En la imagen a) el USV acaba de iniciar la trayectoria y se dirige hacia el primer punto marcado por un 1 en la figura. A continuación, la imagen b) muestra cómo el USV alcanza el primer punto y comienza su viaje hacia el segundo, lo que provoca un giro de 135° . En c) se aprecia la trayectoria de aproximación al punto 2 y su posterior cambio de rumbo hacia el punto 3. El final de la trayectoria se muestra en la imagen d), donde además se aprecia que el USV reduce la velocidad al llegar a dicho punto. Finalmente, la imagen e) muestra la visión general de la trayectoria seguida por el USV.

4 PRUEBAS UNITARIAS CON SENSORES IDEALES

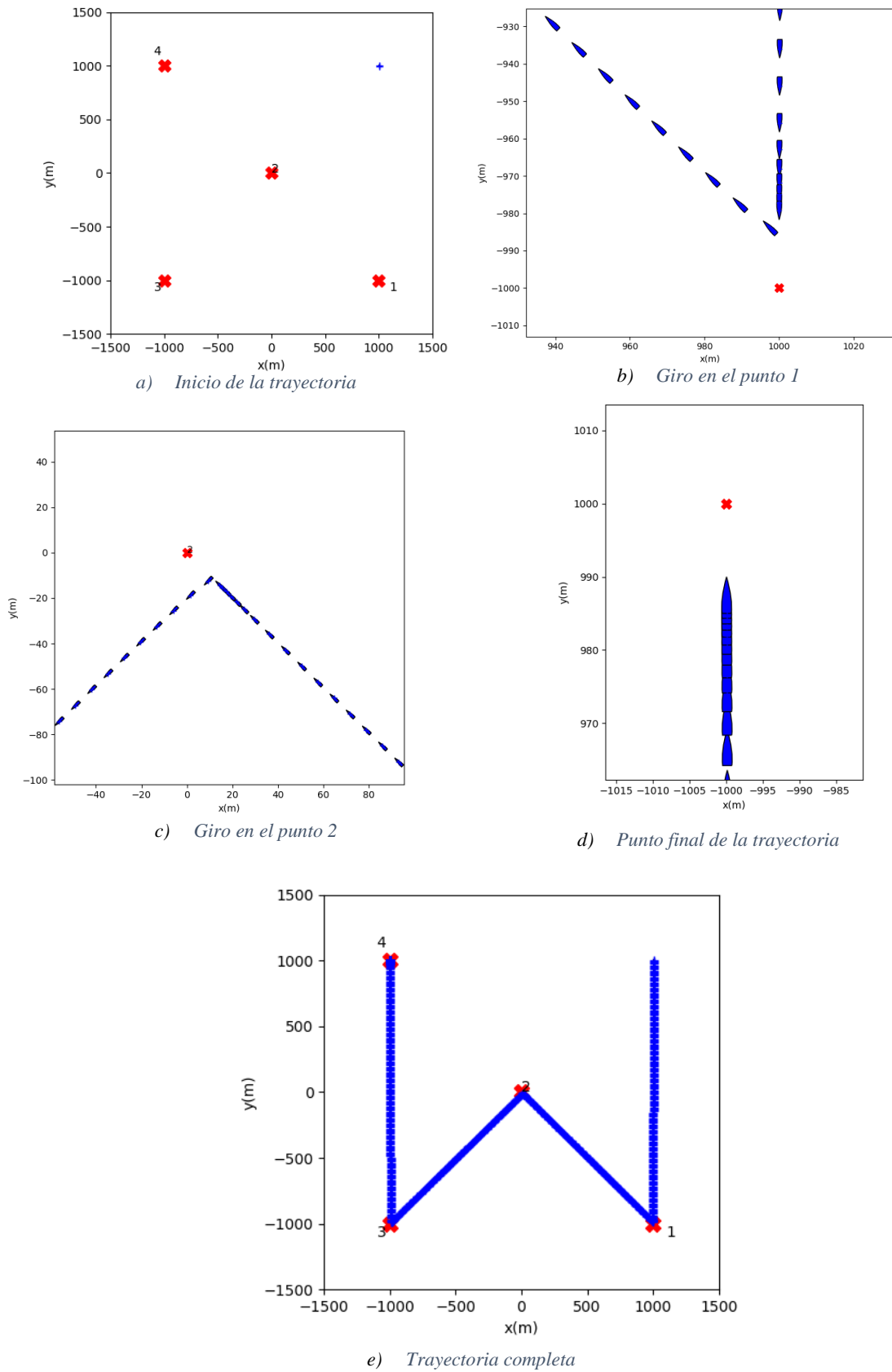


Figura 21 Ruta navegación por puntos

4.2 Navegar en paralelo

Se exige ahora a una pareja de USVs realizar la misma maniobra que en la sección anterior. En este caso, el USV líder, en azul, realiza la maniobra mientras que el USV seguidor, en morado, debe mantener su posición relativa a $(2, -30)$ metros en dirección del rumbo de navegación. Tal y como se aprecia en la imagen a) dentro de la Figura 22, ambos USVs parten de una posición relativa distinta de la nominal. En las imágenes b) y c), el USV seguidor recorta la distancia con el USV líder hasta que finalmente el USV seguidor alcanza la posición relativa nominal (Imagen d).

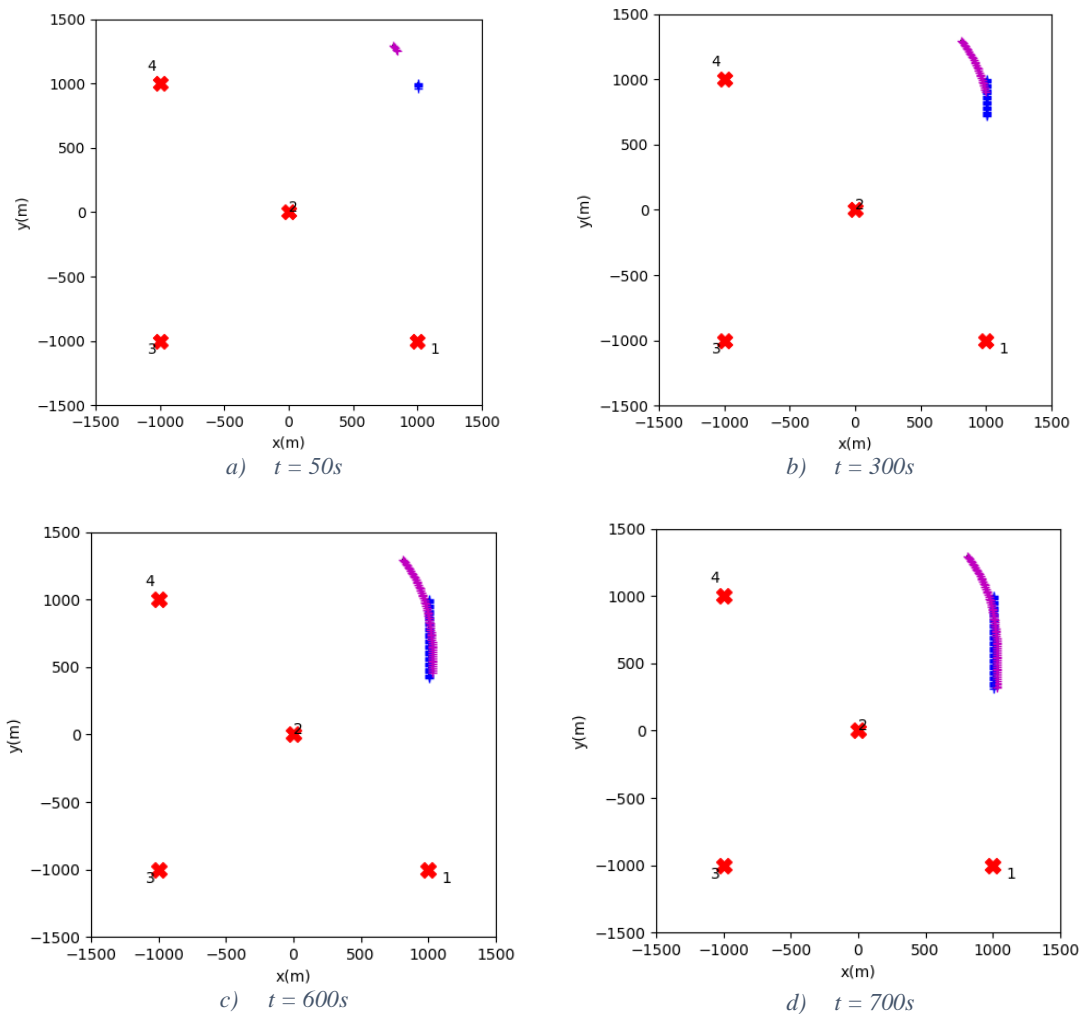


Figura 22 Detalle inicio de trayectoria

En la Figura 23 se aprecian distintos instantes de la trayectoria de los USVs durante esta maniobra. En la imagen a) se aprecia el primer cambio de objetivo, el USV azul comienza su viaje hasta el punto 2, el USV seguidor le acompaña durante este giro. Además, al tratarse de un giro “a derechas” es más sencillo para el USV seguidor puesto que lo único que debe hacer es aumentar la velocidad. En la imagen c) se observa el paso por el segundo punto de giro, donde al tratarse de un giro “a izquierdas” o en la dirección del propio USV seguidor, este tiene más dificultad para mantener en su posición relativa nominal. En la imagen e) se muestra la llegada al último punto y como ambos USVs

4 PRUEBAS UNITARIAS CON SENSORES IDEALES

disminuyen la velocidad para quedarse en él. Por otro lado, b), d) y e) muestran, en una vista general, distintos instantes de la trayectoria. Se aprecia que la trayectoria ha sido realizada cumpliendo correctamente los puntos de paso.

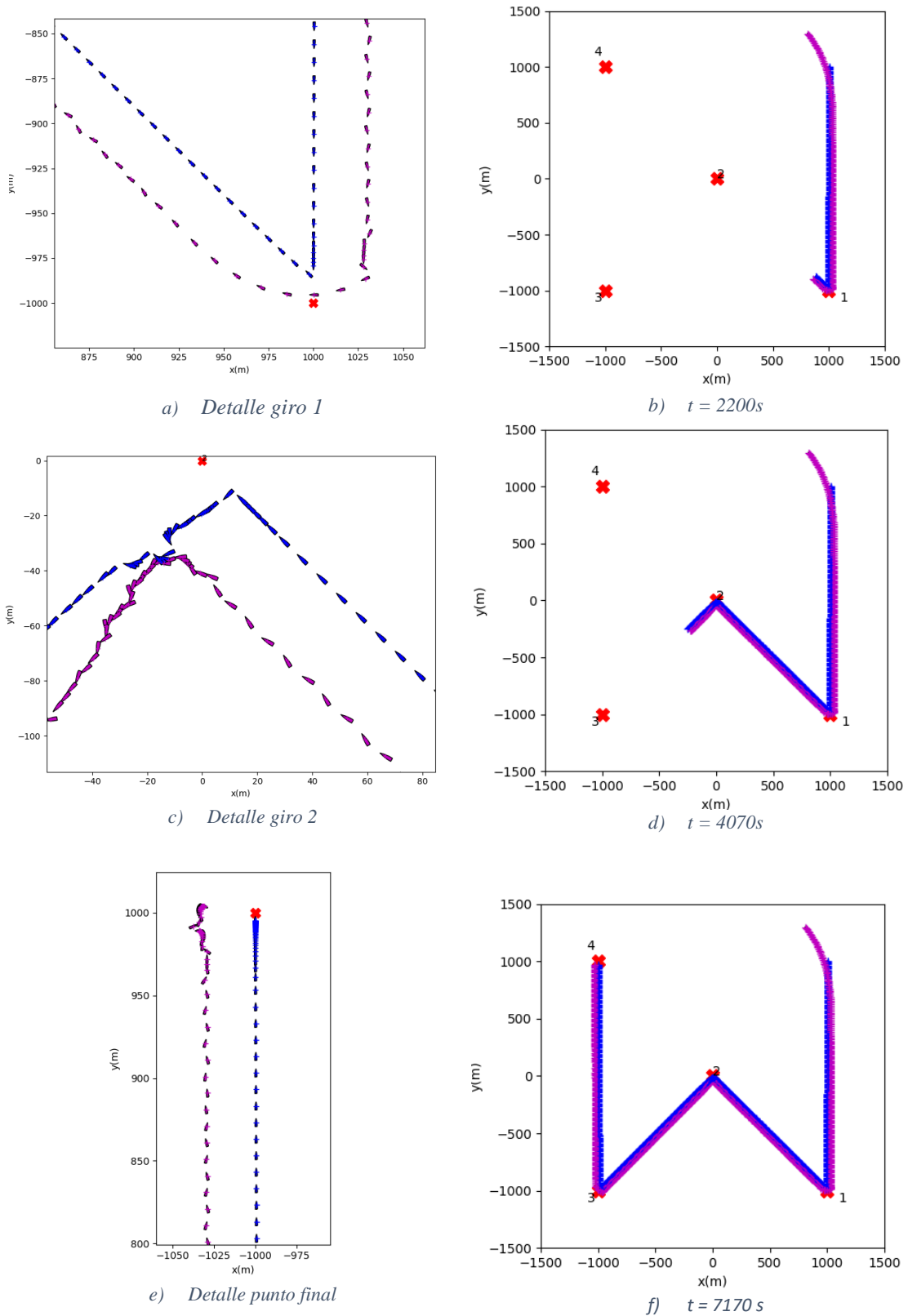


Figura 23 Trayectoria navegación en paralelo

4.3 Navegación a un máximo de contaminación

En este caso los USVs deben alcanzar el máximo nivel de contaminación y permanecer en el entorno de dicho punto. La Figura 24 muestra la distribución de biocontaminantes y el máximo teórico (marcado por una cruz roja) que deben alcanzar los USV.

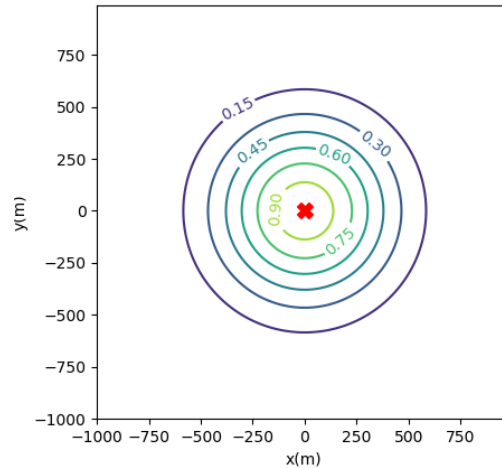


Figura 24 Distribución de contaminación caso alcanzar máximo

La Figura 25 muestra la trayectoria seguida por la pareja de USV para alcanzar el máximo. Comenzando en a), los USV inician la maniobra para colocarse en la posición nominal de funcionamiento. En la imagen b) los USV viran tomando el rumbo de la dirección del gradiente máximo, es decir, en dirección al punto de máxima concentración de biocontaminantes. Las imágenes c), d) y e) muestran como la trayectoria de la pareja de USV se mantiene fija y orientada a dicho punto máxima concentración. Una vez alcanza el máximo, comienzan a rotar alrededor del mismo. En la imagen f) se observa que la trayectoria seguida por el USV líder, en azul, envuelve el punto de máxima concentración de biocontaminantes.

4 PRUEBAS UNITARIAS CON SENSORES IDEALES

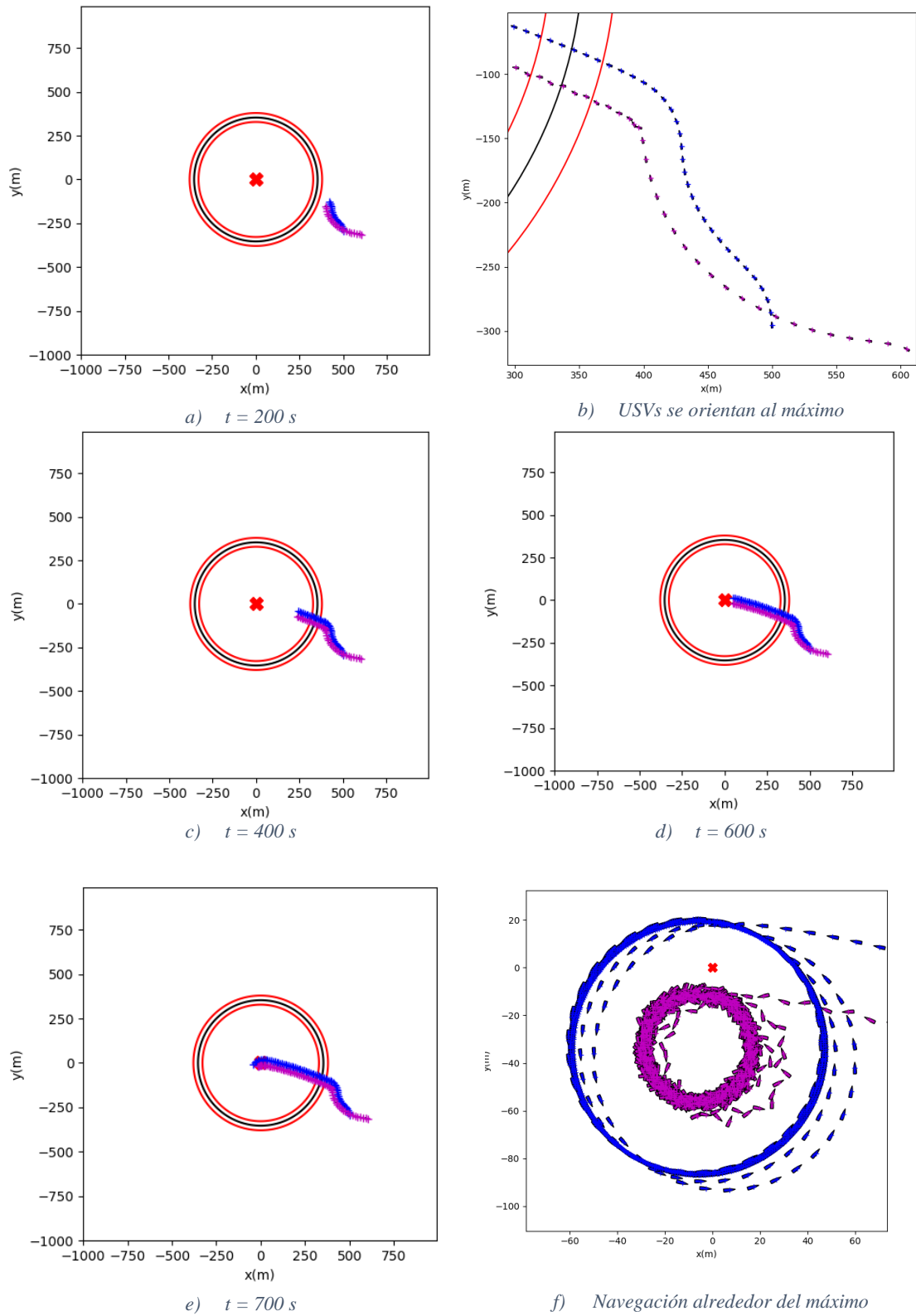


Figura 25 Trayectoria navegación a máximo de concentración

4.4 Seguimiento de curvas de nivel

En esta sección se van a realizar pruebas sobre funciones de contaminación gaussianas con diferentes dispersiones para probar el funcionamiento del algoritmo en distintos escenarios.

La primera mancha, representada en la

Figura 26 y de tamaño grande, se modela con las siguientes características:

$$x_o = (0.0, 0.0)$$

$$\sigma_x^2 = 4000.0$$

$$\sigma_y^2 = 4000.0$$

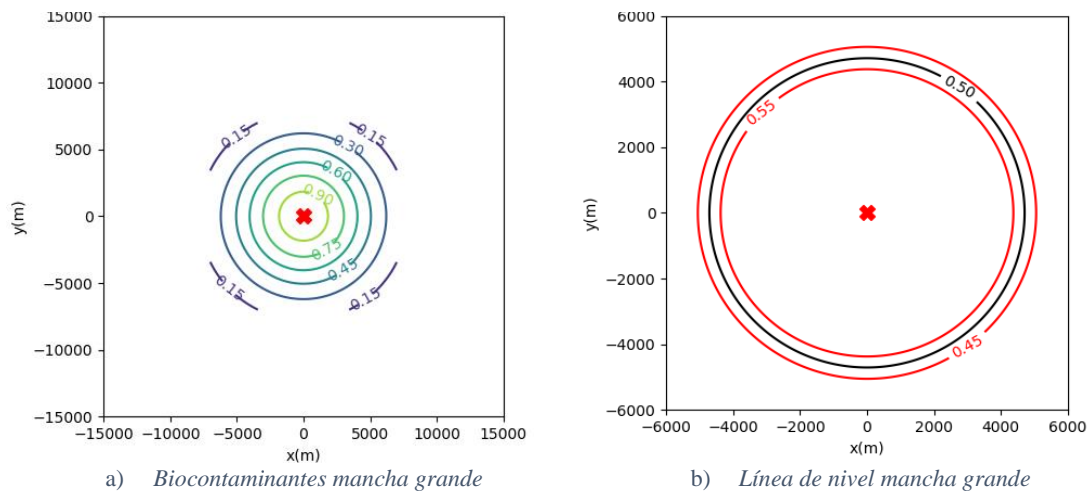
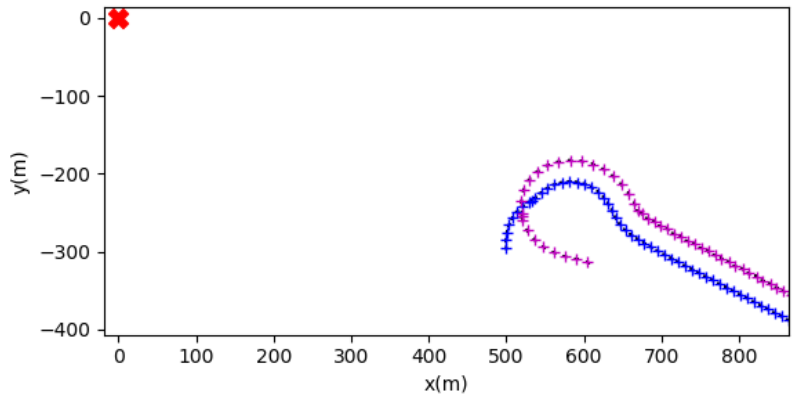


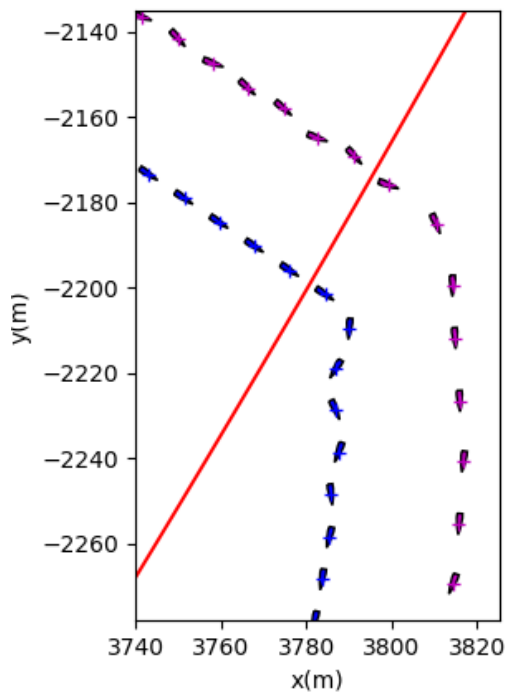
Figura 26 Configuración mancha grande

La Figura 27 muestra algunos de los eventos más importantes durante la trayectoria para recorrer la curva de nivel seleccionada. En la imagen a) se observa el inicio de dicha trayectoria donde los USV realizan un giro para establecer un rumbo en dirección paralela al de gradiente mínimo que se mantiene también en b). En la imagen c) puede apreciarse el cambio de rumbo que se produce una vez que la pareja de USV entra en la franja de concentración aceptada por el algoritmo. Finalmente, d) muestra la trayectoria completa.

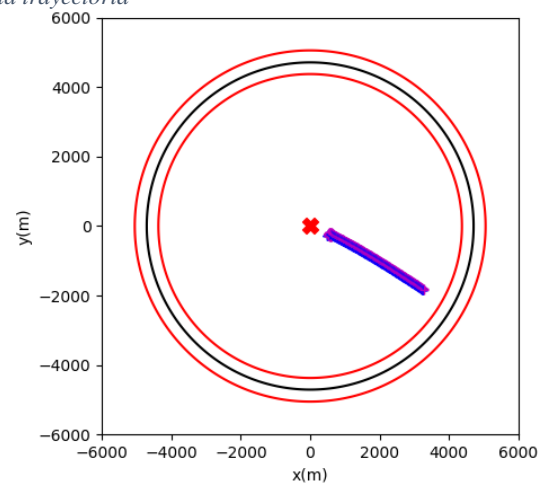
4 PRUEBAS UNITARIAS CON SENSORES IDEALES



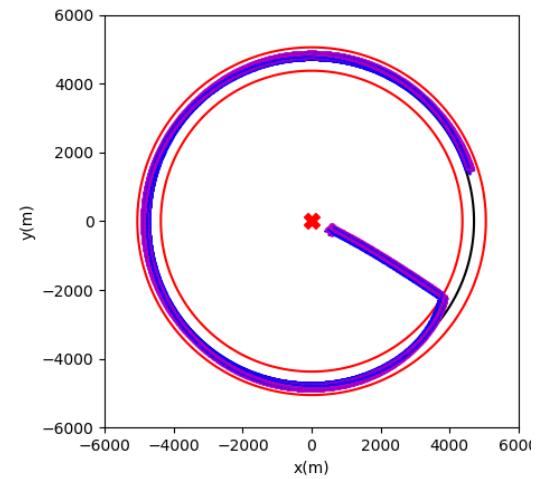
a) Inicio de la trayectoria



c) Entrada la franja



b) USVs navegan en la dirección opuesta al máximo



c) USVs completan la curva de nivel

Figura 27 Trayectoria curva de nivel mancha grande

4 PRUEBAS UNITARIAS CON SENSORES IDEALES

A continuación, se analiza el funcionamiento del algoritmo sobre una mancha de tamaño intermedia con una dispersión elíptica, modelada con las siguientes características:

$$x_o = (0.0, 0.0)$$

$$\sigma_x^2 = 1000.0$$

$$\sigma_y^2 = 2000.0$$

La Figura 28 muestra la distribución de contaminación (imagen a) y la respectiva curva de nivel a recorrer por los USV (imagen b).

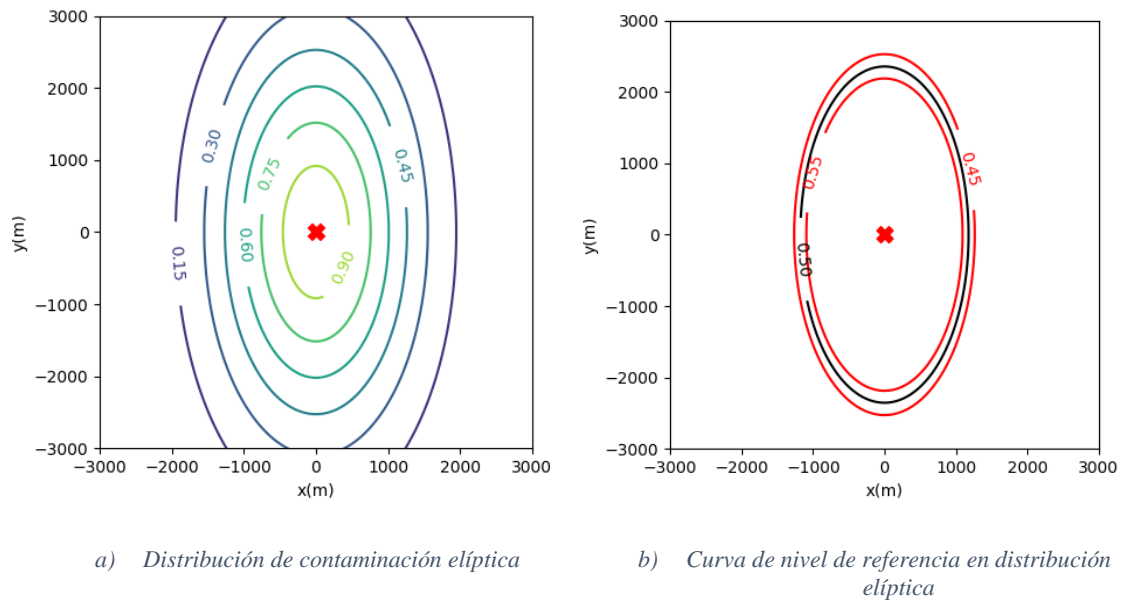


Figura 28 Configuración caso distribución elíptica

La Figura 29 muestra la trayectoria realizada por los USVs. Tras comenzar en el interior de la curva de nivel, en la imagen a) se muestra la trayectoria en la que se alejan del punto de máxima concentración para alcanzar la franja aceptada por el algoritmo. En b) se aprecia la trayectoria completa, se aprecia que la pareja de USV completa la curva con una trayectoria suave en el interior de la franja.

4 PRUEBAS UNITARIAS CON SENSORES IDEALES

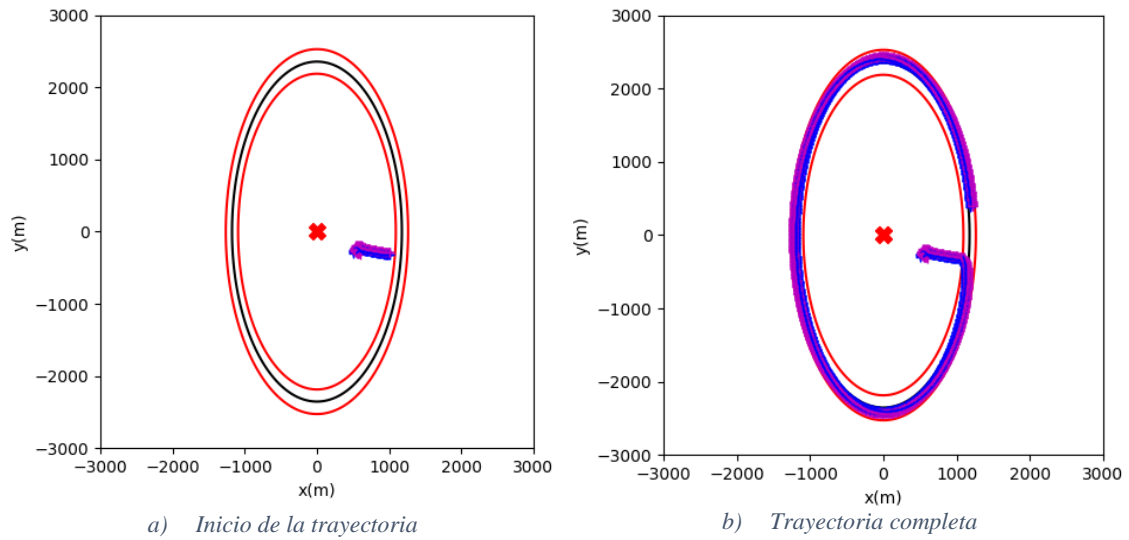


Figura 29 Trayectoria curva de nivel elíptica

El detalle mostrado la Figura 30 es la trayectoria por la zona de máxima curvatura. Es un evento relevante porque muestra la capacidad del algoritmo de guiado para variar el rumbo acorde a la curvatura.

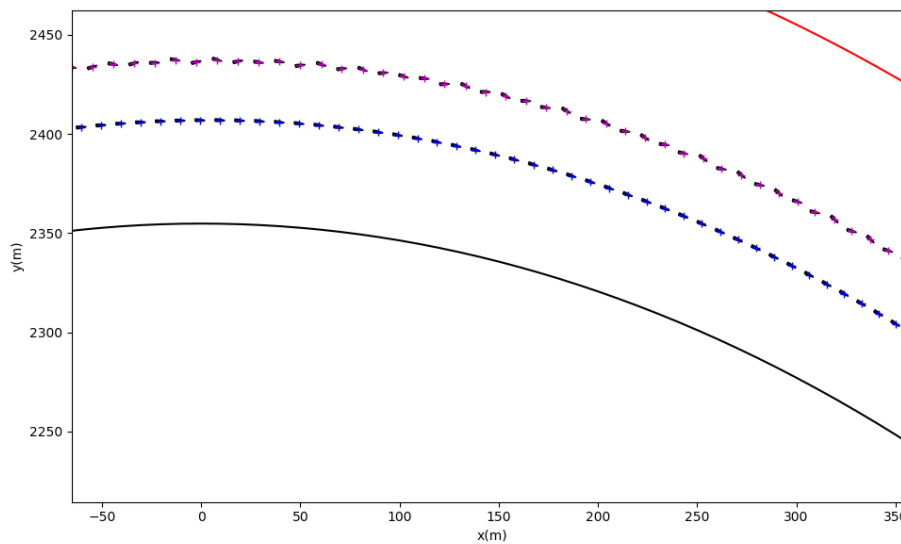


Figura 30 Paso de USVs por la zona de máxima curvatura

Finalmente, se prueba un escenario con una mancha de contaminación mucho menor que en los casos anteriores. La curva de nivel, representada en Figura 31 tiene un tamaño aproximado de 300m.

$$x_o = (0.0, 0.0)$$

$$\sigma_x^2 = 300.0$$

$$\sigma_y^2 = 300.0$$

4 PRUEBAS UNITARIAS CON SENSORES IDEALES

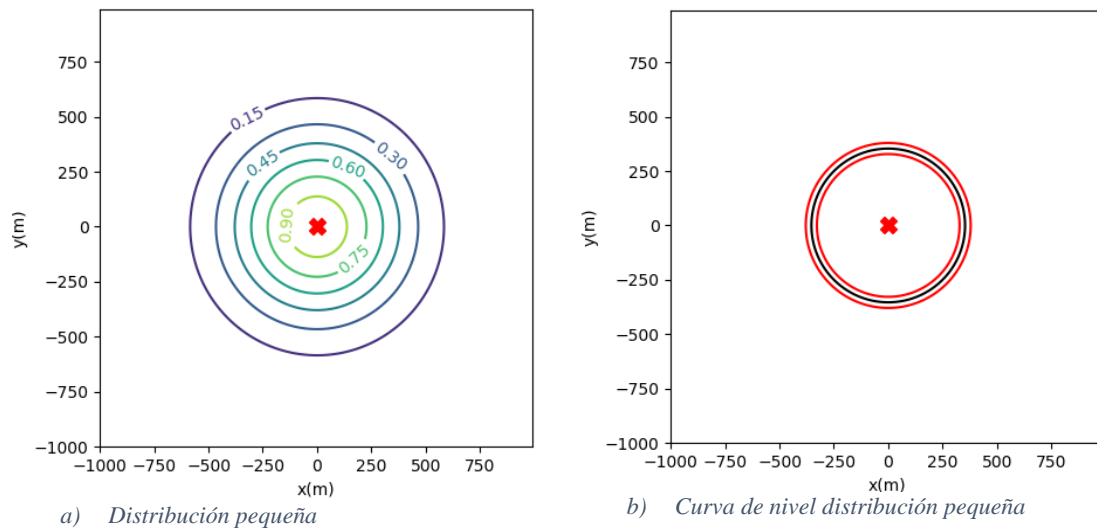


Figura 31 Configuración mancha pequeña

La trayectoria resultante del algoritmo se recoge en la secuencia de imágenes de la Figura 32. Está claro que este tipo de escenarios es mucho más exigente para los USVs desde un punto de vista de su dinámica, ya que tienen que menos espacio para acomodarse a la tendencia de la línea de nivel. Por ejemplo, en la imagen b) se observa como la primera vez que se aproximan a la franja, la pareja de USV no consigue situarse correctamente en el interior de la misma. Posteriormente, en las imágenes c) y d) se muestra que finalmente una vez los USVs toman la posición correcta en la franja son capaces de recorrerla con suavidad.

4.5 Obstáculo

Se han establecido dos pruebas distintas. La primera en la que el obstáculo está fijo y no reacciona a la posibilidad de colisión. La segunda el obstáculo también reacciona para evitar la colisión.

Las condiciones que se han establecido para ambas pruebas son:

- Un USV tiene por origen el punto $(0.0, 0.0)$ y por objetivo el punto $(500.0, 0.0)$.
- Existe un obstáculo en el punto $(200.0, 0.0)$.

La secuencia de imágenes expuestas en la Figura 33 muestran la trayectoria que sigue el USV azul para esquivar el obstáculo (en este caso representado por el USV morado). En la imagen a) el USV azul se encuentra en movimiento hacia el objetivo. Su trayectoria, aunque no se aprecie en la imagen, cruza por el obstáculo, representado en morado. A continuación, en la imagen b) se observa como el USV comienza a disminuir su velocidad progresivamente conforme se acerca al obstáculo. Esto se puede saber porque los instantes que se representan están equidistantes en el tiempo y las posiciones del USV cada vez están más juntas. En la imagen c) el USV ya ha modificado completamente su trayectoria y se observa cómo ha bordeado el obstáculo. Para acabar, en la imagen d) el USV ha esquivado completamente el obstáculo y ha vuelto a incrementar su velocidad con rumbo al punto objetivo que llevaba.

4 PRUEBAS UNITARIAS CON SENSORES IDEALES

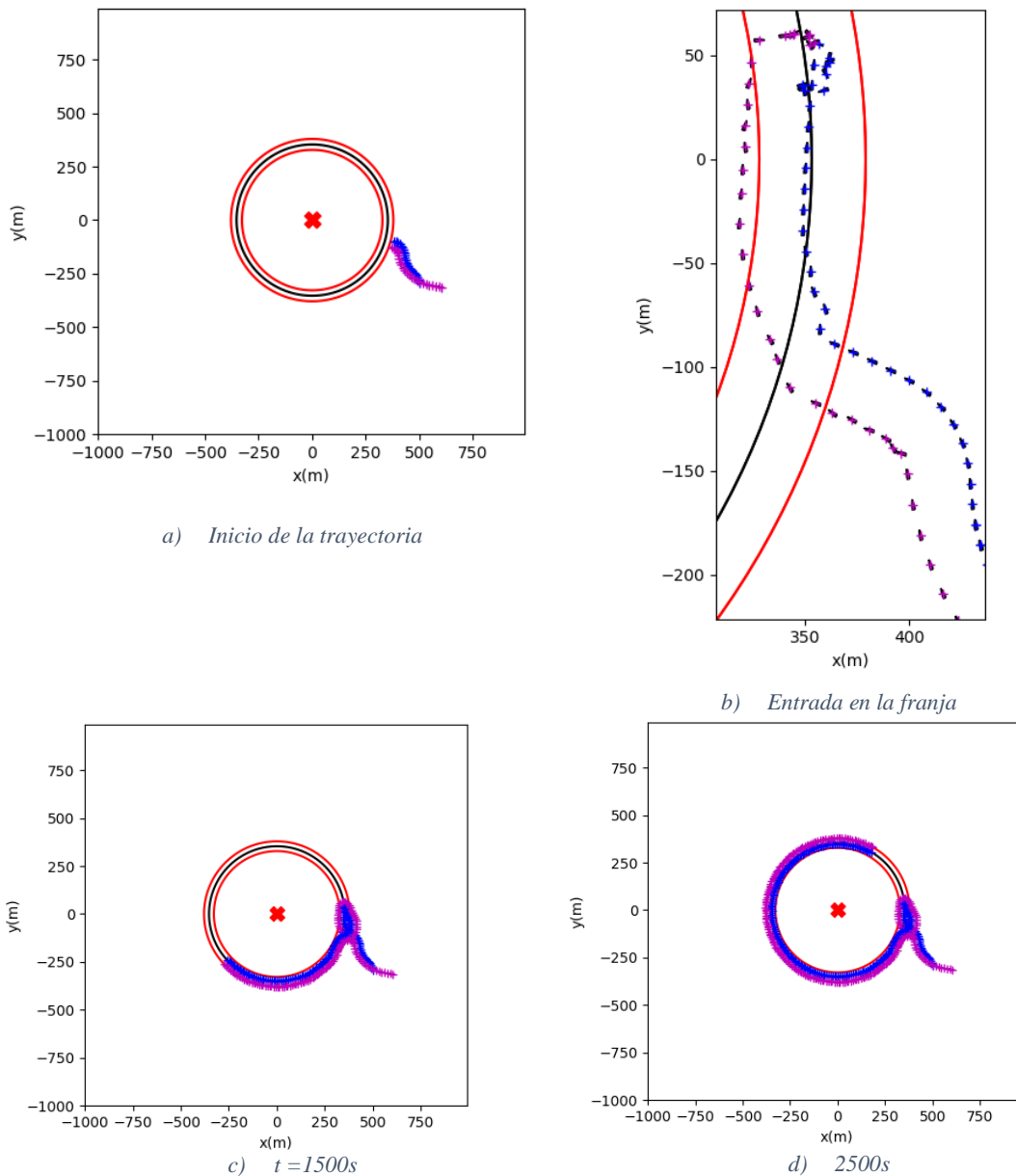


Figura 32 Trayectoria distribución pequeña

Como se ha comentado anteriormente, otro caso posible es que el obstáculo sea también un USV y tenga la capacidad de moverse para evitar el choque. La secuencia, representada en las imágenes de la Figura 34, es parecida a la del caso anterior: inicialmente ambos USVs están realizando su misión, el azul mantiene una trayectoria que pasa cerca del morado y este último está quieto. Cuando los USVs están a menos de la distancia de seguridad de 25m, ambos modifican su trayectoria actual con el ánimo de evitar la colisión. Se puede observar como el USV azul disminuye su velocidad y el USV morado comienza a navegar en la dirección opuesta al USV azul, ya que ambos navegan repeliéndose. Finalmente, el USV morado alcanza un punto en el que ya no detecta la presencia del USV azul, y este último ya avanza en dirección a su objetivo original.

4 PRUEBAS UNITARIAS CON SENSORES IDEALES

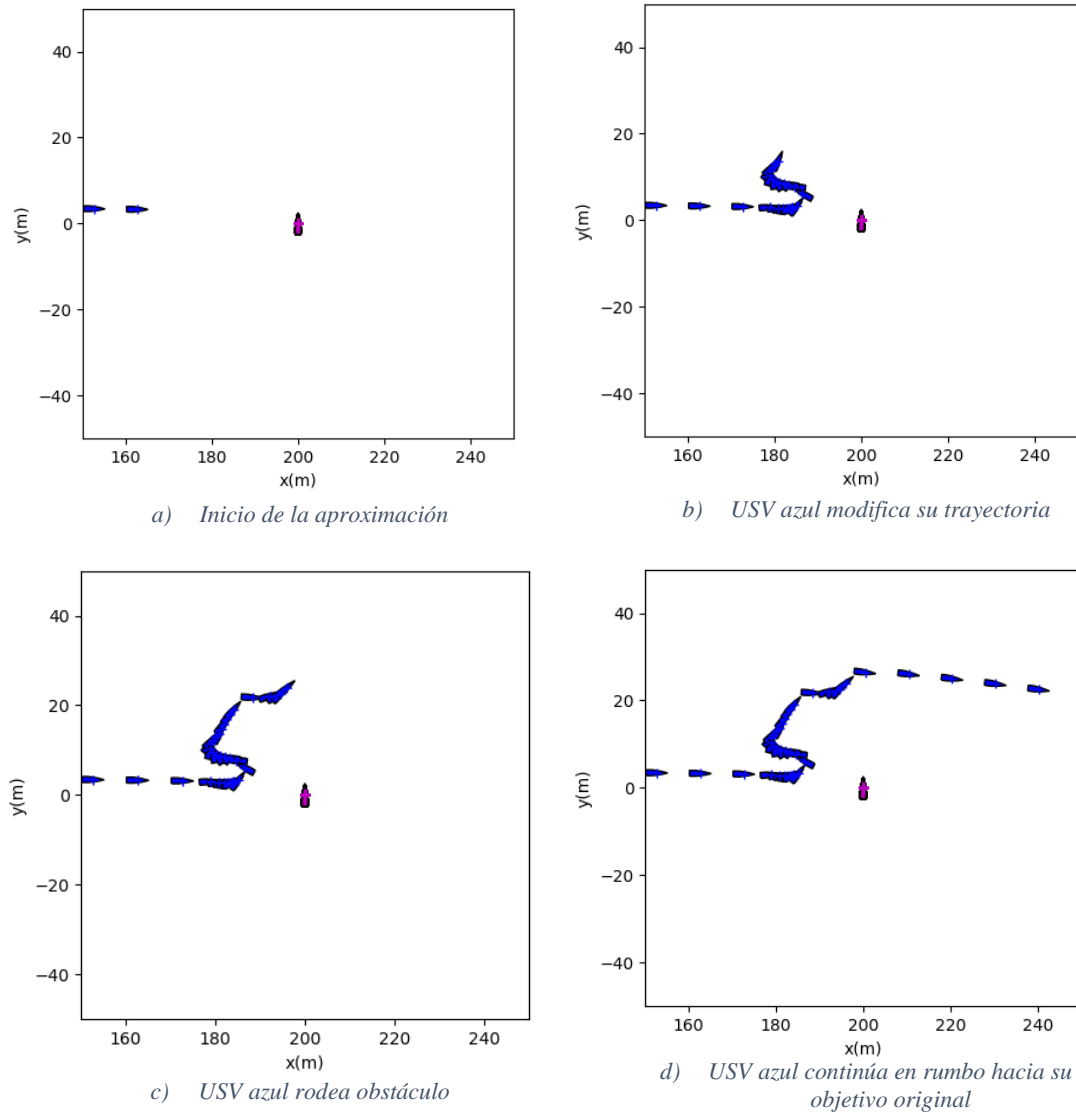


Figura 33 Secuencia de esquiva de obstáculo fijo

4 PRUEBAS UNITARIAS CON SENSORES IDEALES

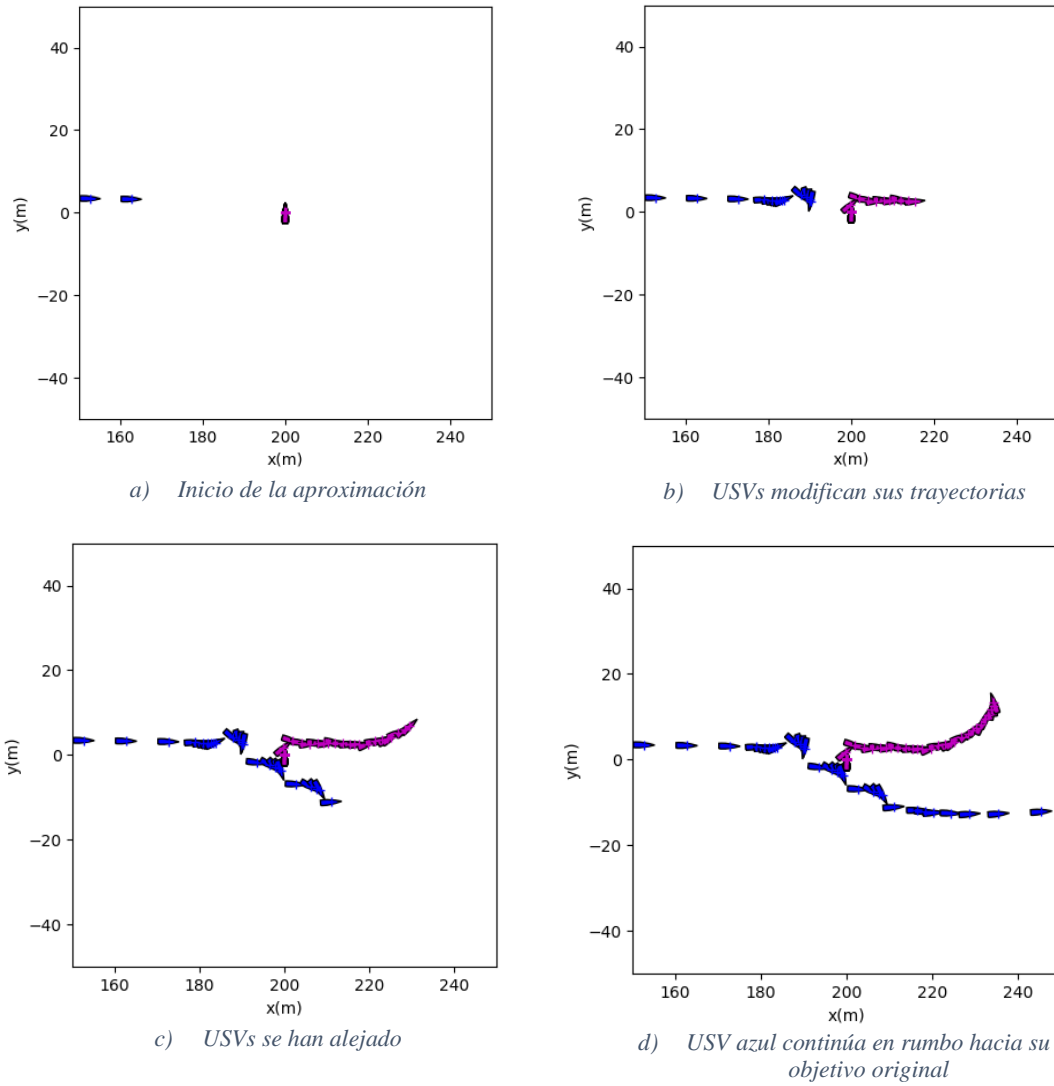


Figura 34 Esquiva de obstáculo móvil

Con las dos pruebas anteriores se comprueba cómo los algoritmos desarrollados permiten que el USV evite con éxito las colisiones frente a obstáculos fijos y frente a otros vehículos que con la misma capacidad de esquiva de obstáculos.

5. EFECTOS DE INTRODUCIR SENSORES REALES

En este capítulo se muestra el efecto que tienen sobre los algoritmos desarrollados el haber introducido los efectos realistas (dinámicos y ruidos) en los sensores.

En la sección 2.5 se explicaron los modelos matemáticos para cada uno de los sensores. En este capítulo se les dará valor a los parámetros de dichos modelos y se realizarán pruebas de los algoritmos de GNC con los parámetros seleccionados para habilitar los efectos realistas de los sensores.

5.1 Posición y rumbo

El error de posición se descompone en un ruido blanco y un ruido rojo. Se escogen los siguientes valores.

σ_{wn}	σ_{rn}
1.0	0.01

Tabla 8 Valores seleccionados para los parámetros error de posición

En la Figura 35 se muestra el error de posición X e Y en diferentes instantes de tiempo. En concreto, se han simulado 30000s. Se aprecia como el ruido rojo provoca que el error no esté centrado necesariamente en el 0.0.

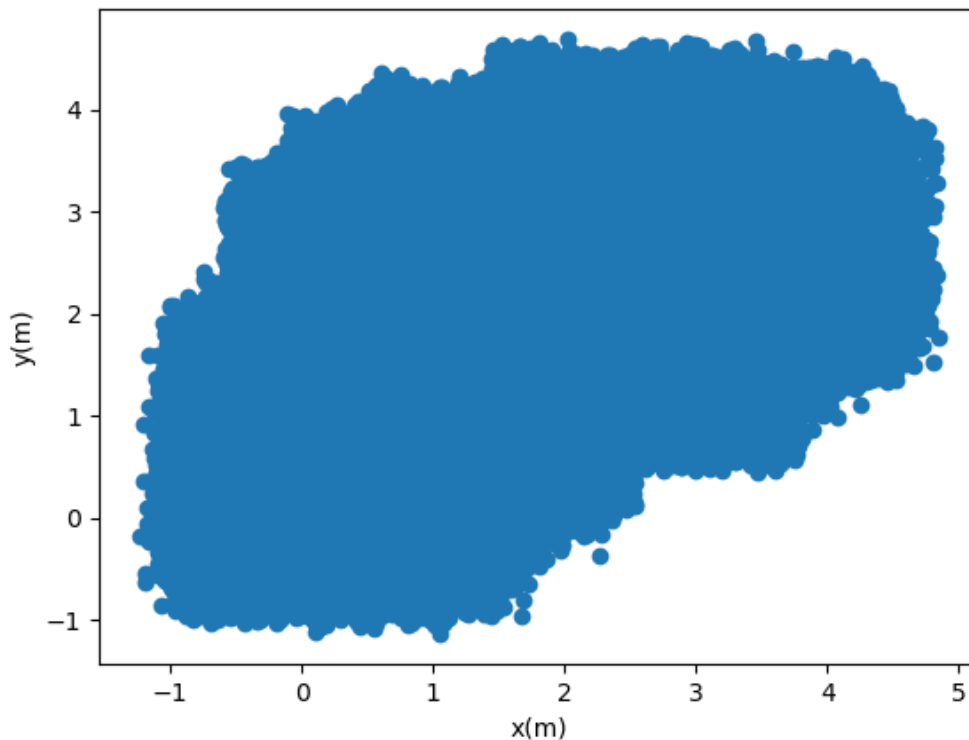


Figura 35 Ejemplo error posición

5 EFECTOS DE INTRODUCIR SENSORES REALES

Para el caso del sensor de rumbo, el error se modela como un ruido blanco.

σ_{wn}
1.0°

Tabla 9 Valores seleccionados para los parámetros error de rumbo

Esto provoca que la medida de rumbo pueda tener variaciones instantáneas de hasta 1°.

La siguiente figura muestra una secuencia de imágenes de una trayectoria en la que la pareja de USVs tiene como misión encontrar el máximo de concentración y, posteriormente, navegar por la curva de nivel.

En la imagen a) la pareja de USVs alcanza el máximo sin errores aparentes. Es en la imagen b) donde se aprecia que los USVs tienen algunas dificultades para mantener una trayectoria suave como la mostrada en la sección 4.2. Posteriormente, en la imagen c) los USVs se salen completamente de la franja y finalmente, en la imagen d) cuando regresan a ella cometen graves errores que derivan en una especie de nudo.

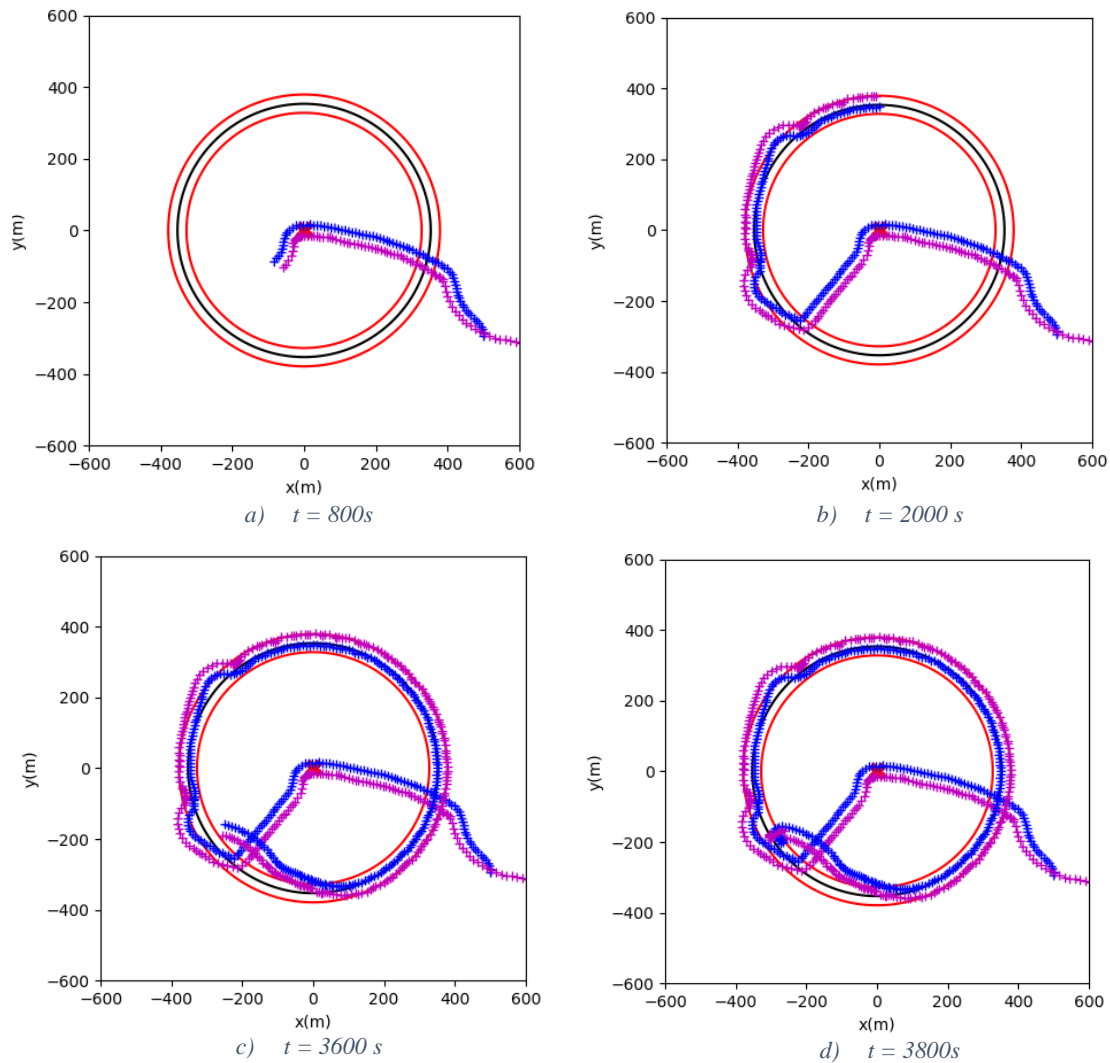


Figura 36 Trayectoria con errores de posición y rumbo

5.2 Medida de biocontaminante

Acorde a la ecuación (16), esta medida se modela como un ruido blanco, un bias y la propia dinámica del sensor.

La Tabla 10 muestra los valores seleccionados para los parámetros del sensor de contaminantes.

$\tau_s(s)$	b_s	σ_{wn}
0.5	0.0005	0.01

Tabla 10 Parámetros biosensor

La Figura 37 muestra la respuesta escalón del sensor de contaminantes. Se ha seleccionado una dinámica relativamente lenta. Se incluye un pequeño bias aunque es inapreciable en la figura.

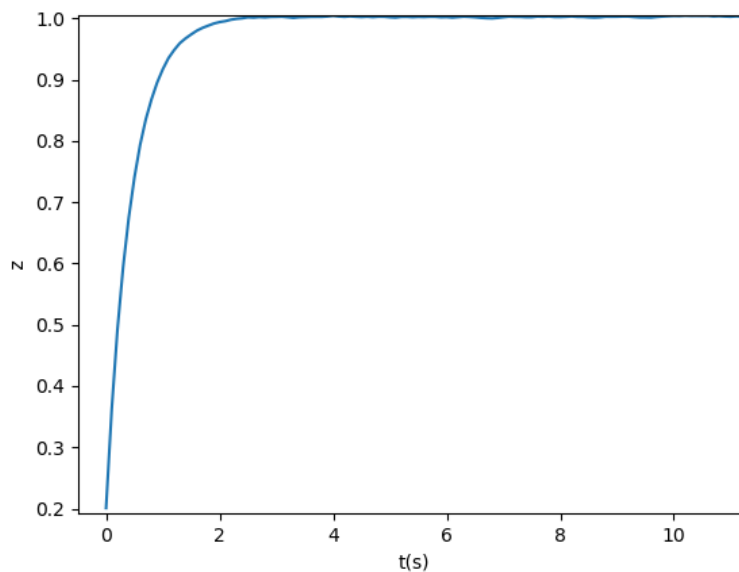


Figura 37 Respuesta escalón sensor de contaminantes

La siguiente figura muestra la simulación del seguimiento de curva de nivel en la mancha pequeña donde se incluye bias únicamente a uno de los vehículos para que tenga un efecto más realista y ruido blanco a ambos USVs. Se aprecia un comportamiento errático en varios puntos de la trayectoria. Esto se debe a que el error de medida de contaminación afecta directamente al cálculo del gradiente. Los algoritmos de guiado para seguimiento de curva de nivel y localización de máximos dependen plenamente de la capacidad del conjunto de USVs para estimar dicho gradiente. Por tanto, una vez afectada esta capacidad baja el rendimiento de los algoritmos. No forma parte de este proyecto el tratamiento de señales asociados a los sensores reales pero se recomienda, como línea de trabajo futura, realizar un correcto filtrado y calibrado de este sensor.

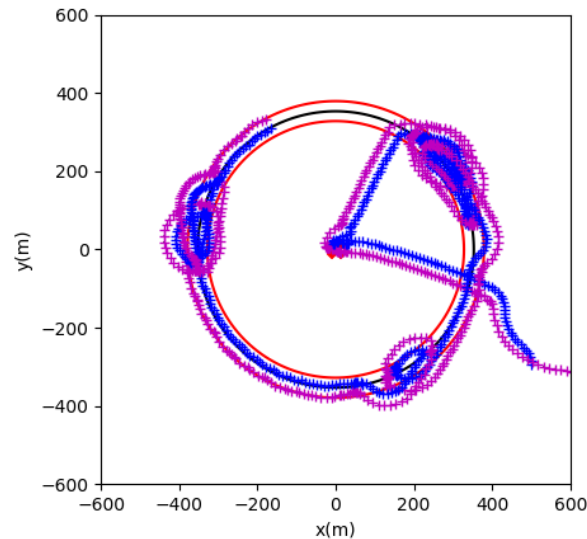


Figura 38 Escenario error sensor contaminación

5.3 Comunicaciones

Se ha simulado la misma trayectoria que en los casos anteriores incluyendo un 10% de errores en la recepción de la telemetría en cada USV.

No se aprecian efectos significativos en las trayectorias de los USVs. Dado que las comunicaciones se han simulado a una frecuencia mayor que los algoritmos de guiado, es posible que no tenga un efecto significativo sobre las capacidades de los algoritmos.

5.4 Resumen

Finalmente, se muestra una trayectoria en la que se combinan todos los errores anteriormente expuestos. La trayectoria es similar a la obtenida en los casos previos. En ocasiones, durante la trayectoria se pierde la franja y la pareja de USVs realiza una trayectoria errática hasta que consiguen volver a colocarse en la curva de nivel. Como se ha dicho anteriormente, se requiere el filtrado de señales de los sensores para mantener las prestaciones de los algoritmos de Guiado, Navegación y Control expuestos en este proyecto. Adicionalmente, se propone como línea futura de investigación el filtrado de la propia estimación del gradiente de contaminación.

5 EFECTOS DE INTRODUCIR SENSORES REALES

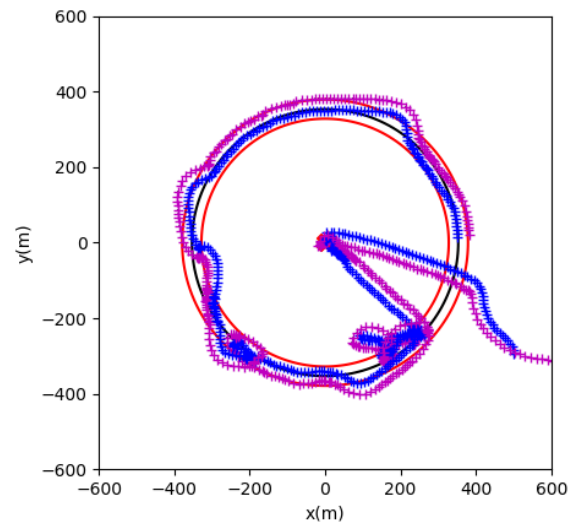


Figura 39 Trayectoria combinando todos los errores e los sensores

6. PRUEBAS SOBRE UN ESCENARIO COMPLETO

En este capítulo se prueba el funcionamiento de los algoritmos anteriormente presentados en un escenario completo. Es decir, en el que hay varias parejas de USVs trabajando en la misma zona y cada pareja de USVs tiene varias tareas encomendadas. Además, se utiliza una distribución de contaminantes más compleja con varias distribuciones normales en contacto entre sí. Se ha decidido no incluir los efectos de los sensores dado que se considera que esta parte requiere de un estudio más profundo.

Se muestra en primer lugar la mancha de contaminación, esta ha sido generada como la combinación de las siguientes distribuciones normales:

Centro	Amplitud	Varianza
$[-200, 1000]$	0.6	$[800, 900]$
$[-500, -300]$	0.3	$[700, 700]$
$[800, 1000]$	0.8	$[2200, 1200]$
$[-3000, -3000]$	0.7	$[800, 800]$

Tabla 11 Distribución contaminación caso completo

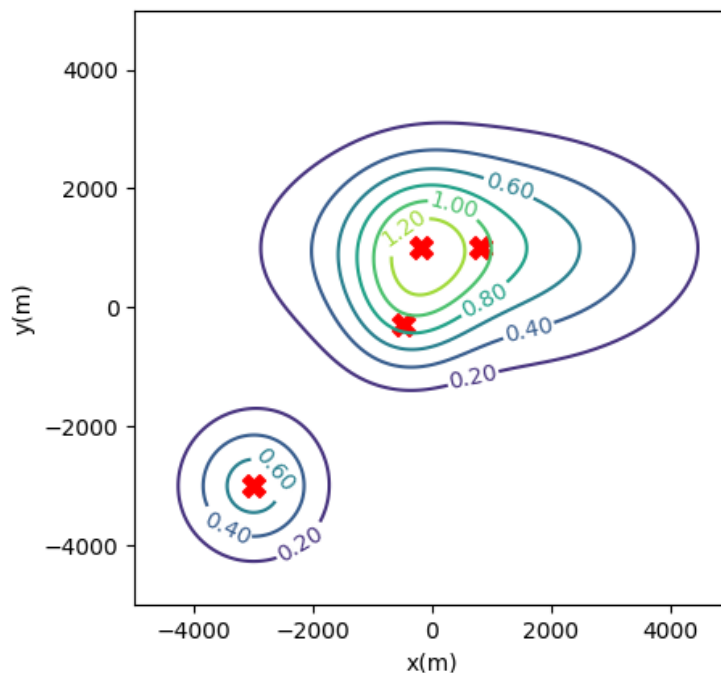


Figura 40 Distribución de contaminación escenario completo

Cada una de las siguientes tablas se corresponde con la lista de tareas a realizar por cada uno de los USVs durante la operación.

TAREA	COMPAÑERO	TAREA	LÍNEA DE NIVEL	PUNTO OBJETIVO
1	2	Objetivo	N/A	$[0, 0]$
2	2	Línea de nivel	0.4	N/A
3	2	Objetivo	N/A	$[1000, -1000]$

Tabla 12 Tareas USV número 1

6 PRUEBAS SOBRE UN ESCENARIO COMPLETO

TAREA	COMPAÑERO	TAREA	LÍNEA DE NIVEL	PUNTO OBJETIVO
1	1	Paralelo	N/A	N/A

Tabla 13 Tareas USV número 2

TAREA	COMPAÑERO	TAREA	LÍNEA DE NIVEL	PUNTO OBJETIVO
1	4	Objetivo	N/A	[0, 0]
2	4	Máximo	N/A	N/A
3	4	Objetivo	N/A	[-2600, -3600]
4	4	Máximo	N/A	N/A
5	4	Línea de nivel	0.4	N/A
6	4	Objetivo	N/A	[1000, -1000]

Tabla 14 Tareas USV número 3

TAREA	COMPAÑERO	TAREA	LÍNEA DE NIVEL	PUNTO OBJETIVO
1	3	Paralelo	N/A	N/A

Tabla 15 Tareas USV número 4

TAREA	COMPAÑERO	TAREA	LÍNEA DE NIVEL	PUNTO OBJETIVO
1	6	Objetivo	N/A	[0, 0]
2	6	Línea de nivel	0.6	N/A
3	6	Objetivo	N/A	[-2600, -3600]
4	6	Línea de nivel	0.6	N/A
5	6	Objetivo	N/A	[1000, -1000]

Tabla 16 Tareas USV número 5

TAREA	COMPAÑERO	TAREA	LÍNEA DE NIVEL	PUNTO OBJETIVO
1	5	Paralelo	N/A	N/A

Tabla 17 Tareas USV número 6

La Tabla 18 muestra el color seleccionado para cada USV en la simulación.







USV	COLOR
1	
2	
3	
4	
5	
6	

Tabla 18 Tabla de identificación de colores USVs

Como se puede apreciar en las tablas anteriores, las líneas a detectar son las de valor 0.4 y 0.6. La Figura 41 muestra la distribución geométrica de dichas líneas de nivel, el color negro se reserva para la línea de nivel del valor nominal y las rojas para la franja. Además, el punto rosa muestra el máximo global de la distribución y los puntos rojos los máximos locales.

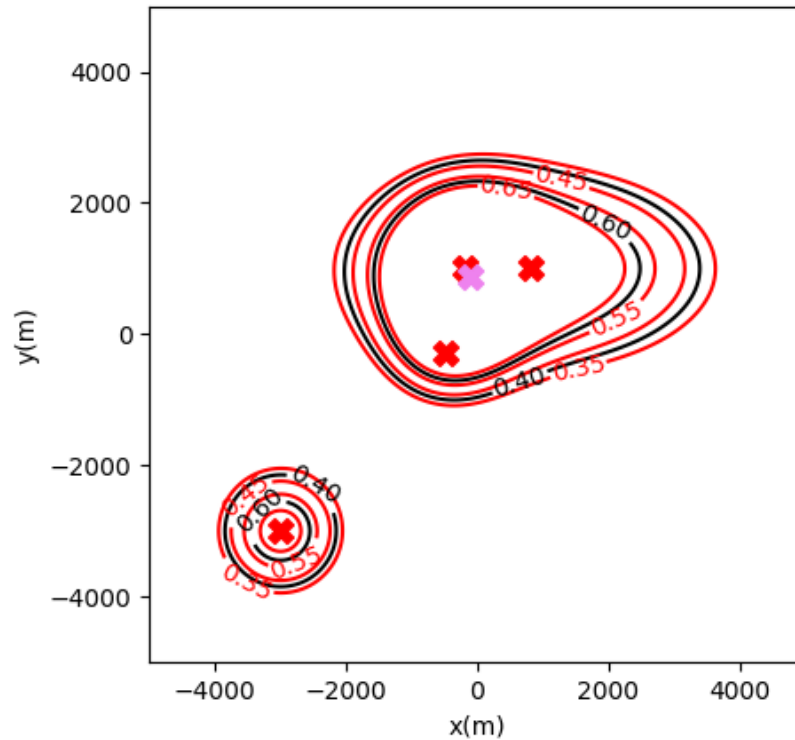


Figura 41 Mapa de líneas de nivel a detectar escenario completo

En la Figura 42, se muestran los primeros instantes de la trayectoria. Debido a que inicialmente todos los USVs tienen por objetivo alcanzar el punto $[0, 0]$, tal y como se aprecia en la imagen a), todos navegan en paralelo evitando la colisión al posicionarse inicialmente con sus compañeros. En el segundo 400 todos van ya acompañados de su compañero de trabajo y en una trayectoria estabilizada al punto objetivo. Las imágenes b) y c) muestran el instante en el que las trayectorias de cada una de las parejas se separan con el ánimo de realizar la siguiente tarea planificada.

La Figura 43 muestra distintos detalles de las trayectorias seguidas por los USVs para la realización de la tarea asignada. Concretamente las imágenes a) y b) muestran el inicio de las líneas de nivel para las parejas 1-2 y 5-6 respectivamente. En la imagen c) se observa el instante en el que la pareja 3-4 alcanza el máximo de contaminación dentro de la zona en la que estaba trabajando. Una vez lo alcanza inicia su viaje hacia la zona contaminada que se encuentra aislada. Precisamente la imagen d) muestra el segundo 3200 s en el que las parejas 1-2 y 5-6 están recorriendo sus respectivas curvas de nivel mientras que la pareja 3-4 ya lleva rumbo a su nuevo punto objetivo.

6 PRUEBAS SOBRE UN ESCENARIO COMPLETO

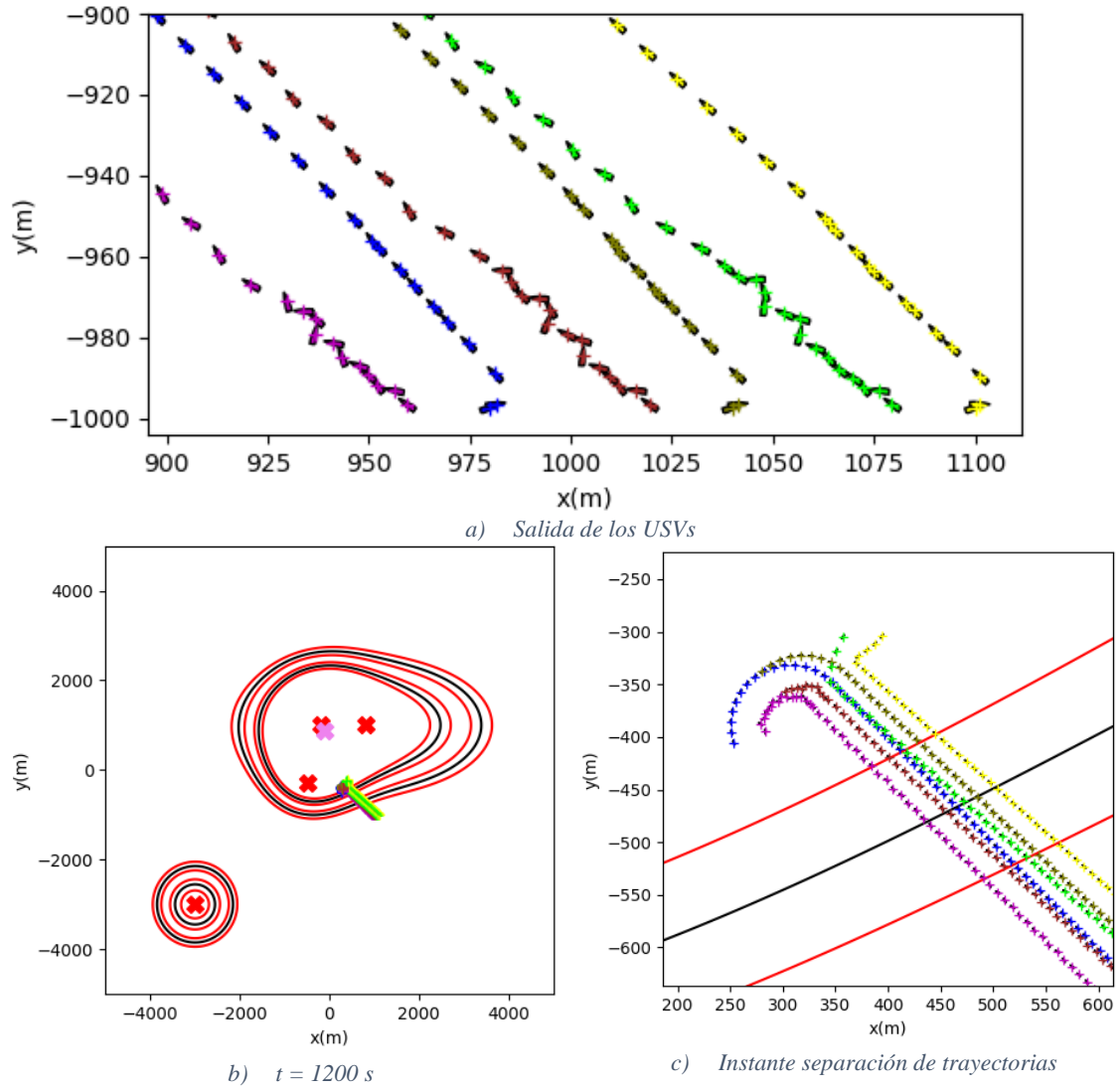
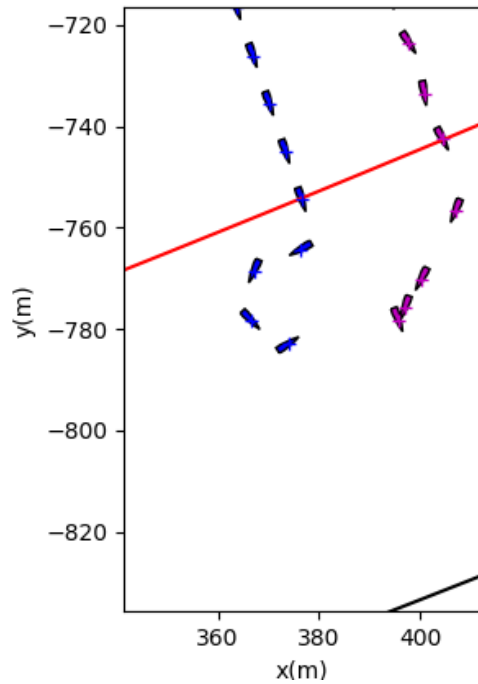
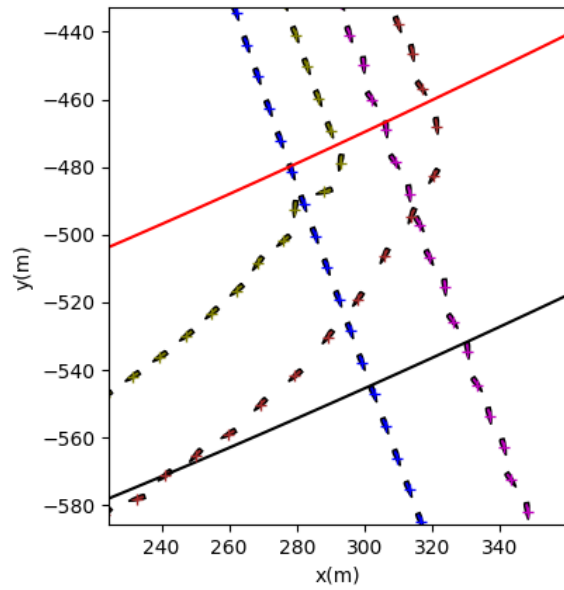


Figura 42 Primeros instantes de la trayectoria

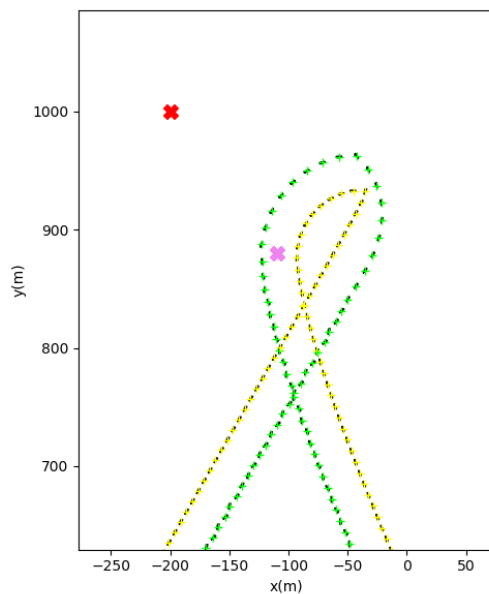
6 PRUEBAS SOBRE UN ESCENARIO COMPLETO



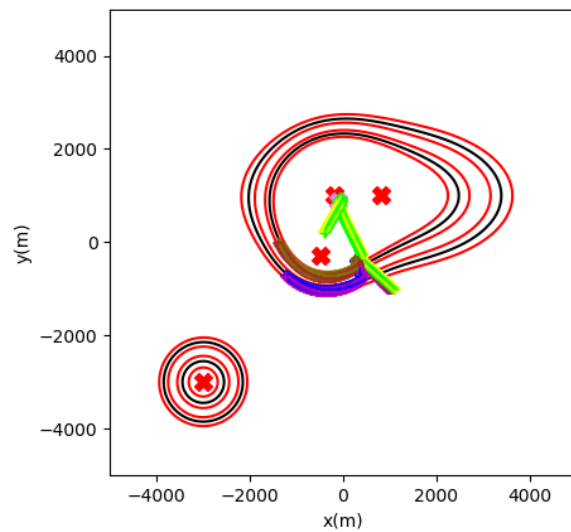
a) Pareja 1-2 entra en la línea de nivel asignada



b) Pareja 5-6 entra en la línea de nivel asignada



c) Pareja 3-4 alcanza el primer máximo



d) $t = 3300 \text{ s}$

Figura 43 USVs realizan primeras tareas

La siguiente secuencia de imágenes de la Figura 44 muestra las tareas realizadas por los USVs 3 y 4 en la mancha aislada. En la imagen a), la pareja alcanza la zona contaminada y comienza la búsqueda del máximo. El detalle del paso de los USVs por el máximo de contaminación se aprecia en la imagen b). Finalmente, en la imagen c), la pareja de USVs ha localizado la curva de nivel que tienen asignada y comienzan a recorrerla.

6 PRUEBAS SOBRE UN ESCENARIO COMPLETO

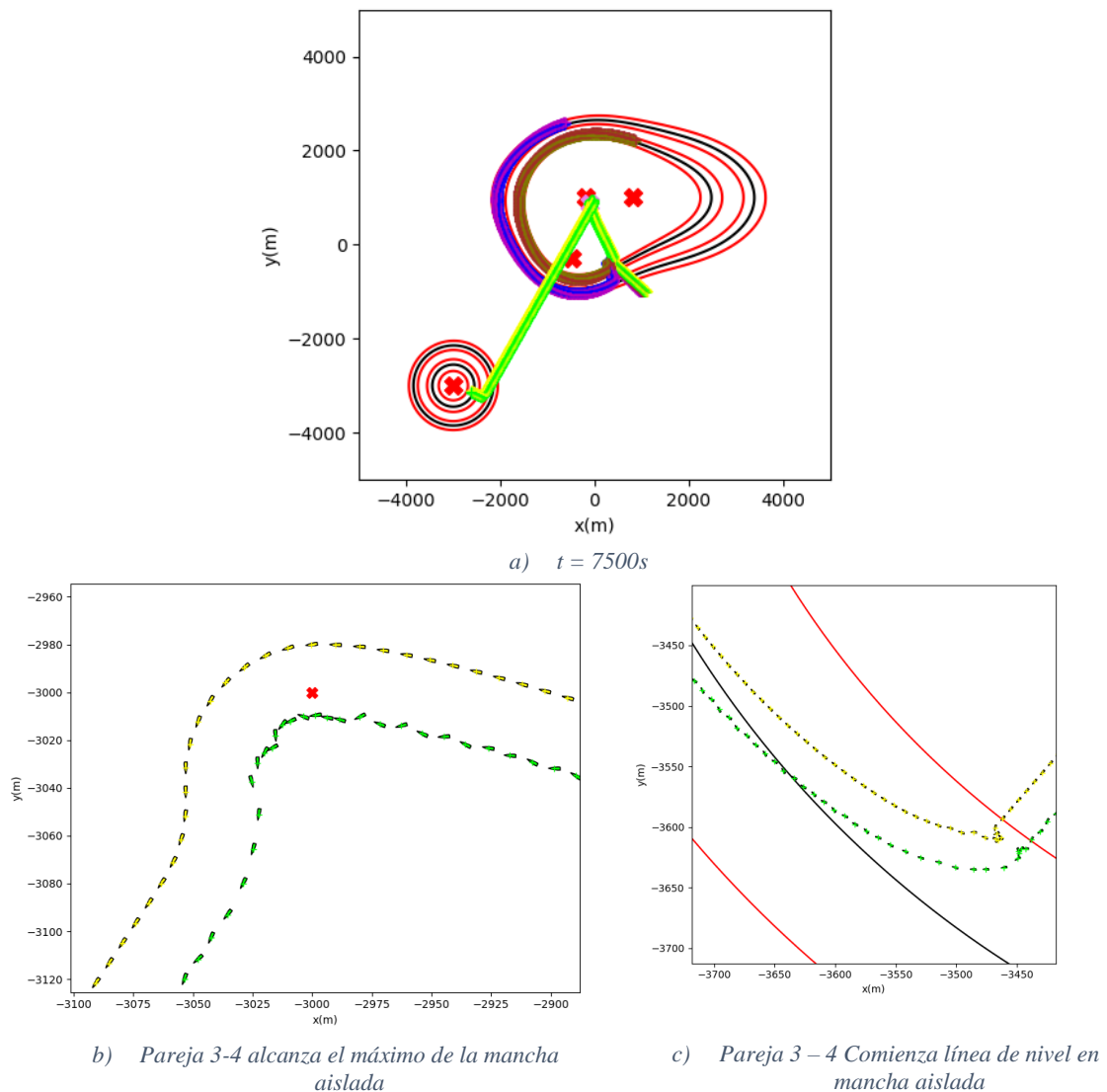


Figura 44 Pareja de USVs 3-4 realizando tareas en la mancha aislada

En la Figura 45 se muestra como los USVs terminan de realizar todas las tareas asignadas y vuelven al punto de origen. La imagen a) se corresponde con el instante en el que los USVs 3 y 4 cierran la línea de nivel de 0.4 en esta mancha aislada y, por otro lado, los USVs 5 y 6 terminaron la línea de nivel y están comenzando su viaje hasta la mancha aislada para detectar otra línea de nivel. En el segundo 17400, en la imagen b), los USVs 1 y 2 ya han terminado todas sus tareas para este escenario y han vuelto al punto de inicio. Por su parte, los USVs 3 y 4 se encuentran también de vuelta a la base. Mientras tanto, la pareja 5-6, está recorriendo la línea de nivel 0.6 en la zona aislada. Finalmente, hacia el segundo 23700, imagen c), todos los USVs se encuentran de vuelta en el punto de origen.

6 PRUEBAS SOBRE UN ESCENARIO COMPLETO

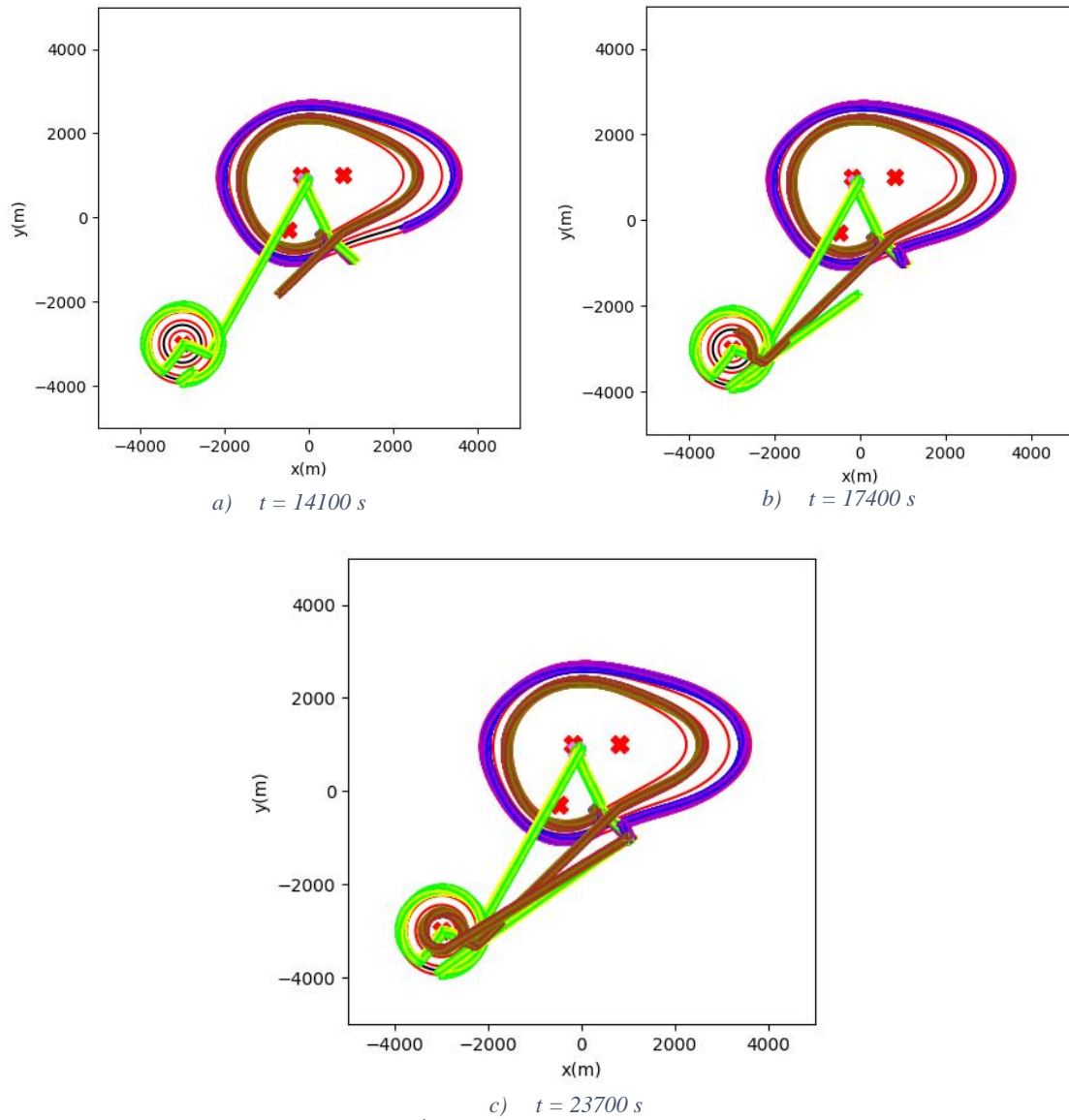


Figura 45 Últimas tareas y vuelta al punto inicial

7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En el presente capítulo se exponen las principales conclusiones alcanzadas durante el desarrollo del proyecto. Finalmente, se proponen unas líneas de investigación y trabajo futuras.

7.1 Conclusiones

Se ha diseñado e implementado un entorno de simulación para escenarios con múltiples USVs. Además, se incluye la posibilidad de simular efectos realistas en los sensores para estudiar su efecto sobre los algoritmos de Guiado, Navegación y Control.

Se han diseñado, implementado y probado en simulación algoritmos de Guiado que permiten realizar distintas tareas. Específicamente las tareas posibles son:

- Localizar zonas de máximo nivel de biocontaminantes.
- Localizar y navegar a través de líneas de nivel de biocontaminantes.
- Navegar hacia un punto objetivo deseado.
- Evitar obstáculos fijos y móviles.

Por otro lado, se ha analizado e implementado la capacidad de cooperación entre USVs. Para esto, se ha implementado un algoritmo que permite a dos USVs navegar en paralelo. Se han propuesto los datos a transmitir por un enlace de radiofrecuencia y su correspondiente formato.

Se ha estudiado el problema de control MIMO, linealizando las ecuaciones se obtuvo que es posible controlar el sistema con dos lazos de control independientes. Uno para la velocidad del USV y otro para el rumbo. Se ha ajustado cada uno de los controladores para obtener la respuesta deseada.

Aunque no se han podido realizar pruebas sobre hardware específico, todos los algoritmos diseñados no requieren de una gran capacidad de cálculo y se basan en operaciones lógicas, sumas y multiplicaciones. Además, los lazos de guiado no son muy exigentes. Por estos motivos se considera que estos algoritmos pueden ejecutarse en un sistema de tiempo real.

Se han simulado distintos tamaños y relaciones de manchas manteniendo los sensores con medidas ideales para probar que conceptualmente es posible el uso de los algoritmos.

Se han mostrado ejemplos de los efectos realistas sobre la medida de los sensores.

Finalmente, se ha simulado un escenario con varios USVs realizando distintas misiones sobre la misma área.

Todos los objetivos marcados han sido alcanzados con éxito.

7.2 Líneas futuras

De cara a un mejor funcionamiento general de los algoritmos así como de un incremento de la robustez de los mismos, se proponen las siguientes líneas de trabajo:

Simulador:

- Se considera imprescindible generar un modelo de USV más completo y realista. Donde se puedan incluir efectos adicionales a los de la maniobra.

Gestor de tareas:

- Se requiere aumentar lo robustez del gestor de tareas, especialmente en la detección del salto de tarea.
- Además, dicho gestor de tareas, puede estar regido por una capa superior que incluya un optimizador de la trayectoria y de las propias tareas.
- Incluir la capacidad de que los USVs puedan modificar su planificación teniendo en cuenta la información del resto USVs colaborando en la misma área.

Navegación:

- Una vez seleccionados unos sensores específicos, se considera necesario la caracterización y simulación de los mismos.
- Incluir tratamiento de señal, que permita el suavizado de las señales así como la estimación de las variables de estado del problema si fuese necesario.

Guiado:

- Incluir en el algoritmo de colisiones un estimador de la velocidad y la posición del resto de USVs podría permitir navegar con los USVs de manera más cercana y realizar maniobras más complejas.
- Actualización y manejo en tiempo real de los parámetros incluidos en los algoritmos de guiado, especialmente para el caso de líneas de nivel. Esto permitiría tener una mayor flexibilidad en el tipo de escenarios que pueden estudiarse.
- En la búsqueda de las zonas con máximos niveles de concentración, incluir técnicas heurísticas que eviten queda atrapado en máximos locales.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

GNC	Guiado, Navegación y Control
GNSS	Global Navigation Satellite System
IMU	Inertial Measurement Unit
MIMO	Multiple Input Multiple Output
UCM	Universidad Complutense de Madrid
UNED	Universidad Nacional de Educación a Distancia
USV	Unmanned surface vehicle
WGS 84	World Geodetic System

BIBLIOGRAFÍA

Almeida, J., Silvestre, C. & Pascoal, A., 2012. Cooperative control of multiple surface vessels with discrete-time periodic communications.. *Int. J. Robust. Nonlinear Control*, 22(), pp. 398-419.

Amato, N., 2004. *Potential Field Methods*. ed. : .

autónomos, C., s.f. *unmanned-ship*. [En línea]
Available at: <http://www.unmanned-ship.org/munin/>

Balch, T. & Arkin, R. C., 1998. Behavior-Based Formation Control for Multi-Robot Teams. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*.

Bayat, B., Crasta, N., Cresp, A. & Pascoal, A., 2017. Environmental monitoring using autonomous vehicles: a survey of recent searching techniques.. *Current opinion in Biotechnology*, Volumen 45, pp. 76-84.

Black, K. & McBean, E., 2018. Drinking water supply systems: decreasing advisories and improving treatment through real-time water quality monitoring.. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua* 67, Volumen 4, pp. 317-331.

Boholm, A. & Prutzer, M., 2011. Expert's understanding of drinking water risk management in a climate change scenario.. *Climate Risk Environment*, Volumen 16, pp. 133-144.

Bucknall, T., 2013. Cooperative path planning algorithm for marine surface vessels.. *Ocean Engineering*, Volumen 57, pp. 25-33.

Cifuentes Costa, S., . *PHD Thesis Integración de Comportamientos para la Navegación Coordinada de Múltiples Robots mediante Potenciales Virtuales*. ed. : .

Delpla, I. y otros, 2009. Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. *Environmental International*, 35(8), pp. 1225-1233.

Francis, B. A. & Maggiore, M., 2016. *Flocking and Rendezvous in Distributed Robotics*. ed. : Springer.

Giron-Sierra, J. M., Gheorghita, A., Angulo, G. & Jimenez, J. F., 2015. Preparing the automatic spill recovery by two unmanned boats towing a boom: Development with scale experiments. *Ocean Engineering*, Issue 95, pp. 23-33.

Gómez Tierno, M. Á., Pérez Cortés, M. & Puentes Márquez, C., 2012. *Mecánica del vuelo*. 2 ed. Madrid: IBERGARCETA.

Holland, K., Calatoni, J. & Slocum, D., 2016. *Recent Advances in Bathymetric Surveying of Continental Shelf Regions Using Autonomous Vehicles*, : .

IEEE, 2016. *IEEE Control Systems Magazine*, 31(2).

Jung, S. y otros, 2017. Development of Algal Bloom Removal System Using Unmanned Aerial Vehicle and Surface Vehicle. *IEEE Access*.

Kathib, O. & LeMaitre, J., 1978. *Dynamic control of manipulators operating in a complex environments*. Udine, s.n.

BIBLIOGRAFÍA

Luc, R., s.f. *Designing Control Laws for Cooperative Agent Teams*. s.l., s.n.

Ortega, G., 2014. *ESA Guidance, Navigation, and Control Systems*. Dresdner, s.n.

Roza, A., Maggiore, M. & Scardovi, L., 2019. A Smooth Distributed Feedback for Formation Control of Unicycles. *IEEE Transactions on automatic control*, 64(12).

SAICA, 2020. [En línea]

Available at: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/aguas-superficiales/programas-seguimiento/saica.aspx>

Triantafyllou, M. S. & Hover, F. S., s.f. *Maneuvering and control of marine vehicles*. 2003 ed. s.l.:s.n.