

Universidad Nacional de Educación a Distancia
Máster en Ingeniería de Sistemas y Control

Proyecto Fin de Máster

**Guiado de vehículos marinos en formación
mediante técnicas de control por comportamiento
y control cooperativo**



Alumno: **Pedro M.^a Fernández Varela**
Directora: **Eva Besada Portas**

Curso académico 2016-2017
Convocatoria de defensa: Septiembre

Máster en Ingeniería de Sistemas y Control

**Guiado de vehículos marinos en formación
mediante técnicas de control por comportamiento
y control cooperativo**

Alumno: **Pedro M.^a Fernández Varela**
Directora: **Eva Besada Portas y**



Autorización

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

Firmado:

Firma del alumno

Resumen

El presente trabajo se ubica, dentro del dominio del control de sistemas y de procesos, en el campo del guiado de vehículos autónomos marinos y específicamente en el área del guiado de formaciones de vehículos autónomos.

El objetivo del trabajo es el análisis de dos métodos de guiado conocidos como: método de control basado en comportamientos y método de control cooperativo, ambos con enfoques muy diferentes respecto de la solución aportada a la problemática del guiado de vehículos en formación. Ambos métodos están considerados de gran relevancia en el panorama actual, dentro del contexto señalado. En el trabajo también se incluye información, a modo de introducción, referente a la problemática de las formaciones y se muestran ejemplos de vehículos y de aplicaciones reales donde se emplean las formaciones de vehículos marinos. Además, se exponen los conceptos básicos del modelado de las dinámicas de tales vehículos.

Para realizar el análisis se han creado modelos de simulación de ambos métodos y se ha ilustrado la influencia que, la variación de los parámetros característicos de los controladores implementados, tiene en el comportamiento de las formaciones de vehículos. Los modelos se han implementado con la información obtenida de la bibliografía existente sobre la temática y como herramienta de modelado se ha elegido SIMULINK.

Como conclusión, y tras el estudio de los métodos, se sugieren unos valores límite para los parámetros de interés en cada método, mas allá de los cuales los resultados de simulación no se consideran aceptables. Finalmente y como consecuencia del análisis, se proponen mejoras en los métodos que se podrían enfocar como posibles trabajos futuros.

Palabras clave: guiado de formaciones de vehículos, vehículo autónomo marino, control basado en comportamientos, control cooperativo.

Indice General

1	Introducción.....	4
1.1	Objetivos.....	5
1.2	Organización Memoria.....	7
2	Estado del arte.....	8
2.1	Contexto: Vehículos Marinos Autónomos.....	8
2.2	Formaciones de vehículos marinos autónomos.....	14
2.3	Técnicas de Modelado de Formaciones.....	15
3	Modelado del vehículo marino.....	18
3.1	El sólido rígido.....	18
3.2	Herramientas matemáticas.....	19
3.3	Modelado de un vehículo marino.....	21
3.4	Modelos Dinámicos.....	24
4	Control Basado en Comportamientos.....	31
4.1	Descripción del control NSB.....	32
4.2	Implementación de formaciones mediante control NSB.....	34
4.3	Resultados.....	41
4.4	Limitaciones del algoritmo.....	43
4.5	Conclusiones para el método de control NSB.....	51
5	Control Cooperativo.....	53
5.1	Implementación de formaciones mediante control cooperativo.....	53
5.2	Resultados.....	57
5.3	Limitaciones del algoritmo.....	63
5.4	Conclusiones para el método de control cooperativo.....	73
6	Observaciones Finales.....	75
6.1	Conclusiones.....	75
6.2	Lineas de trabajo futuro.....	76
7	Bibliografía.....	78

Lista de figuras

Fig.1: Vehículo autónomo "C-Enduro" de la compañía ASV Global (Reino Unido).....	11
Fig.2: En sentido descendente y de Izq a Dcha modelos; “DELFIN”, “Roboski”, “Spartan”, “Ocean Cruiser”, UMV-O y proyecto AWAA.....	12
Fig.3: Modelo de temperaturas oceánicas obtenidas durante el evento MB2006 en Monterrey; Sup) Temperatura de superficie de predicción. Inf) Muestras de temperaturas reales.....	13
Fig.4: Ejemplo de formación heterogénea de vehículos marinos.....	15
Fig.5: Convención de componentes de posición y movimiento para un vehículo marino.....	19
Fig.6: Componentes del movimiento de un buque.....	20
Fig.7: Diagrama de bloques para planta según modelo de buque linealizado.....	26
Fig.8: Diagramas de bloques del modelo de buque parcialmente linealizado. Sup) Estructura de la planta en espacio de estados. Inf) Esquema general del modelo con perturbaciones y procesos de actualización de las matrices.....	29
Fig.9: Esquema de arquitectura de control NSB.....	33
Fig.10: Esquema de implementación para control NSB.....	35
Fig.11: Solución geométrica de la tarea "Evitar Obstáculo"	38
Fig.12: Contexto de ejecución de las tareas implementadas para el control NSB.....	40
Fig.13: Control NSB: formación en flecha para trayectoria curva.....	42
Fig.14: Control NSB: formación en línea para trayectoria recta.....	43
Fig.15: Resultados de la variación de la ganancia Λ_b en el control NSB. Sup) Efectos para límite inferior $\Lambda_b=0.0001$. Inf) Efectos para límite superior $\Lambda_b=5$	45
Fig.16: Resultados de la variación de la ganancia Λ_f en el control NSB. Sup) Efectos para límite inferior $\Lambda_f=0.0001$. Inf) Efectos para límite superior $\Lambda_b=10$	47
Fig.17: Resultados de la variación de la ganancia Λ_o en el control NSB. Sup) Efectos para límite inferior $\Lambda_o=0.0001$. Inf) Efectos para límite superior $\Lambda_o=100$	49
Fig.18: Control NSB: comportamiento del algoritmo en la situación "callejón sin salida".....	50
Fig.19: Ejemplo de grafo de comunicaciones bidireccional.....	57
Fig.20: Control cooperativo: formación en paralelo sobre trayectoria rectilínea.....	59
Fig.21: Control cooperativo: formación en flecha sobre trayectoria rectilínea.....	60
Fig.22: Control cooperativo: formaciones sobre trayectoria curva. Sup) Configuración paralelo. Inf) Configuración flecha.....	62
Fig.23: Formación “modelo” para variación de ganancias en control cooperativo.....	63
Fig.24: Resultados de la variación de la ganancia K_1 en el control cooperativo. Sup) Efectos para límite inferior $K_1 = 0.01$. Inf) Efectos para límite superior $K_1 = 5$	66
Fig.25: Resultados de la variación de la ganancia K_2 en el control cooperativo. Sup) Efectos para límite inferior $K_2 = 15$. Inf) Efectos para límite superior $K_2 = 10^5$	67
Fig.26: Resultados de la variación de la ganancia D en el control cooperativo. Sup) Efectos para límite inferior $D = 10^{-6} \cdot I$. Inf) Efectos para límite superior $D = 0.04 \cdot I$	70

Fig.27: Resultados de la variación de la ganancia B en el control cooperativo. Sup) Efectos para límite inferior $B = 0.002 \cdot I$. Inf) Efectos para límite superior $B = 10^3 \cdot I$71

Fig.28: Resultados de la variación de la ganancia E en el control cooperativo. Sup) Efectos para límite inferior $E = 10^{-4} \cdot I$. Inf) Efectos para límite superior $E = 10^4 \cdot I$72

Lista de tablas

Tabla 1: Valores de matrices M y N para el modelo de buque lineal.....26

Tabla 2: Valor real de los coeficientes para el modelo parcialmente linealizado.....30

Tabla 3: Valores límite establecidos para los parámetros del método de control NSB.....50

Tabla 4: Valores límite establecidos para los parámetros del método de control cooperativo.....73

1 Introducción

El concepto de vehículo autónomo ha estado en la imaginación de los inventores desde siempre. Ya Leonardo Da Vinci ideó un pequeño carro autopropulsado que mostraba en ferias y eventos del renacimiento italiano, causando el asombro de los presentes.

El contexto actual es el adecuado para que por fin vehículos con diferente grado de autonomía se integren totalmente en la vida cotidiana. El desarrollo de la tecnología, una predisposición social a su adopción y la existencia de un mercado potencial maduro son las señales claras de que dicha integración ya ha comenzado.

Aunque el concepto de vehículo autónomo evoca a la ciencia ficción, la realidad es que en los últimos años han aparecido muchos ejemplos de auténticos “robots” capaces de planificar trayectorias, evitar obstáculos y efectuar tareas más o menos automatizadas. En el ámbito doméstico, sin ir más lejos, ya se comercializan aspiradoras, cortadores de césped, robots de limpieza para piscinas y automóviles con capacidad de aparcamiento autónomo. Un ejemplo de autoguiado muy precoz y no tan evidente es el piloto automático que incorporan los aviones desde principios del siglo XX. En la actualidad la presencia del piloto humano en la cabina de cualquier vuelo civil o comercial tiene un papel de respaldo para la mayoría de maniobras. El área militar siempre ha sido puntero en desarrollo tecnológico, los misiles y drones son un buen ejemplo de vehículos autónomos. Por otro lado la exploración espacial, muy unida al ámbito militar, no sería posible sin sofisticados sistemas de guiado incorporados en las lanzaderas, cápsulas y modernos robots exploratorios.

La teoría de control aplicada al guiado de vehículos es ecléctica en el más amplio sentido de la palabra, bebe de muchas disciplinas y las bases teóricas llevan décadas asentadas. No obstante, este establecimiento teórico no había sido condición suficiente para conseguir un avance visible hasta ahora, cuando el desarrollo en las tecnologías de computación y el coste de los dispositivos parece ser la piedra angular de su despliegue.

El intenso esfuerzo invertido en el desarrollo de los vehículos autónomos viene motivado por las limitaciones del agente humano. Estas limitaciones se hacen evidentes en tareas con características de multitarea o repetitivas, donde la probabilidad de fallo humano es muy alta, así como en condiciones operativas adversas ya sea por limitaciones fisiológicas o por condiciones de seguridad.

En cualquier circunstancia imaginable donde un operador humano admita asistencia en la operación de un vehículo o directamente pueda ser sustituido se encontrarán sinergias que derivarán en un importante impacto económico, lo que sin duda es la mayor de las motivaciones para la inversión en investigación.

En el ámbito de los vehículos marinos este último punto es crucial, el medio marino no es natural para el ser humano y las operaciones que se desarrollan en él requieren extras en seguridad, logística y planificación con un coste importante. Un buque mercante, por ejemplo, realiza travesías

que pueden durar semanas con un cargamento valorado en millones de euros, las maniobras que efectúa son complicadas a causa de sus características físicas aún en condiciones climáticas favorables, no es infrecuente que existan averías y dificultades de comunicación, si se produjera una emergencia sanitaria a bordo la agilidad en la respuesta dependería prácticamente del propio personal en el buque. El medio marino es pues un contexto ideal para el desarrollo de vehículos autónomos que no requieran de infraestructuras de soporte humano.

Si el primer paso en la autonomía de un vehículo marino es la capacidad de autoguiado, el siguiente paso es la capacidad colaborativa con otros vehículos. Es habitual que en las operaciones marinas, tanto en superficie como subacuáticas, participe un grupo heterogéneo de vehículos y a menudo esto requiere que varios vehículos se desplacen coordinadamente para la consecución de un objetivo común. Algunos ejemplos típicos son las labores de búsqueda y rescate, rondas de vigilancia, remolcado de buques, sondeo de fondos marinos, exploración y maniobras militares entre otros. En todas ellas el éxito depende de que varios vehículos puedan evolucionar en formación, de forma interdependiente y con seguridad.

Todas las razones anteriores centran el foco de las investigaciones actuales en el desarrollo de sistemas de guiado colaborativos que puedan aplicarse de forma generalizada. Dentro de esta línea de investigaciones se encuentran las realizadas por el Grupo de Ingeniería de Sistemas, Control, Automática y Control (ISCAR) de la Universidad Complutense de Madrid (UCM) y el Departamento de Informática y Automática de la Universidad Nacional a Distancia (UNED), que en los últimos 10 años han liderado diferentes proyectos nacionales en el ámbito marino. Más en concreto, en el DPI2013-46665-C1, titulado: “Sistema Autónomo para la Localización y Actuación ante Contaminantes en el Mar (SALACOM)” se están desarrollando diferentes sistemas de control de formaciones generales, para su aplicación posterior durante las labores de despliegue de una red de contención de vertidos por una pareja de vehículos marinos. Por lo tanto, la propuesta de este trabajo de investigación se encuentra relacionada con este proyecto, y tiene como objetivo implementar y delimitar las capacidades de diferentes sistemas de guiado existentes en la literatura.

1.1 Objetivos

El objetivo del presente trabajo es el análisis de las características, funcionamiento y limitaciones de diferentes métodos de guiado de vehículos marinos en formación. En concreto, se estudiarán e implementarán dos métodos de control con enfoques diferentes, el primero conocido como “control basado en comportamientos” [1] y el segundo conocido como “control cooperativo” [2]. Ambos métodos son líneas de investigación principales dentro del área de control.

La consecución del objetivo principal del trabajo ha requerido de varios pasos que en sí mismos tienen entidad propia.

La elaboración de un estudio del arte es siempre conveniente con la finalidad de poner el trabajo en contexto dentro de la situación general. Existen varias líneas de investigación en cuanto a los métodos de guiado de formaciones de vehículos marinos autónomos, así como toda una pléyade de

documentos con información relacionada con proyectos, prototipos y aplicaciones, que requieren un proceso de selección y filtrado de contenido, adaptado a la finalidad del trabajo.

En la implementación de los algoritmos expuestos en [1] y [2] es necesaria la comprensión de conceptos específicos en el área de control de vehículos marinos, así como el conocimiento matemático complementario que permite la derivación de las leyes de control que resultan del diseño. La asimilación de éstos conocimientos requiere la consulta de las referencias incluidas en los propios artículos.

La elección de una herramienta de modelado y simulación lleva intrínseca una capacitación para el manejo de dicha herramienta. Esto determina la habilidad para modelar las soluciones de diseño, diagnosticar las causas de los fallos y resolver los problemas surgidos en los modelos. La elección de la herramienta SIMULINK permite una rápida capacitación en su manejo, con la ventaja de ser un estándar en el ámbito académico, aunque no está exenta de particularidades a la hora de simular un modelo.

Finalmente, la obtención de un modelo funcional, a partir de unos conceptos teóricos, es siempre un reto que supone un extra, si además, se deben encontrar los límites de aplicación y los puntos de fallo en dicho modelo. Por un lado es habitual que, fuera de las condiciones operativas estándar, se pongan de relieve defectos de diseño del modelo y/o implementación, que necesariamente deben ser corregidos. Por otro lado está el propio proceso de búsqueda y ejecución de los casos de simulación en las condiciones de interés, donde se ponga de manifiesto las capacidades y limitaciones del método en cuestión. No se debe obviar, por último que siempre existen labores extra relacionadas con la presentación y justificación de los comportamientos en los referidos casos. Un ejemplo de ello es la extracción de datos de simulación relevantes para el modelo, el proceso de acondicionamiento e interrelación de los datos y la representación adecuada en gráficas.

1.2 Organización Memoria

El documento elaborado se divide en dos partes diferenciadas: una primera parte introductoria y una segunda parte técnica.

En la primera parte, que abarca los capítulos 1, 2 y 3, se introducen los conceptos generales del ámbito del control de los vehículos autónomos marinos. En la sección 2.1 se ofrece una visión en conjunto de la situación, mostrando ejemplos de vehículos y aplicaciones relevantes en las que se utilizan formaciones de vehículos, no únicamente marinos. En la sección 2.2 se introduce el concepto de “formación de vehículos” y la problemática asociada así como las soluciones más comunes empleadas para resolver dicha problemática. El capítulo 3 tiene un contenido más técnico y es una introducción al modelado de vehículos marinos, en él se presentan los modelos de buques utilizados en la implementación de los métodos de guiado.

En la segunda parte, que abarca los capítulos 4 y 5, se presentan los dos métodos implementados para guiado de formaciones de vehículos. En el capítulo 4 se analiza el método de guiado basado en comportamientos denominado “Control basado en espacio nulo” (NSB, Null Space Based) con los detalles de implementación más relevantes, los resultados de las simulaciones y se efectúa un análisis de sus limitaciones. En el capítulo 5 se analiza el método de guiado denominado “Control cooperativo” y se realiza un estudio análogo al capítulo 4.

Por último, al final de los capítulos 4 y 5 así como en el capítulo 6, se aportan las conclusiones de cada método y observaciones respecto del trabajo realizado.

2 Estado del arte

En este capítulo se presenta información y ejemplos relacionados con vehículos marinos autónomos, aplicaciones reales y las técnicas más utilizadas para el modelado de formaciones. El contenido tiene un carácter general y sirve para poner en contexto el trabajo desarrollado.

Aunque la información aquí expuesta es una parte ínfima de la existente se incluyen referencias que sirven como ampliación de conocimiento en el área, tanto en sí mismas como en las referencias en ellas contenidas.

2.1 Contexto: Vehículos Marinos Autónomos

Un vehículo autónomo marino o ASV (Autonomous Surface Vehicle) es todo aquel con capacidades de autoguiado, con diferente grado de autonomía en cuanto que puede reemplazar capacidades típicamente humanas.

Poniendo el ASV en contexto, su desarrollo tecnológico es un área puntera en investigación. La motivación para el ingente esfuerzo invertido en dicho desarrollo predice las numerosas ventajas derivadas de aplicar un creciente grado de autonomía a diferentes tipos de vehículos en aplicaciones reales.

Se estima que un 40% de la población mundial vive en áreas geográficas costeras o bajo su influencia [3], ello repercute en una intensa actividad económica que requiere de infraestructuras adaptadas al entorno marino, principalmente la logística y el transporte. El tráfico marítimo mundial, por poner un ejemplo, creció en el año 2015 un 3,4% acercándose a las 10.000 millones de toneladas [4]. En los océanos existen aún importantes recursos, yacimientos sin explotar y reservas pesqueras, sin obviar la importancia geoestratégica de ciertas zonas marítimas.

La integración de sistemas autónomos de guiado en los vehículos actuales, facilitando la navegación y permitiendo efectuar maniobras de forma desatendida, segura y eficiente, será una importante ventaja competitiva. Aún más, de forma análoga a lo sucedido con otras tecnologías, los sistemas de guiado autónomo serán requisito obligatorio en un futuro no muy lejano. Aunque las tareas candidatas a ser automatizadas se clasifican habitualmente como repetitivas, peligrosas, actividades en remoto y tareas sistematizadas (exploración, obtención de datos,..etc), la realidad es que existe la tendencia a adaptar la tecnología a todo tipo de situaciones, añadiendo por ejemplo, manipuladores o sistemas de visión artificial a los vehículos entre los casos más llamativos.

Un ASV requiere conocer su entorno y detectar obstáculos mediante el uso de diversos sensores. Además para el cálculo de las acciones es imprescindible tener un modelo de su dinámica, que en el caso de los vehículos marinos (y submarinos) son bastante complicadas a causa de las interacciones con el medio. Éstos modelos dinámicos se verán en el capítulo 3.

Un trabajo de interés se referencia en [5] que, aún desactualizado, bien sirve para hacerse una idea global del contexto en el que se desarrollan las investigaciones, así como los retos tecnológicos a superar dentro del área del control autónomo. Entre los contextos mencionados se incide especialmente en el ámbito militar, donde existen requisitos de operación especiales y se busca minimizar la exposición al riesgo a los efectivos humanos, principalmente en misiones de inteligencia y de obtención de datos. Por otro lado, es creciente el interés en el área de la logística y el transporte en las cual el coste de personal puede reducirse drásticamente empleando vehículos autónomos. Se expone además cómo los mencionados retos tecnológicos suponen el desarrollo de nuevas habilidades en, y siguiendo las líneas de investigación fundamentales: el diseño de sensores y actuadores que tengan buena relación señal-ruido, con consumo reducido y características físicas adecuadas para su uso en un ASV; el diseño y uso de materiales de construcción que los doten de características óptimas para el medio, aprovechando la ausencia de sistemas limitantes, como por ejemplo sistemas de soporte vital, o la gestión eficiente de energía proveniente de baterías; algoritmos de control capaces de suplir capacidades típicamente humanas, las cuales se caracterizan por tomar decisiones en base a datos con características difusas o incompletos; sistemas de computación donde se ejecuten los mencionados algoritmos que, aparte de la capacidad de procesamiento necesaria, deben ser tolerantes a fallos, escalables y tener un coste reducido. Por otro lado, el interés por agrupar varios vehículos, para la consecución de objetivos más ambiciosos, está en el concepto mismo de vehículo autónomo, ya que estos objetivos tienen un foco de interés máximo en la obtención de datos mediante redes de sensores móviles y como consecuencia, un nuevo reto técnico se plantea en el área de las comunicaciones, al tener que ampliar la capacidad de transmisión de datos en diferentes contextos, reduciendo el uso de ancho de banda y mejorando la tolerancia a fallos. En la sección 2.2 se tratará el tema de las formaciones de vehículos.

Resulta intuitivo establecer los puntos diferenciadores en un vehículo autónomo. Por un lado el concepto de guiado, que comprende las acciones necesarias para seguir una trayectoria predefinida. Estas acciones se sintetizan en tres tareas básicas:

1. Estabilización puntual, que posiciona el vehículo en un punto espacial con una determinada orientación.
2. Seguimiento de trayectoria, que cumple unas especificaciones temporales mediante la asignación de una velocidad así como espaciales mediante la eliminación de error de posicionamiento respecto de una referencia.
3. Evitación de obstáculos y detección de riesgos basados en mediciones de los sensores.

Por otro lado, el concepto de autonomía es abstracto y depende del contexto. Utilizando como referencia a Sheridan en [6], donde se establecen grados de autonomía según se requiera la participación de un supervisor en las operaciones de guiado, se establece la siguiente escala:

1. El vehículo no necesita interacción humana.
2. Se informa al supervisor solo si es necesario.

3. Se informa al supervisor si se le requiere.
4. Realiza de manera automática una acción e informa al supervisor.
5. Antes de ejecutar una acción permite la cancelación por parte del supervisor.
6. Ejecuta una acción automática previa aceptación por parte del supervisor.
7. Propone una acción entre varias posibles ante una situación.
8. Propone un conjunto de acciones candidatas ante una situación.
9. Propone varias alternativas de pares decisión/acción ante una situación.
10. El supervisor toma todas las decisiones.

El ideal de autonomía de un ASV debería estar como mínimo en el nivel 5, por lo que un vehículo operado de forma remota no puede considerarse autónomo por muy sofisticado que sea su equipamiento. Tomemos como ejemplo uno de los problemas básicos del autoguiado, la evitación de obstáculos. Se puede afirmar que el manejo de situaciones imprevistas es lo que confiere de “inteligencia” a un sistema y ante un riesgo de colisión es frecuente que no exista tiempo para iniciar una consulta al supervisor, puede incluso que éste no tuviera capacidad de reacción si se tratara de una operación remota y hubiera un fallo de comunicación. Por lo tanto, se puede considerar que la tarea “evitar obstáculos” debe cumplir el máximo nivel de competencia. Aún más, puede decirse que la evitación de obstáculos subyace en la práctica totalidad de situaciones imprevistas y que el proceso no debe entenderse únicamente como las acciones que permiten esquivar un obstáculo físico en la trayectoria, sino que un proceso de “evasión” es necesario en otros contextos habituales donde se requieren niveles altos de competencia. Un ejemplo de ello son las maniobras de atraque en puerto donde se busca precisión en los movimientos, cálculos de distancias y una estimación en detalle de las fuerzas que actúan sobre el casco. Otro ejemplo a considerar son las operaciones en presencia de otros vehículos marinos, igualmente en movimiento, donde se requiere un proceso de evaluación del riesgo de colisión y anticipación de movimientos para mantener la seguridad en el conjunto de vehículos.

Expuesta la problemática tecnológica y de contexto se mostrarán algunos casos reales de ASVs, así como una aplicación real donde estos vehículos son la herramienta fundamental. A consecuencia de la multitud de modelos existentes y la dificultad de elección se ha tomado como referencia [7] donde se realiza una selección de varios prototipos y proyectos, diseñados principalmente en los EEUU, junto algunas de sus características y uso.

En la Fig.1 se muestra el modelo “C-Enduro”, de la compañía ASV Global (Reino Unido: “<https://www.asvglobal.com/>”), un modelo catamarán diseñado para labores de monitorización y recopilación de datos oceánicos que está equipado con sensores tanto aéreos como subacuáticos y que puede realizar labores de enlace de comunicaciones para operaciones con vehículos autónomos submarinos o UAVs (Underwater Autonomous Vehicles).



*Fig.1: Vehículo autónomo "C-Enduro" de la compañía ASV Global (Reino Unido).
Ref:<https://www.asvglobal.com/product/c-enduro/>*

En la Fig.2 se muestran (en orden descendente y de izquierda a derecha) varios ejemplos más: el primero es el modelo "DELFIN", del "Laboratorio de Robótica Oceánica y Sistemas Dinámicos" en Lisboa, un modelo tipo catamarán diseñado para la investigación con una autonomía de 700 millas náuticas. A continuación aparece el prototipo militar "Roboski", de la Marina de los EE.UU, un vehículo en formato moto acuática concebido como blanco móvil y que más tarde fue reconvertido a labores de reconocimiento. El siguiente modelo es prototipo militar "SPARTAN", un vehículo modular, configurable y que permite el transporte de mercancías en misiones multipropósito. Se continúa con el "Ocean Cruiser", prototipo de la compañía UOV, en Virginia(EE.UU), un vehículo en formato velero monocasco, energéticamente autosuficiente, equipado con paneles solares y que opera a bajas velocidades. Fue diseñado para labores de reconocimiento, vigilancia y obtención de datos. Le sigue el modelo "UMV-O" de la compañía Yamaha (Japón), un vehículo para largas travesías diseñado para labores científicas de observación oceánica y atmosférica. Por último se muestra una ilustración conceptual del proyecto "AAWA", de la compañía Rolls Royce, aún en fase de investigación y que promete la fabricación y distribución de vehículos autónomos para el transporte transoceánico de mercancías.



Fig.2: En sentido descendente y de Izq. a Dcha. modelos; “DELFIN”, “Roboski”, “Spartan”, “Ocean Cruiser”, UMV-O y proyecto AWAA. Ref:[7]

Como último caso se hace mención a un ejemplo real de aplicación de formaciones de vehículos marinos, referenciado en [8] y denominado “Autonomous Ocean Sampling Network” (AOSN), un experimento realizado bajo en ámbito del proyecto MB06 (<http://www3.mbari.org/mb2006/>) ubicado en la bahía de Monterrey (California) en los meses de verano del 2006. El objetivo del proyecto MB06 fue proporcionar un escenario real a investigadores de diversas áreas, implementando una red de sensores móviles, con el fin de obtener datos científicos para generar modelos de predicción de procesos oceánicos. En la Fig.3 se ilustra el esquema general del proyecto. La captación de datos se realizó mediante el despliegue de varios grupos de vehículos autónomos (entre ellos diferentes modelos de ASVs) que obtuvieron una serie de mediciones ambientales sobre corrientes marinas, estratificación biológica e hidrodinámicas oceánicas, además de realizar varios experimentos de comunicación submarina. Los ASVs de los experimentos realizaron un “muestreo adaptativo” de forma que las trayectorias de cada vehículo en las formaciones se adaptaban al estado global de la observación; cada sensor se posicionaba donde su desempeño fuera óptimo con una solución de guiado basada en métodos cooperativos, que usaban como modificadores de trayectoria el estado (lectura de sensores) de un subconjunto de vehículos en la vecindad. En [9] se puede encontrar información adicional.

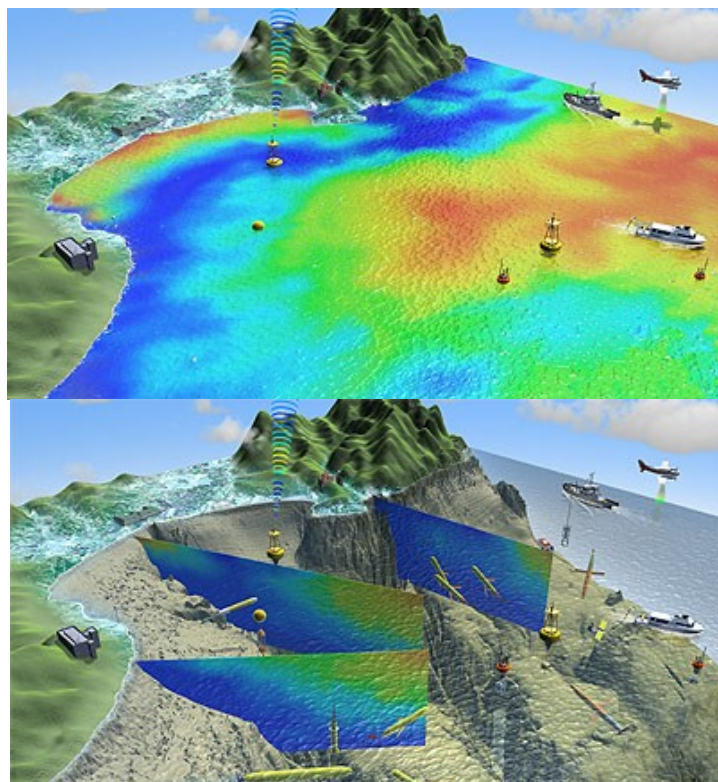


Fig.3: Modelo de temperaturas oceánicas obtenidas durante el evento MB2006 en Monterrey; Sup) Temperatura de superficie de predicción. Inf) Muestras de temperaturas reales. Ref:<http://www3.mbari.org/mb2006/>

2.2 Formaciones de vehículos marinos autónomos

A medida que los sistemas crecen en complejidad y aumenta la sofisticación de las tareas, la tendencia natural es emplear varios agentes que colaboren en la consecución de un objetivo, siendo ésta a menudo la única solución posible. No es extraño además que se produzcan sinergias que alerten sobre potenciales aplicaciones surgidas de la interrelación de componentes heterogéneos. El uso de múltiples agentes que colaboran en la consecución de una meta lleva intrínsecas las siguientes ventajas:

- Tolerancia a fallos: el fallo de funcionamiento en un número determinado de agentes aún permite la consecución del objetivo.
- Flexibilidad: las tareas pueden ser reasignadas de manera dinámica para adaptarse a cambios inesperados y situaciones imprevistas en entornos reales.
- Escalabilidad: la ampliación de la capacidad global se consigue aumentando el número de agentes, aunque eso habitualmente requiera un “cierto” ajuste en las infraestructuras de coordinación.
- Precio: el coste de varios agentes simples es por regla general inferior al de un único agente más complejo.

Hay que destacar la desventaja principal del paradigma, que surge de los inconvenientes asociados a la coordinación entre diferentes elementos. Esta coordinación requiere un intercambio de información que genera un cuello de botella en el proceso de comunicaciones. Las infraestructuras y algoritmos de intercomunicación cuentan con inherentes limitaciones: principalmente el ancho de banda disponible, el ruido inherente al medio de comunicación, las latencias introducidas por los sistemas gestores de tráfico y los inevitables fallos intermitentes. Especialmente los ASVs se ven afectados por restricciones en sus comunicaciones a causa del medio marino.

Las formaciones pueden ser heterogéneas y no todos los vehículos implicados tienen que estar en movimiento. Aunque es habitual entender una “formación” como una interrelación espacial en la que todos los vehículos evolucionan con cierta simetría y con velocidades semejantes, la realidad es que una formación admite otras configuraciones. Algunos casos son las maniobras coordinadas en misiones de defensa y ataque, problemas de maximización en la exploración de un área, creación de una zona de enlace de comunicaciones, etc. En [10] se muestra un interesante ejemplo cuyo objetivo es realizar un mapa del hábitat marino, ilustrado en la Fig.4. En el ejemplo se describe un esquema formado por un vehículo de superficie (ASV), un vehículo submarino autónomo (AUV) primario y un escuadrón de AUVs secundarios. El ASV actúa como enlace de comunicaciones, conectado físicamente (cable umbilical) con un AUV primario que realiza fotografías del hábitat sobre el lecho marino. Las fotografías se envían a un barco nodriza que actúa de centro de control y donde se evalúan los datos transmitidos. A su vez existe un escuadrón de AUVs secundarios en espera que son activados desde el centro de control, cuando se detecta una zona de interés, para iniciar una exploración detallada de la zona. La misión requiere que tanto el ASV como el UAV

primario sigan una trayectoria en sincronía vertical y en zigzag mientras el escuadrón de AUVs secundarios efectúa de forma desatendida y coordinada la maniobra de sondeo detallado en la zona. En este caso la plataforma ASV se comunica vía radio con el barco nodriza, a través de un enlace físico con el AUV primario y mediante señales acústicas (SONAR) con el escuadrón de AUVs secundarios.

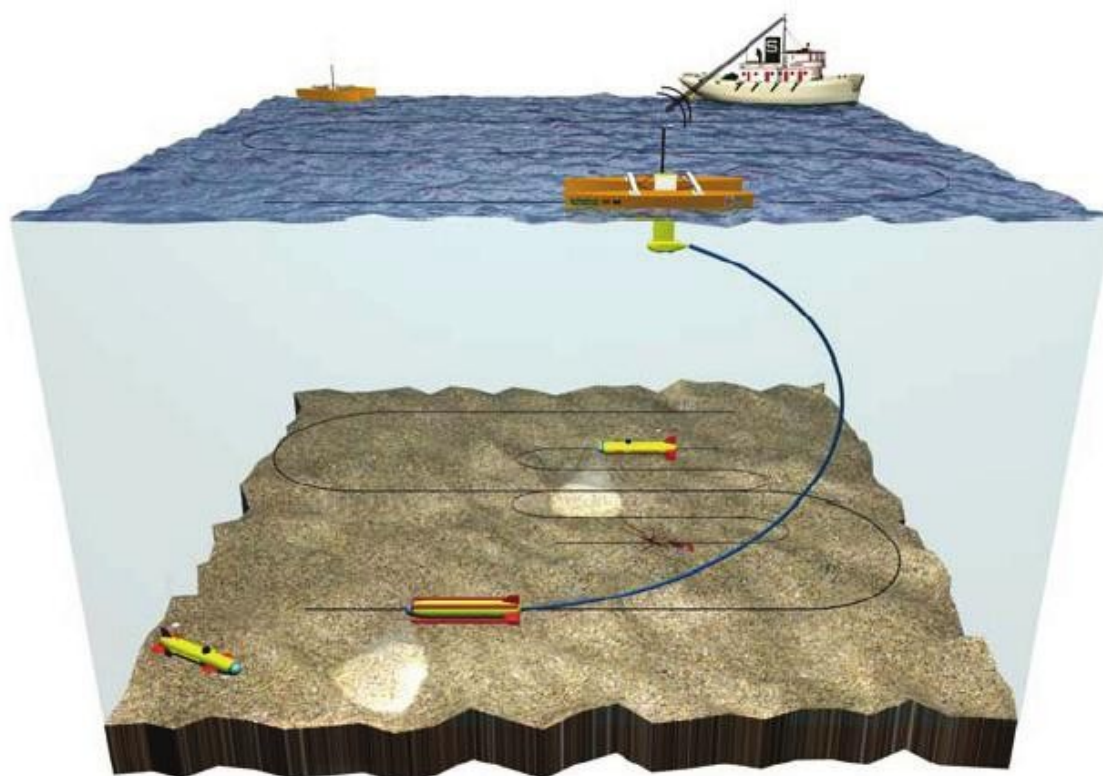


Fig.4: Ejemplo de formación heterogénea de vehículos marinos. Ref:[10]

2.3 Técnicas de Modelado de Formaciones

Una formación espacial de vehículos se puede modelar según el método empleado para: definir la geometría, diseñar los algoritmos para mantenerla estable en presencia de perturbaciones y asignar a cada vehículo su posición dentro de la formación. En los párrafos siguientes se hablará únicamente de las técnicas más relevantes para definir las geometrías de las formaciones.

Una clasificación básica de éstos métodos se basa en la naturaleza centralizada o descentralizada de su arquitectura. En un método centralizado existe un proceso, bien un agente externo de control o bien en uno de los vehículos, que conoce el estado de todos los vehículos en la formación, calcula todas las trayectorias individuales en base a las lecturas de los sensores y envía las ordenes de movimiento a cada vehículo. En cambio, en un método descentralizado, cada vehículo dispone de los parámetros que definen su trayectoria objetivo, sondea su entorno y conoce el estado de un

subconjunto de los vehículos de la formación, información con la que calcula su propia trayectoria real.

Algunas de las técnicas más relevantes en el modelado en formaciones se citan a continuación.

Estructuras Virtuales (Virtual Structures)

En las estructuras virtuales el comportamiento de cada vehículo en formación se asemeja al de una partícula incrustada en una estructura fija. La formación es definida como un conjunto de restricciones espaciales que parametrizan una configuración geométrica. Los vehículos deben respetar en su movimiento las restricciones a medida que la propia formación se desplaza. Un ejemplo de esto se encuentra en [11] donde el algoritmo diseñado usa el desplazamiento de la geometría de la formación para el cálculo de las trayectorias individuales de cada vehículo según su posición dentro de la misma.

El algoritmo de control de una estructura virtual necesita conocer los datos de los sensores de todos los vehículos para generar todas las trayectorias objetivo por lo que está clasificado dentro de los métodos centralizados.

Basados en comportamientos

Los métodos basados en comportamiento definen, para cada vehículo, un conjunto de tareas o “comportamientos” que cumplen diferentes objetivos priorizados según el contexto. Según la variante del algoritmo implementado, se puede priorizar de manera absoluta la consecución del objetivo de una de las tareas alternándolas según la prioridad vigente, o bien buscar una ponderación de objetivos de forma que se puedan cumplir todos los objetivos en la mayor medida posible. Ejemplos de tareas o comportamientos son el evitar un obstáculo y el mantener la posición dentro de la formación.

Los métodos basados en comportamientos suelen clasificarse dentro de los métodos centralizados.

En el capítulo 4 se tratará con más detalle un método basado en comportamiento denominado “Control NSB”.

Seguimiento al líder

En los métodos “seguimiento al líder” existe una dependencia entre el movimiento de un vehículo denominado líder y otro vehículo que le sigue [12]. Se pueden dar dependencias encadenadas de forma que un líder puede comportarse a su vez como seguidor de otro líder diferente.

Las dependencias son espaciales y temporales. La dependencia espacial determina la trayectoria que sigue vehículo en función de la trayectoria del líder manteniendo una relación geométrica, un ejemplo son las trayectorias paralelas. La dependencia temporal establece una relación entre la velocidad del líder y la velocidad del vehículo seguidor. La combinación de ambas genera la formación.

En este tipo de métodos cada vehículo conoce únicamente su estado y bien, el estado de su líder, o bien el estado de un conjunto de vehículos en la formación. En consecuencia y con la información de sus sensores genera su propia trayectoria. El método se clasifica por ello como no centralizado.

El punto débil en éste tipo de métodos está en el propio líder: cualquier situación que afecte su movilidad repercute en la formación al completo. Además, si algún seguidor no pudiera permanecer en la formación, quedaría descolgado sin que los demás tuvieran conocimiento de ello. Esto último puede suceder en formaciones con vehículos heterogéneos donde, por ejemplo, existen diferentes velocidades máximas o capacidades de maniobra. Una forma de evitar ésto último es aumentar la información de la que dispone un vehículo seguidor con el estado de un conjunto de vehículos accesibles.

En el capítulo 5 se tratará con más detalle un método de seguimiento al líder denominado “Control Cooperativo”.

Campos potenciales artificiales (Artificial Potential Fields).

Los campos potenciales fueron concebidos para evitar las colisiones de los manipuladores con los obstáculos presentes en las maniobras, aunque la técnica se adaptó fácilmente al problema de guiado en los vehículos autónomos. El concepto básico de un campo potencial es un campo de gradiente ficticio donde los obstáculos son puntos repulsivos y los puntos de trayectoria son puntos de atracción. Un vehículo que se desplaza a través del campo potencial artificial mantiene un balance entre energía potencial según el formalismo de Lagrange [13] que solo puede ser modificado por las fuerzas de control y las perturbaciones. El desplazamiento evita los puntos repulsivos mientras es atraído hacia el objetivo final. El uso de campos potenciales artificiales se combina con otras técnicas para el guiado de varios vehículos en formación. Por ejemplo en [14] se utiliza la técnica de las estructuras virtuales para definir las posiciones dentro de la formación mientras que los campos potenciales determinan a bajo nivel la manera segura y más eficiente de mantener cada vehículo en la formación según la distancia de cada vehículo con sus vecinos inmediatos.

Según la combinación de técnicas se puede considerar el método como centralizado o descentralizado.

3 Modelado del vehículo marino

En teoría de control, un modelo dinámico es un conjunto de ecuaciones obtenidas mediante cálculos, estimaciones y mediciones experimentales que aproximan el comportamiento de las dinámicas reales de un sistema mas o menos complejo, con el objetivo de extraer una formalización matemática del comportamiento físico en el mundo real. En el contexto de los ASVs, el modelo dinámico permite predecir la respuesta cinemática de un buque en presencia de perturbaciones y ante diferentes estímulos externos.

Esta dinámica se utiliza para diseñar un controlador que genere las respuestas correctas en el modelo para la consecución de un objetivo, en este caso seguimiento de trayectorias. En el capítulo se darán las nociones básicas que se aplican en el modelado de las ecuaciones dinámicas de un vehículo marino, se introducen las herramientas matemáticas y se presentan los modelos usados en capítulos posteriores.

Una breve introducción sobre el modelado dinámico de un vehículo marino es un paso natural en la exposición, anticipando que el lector no tienen porqué tener una formación previa en el área, así como el hecho de que los siguientes capítulos se basan en el conocimiento de dichos modelos dinámicos para el diseño de los controladores en los métodos de guiado.

Se han consultado varias referencias para la confección de la información aquí expuesta. Así [15] contiene, a modo de material didáctico, un amplio abanico de conceptos de interés, desde la dinámica de un sólido rígido al modelado de perturbaciones por corrientes, viento y olas. En [16] se muestra un procedimiento completo de identificación y modelado para un vehículo marino. En [17] son de especial interés los capítulos 2, 3 y 6 donde de manera extensa se explican las cinemáticas de un buque como un “sólido rígido” con sus ecuaciones y las teorías de maniobra.

3.1 El sólido rígido

El concepto físico de “buque” es el de un sólido rígido con seis grados de libertad (6DOF, 6 Degrees Of Freedom), entendiendo por “grado de libertad” a la posibilidad de una traslación y rotación independiente en cada uno de los tres ejes cartesianos, bases en un sistema de coordenadas en el espacio euclídeo, ver Fig.5.

La traslación en cada uno de los ejes X, Y, Z se denomina avance, deriva y arfada. Esta última tiene naturaleza oscilatoria en un vehículo de superficie (no así en un vehículo submarino) y está causada por perturbaciones del medio marino o como consecuencia de los demás componentes del movimiento. Igualmente cada una de las rotaciones sobre los ejes se denominan balanceo, cabeceo y rumbo (o guiñada). La posición de un vehículo en el espacio tridimensional se define mediante un vector de seis componentes $[x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$ y su velocidad mediante otro vector con las correspondientes componentes $[u, v, w, \dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}]^T$.

El objetivo fundamental es el diseño de un controlador de trayectoria para un modelo de buque simplificado que se desplaza a velocidades medias-altas, donde el componente deriva es despreciable respecto al componente de avance. En estas condiciones operativas es posible reducir la complejidad trabajando sobre un modelo con tres grados de libertad (3DOF) y representación $\eta=[x, y, \psi]^T$ para la posición y $v=[u, v, r]^T$ para la velocidad.

Esta simplificación omite en el modelo los componentes de arfada, balanceo y cabeceo puesto que, en las condiciones indicadas, las componentes no aportan información de interés a las dinámicas del vehículo marino y se suelen modelar como perturbaciones.

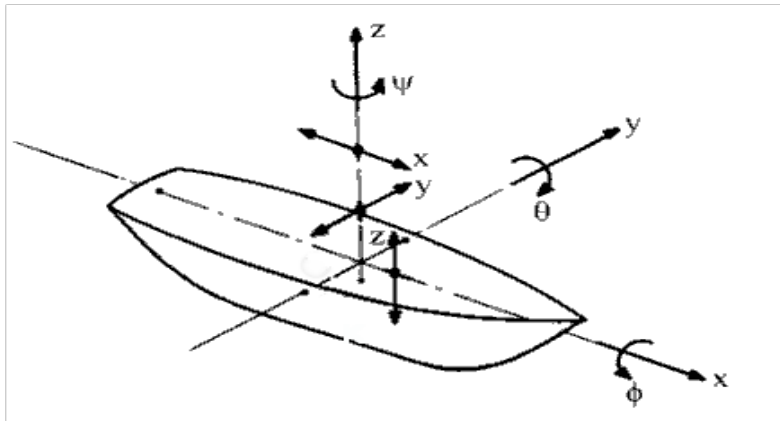


Fig.5: Convención de componentes de posición y movimiento para un vehículo marino.
Ref:https://wiki.marin.nl/index.php/Coordinate_systems

3.2 Herramientas matemáticas

Es habitual establecer dos sistemas de coordenadas para representar el movimiento del vehículo:

- **Sistema de coordenadas Inercial** $\{I\}$: con orientación Norte, Este, Abajo (NED) y que sirve de referencia global para la posición del buque.
- **Sistema de coordenadas No inercia o Local** $\{L\}$: con orientación NED y fijado en el centro de masas del buque. Sirve como referencia para los componentes de las dinámicas vistas desde el punto de vista del propio vehículo, simplificando así su representación.

Las componentes del movimiento de un vehículo se muestran en la Fig.6: el sistema de referencia $\{L\}$ se ubica en η (posición del vehículo) con una rotación de ψ respecto de $\{I\}$. La velocidad relativa del vehículo v_r con componentes $[u, v, r]$ se expresa en $\{L\}$ como un vector de módulo U y ángulo χ y es resultado de las fuerzas de control del vehículo. En presencia de perturbaciones, comúnmente corrientes, cuyo vector v_c es la transformación a $\{L\}$ del vector v_c (inicialmente referenciado en $\{I\}$), se obtiene el vector velocidad absoluta del buque según la expresión $v=v_r+v_c$, donde v está referenciado en $\{I\}$.

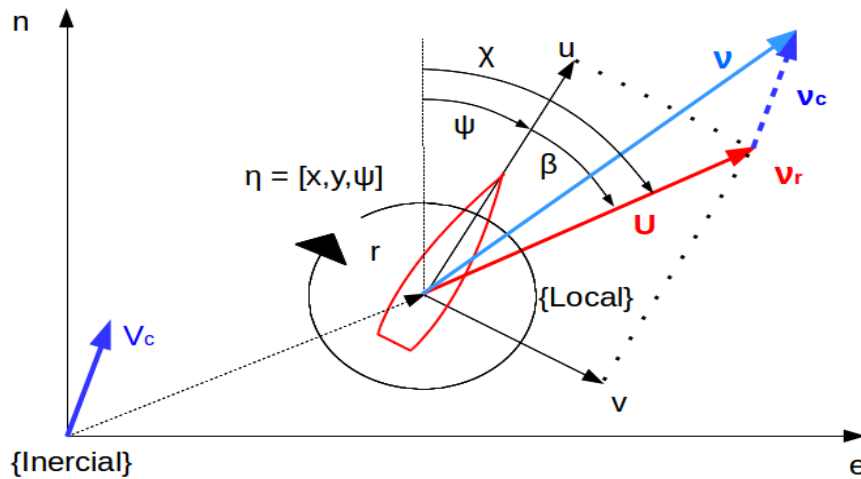


Fig.6: Componentes del movimiento de un buque.

Es habitual encontrar dos clases de buques según sus capacidades de movimiento:

- **Sobreactuado** cuando disponen de capacidad para generar impulso lateral y disponen de un sistema de actuadores extra que permite maniobrabilidad total a velocidades bajas.
- **Subactuado** cuando no tienen capacidad de generar impulso lateral.

Si un buque es sobreactuado puede generar componente deriva ($v \neq 0$) y su velocidad relativa v_r determina un ángulo de trayectoria χ diferente del ángulo de rumbo ψ . A ésta diferencia de ángulos se la representa por β y se expresa según $\chi = \psi + \beta$. Un buque sobreactuado puede seguir una trayectoria de referencia sin variar el ángulo de rumbo ψ lo que le confiere capacidades extras.

Si un vehículo es subactuado no puede generar componente de deriva ($v = 0$) y el módulo de la velocidad v_r equivale a su componente no nula $U = u$, consecuentemente el ángulo $\beta = 0$ y la diferencia entre la dirección real χ y la dirección de referencia se debe compensar variando el rumbo de trayectoria ψ .

La transformación de los vectores entre los sistemas de coordenadas definidos se realiza según la relación $\dot{\eta} = R(\psi)v$, donde $\dot{\eta}$ representa el vector velocidad absoluta del buque en sistema de coordenadas Inerciales $\{I\}$, el vector v es su transformación a sistema de coordenadas local $\{L\}$ y $R(\psi)$ es la matriz de rotación según el ángulo ψ expresada como:

$$R(\psi) = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

La matriz de rotación cumple las propiedades matemáticas siguientes:

1. $R(\psi)^T R(\psi) = I$
 2. $\|R(\psi)\| = 1$
- $S = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$ definida como matriz oblicua o "skew",

$$3. \quad \dot{R}(\psi) = \dot{\psi} R(\psi) S$$

obteniéndose, sobre lo anteriormente expuesto, las relaciones de velocidades:

$$v_r = v - R(\psi)^T v_c \quad (1)$$

$$\dot{v}_r = \dot{v} - r S^T R(\psi)^T v_c. \quad (2)$$

3.3 Modelado de un vehículo marino

Partiendo de la segunda ley de Newton se deriva la ecuación general del movimiento de vehículo marino:

$$M_{RB} \dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau_{RB}, \quad (3)$$

con los componentes siguientes:

M_{RB} : matriz de inercias del sólido rígido. Su efecto físico es la resistencia al cambio que experimenta una masa sometida a aceleración lineal y angular, y toma la forma:

$$M_{RB} = \begin{pmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & mx_g \\ 0 & mx_g & I_z \end{pmatrix},$$

donde m es la masa del cuerpo, x_g es la distancia en las coordenadas locales del centro de masas e I_z es el momento de inercia en el eje z . Por simplicidad a menudo se establece el centro de masas del sólido en el origen de coordenadas del sistema de referencia $\{L\}$, eliminando así los términos en x_g .

$C_{RB}(v)$: matriz de fuerzas centrípetas y Coriolis. Su efecto físico tiene que ver con las fuerzas que aparecen sobre una masa que se mueve en un sistema inercial y en un medio viscoso. Una forma común de expresión para ésta matriz es:

$$C_{RB}(v) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -m(x_g r + v) \\ 0 & 0 & mu \\ m(x_g r + v) & -mu & 0 \end{pmatrix},$$

con los componentes análogos a la matriz de inercias M_{RB} . Además u , v y r son las componentes de la velocidad en el sistema de coordenadas $\{L\}$ y x_g es la distancia del centro de masas al origen de coordenadas.

τ_{RB} : vector de fuerzas externas que actúan sobre el sólido rígido con componentes $[\tau_u, \tau_v, \tau_r]$. Este término es el resultado de la composición de otras fuerzas causadas por efectos hidrodinámicos, acciones de control y perturbaciones tales como corrientes, olas. etc.

Se expresa como:

$$\tau_{RB} = \tau_H + \tau_C + w ,$$

donde el termino τ_H es el conjunto de fuerzas hidrodinámicas, τ_c es la fuerza de control y w es la fuerza de perturbación. Estos términos se explican a continuación.

Las fuerzas hidrodinámicas τ_H aparecen como resultado de la interacción entre un solido móvil sumergido en un fluido y el propio fluido. El vector de fuerzas hidrodinámicas agrupa una superposición de varios efectos relacionados con rozamientos, “masas añadidas” o (added mass) y fuerzas de presión de fluido. Ya se definió el concepto de velocidad relativa como la diferencia entre la velocidad del buque y la velocidad de la corriente $v_r = v - v_c$ donde el vector de corriente v_c se proporciona en coordenadas globales $\{I\}$ y se transforman según $v_c = R(\psi)^T v_c$ a coordenadas locales $\{L\}$. Así las fuerzas hidrodinámicas se expresan en función de la velocidad relativa v_r como:

$$\tau_H = -M_A(\dot{v}_r) - C_A(v_r)v_r - d(v_r) ,$$

con los términos siguientes:

M_A : matriz de masas añadidas (Added Mass) con la forma:

$$M_A = \begin{pmatrix} -X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & -Y_{\dot{v}} & -Y_{\dot{r}} \\ 0 & -N_{\dot{v}} & -N_{\dot{r}} \end{pmatrix} ,$$

donde los valores $X_{(\cdot)}$, $Y_{(\cdot)}$ y $N_{(\cdot)}$ son coeficientes dependientes de la forma del casco. La interpretación física de esta matriz es el conjunto de fuerzas resultantes de la presión de fluido sobre el casco consecuencia de la velocidad y aceleración del buque. En condiciones de simulación con fluidos ideales se cumple $M_A = M_A^T$.

C_A : matriz de fuerzas centrípetas y Coriolis añadidas (Added Coriolis & Centripetal Forces). Esta matriz, calculada a partir de M_A y de la velocidad relativa v_r , es antisimétrica; $C_A = -C_A^T$ con estructura:

$$C_A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & c_{13}(v) \\ 0 & 0 & c_{23}(v) \\ -c_{13}(v) & -c_{23}(v) & 0 \end{pmatrix} ,$$

donde los coeficientes se obtienen según $c_{13}(v) = Y_{\dot{v}}v_r + \frac{1}{2}(N_{\dot{v}} + Y_{\dot{r}})r$ y $c_{23}(v) = -X_{\dot{u}}u_r$.

$d(v_r)$: vector de amortiguamiento (Damping Vector) cuyos componentes no lineales se suelen determinar combinando técnicas analíticas y datos experimentales. Una expresión habitual para calcular el vector de amortiguamiento es:

$$d_{(v_r)} = D_L v_r + D_{NL}(v_r)v_r = D(v_r)v_r ,$$

con la componente lineal:

$$D_L = \begin{pmatrix} -X_u & 0 & 0 \\ 0 & -Y_v & -Y_r \\ 0 & -N_v & -N_r \end{pmatrix},$$

y la componente no lineal:

$$D_L = \begin{pmatrix} -d_{11}(v_r) & 0 & 0 \\ 0 & -d_{22}(v_r) & -d_{23}(v_r) \\ 0 & -d_{32}(v_r) & -d_{33}(v_r) \end{pmatrix},$$

con los elementos de la matriz calculados según las ecuaciones; $d_{11}(v_r) = X_{|u|} |u_r| + X_{uu} u_r^2$, $d_{22}(v_r) = Y_{|v|} |v_r| + Y_{|r|} |r|$, $d_{23}(v_r) = Y_{|v|r} |v_r| + Y_{|r|r} |r|$, $d_{32}(v_r) = N_{|v|} |v_r| + N_{|r|} |r|$ y $d_{33}(v_r) = N_{|v|r} |v_r| + N_{|r|r} |r|$.

Los coeficientes $X_{(\cdot)}$, $Y_{(\cdot)}$ y $N_{(\cdot)}$ se denominan coeficientes de fricción (Drag Terms) y son datos proporcionados como parte de las características del modelo. Más información referente al cálculo de estos coeficientes y su origen puede ser consultado en [18].

Establecidos los términos necesarios se puede expresar el modelo simplificado de buque según la expresión:

$$M_{RB} \dot{v} + M_A \dot{v}_r + C_{RB}(v) v + C_A(v_r) v_r + D(v_r) v_r = \tau_c + w, \quad (4)$$

donde las matrices de “masas añadidas” dependen de la velocidad relativa v_r y las matrices inerciales dependen de v . Finalmente es común reducir la expresión (4) a:

$$M \dot{v} + C(v) v + D(v) v = \tau + R(\psi)^T w_c + w_b, \quad (5)$$

donde se han efectuado las contracciones de términos según $M = M_{RB} + M_A$ y $C(v) = C_{RB}(v) + C_A(v)$.

En la expresión (5) los términos: w_c son las fuerzas de corrientes, w_b es un término que modela otras fuerzas externas (olas y/o viento) y el término $\tau_c = [\tau_{c,u}, \tau_{c,v}, \tau_{c,r}]^T$ es la fuerza de control generada por los actuadores. Ésta fuerza de control puede ser, dependiendo del problema a modelar, una función del ángulo del timón, revoluciones por minuto (rpm) de los motores, etc.

3.4 Modelos Dinámicos

En el diseño de un controlador, además del objetivo de control, es fundamental el modelo dinámico sobre el que se aplica. Cuando la finalidad es mostrar el resultado de la aplicación del algoritmo de control sobre algún vehículo de interés es común usar modelos parcialmente linealizados con indeterminaciones y perturbaciones en las dinámicas, así se facilita la adaptación de los modelos de

simulación a modelos reales. En otras ocasiones, cuando el objetivo es incidir en el comportamiento del propio algoritmo de control, se eligen modelos linealizados sin indeterminación de parámetros y opcionalmente presencia de perturbaciones en las dinámicas. Así cualquier modelo será alguna variante de la ecuación (5), según el proceso de linealización aplicado, la presencia de indeterminaciones en las dinámicas y el modelo de perturbaciones elegido.

El objetivo de un modelo dinámico es servir de “planta” para los controladores implementados y el esquema general “controlador-planta” requiere la transformación de un modelo expresado con ecuaciones dinámicas a otro modelo equivalente expresado en espacio de estados. Un modelo en espacio de estados está expresado por las ecuaciones:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (6)$$

$$y = Cx + Du \quad (7)$$

donde x es el vector de estados que en un modelo de buque se corresponde con su velocidad relativa $v_r = [u, v, r]^T$, las matrices A , B , C y D son matrices de estado, entrada, salida y transmisión directa respectivamente; u es el vector de entrada de planta o control que se corresponde con $\tau = [\tau_1, \tau_2, \tau_3]^T$; finalmente y es la salida de planta que en el modelo se corresponde con el vector de estado v_r .

Se presentan a continuación los dos modelos implementados en el trabajo: un modelo linealizado extraído de [1] y otro parcialmente linealizado extraído de [2], los cuales están adaptados a la naturaleza de cada método de control tratado. A continuación se explica cómo se han transformado, ambos modelos, de su representación como ecuación dinámica a modelo en espacio de estados.

3.4.1 Modelo linealizado con perturbaciones

El modelo de buque usado en el método de control por comportamiento, tratado en el capítulo 4, es el referenciado en [1] cuyas características son:

- Modelo completamente linealizado y sobreactuado.
- Con fuerzas de perturbación.

Con ecuación dinámica:

$$M \dot{v} = \tau - N(v)v + R^T(\psi)w, \quad (8)$$

donde la correspondencia con los términos en (5) es:

- M : matriz de inercias, resultado de la combinación y linealización de los términos de inercia M_{RB} y matriz de masas añadidas M_A .
- N : combinación lineal de la Matriz de Coriolis y fuerzas centrípetas (y su correspondiente matriz de fuerzas añadidas) con la matriz de fuerzas hidrodinámicas.

- τ : vector de fuerzas de control.
- w : vector de fuerzas de perturbación expresadas en sistema de coordenadas $\{L\}$ y $R^T(\psi)$ la matriz de transformación a coordenadas $\{I\}$.

El modelo de espacio de estados se puede obtener de forma directa partiendo de (8) y transformando la ecuación:

$$\dot{v} = M^{-1}\tau - M^{-1}N(v)v + M^{-1}R^T(\psi)w, \quad (9)$$

Con las equivalencias en (6)-(7) según: $A = -M^{-1}N$, $B = -M^{-1}$, $C = I$ y $D = 0$. Además se hace corresponder $x = v$, $y = v$ y $u = (\tau + R^T(\psi)w)$.

La codificación del esquema usando un bloque “espacio de estados” (disponible en SIMULINK) es inmediata según el esquema mostrado en la Fig.7. La simulación de la planta requiere el calculo de la matriz de rotación $R(\psi)$ y su inversa $R^T(\psi)$, la función del bloque $S(\psi)$ es el calcular esas matrices.

La simulación de la dinámica de la planta se efectúa en los siguientes pasos:

1. Se combinan las perturbaciones con la señal de control para calcular la entrada a la planta.
2. Se computa la salida de la planta v resultado la aplicación de la señal de entrada del punto anterior.
3. La velocidad en coordenadas no inerciales v se transforma a coordenadas inerciales $\dot{\eta}$ que se integran para obtener la posición del vehículo η . La posición es utilizada en la actualización de las matrices de rotación R y rotación inversa R' con la función $S(\psi)$, matrices que se calculan en función del rumbo del vehículo ψ . La entrada de perturbación F_c se trata de un componente irrotacional y no tiene efecto sobre el angulo de rumbo.

Por último se muestran la Tabla 1 el valor de las matrices M y N de las dinámicas del modelo extraídas de [1]:

Matriz	Símbolo	Valor
Inercias	M	$M = \begin{pmatrix} 0.0035 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0046 & -0.0009 \\ 0 & -0.0009 & 1.0740 \end{pmatrix}$
Coriolis y Fuerzas centrípetas	N	$N = \begin{pmatrix} 0.0007 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0071 & 0.1812 \\ 0 & -0.1079 & 1.8490 \end{pmatrix}$

Tabla 1: Valores de matrices M y N para el modelo de buque lineal.

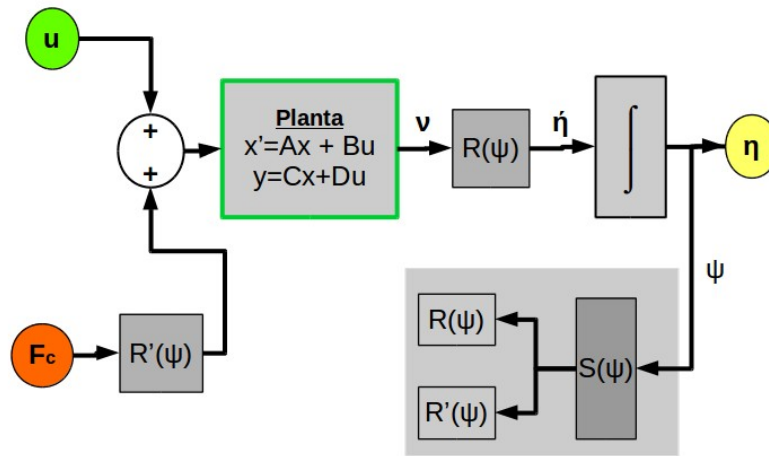


Fig.7: Diagrama de bloques para planta según modelo de buque linealizado.

3.4.2 Modelo parcialmente linealizado con indeterminaciones

El modelo de buque usado en la implementación del método cooperativo, tratado en el capítulo 5, es el referenciado en el artículo [2] cuyas características son:

- Modelo parcialmente linealizado y sobreactuado.
- Con fuerzas de perturbación por corrientes.

con ecuación dinámica:

$$M \dot{v}_r = \tau - C(v_r) v_r + f(v_r), \quad (10)$$

cuya correspondencia con los términos en (5) es:

- M : matriz de inercias, resultado de la combinación y linealización de los términos de inercia M_{RB} y matriz de masas añadidas M_A .
- $C(v_r)$: matriz de Coriolis y fuerzas centrípetas calculada en función de v_r .
- τ : vector de fuerzas de control.
- $f(v_r)$: vector de fuerzas hidrodinámicas en función de v_r .

Aunque en la ecuación no se incluye un término explícito para las perturbaciones por corrientes, su efecto se modela mediante la velocidad relativa v_r .

Cuando un modelo incorpora fuerzas moduladas por parámetros en función de v_r , como en éste caso las fuerzas hidrodinámicas, el termino $f(v_r)$ se define como un producto $\Phi(v_r)\phi$ donde, supuestos n parámetros, la matriz $\Phi \in \mathbb{R}^{3 \times n}$ se calcula en función de v_r y $\phi \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ es un vector de parámetros de diseño cuyos valores son proporcionados con el modelo. Es habitual que estos parámetros presenten indeterminaciones y que sus valores sean aproximaciones con diferentes grados de exactitud.

En caso de indeterminaciones el vector de parámetros se descompone según $\phi = \phi_k \cup \phi_u$, con un número de parámetros $n = k + u$, donde k es el numero de parámetros conocidos y ϕ_k el vector de dichos parámetros, y u es el número de parámetros desconocidos con ϕ_u como su vector asociado. Los parámetros desconocidos se estiman con la expresión $\phi_u = \hat{\phi}_u - \tilde{\phi}_u$ en la cual $\hat{\phi}_u$ es el vector de valores estimados y $\tilde{\phi}_u$ es el vector de errores de estimación. Sobre lo expuesto es posible expresar el término de fuerzas hidrodinámicas de forma $f(v_r) = \Phi_k(v_r)\phi_k + \Phi_u(v_r)\phi_u$.

En este caso, con un modelo dinámico parcialmente linealizado, no se emplea el bloque estándar de “espacio de estados” (disponible en SIMULINK) ya que la existencia de fuerzas de perturbación expresadas en función del estado de la planta v_r requiere una alteración del esquema típico para el uso de dicho bloque. Por lo tanto, se ha optado por crear un esquema equivalente al del referido bloque en SIMULINK pero adaptado a las particularidades del modelo descrito. En este esquema propio, las matrices de modelo se calculan en función del estado de planta v_r .

Partiendo de la ecuación (10) se realiza la transformación:

$$\dot{v}_r = -M^{-1}C(v_r)v_r + M^{-1}\tau + M^{-1}f(v_r), \quad (11)$$

con equivalencias en (6) según: $A = -M^{-1}C(v_r)$, $B = M^{-1}$, $C = I$ y $D = 0$. Además se hace corresponder, como ya se indicó anteriormente: $x = v_r$, $y = v_r$ y el término dependiente de las fuerzas hidrodinámicas se modela como una nueva matriz $F = M^{-1}f(v_r)$.

Se muestra en la Fig.8 el esquema implementado: en el diagrama superior la entrada de la planta es la señal de control u , los parámetros se incluyen en ϕ y la velocidad relativa se obtiene de la expresión (11) según $\dot{v}_r = \int (Av_r + Bu + F\phi)$ cuyo valor se lleva a la salida de la planta y . En la misma figura, en el diagrama inferior, se muestra la integración del bloque de la planta en un contexto global. Las corrientes se incluyen en la planta como una entrada de perturbación v_c que influye en la salida v_r generando v con modelo de perturbación según la expresión (1). En el diagrama también se incluyen elementos externos a la planta necesarios para su computación, así las funciones de cálculo $S_v(v_r)$ y $S_\psi(\psi)$ se encargan de actualizar las matrices A , B , F y las matrices de rotación R e inversa de rotación R' respectivamente.

La simulación de la dinámica de la planta se efectúa en los siguientes pasos:

1. Se computa la salida v_r como resultado de aplicar la señal de control u a la entrada de la planta.
2. El bloque $S_v(v_r)$ calcula las matrices A , B y F en función de v_r .
3. Se añaden las perturbaciones a la salida de la planta con resultado v . Las perturbaciones por corriente se proporcionan en coordenadas inerciales v_c y se transforman a coordenadas no inerciales v_c mediante la matriz inversa R' en función de ψ .
4. La velocidad en coordenadas no inerciales v se transforma a coordenadas inerciales $\dot{\eta}$ que se integra para obtener la posición del vehículo η . La posición es utilizada en la actualización de las matrices de rotación R y rotación inversa R' . Éstas matrices se calculan en función del rumbo del vehículo ψ , aclarando que la entrada de perturbación v_c se trata de un componente irrotacional y no tiene efecto sobre el ángulo de rumbo.

Por último se muestran las matrices usadas en el modelo, así como los valores reales de diseño proporcionados. Los datos se han extraído de [2].

$$M = \begin{pmatrix} m_u & 0 & 0 \\ 0 & m_v & 0 \\ 0 & 0 & I_r \end{pmatrix}, \quad C(v_r) = \begin{pmatrix} 0 & -m_v r & 0 \\ m_u r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ y } f(v_r) = \begin{pmatrix} u_r & |u_r|u_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & |r|v_r & v_r v_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r & |r|r \end{pmatrix}.$$

El significado de todos los componentes se ha explicado en la sección 3.3 y siguientes. El vector de parámetros está definido según $\phi = [X_u, X_{|u|u}, Y_{|r|v}, Y_{vv}, N_r, N_{|r|r}]^T$. En la Tabla 2 se muestran los valores para todos los coeficientes del modelo.

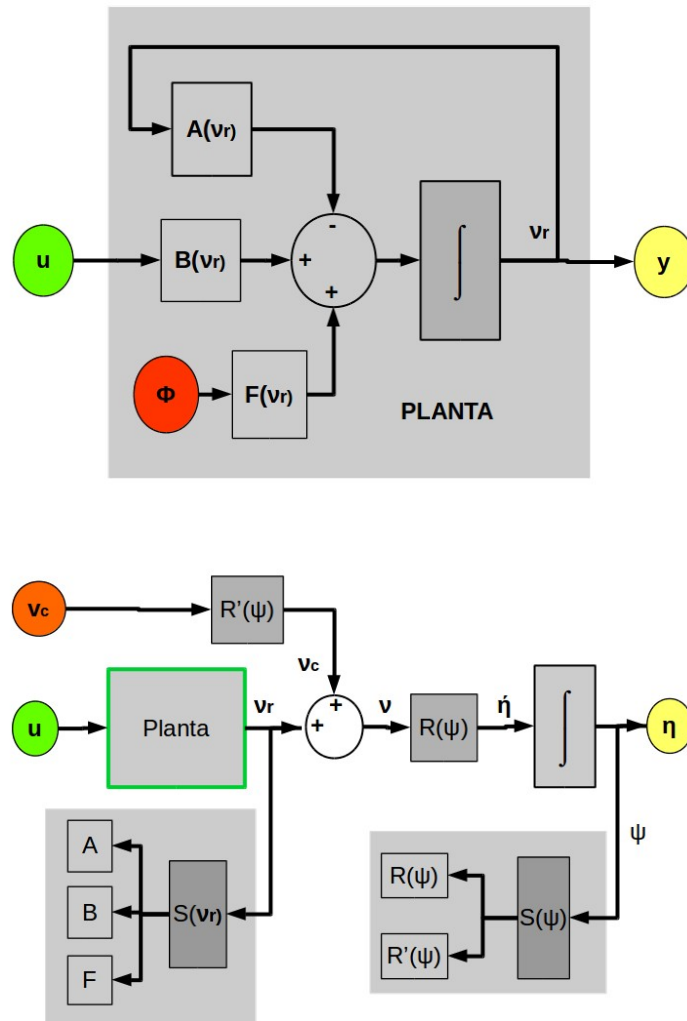


Fig.8: Diagramas de bloques del modelo de buque parcialmente linealizado. Sup) Estructura de la planta en espacio de estados. Inf) Esquema general del modelo con perturbaciones y procesos de actualización de las matrices.

Tipo	Coficiente	Valor
Masa	m_u	421.8 kg
	m_v	1008.1 kg
Momento Inercia	I_r	690.5 kg m ²
Hidrodinámico	X_u	-0.5 kg m/s
	$X_{ u u}$	-23.1 kg /m
	$Y_{ r v}$	-339.0 kg
	Y_{vv}	-121.2 kg/m
	N_r	-0.26 kg m ² /s
	$N_{ r r}$	-1764.2 kg m ²

Tabla 2: Valor real de los coeficientes para el modelo parcialmente linealizado.

4 Control Basado en Comportamientos

Los sistemas basados en comportamiento se adaptan bien a problemas cuyo objetivo es el seguimiento de trayectorias en entornos dinámicos con presencia de obstáculos y se fundamentan en la descomposición de un problema en comportamientos (o subtareas) que se ocupan individualmente de solucionar subproblemas con diferente nivel de prioridad. Con las soluciones parciales se conforma una única solución global utilizando diferentes algoritmos de composición que en una transformación final se traduce en un comando de control. Varios ejemplos de guiado en formación se referencian en [19] donde se muestran las tareas o comportamientos diseñados para diferentes tipos de formaciones de vehículos.

Cada una de las tareas en las que se descompone el objetivo general se define como una función de coste, calculada a partir del estado del vehículo (su posición), cuyo valor se minimiza en la medida que se cumple el objetivo de la misma. La existencia de múltiples funciones de coste hace que la consecución simultánea de varios objetivos sea improbable, lo que crea, con frecuencia, situaciones de “conflicto”, definido éste como la situación en la cual un cambio de estado en el vehículo reduce algunas funciones de coste a expensas de aumentar otras de interés. La resolución de los conflictos y la definición de una política de priorización de tareas es un punto determinante en el diseño de un control basado en comportamiento.

Las arquitecturas para la resolución de conflictos se pueden sintetizar en:

- Basado en capas (Layered control system).
- Basado en esquemas de movimiento (Motor schema control).
- Basado en espacio nulo (Null-space-based control).

Además los métodos de control basados en comportamientos se pueden clasificar según alguna de las arquitecturas nombradas aunque de manera global se agrupan en dos categorías: **métodos competitivos** y **métodos cooperativos**.

En los métodos competitivos la información obtenida de los sensores determina cual es la tarea prioritaria. Esta tarea será la única activa y generará los comandos necesarios para que el estado del vehículo minimice su función de coste.

En los métodos cooperativos se incluye la figura del “supervisor”, agente que se encarga de balancear la importancia de cada una de las tareas. El supervisor establece las prioridades en función de los datos de los sensores, y pondera el efecto de cada una de las tareas en el comando final.

A continuación se describen las características más relevantes de cada arquitectura.

La arquitectura **por capas** (Layered) es un ejemplo de método competitivo donde cada tarea se asocia a una capa de competencia. Una forma de modelar una arquitectura por capas es mediante

una máquina de estados donde solo un estado o capa se encuentra activo en cada momento, así cada una de las tareas se evalúa de manera independiente generando un comando de movimiento. La prioridad de una capa se asigna según su nivel de competencia y las capas prioritarias pueden suprimir el efecto de las capas de menor prioridad. De este modo siempre se intenta cumplir el objetivo marcado por la tarea más prioritaria. Según el contexto del vehículo se pueden modificar las prioridades de las tareas, resultando en los diferentes comandos de movimiento, generados a bajo nivel, que determinan el comportamiento general.

La arquitectura basada en esquemas de movimiento (**Motor Schema**) es un ejemplo inspirado en la biología. Así se define el término “esquema de movimiento” como una unidad básica de ejecución que se usa para construir comandos más complejos. El resultado de la ejecución de cada esquema es un vector velocidad que posteriormente deberá combinarse con el resultado de los demás esquemas. Existe una tarea supervisora responsable de la composición de esquemas de forma dinámica, realizando una suma ponderada de cada componente. En esta arquitectura no se busca minimizar una función de coste en particular, sino que se explora el estado que minimiza una función de coste compuesta (ponderada).

La arquitectura **basada en espacio nulo** o NSB (Null-Space-Based) es un método centralizado que cumple simultáneamente varios objetivos: siempre lleva a cabo los objetivos de la tarea con mayor prioridad y realiza de forma parcial los objetivos de las demás tareas. Utiliza la “proyección sobre espacio nulo” para combinar los resultados individuales, filtrando los componentes que entran en conflicto. Se tratarán los detalles de esta arquitectura en la siguiente sección.

4.1 Descripción del control NSB

El esquema general de la arquitectura de un control NSB se puede ver en la Fig.9, donde se muestra cómo las salidas de cada tarea son priorizadas por el proceso supervisor y luego proyectadas entre sí según las prioridades asignadas.

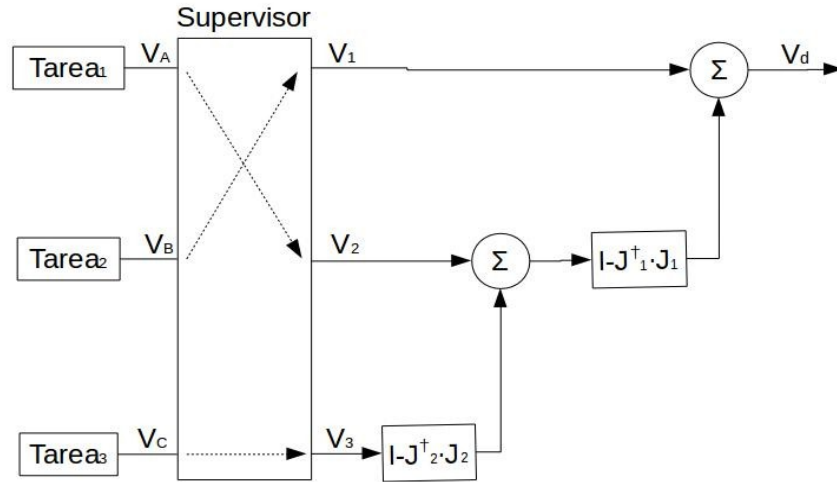


Fig.9: Esquema de arquitectura de control NSB.

En el control NSB se describe cada una de las tareas como una variable $\sigma \in \mathbb{R}^m$ evaluada con una función $f(p)$ definida sobre una variable $p \in \mathbb{R}^3$, en este caso la posición del vehículo

$$\sigma = f(p), \quad (12)$$

con la ecuación diferencial definida según:

$$\dot{\sigma} = \frac{\partial f(p)}{\partial p} v = J(p)v, \quad (13)$$

donde $J \in \mathbb{R}^{m \times 3}$ es la matriz Jacobiana de la función $f(p)$ y $v \in \mathbb{R}^3$ es la velocidad del vehículo.

Estableciendo en la expresión (12) un valor de referencia $\sigma_d(t)$, es posible calcular una solución a partir de (13). En este punto, el cálculo de una solución está condicionado por la existencia de la inversa de J , condición que no se puede garantizar puesto que J es dependiente de la configuración de la tarea σ . Como consecuencia se calcula la pseudoinversa J^\dagger para despejar la solución según $v = J^\dagger \dot{\sigma}$. Con esta técnica las soluciones obtenidas son aproximaciones por el método de los mínimos cuadrados y la solución calculada no será única.

Expuesto lo anterior se aproxima una velocidad deseada v_d , como resultado de la tarea, en función de $\dot{\sigma}_d$ según la siguiente expresión:

$$v_d = J^\dagger \dot{\sigma}_d \quad (14)$$

La trayectoria deseada se obtiene mediante integración de la expresión (14), que suele aproximarse con algoritmos en tiempo discreto con un error de cálculo inherente, por ello se usa el algoritmo

denominado “Closed Loop Inverse Kinematics” (CLIK) que compensa el error de deriva. El bucle CLIK se define como:

$$v_d = J^\dagger (\dot{\sigma}_d - \Lambda \tilde{\sigma}) \quad (15)$$

donde Λ es una matriz definida positiva que actúa como ganancia de bucle y $\tilde{\sigma}$ es el error de la tarea calculado según $\tilde{\sigma} = \sigma_d - \sigma$.

El resultado individual de cada tarea se proyecta sobre el resultado la siguiente tarea con mayor prioridad en un proceso denominado “proyección sobre espacio nulo”. Este proceso aprovecha los componentes de movimiento de la tarea de menor prioridad que se alinean en la consecución del objetivo de la tarea prioritaria, filtrando, en cambio, aquellos componentes que entran en conflicto. De esta manera se aprovecha toda la capacidad de movimiento hacia el objetivo.

Si se define cada tarea σ_i y su contribución al movimiento como v_i se generaliza la expresión (15) en:

$$v_i = J_i^\dagger (\dot{\sigma}_{i,d} - \Lambda_i \tilde{\sigma}_i) \quad (16)$$

Un ejemplo hipotético de tres tareas en orden de prioridad {1,2,3} genera un resultado final, con la proyección de cada v_{i+1} sobre cada v_i , según a expresión:

$$v_d = v_1 + (I - J_1^\dagger J_1) [v_2 + (I - J_2^\dagger J_2) v_3], \quad (17)$$

donde se garantiza la consecución del objetivo de la tarea σ_1 (más prioritaria) mediante v_1 y se aprovecha en lo posible los aportes del resultado de las demás tareas.

El rango de la matriz J_i asociada a una tarea σ_i determina la medida en la que se pueden conseguir los objetivos de otras tareas de menor prioridad. Si una matriz Jacobiana tiene rango total su espacio nulo asociado tiene dimensión nula, y por lo tanto las resultantes de todas las tareas de menor prioridad son filtradas. La deducción es inmediata observando la expresión (17) donde la proyección sobre el espacio nulo de cada tarea se realiza con el factor $I - J^\dagger J$, si J es regular entonces $J^\dagger = J^{-1}$ y el factor de proyección es nulo.

Una descripción más detallada del control NSB se puede consultar en [20].

4.2 Implementación de formaciones mediante control NSB

La implementación del algoritmo de control NSB, detallado en la sección anterior, se basa en el trabajo [1] que propone el guiado de varios vehículos marinos en una formación fija con capacidad de evitar obstáculos. En la Fig.10 se muestra el esquema general de la implementación donde hay dos bloques principales:

- Control NSB
- Subsistema de guiado de vehículo.

El control NSB recibe como entrada la trayectoria deseada para la formación, las variables de configuración (denominadas variables de entorno) y las posiciones reales de todos los vehículos de la formación. La definición de las tareas que componen el NSB se expondrá a continuación, aunque se adelanta aquí que el resultado del proceso es la generación de tantas referencias de velocidad como vehículos hay en la formación.

El subsistema de guiado individual de cada vehículo toma como referencia la velocidad que el control NSB ha generado y realiza las maniobras a bajo nivel necesarias para seguir dicha referencia.

El esquema completo muestra una arquitectura con componentes centralizados y no centralizados, cuyos detalles de implementación se exponen a continuación.

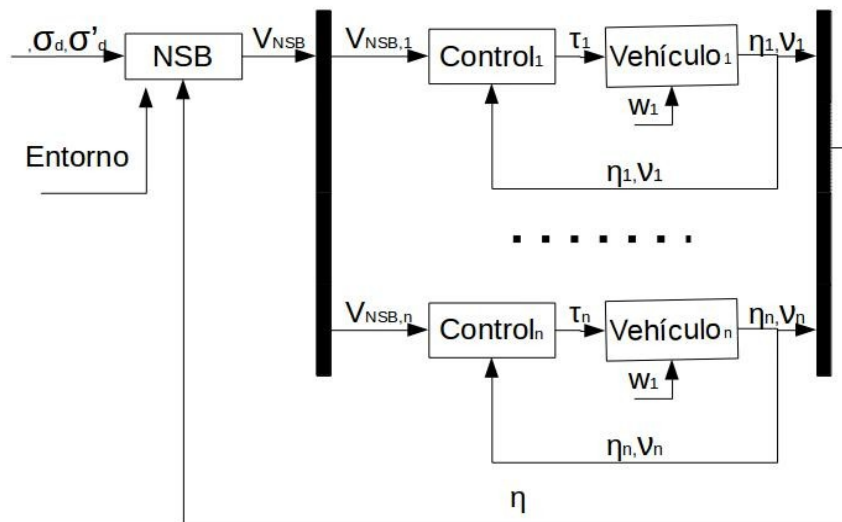


Fig.10: Esquema de implementación para control NSB.

4.2.1 Control NSB

En el esquema de la Fig.10 el control NSB es una etapa previa al controlador de cada vehículo que genera las referencias de velocidades, este controlador es un componente centralizado y se descompone en los siguientes elementos:

1. Tarea baricentro.
2. Tarea formación.
3. Tarea evitar obstáculos.
4. Agente Supervisor.

La tarea **“baricentro”** tiene como objetivo guiar la formación en su conjunto por la trayectoria planificada. El baricentro es el punto geométrico resultado del promedio de todas las posiciones de los vehículos y puede interpretarse como el “lugar” donde se encuentra la formación al completo. Con esta premisa se define la función de la tarea como:

$$\sigma_b = f_b(p_1, p_2, \dots, p_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i$$

donde cada $p_i = [n_{1,n}, n_{1,n}]^T$ es la posición del vehículo i en una formación de n vehículos.

Según el método expuesto en la sección 4.1 se calcula la diferenciación de σ_b según la expresión:

$$\dot{\sigma}_b = \frac{\sum_{i=1}^n \partial f_b(p)}{\partial p_i} = J_b(p) v,$$

donde la Jacobiana de la tarea $J_b(p) \in \mathbb{R}^{2 \times 2n}$ se define como $J_b = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}$.

Según (16) se computa la salida de la tarea σ_b como:

$$v_b = J_b^\dagger(\dot{\sigma}_{b,d} + \Lambda_b \tilde{\sigma}_b),$$

donde v_b es la velocidad de referencia asignada a cada vehículo para que el baricentro siga la trayectoria deseada, es decir, el valor objetivo de la tarea $\dot{\sigma}_{b,d}$.

Se define $\Lambda_b > 0 \in \mathbb{R}$ como la ganancia para la tarea “baricentro”.

La tarea **“formación”** tiene como objetivo el posicionamiento de cada vehículo en la ubicación asignada respecto del baricentro. La función objetivo se define para la tarea según:

$$\sigma_f = \begin{bmatrix} p_1 - p_b \\ p_2 - p_b \\ \vdots \\ p_n - p_b \end{bmatrix},$$

donde p_i es la coordenada de cada vehículo y p_b es la coordenada del baricentro. En esencia σ_f representa cada posición relativa de un vehículo respecto del baricentro.

Reorganizando las coordenadas p en σ_f de forma que $p = [\eta_{1,1} \dots \eta_{n,1}, \eta_{1,2} \dots \eta_{n,2}]^T$ es posible operar con una Jacobiana $J_f \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$ con estructura:

$$J_f = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix},$$

donde la subcomponente $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es una matriz con valores:

$$A = \begin{bmatrix} 1 - \frac{1}{n} & -\frac{1}{n} & \dots & -\frac{1}{n} \\ -\frac{1}{n} & 1 - \frac{1}{n} & \dots & -\frac{1}{n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\frac{1}{n} & -\frac{1}{n} & \dots & 1 - \frac{1}{n} \end{bmatrix},$$

que calcula, en función de las coordenadas del baricentro, la posición de todos los vehículos.

En este punto destacar que A es una matriz no singular y el calculo de J_f^\dagger no puede hallarse según la expresión habitual $J^T(JJ^T)^{-1}$. Así teniendo en cuenta las propiedades de la Jacobiana definida para la tarea; $JJ^\dagger J = J^\dagger$ y $J^\dagger JJ^\dagger = J^\dagger$, donde las matrices JJ^\dagger y $J^\dagger J$ son simétricas; y que J_f es simétrica e idempotente se obtiene la relación para la pseudoinversa de la función como $J^\dagger = J_f$.

El valor objetivo para la tarea $\sigma_{f,d}$ se define como la posición correcta dentro de la formación, en coordenadas respecto del baricentro, de cada vehículo. Como resultado se genera una velocidad intra-formación según:

$$v_f = J^\dagger \Lambda_f \tilde{\sigma}_f$$

A modo de aclaración, indicar que en la obtención de la expresión anterior se consideran únicamente formaciones de vehículos estáticas y por tanto $\dot{\sigma}_{f,d} = 0$.

Se define $\Lambda_f > 0 \in \mathbb{R}$ como la ganancia de la tarea “formación”.

La tarea “evitar obstáculos” se ocupa del cálculo de las acciones evasivas en caso de detección de un obstáculo. La estrategia a seguir es la generación de un vector velocidad con dirección “hacia fuera” del obstáculo y con magnitud dependiente de una distancia de seguridad predefinida. En la Fig.11 se muestra la geometría de la estrategia de evitación: sobre una trayectoria con velocidad V se encuentra el obstáculo P_o , si el vehículo sobrepasa la distancia de seguridad d se calcula una velocidad de evasión V_o respecto de P_o .

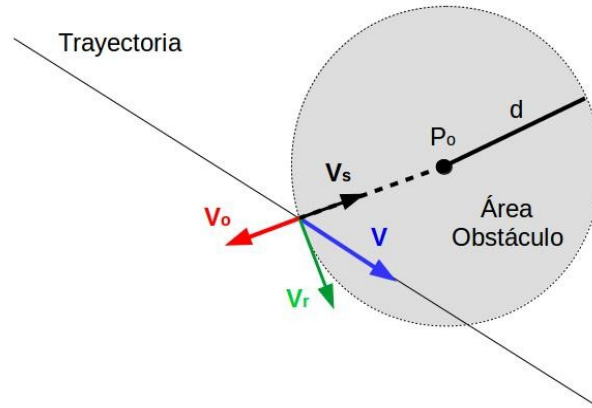


Fig.11: Solución geométrica de la tarea "Evitar Obstáculo".

La tarea σ_o se define como:

$$\sigma_o = \|p - p_o\| ,$$

donde p y p_o son las posiciones del vehículo y obstáculo respectivamente.

Se fija además $\sigma_{o,d} = d$ como la distancia de seguridad y se calcula $\hat{r} = \frac{p - p_o}{\|p - p_o\|}$ como el vector director de la velocidad de evasión. Se puede entonces definir la Jacobiana de la tarea como $J_o = \hat{r}^T$ y según (15) obtener una velocidad de evasión:

$$v_o = J_o^\dagger \Lambda_o \tilde{\sigma}_o = \Lambda_o (d - \|p - p_o\|) \hat{r}$$

Se define $\Lambda_o > 0 \in \mathbb{R}$ como la ganancia de tarea σ_o y es el ajuste del módulo para el vector v_o .

La tarea “**Agente Supervisor**” se encarga de la composición de las tareas definidas mediante el establecimiento de una política de prioridades.

Aunque el objetivo principal es mover una formación de vehículos, es fundamental mantener la integridad física de cada uno de ellos. Ante el riesgo de colisión la tarea “evitar obstáculo” debe ser prioritaria mientras que en situación de no riesgo debería ser ignorada. Se definen así dos modos de funcionamiento para un vehículo:

- **Modo seguro:** no existen ningún obstáculo dentro del área de seguridad del vehículo $d < \|p - p_o\|$ y éste debe tratar de mantenerse en formación por lo que la tarea “evitar obstáculo” tiene prioridad mínima.

- Modo colisión: existe un obstáculo a una distancia menor que la de seguridad $d \geq \|p - p_o\|$ y ante el riesgo de colisión, la tarea “evitar obstáculo” tiene prioridad máxima.

Se detalla cada uno de los modos a continuación.

En modo seguro la prioridad de las tareas “formación” y “baricentro” esta prefijada con el razonamiento siguiente. Si se prioriza la tarea “formación”, el componente velocidad de cada vehículo será una velocidad intra-formación y los demás componentes velocidad se proyectaran sobre el espacio nulo de dicha la tarea. Puesto que cada velocidad, así hallada, depende del baricentro y éste no tiene ninguna componente de velocidad estabilizada, no existirá un movimiento definitivo en el conjunto de la formación hasta que todos los vehículos estén en posición. El efecto es que, en la medida en que cada vehículo se acerca a la posición asignada en la formación, el baricentro se actualiza continuamente y es necesario rectificar de nuevo la posición del vehículo en la formación. Si, en cambio, se prioriza la tarea “baricentro”, existirá una componente de velocidad idéntica para cada vehículo que desplazarán dicho punto ficticio hacia la trayectoria de referencia. Una vez que el baricentro tiene una componente de velocidad definida la proyección de las demás componentes de velocidad sobre su espacio nulo se encarga de llevar cada vehículo a su posición correcta dentro de la formación.

En modo colisión el espacio nulo de la tarea “evitar obstáculo” está expresado por $N(J_o) = I - \hat{r}\hat{r}^T$, que únicamente permite velocidades tangenciales al círculo imaginario alrededor del obstáculo. Se muestra en la Fig.11 cómo en un entorno de radio d alrededor del obstáculo P_o , una velocidad de trayectoria V se descompone en sus componentes $[V_s, V_r]$. La velocidad generada por la tarea “evitar obstáculo” V_o entra en conflicto con la componente V_s y en la proyección sobre el espacio nulo es filtrada con resultante V_r , que es una velocidad tangencial al área del obstáculo definida. En presencia de múltiples obstáculos debe establecerse una prioridad a la hora de generar una velocidad final por lo que la solución implementada es priorizar el obstáculo mas cercano al vehículo.

Es importante destacar aquí, como detalle de implementación, que la tarea “evitar obstáculo” pertenece a un contexto diferente al de las demás tareas, según lo cual, se distinguen dos contextos de ejecución: un contexto global, donde los cambios de prioridad tienen influencia directa en todos los vehículos de la formación, y otro contexto local, donde los cambios de prioridad afectan de manera directa al comportamiento de un vehículo e indirectamente al resto de la formación. La tarea “evitar obstáculo” debe tener la perspectiva del vehículo para conocer los obstáculos que tiene cerca y cambiar la prioridad de tareas cuando exista riesgo de colisión, por ello se considera que está en un contexto local. El reflejo de ello se muestra en el esquema de la Fig.12.

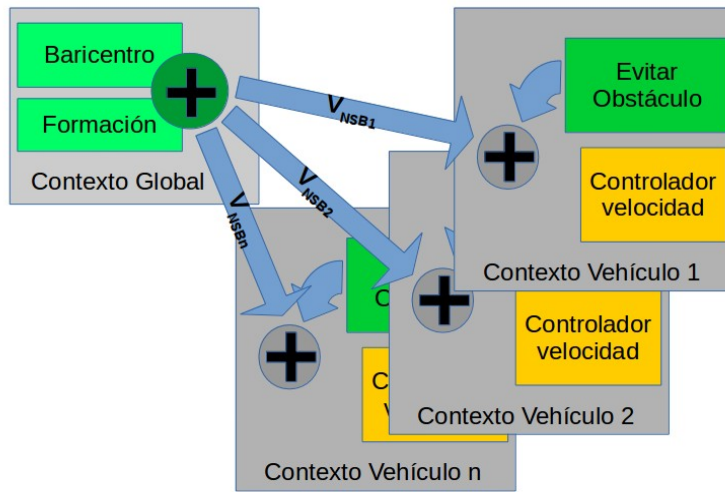


Fig.12: Contexto de ejecución de las tareas implementadas para el control NSB.

4.2.2 Subsistema de guiado (controlador de velocidad).

El subsistema de guiado es el controlador individual de cada vehículo. Partiendo de una referencia en forma de vector velocidad, generada por el control NSB, actúa sobre las dinámicas del vehículo para seguir dicha referencia.

Aunque los cálculos necesarios para obtener los resultados presentados en esta sección se pueden consultar en [1], se aclaran aquí las consideraciones previas y los detalles más relevantes. El controlador se ha implementado sobre el modelo de vehículo linealizado con fuerzas de perturbación descrito en la sección 3.4.

Consideraciones previas:

- Se define el vector de referencia $\dot{\eta}_{ref} = [u, v, \psi]^T$ donde u y v son componentes de velocidad con módulo $U_{ref} = \sqrt{(u^2 + v^2)}$ y ψ es el ángulo de rumbo.
- Las fuerzas de perturbación, definidas como $w = [w_u, w_v, 0]^T$, son de magnitud constante ($\dot{w} = 0$) y desconocida, que se aproximan según $w = \hat{w} - \tilde{w}$ donde \hat{w} es la estimación y \tilde{w} el error de estimación.

La ley de control para el modelo se ha obtenido mediante la técnica del “backstepping” sobre funciones de Lyapunov, para ello se definen:

- Los errores de rumbo $z_1 = \psi - \psi_{ref}$ y velocidad $z_2 = v - \alpha$.
- La función ficticia $\alpha = [\alpha_1 = U_{ref} \cos \beta, \alpha_2 = U_{ref} \sin \beta, \alpha_3 = \dot{\psi}_{ref} - z_1]^T$ donde el ángulo $\beta = \chi - \psi$ modela una diferencia de ángulo entre rumbo y dirección, de acuerdo con la Fig.6. Si $\psi = \text{atan}(\frac{v}{u})$ siempre se cumple que $\beta = 0$.

Partiendo de la ecuación dinámica (8) se obtiene la ley de control:

$$\tau = M \dot{\alpha} + N \alpha - R^T \hat{w} - h k_1 z_1 - K_2 z_2, \quad (18)$$

donde $k_1 > 0 \in \mathbb{R}$ es la ganancia del error z_1 , $K_2 > 0 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ es la ganancia para el error z_2 y $h = [0 \ 0 \ 1]$ es un vector de expansión de \mathbb{R} a $\mathbb{R}^{3 \times 1}$.

La expresión para la estimación de perturbaciones es $\dot{\hat{w}} = \Gamma R(\psi) z_2$, donde $\Gamma > 0 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ es la ganancia de estimación.

4.3 Resultados

En esta sección se mostrarán resultados ilustrativos para el controlador NSB implementado. Todas las simulaciones se han efectuado con SIMULINK v8.8 y las figuras se han obtenido de las gráficas generadas en las simulaciones desde la propia aplicación MATLAB. Las formaciones se han generado con tres vehículos idénticos: V_1 , V_2 y V_3 con dinámicas según el modelo linealizado explicado en la sección 3.4.

Como primer ejemplo se realiza una simulación en la que los vehículos deben esquivar dos obstáculos mientras evolucionan en una formación con configuración en flecha y una trayectoria curva. Las posiciones y orientaciones iniciales de cada vehículo son: $P_1 = [0, -15, -\frac{\pi}{2}]^T$, $P_2 = [0, 10, \frac{\pi}{2}]^T$ y $P_3 = [0, 30, 0]^T$. Las ganancias para los controladores de velocidad tienen valores $k_1 = 10^8$, $K_2 = 2 * 10^8$ y $\Gamma = I$, valores hallados de forma empírica según lo indicado en [1]. Las fuerzas de perturbación tienen el valor $F_c = [-10^3, -10^3]^T N$. La velocidad sobre la trayectoria asignada es $v = 0.1 m/s$ y las posiciones relativas al baricentro son $f_1 = [0, -30] m$, $f_2 = [10, 0] m$ y $f_3 = [0, 30] m$ respectivamente. Las ganancias NSB para las tareas del controlador “baricentro”, “formación” y “evitar obstáculos” son respectivamente $\Lambda_b = 1$, $\Lambda_f = 1$ y $\Lambda_o = 5$. La distancia de seguridad se configura en 15 metros para todos los vehículos. El tiempo de simulación se fija en 200 segundos.

Los resultados de la simulación se muestran en la Fig.13. En la gráfica de la izquierda se pueden observar las trayectorias seguidas por todos los vehículos (cada una de un color) durante los 200 segundos que dura la formación. Los obstáculos están representados por círculos negros en las posiciones $[80, -50]$ y $[50, 0]$. La trayectoria de referencia para el baricentro se muestra en línea discontinua negra y la trayectoria real en discontinua roja. La gráfica superior derecha muestra la traza, respecto al tiempo, del error de baricentro. Este error mide la distancia entre la trayectoria de referencia y la trayectoria real del baricentro. La gráfica inferior derecha muestra la traza, respecto del tiempo, de las distancias entre cada vehículo y el baricentro (o distancias relativas).

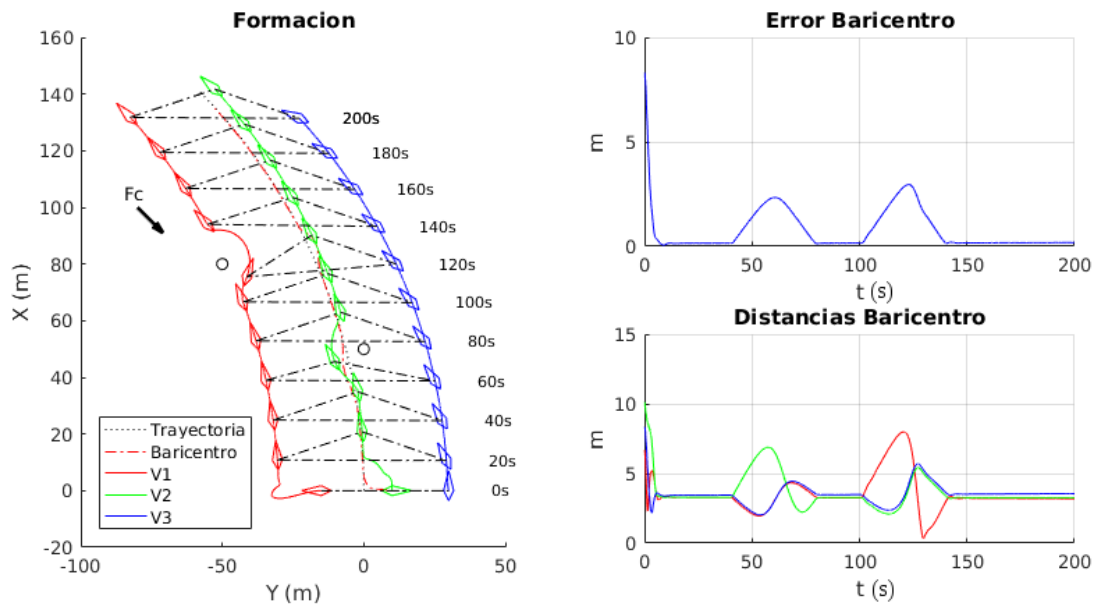


Fig.13: Control NSB: formación en flecha para trayectoria curva.

Se puede observar, en la traza de distancias respecto del baricentro, un alejamiento de los vehículos V_1 y V_2 mientras sortean sus respectivos obstáculos, aproximadamente a los 60 y 120 segundos de simulación. En esos instantes las tareas “evitar obstáculo” correspondientes hacen que los vehículos abandonen la formación. Cuando un vehículo modifica su posición relativa en la formación, la posición del baricentro se actualiza, tal y como se muestra en la traza del error del baricentro, y se desencadena una corrección en toda la formación para que dicho punto ficticio vuelva a la trayectoria de referencia. Esta corrección general provoca las demás desviaciones de distancias relativas observadas en la traza, pero esta vez en los vehículos que estaban en su posición correcta. Se constata, por tanto, que la acción de un vehículo genera una reacción en los demás vehículos de la formación. Las variaciones del error del baricentro observadas están causadas como consecuencia de todos los ajustes descritos.

Como segundo ejemplo se realiza una simulación en la que los vehículos deben esquivar dos obstáculos mientras evolucionan en una formación con configuración en paralelo y una trayectoria rectilínea. Los parámetros de configuración se mantienen iguales al primer ejemplo mostrado a excepción de las posiciones que conforman la formación (relativas al baricentro), que se establecen en $f_1=[0,-30]m$, $f_2=[0,0]m$ y $f_3=[0,30]m$ respectivamente. Las posiciones de los obstáculos se han cambiado convenientemente a las posiciones $[80,-30]m$ y $[50,30]m$ para que coincidan con las trayectorias de los vehículos V_1 y V_2 .

Los resultados de este segundo ejemplo se muestran en la Fig.14. Los razonamientos y las interpretaciones son análogas a los del párrafo anterior. Incidir en un efecto, observado en la gráfica para la formación, que aparece cuando un obstáculo se encuentran exactamente en la trayectoria de un vehículo. En esa circunstancia existen unos momentos iniciales, cuando un vehículo entra en el

área de un obstáculo, en los cuales la proyección de la velocidad de referencia sobre la velocidad de la tarea “evitar obstáculo” es mínima y el vehículo queda casi detenido. A medida que el vehículo se desplaza, tangente al área del obstáculo, el módulo de la velocidad resultante de la proyección se incrementa y en consecuencia el vehículo gana velocidad en su movimiento evasivo. En la traza de distancias relativas se muestra este efecto como una gráfica de pendiente aproximadamente constante en el primer tramo de la trayectoria evasiva y una pendiente negativa, y mucho mayor, en el segundo tramo de dicha trayectoria. Este efecto se observa con más claridad en los vehículos V_1 y V_3 .

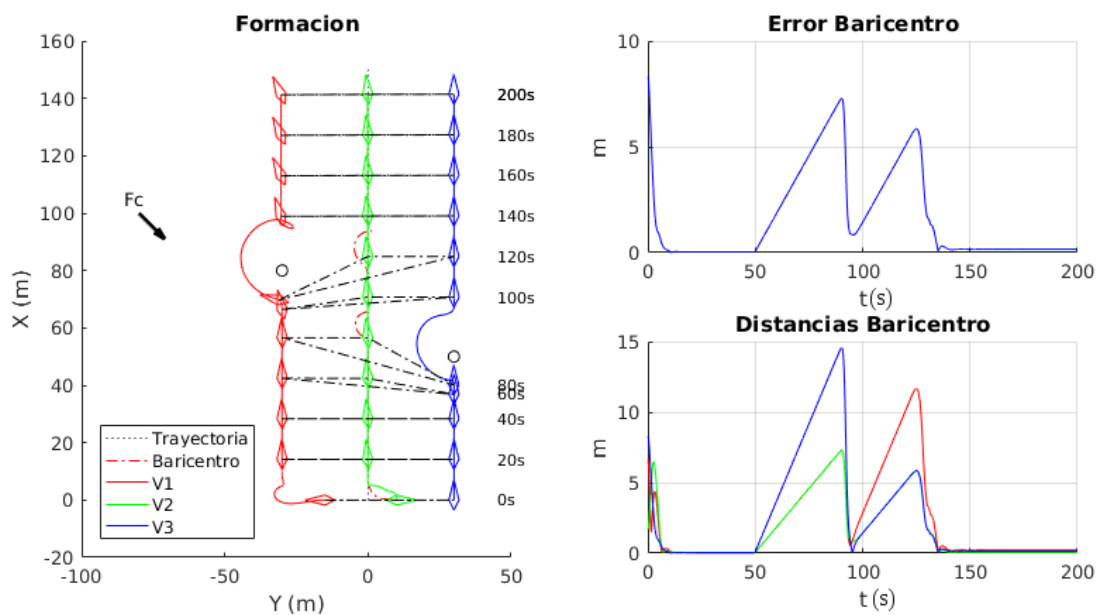


Fig.14: Control NSB: formación en línea para trayectoria recta.

4.4 Limitaciones del algoritmo

Los resultados mostrados en la sección anterior establecen un punto de referencia sobre el que realizar modificaciones para obtener los límites en la aplicación del método de control NSB implementado. Se identificarán aquí dichos límites en base a variación de parámetros de configuración, elegidos entre las ganancias que configuran el controlador Λ_b , Λ_f y Λ_o . No se incluyen, dentro de los parámetros elegidos para el estudio, los parámetros del control de velocidad k_1 y K_2 , considerando que, según el esquema mostrado en la Fig.10, son elementos desacoplados del propio control NSB, de hecho, el control NSB podría utilizarse con cualquier control de velocidad independientemente de cómo esté diseñado.

4.4.1 Ganancia Λ_b

En la sección 4.2 se explica cómo la ganancia Λ_b determina la dinámica del bucle CLIK de la tarea “baricentro” e influye en la velocidad resultante para la formación al completo. Para analizar la influencia de este parámetro en el seguimiento de la formación se han realizado simulaciones con diferentes valores de Λ_b sobre el segundo ejemplo mostrado en la sección anterior, recogiendo en la Fig.15 los resultados obtenidos respecto de unos valores límite propuestos.

Para el límite inferior propuesto $\Lambda_b=0.0001$ se observa una deriva de la formación al completo tras la superación del obstáculo por parte del vehículo V_3 . El efecto observado tiene que ver con el proceso de proyección sobre el espacio nulo en la velocidad de la tarea. La posición del baricentro depende de las posiciones individuales de cada vehículo y el error asociado se intenta compensar con una ganancia muy baja. Cada vehículo, en el proceso de alineamiento con su posición en la formación, proyecta una velocidad intra-formación sobre la velocidad del baricentro. La proyección filtra aquellas componentes que entran en conflicto: en éste caso se filtran las componentes u mientras las componentes v de las velocidades prevalecen. En la combinación de dichas componentes la ganancia Λ_b atenúa la velocidad correctora de baricentro y como consecuencia el vehículo V_3 arrastra toda la formación en su camino cuando evita el obstáculo. Por la misma causa, al inicio de la simulación el baricentro no se sitúa sobre la trayectoria de referencia.

Para el límite superior propuesto $\Lambda_b=5$ se observan variaciones de la formación en los momentos en los que el baricentro no se encuentra sobre la trayectoria, esto es, en la inicialización de la formación y cuando alguno de los vehículos se sale de ella para evitar un obstáculo. Dichas variaciones están producidas por una ganancia Λ_b muy grande en el bucle de la tarea. Así, mientras los vehículos no están estabilizados en sus posiciones dentro de la formación, el baricentro (que es un punto ficticio calculado) se desplaza de la trayectoria y consecuentemente se genera una velocidad correctora aplicada a todos los vehículos para mover el baricentro. Esta velocidad correctora está amplificada por la ganancia Λ_b . Cuando un vehículo abandona la formación para evitar un obstáculo en realidad entra y sale del área del obstáculo varias veces mientras lo bordea. Esto provoca cambios de operación entre “modo seguro” y “modo colisión”, generando sucesivas conmutaciones de velocidad que los controladores de velocidad no son capaces de asumir. Ello induce los efectos indeseados tanto en las trayectoria individuales como en las orientaciones de los vehículos.

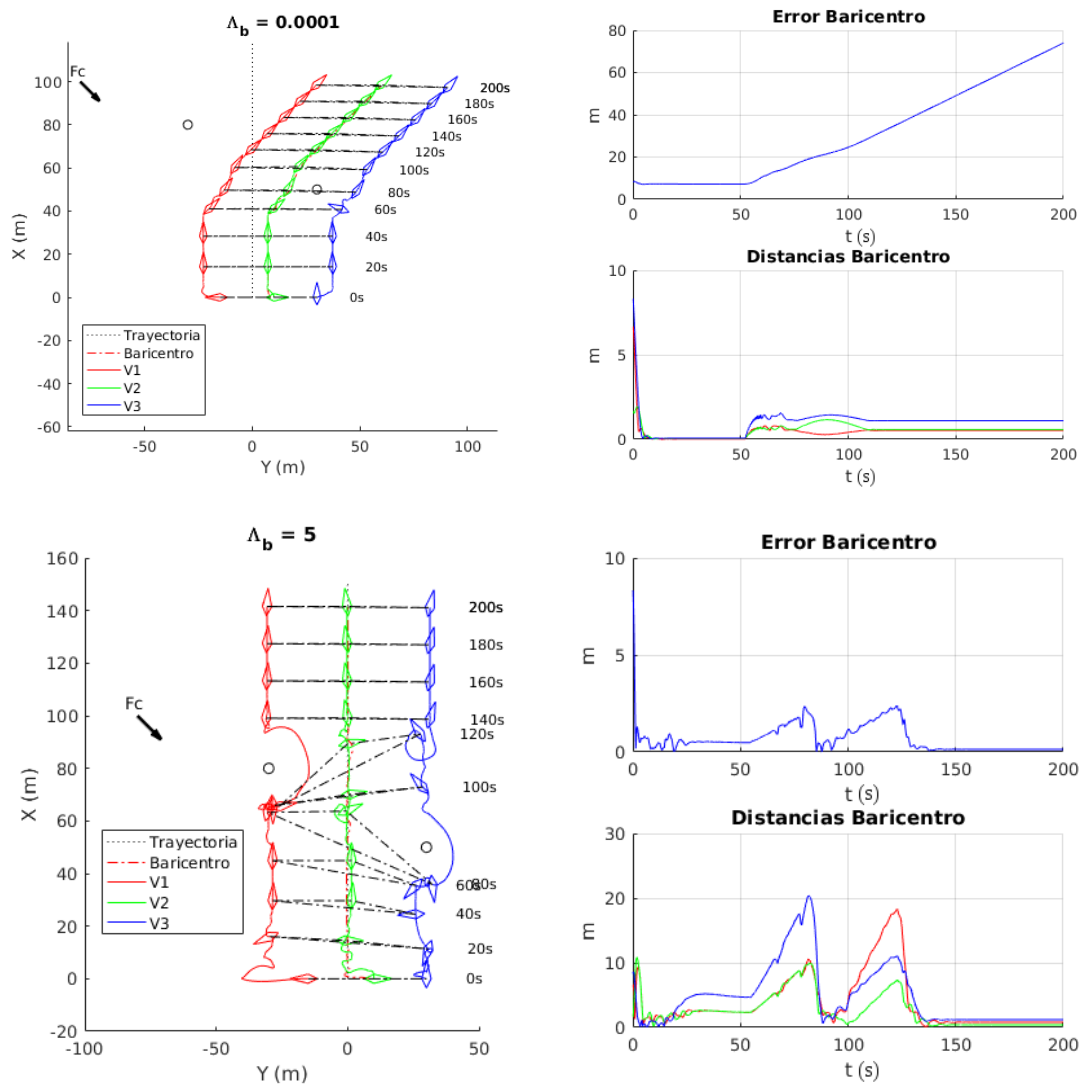


Fig.15: Resultados de la variación de la ganancia Λ_b en el control NSB. Sup) Efectos para límite inferior $\Lambda_b=0.0001$. Inf) Efectos para límite superior $\Lambda_b=5$.

4.4.2 Ganancia Λ_f

En la sección 4.2 se explica cómo la ganancia Λ_f determina la dinámica del bucle CLIK de la tarea “formación” e influye en las velocidades intra-formación. Para analizar la influencia de este parámetro en el seguimiento de la formación se han realizado simulaciones con diferentes valores de Λ_f , sobre el segundo ejemplo mostrado en la sección anterior, recogiendo en la Fig.16 los resultados obtenidos respecto de unos valores límite propuestos.

Previo al análisis, recapitular que las velocidades intra-formacion generadas por la tarea se proyectan sobre el espacio nulo de la tarea “baricentro”, de mayor prioridad, lo que filtra de manera general las componentes v de tales velocidades.

Para el límite inferior propuesto $\Lambda_f=0.0001$ se aprecia como la atenuación de las velocidades intra-formación proyectadas provoca que la formación se descomponga. En la figura se aprecia cómo el baricentro sigue la trayectoria pero los vehículos se desvían cuando abandonan la formación para evitar sus respectivos obstáculos. Se puede observar igualmente cómo las posiciones relativas iniciales de cada vehículo están determinadas por la fase de adaptación a la velocidad de baricentro.

Para el límite superior propuesto $\Lambda_f=10$ se observa un efecto desestabilizador que aparece cuando algún vehículo abandona su posición en la formación. Como ya se ha visto anteriormente, el cambio de la posición de un vehículo en formación conlleva un cambio en el baricentro y una cascada de correcciones para el resto de vehículos. Una ganancia Λ_f muy grande amplifica el error asociado a la posición dentro de la formación y la velocidad de corrección generada está igualmente amplificada. La proyección de la velocidad genera modificaciones en la posición de baricentro y como consecuencia correcciones en todos los vehículos. Se puede observar en las trazas como, tanto el error del baricentro como las distancias a éste, presentan oscilaciones de alta frecuencia asociadas a una ganancia alta. Además se observa que dichas oscilaciones tienen un efecto negativo en el comportamiento del controlador de velocidad de cada vehículo, ya que las referencias que se le imponen fluctúan (en la componente v de la velocidad) y desestabilizan la convergencia del error z_1 (error de rumbo) frente a la convergencia del error z_2 (error de velocidad). Como consecuencia los vehículos tienden a desplazarse en modo lateral hasta que son capaces de corregir el error de rumbo, de manera muy lenta. Puede apreciarse el efecto de las citadas oscilaciones en la traza de distancias al baricentro, a partir del tiempo de simulación 150 aproximadamente.

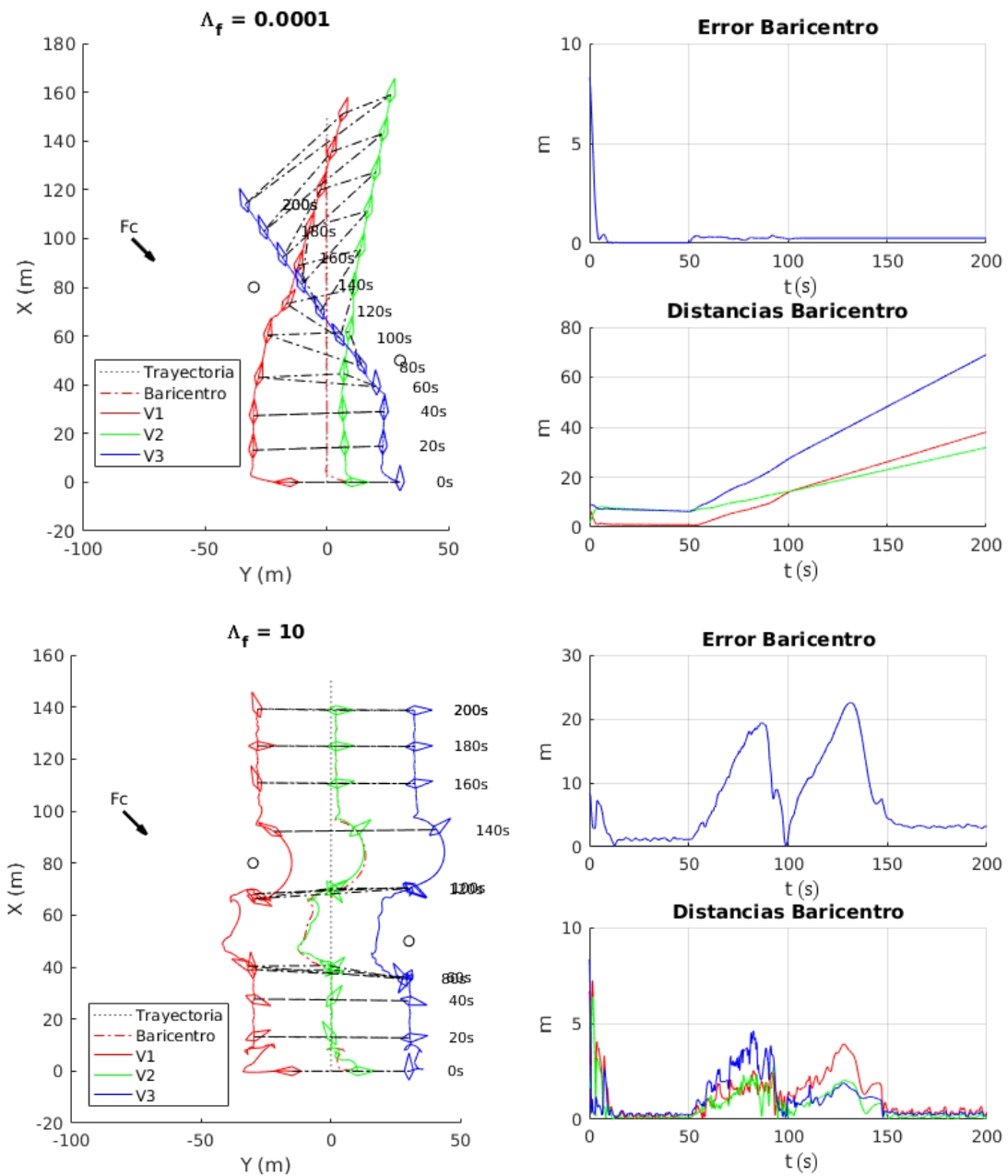


Fig.16: Resultados de la variación de la ganancia Λ_f en el control NSB. Sup) Efectos para límite inferior $\Lambda_f=0.0001$. Inf) Efectos para límite superior $\Lambda_b=10$.

4.4.3 Ganancia Λ_o

En la sección 4.2 se explica cómo la ganancia Λ_o determina la dinámica del bucle CLIK de la tarea “evitar obstáculo” y la velocidad de evasión cuando un vehículo opera en modo colisión. En modo colisión la velocidades resultantes del resto de tareas se proyectan sobre el espacio nulo de la tarea y el resultado de la operación dependerá de la posición relativa entre el vehículo y el obstáculo. Para analizar la influencia de este parámetro en el seguimiento de la formación se han realizado

simulaciones con diferentes valores de Λ_o , sobre el segundo ejemplo de la sección anterior, mostrando en la Fig.17 los resultados obtenidos respecto de unos valores límite propuestos.

Las gráficas muestran poca diferencia entre los límites inferior $\lambda_o=0.0001$ y superior $\lambda_o=100$ propuestos. La justificación viene del funcionamiento del algoritmo en “modo colisión”: cuando un vehículo ha rebasado la distancia de seguridad, la tarea “evitar obstáculo” genera una velocidad radial, tal y como se muestra en la Fig.11 con módulo amplificado por Λ_o . Cuando un vehículo entra en el área de un obstáculo, esta velocidad radial tendrá un efecto proporcional a la velocidad de entrada y cuando el vehículo sale del área del obstáculo, la velocidad de evasión desaparece. Para valores grandes de Λ_o se observan oscilaciones en las trayectorias de los vehículos a medida que sortean los obstáculos (se aprecia en la primera parte de la trayectoria evasiva del vehículo V_2 alrededor del obstáculo que bordea). Estas oscilaciones se observan en las trazas correspondientes para el error de baricentro y distancias al baricentro.

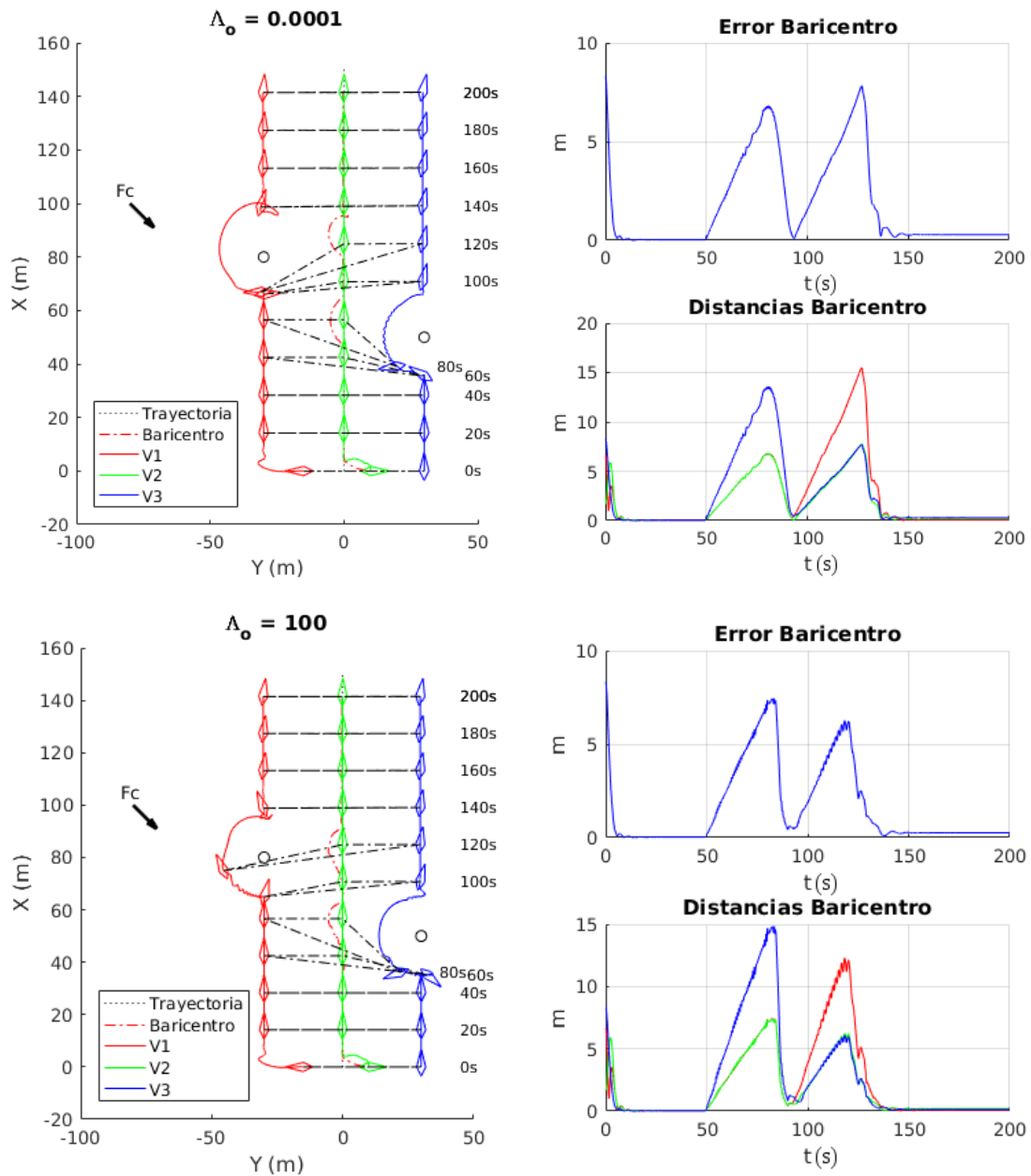


Fig.17: Resultados de la variación de la ganancia Λ_o en el control NSB. Sup) Efectos para límite inferior $\Lambda_o=0.0001$. Inf) Efectos para límite superior $\Lambda_o=100$.

4.4.4 Rangos de parámetros válidos

En base a las simulaciones realizadas, cuyos casos límite se presentan en las secciones 4.4.1, 4.4.2 y 4.4.3, se sugieren y presentan en la Tabla 3 unos rangos de valores, para las ganancias Λ_b , Λ_b y Λ_o , en los que el método de control NSB es aplicable sobre las características de los vehículos y el escenario analizado. Es importante destacar que los valores “reales” para las ganancias deberían localizarse hacia el centro de cada rango propuesto, ya que los extremos presentan comportamientos no deseables.

Parámetro	Límite Inferior	Límite Superior
Λ_b	1	2
Λ_f	0.1	2
Λ_o	10^{-2}	100

Tabla 3: Valores límite establecidos para los parámetros del método de control NSB.

4.4.5 Particularidades en la tarea “evitar obstáculo”

La evolución que sigue un vehículo en “modo riesgo” presenta situaciones que requieren especial atención, tal y como se muestra en los siguientes párrafos.

En la Fig.18 se muestra el comportamiento del algoritmo en caso de una situación tipo “callejón sin salida”, en la cual un vehículo queda atrapado entre tres obstáculos con posiciones $[80, -45]m$, $[90, -30]m$ y $[80, -20]m$ con distancia de seguridad $\sigma_{o,d}=25m$. La situación se alcanza porque es imposible avanzar con la velocidad de referencia sin que el vehículo se interne en el área de algún obstáculo, como consecuencia el vehículo queda atascado en una posición “neutral”.

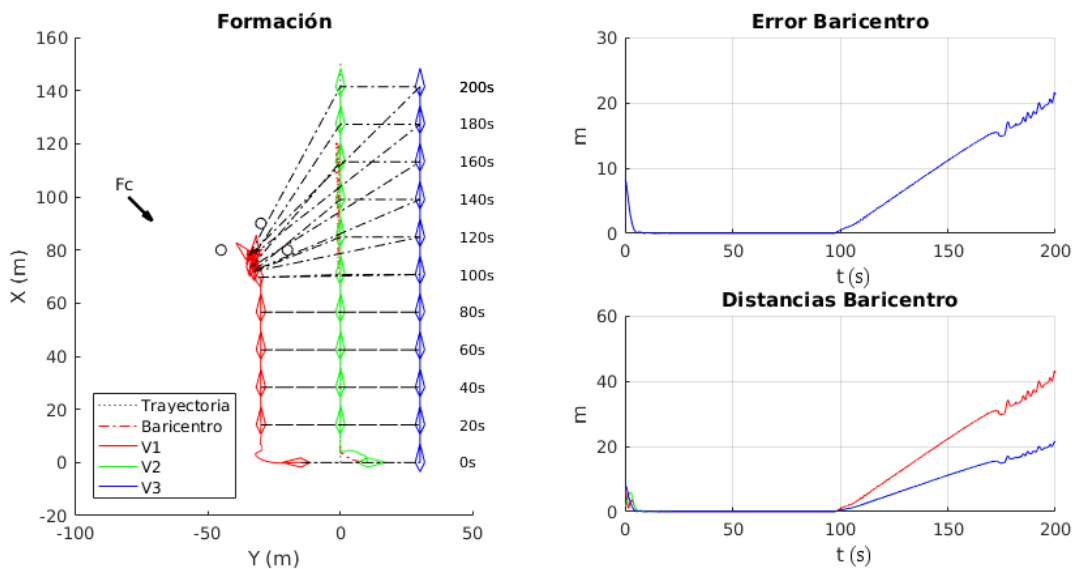


Fig.18: Control NSB: comportamiento del algoritmo en la situación "callejón sin salida".

El desenlace de la situación depende de: la priorización de obstáculos por parte de la tarea “evitar obstáculo”, el valor de la ganancia Λ_o y de la distancia del vehículo a su posición en la formación. En la implementación realizada se prioriza el obstáculo más cercano y la proyección de cualquier otra velocidad sobre la velocidad de la tarea resulta en una componente tangencial, que adentra el vehículo en el área de otro obstáculo hasta que se convierte en el nuevo obstáculo más cercano. En

ese momento este obstáculo se prioriza y es el origen de la velocidad de evasión. El efecto es que el vehículo se adentra de nuevo en el área del obstáculo inicial y se repite el proceso. A medida que la formación se aleja del conjunto de obstáculos que provocan el bloqueo la velocidad de referencia aplicada al vehículo aumenta y en consecuencia lo hacen las proyecciones tangenciales. El resultado final es que el vehículo evoluciona por la zona intersección de las zonas de los dos obstáculos adyacentes desplazándose, según un patrón tipo “rebote”, con oscilaciones dependientes de la ganancia Λ_o hasta que sale de la zona de intersección. Esta situación, aunque logra que el vehículo pase por el medio de dos obstáculos, no asegura su integridad física si la distancia entre dos obstáculos no es muy grande. Una solución simple puede consistir en agrupar varios obstáculos adyacentes como si fuera un único elemento y aumentar adecuadamente, si fuera necesario, la distancia de seguridad.

Otra casuística, que a nivel teórico existe pero a nivel práctico es difícil de reproducir, se produce cuando un obstáculo se encuentra exactamente en la trayectoria del vehículo y la velocidad de trayectoria provoca una proyección nula sobre la velocidad de evasión. El resultado es la ausencia de velocidad de referencia para el vehículo, situación que se mantendrá mientras esta última no se modifique.

4.5 Conclusiones para el método de control NSB

Los métodos basados en comportamientos son una solución robusta y en esencia simple para el guiado de vehículos en formación. En el método de control NSB implementado, la descomposición de un objetivo, complejo de antemano, en múltiples tareas sencillas ha facilitado el modelado en las etapas iniciales. No obstante la citada sencillez añade un componente “caótico” fruto de las interacciones entre los diferentes componentes que merecen una atención especial. Una fuente de problemas ha sido el cambio de prioridad de tareas efectuado por la tarea “evitar obstáculo”: esos cambios de prioridad implican cambios bruscos de velocidad en cada conmutación entre “modo seguro” y “modo colisión” que se traducen en componentes de señal con picos y frecuencias temporales muy incómodos en las simulaciones. Otra fuente de problemas en este aspecto ha sido el manejo de ángulos, tanto en funciones “inversa tangente” como en los saltos entre los valores π y $-\pi$.

Las soluciones adoptadas en la implementación han sido, por un lado, la inclusión de filtros paso bajo asociados a los bloques derivativos en cascada y a las funciones trigonométricas problemáticas y por otro lado el uso de funciones tipo “sigmoideal” que suavizan las transiciones en los puntos donde la señal se comporta a “saltos”, como ejemplo los citados cambios de modo de operación en la tarea “evitar obstáculo”.

Dado que, el control NSB implementado solo permite formaciones de vehículos fijas, se propone como una mejora del algoritmo la transformación de la tarea “formación” para que admita la posibilidad de formaciones variables en el tiempo. Entre estas variaciones se podrían incluir las

rotaciones respecto de un punto, de manera que en la especificación de la trayectoria se añada un componente de orientación para la geometría.

5 Control Cooperativo

El método de control cooperativo basa su algoritmo en la definición de una trayectoria de referencia para cada vehículo implicado y en el establecimiento posterior de restricciones o condiciones en el seguimiento de la misma. Las restricciones se refieren a dependencias del propio movimiento respecto del movimiento de un conjunto de vehículos o bien respecto del movimiento de un vehículo líder, de hecho se suele denominar indistintamente como control cooperativo o de “seguimiento al líder”.

La clave del control cooperativo está en la descomposición del problema en dos tareas:

- Una tarea de control que se encarga de la gestión a bajo nivel de las señales de mando necesarias para seguir una trayectoria predefinida.
- Una tarea cooperativa que intercambia información de estado con otros vehículos y calcula, en base a dichos estados, las rectificaciones oportunas que ejecutará la tarea de control.

El esquema aquí expuesto dentro del control cooperativo se denomina en la literatura como CPF (Cooperative Path Following). En la sección 2.1 se esquematizó el problema del seguimiento de una trayectoria en tres puntos: estabilización puntual, seguimiento de trayectoria y evitación de obstáculos. De forma análoga en el problema CPF el concepto de seguimiento de trayectoria se descompone a su vez en:

- Posicionamiento sobre trayectoria: cuyo objetivo es guiar el vehículo al punto de trayectoria más cercano a su posición actual. La diferencia entre la posición real y la posición deseada de un vehículo se define como error sobre trayectoria.
- Seguimiento sobre trayectoria: cuyo objetivo es mantener una velocidad planificada sobre la trayectoria. El error entre la velocidad real y la velocidad deseada se denomina error de seguimiento.

En el algoritmo CPF, la solución adoptada se basa en el desacoplo de los dos componentes mencionados, así existe un control de posicionamiento que reduce el error sobre la trayectoria y el error de seguimiento a la vez que un control cooperativo modula este error de seguimiento en base a unas variables de cooperación definidas. La acción de control es resultado de la combinación de ambos componentes en el controlador de cada vehículo en la formación, es por tanto un método no centralizado.

5.1 Implementación de formaciones mediante control cooperativo

Se exponen a continuación los detalles del controlador propuesto en [2] e implementado para el trabajo. El controlador se divide en dos componentes: la tarea de control, que efectúa el

posicionamiento y seguimiento sobre trayectoria; y la tarea cooperativa que, definido un esquema de comunicación, accede a información de coordinación de otros vehículos en la formación para determinar y corregir las variables de coordinación locales.

5.1.1 Tarea de control

Los algoritmos de control para el seguimiento de trayectorias se basan en el error de posición, definido como la diferencia entre la posición del vehículo y la posición deseada en la trayectoria. En el control implementado la trayectoria se parametriza respecto de la variable $\gamma \in \mathbb{R}$. Así un punto de la trayectoria se expresa según $\eta_{ref}(\gamma) = [x_{ref}(\gamma), y_{ref}(\gamma), \psi_{ref}(\gamma)]^T \in \mathbb{R}^3$, donde γ tiene el significado físico de “distancia sobre la trayectoria”. Puesto que la trayectoria es independiente del tiempo para determinar una velocidad se define $v_{ref}(\gamma) \in \mathbb{R}$ como la velocidad de referencia “sobre trayectoria”, igualmente en función de γ . Existe una relación tal que $v_{ref}(\gamma) = \dot{\gamma}$ y un error de “seguimiento sobre trayectoria” según $\xi = \dot{\gamma} - v_{ref}(\gamma)$. El objetivo de control es eliminar el error de posición del vehículo a la vez que se elimina el error de seguimiento.

Los cálculos necesarios para obtener los resultados presentados en esta sección se pueden consultar en [2], mostrándose aquí únicamente los resultados de dichos cálculos tras aclarar las consideraciones previas y los aspectos más relevantes. El controlador se ha implementado sobre el modelo de vehículo descrito en la sección 3.4, parcialmente linealizado.

Las consideraciones previas son:

- Se define el vector posición como $\eta = [x, y, \psi]^T$ con la expresión $\dot{\eta} = R(\psi)v_r + v_c$ que relaciona la velocidad del vehículo $\dot{\eta}$ y la velocidad de la corriente v_c , referenciadas respecto de $\{I\}$, con el vector de velocidad relativa v_r , referenciado respecto de $\{L\}$. La velocidad relativa es la diferencia entre la velocidad absoluta del vehículo y la corriente $v_r = [u, v, r]^T = R(\psi)^T(\dot{\eta} - v_c)$ expresada en $\{L\}$.
- Los parámetros en el modelo presentan indeterminaciones, por ello el vector de parámetros se descompone según $\phi = \phi_k \cup \phi_u$, donde el vector ϕ_k es el subconjunto de parámetros conocidos y el vector ϕ_u es el subconjunto de parámetros desconocidos. La indeterminación de los parámetros se aproximan con la expresión $\phi_u = \hat{\phi}_u - \tilde{\phi}_u$ donde $\hat{\phi}_u$ es la estimación paramétrica y $\tilde{\phi}_u$ es el error de estimación.
- Las perturbaciones, definidas como $v_c = [u_c, v_c, 0]^T$, son de magnitud constante ($\dot{v}_c = 0$) y desconocida y se aproximan según $v_c = \hat{v}_c - \tilde{v}_c$ donde \hat{v}_c es la estimación y \tilde{v}_c el error de estimación.

La ley de control para el modelo se ha obtenido mediante la técnica del “backstepping” sobre funciones de Lyapunov. Para ello se definen:

- El error de posición $z_1 = R(\psi)^T(\eta - \eta_{ref})$.

- El error de velocidad $z_2 = v_r - \alpha$, donde α es una función auxiliar calculada para el control.

La expresión del controlador es:

$$\tau = M \dot{\alpha} - z_1 - K_2 z_2 + C v_r - \Phi_K \phi_k - \Phi_u \hat{\phi}_u \quad (19)$$

$$\text{con } \alpha = -R(\psi)^T \left(\hat{v}_c - \frac{\partial n_{ref}}{\partial \gamma} \dot{\gamma} \right) - K_1 z_1, \quad (20)$$

Donde $K_1 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ y $K_2 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ son ganancias para los errores definidos.

Las leyes de estimación resultantes son:

- Estimación de corrientes: $\dot{\hat{v}}_c = \Sigma \rho$, donde $\Sigma = \begin{pmatrix} \Sigma^+ & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ es la ganancia del estimador con valor $\Sigma^+ > 0 \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ y con el término de agrupación $\rho = R(\psi)^T (z_1 + K_1 M z_2)$.
- Estimación de parámetros: $\dot{\hat{\phi}}_u = \Gamma \pi$, donde $\pi = \Phi_u^T z_2$ es un término de agrupación, $\Gamma > 0 \in \mathbb{R}^{n_u \times n_u}$ es la ganancia de estimación y n_u el número de parámetros desconocidos.

La función auxiliar α obedece al método de derivación del controlador mediante técnica “backstepping” y ‘método B’ propuesto en [21]. La expresión de su derivada, calculada según

$$\dot{\alpha} = \frac{d\alpha(t, \gamma)}{dt} + \frac{\partial \alpha(t, \gamma)}{\partial \gamma},$$

es compleja y se recomienda recurrir al artículo de referencia tras aclarar para su comprensión que tanto la trayectoria como la velocidad de referencia están parametrizadas

respecto de γ siendo sus diferenciaciones: $\eta_{ref}^{\dot{\gamma}} = \frac{\partial \eta_{ref}(\gamma)}{\partial \gamma}$, $\eta_{ref}^{\ddot{\gamma}} = \frac{\partial^2 \eta_{ref}(\gamma)}{\partial \gamma^2}$ y $v_{ref}^{\dot{\gamma}}(\gamma) = \frac{\partial v_{ref}(\gamma)}{\partial \gamma}$.

El cálculo de las referidas diferenciaciones tienen inconvenientes cuando se calculan mediante la combinación de bloques dentro del modelo en SIMULINK ya que frecuentemente los bloques derivativos deben ir acompañados de filtros paso bajo para atenuar valores de señal muy grandes a frecuencias altas (característicos de los picos de señal). La determinación de la frecuencia de corte de estos filtros es un compromiso entre la precisión del modelo y el tiempo de simulación requerido. La solución adoptada, puesto que las geometrías de las trayectorias son conocidas a priori, es utilizar las expresiones analíticas de dichas funciones derivadas, que se parametrizan respecto de γ , y hacer que formen parte de las entradas de simulación del modelo al igual que la trayectoria.

5.1.2 Tarea cooperativa

La parte cooperativa del controlador se centra en dos puntos:

1. Establecer una relación entre las velocidades de los vehículos.
2. Modelar los flujos de información entre los miembros de la formación.

El primer punto establece, según la estrategia de seguimiento al líder visto en la sección 2.3, que la velocidad de un vehículo v_i depende de la velocidad del vehículo líder $v_{\mathcal{L}}$. Además se define ξ_i

como el estado de coordinación para el vehículo i de manera que un estado global coordinado, para una formación de n vehículos, está condicionado a que $\xi_{\mathcal{L}} = \xi_1 = \xi_2 = \dots = \xi_n$. El error de coordinación entre dos vehículos i y j se define como $\xi_{ij} = \xi_i - \xi_j$ y un estado global de coordinación requiere que $\xi_{ij} = 0 \forall i, j$.

Como consecuencia de lo descrito, se parametriza $\gamma_i = \gamma_i(\xi_i)$ y se establece la relación $R_i(\xi_i) = \frac{\partial \gamma_i}{\partial \xi_i}$, es decir, cómo la variable de coordinación ξ influye en la distancia sobre trayectoria γ para el vehículo i y, por tanto, en su trayectoria $\eta_{ref,i}(\gamma_i)$. El vehículo líder de la formación fija la velocidad de referencia del conjunto y su relación de coordinación siempre es $R_{\mathcal{L}}(\xi_{\mathcal{L}}) = 1$ o $\gamma_{\mathcal{L}} = \xi_{\mathcal{L}}$.

La expresión para el error de seguimiento sobre trayectoria $\zeta = \dot{\gamma} - v_{ref}(\gamma)$ se puede transformar en $\zeta_i = \dot{\gamma}_i - R_i(\xi_i) v_{\mathcal{L}}$ para, a continuación, obtener las ecuaciones dinámicas:

$$\dot{\zeta}_i = \mathbf{u}_i = \ddot{\gamma}_i - \frac{d}{dt} R_i(\xi_i) v_{\mathcal{L}} \quad (21)$$

$$\dot{\xi}_i = \frac{\zeta_i}{R_i(\xi_i)} + v_{\mathcal{L}}, \quad (22)$$

que establecen, para cada vehículo de la formación, cómo evoluciona el error de seguimiento ζ y el estado de coordinación ξ respecto de la velocidad sobre trayectoria la del líder $v_{\mathcal{L}}$. Además \mathbf{u}_i es la entrada de control usada para mantener en coordinación el vehículo i .

El segundo punto de la tarea cooperativa se fundamenta en la teoría de grafos y establece que el patrón de comunicación entre los miembros de una formación se puede entender como un grafo no dirigido, donde cada vértice se asocia a un vehículo y cada arco entre dos vértices i y j indica la existencia de comunicación entre los vehículos asociados. Sobre lo anterior se define la matriz de adyacencia A como una matriz cuadrada de dimensión igual al número de vehículos, donde cada elemento tiene valor $a_{ij} = 1$ si existe comunicación entre los vehículos i y j , y valor $a_{ij} = 0$ en otro caso. Se define la matriz de grado Δ como una matriz diagonal donde sus elementos en la diagonal principal Δ_{ii} indican el número de vértices que son adyacentes al vértice i según A , si se define $\mathbf{1} = [1]_{n \times 1}$ se puede calcular $\Delta = \text{diag}(A\mathbf{1})$. El concepto de matriz "Laplaciana" se obtiene así según la expresión $L = \Delta - A$.

En la Fig.19 se muestra un ejemplo de grafo de comunicaciones entre tres vehículos cuyas matrices de adyacencia, de grado y Laplaciana son respectivamente:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \Delta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{y} \quad L = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}.$$

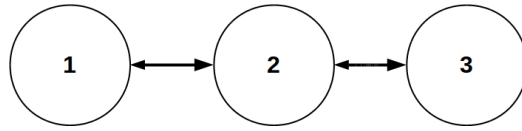


Fig.19: Ejemplo de grafo de comunicaciones bidireccional.

Se puede definir el error de cooperación según la expresión $\theta = G^T \xi$, donde $G \in \mathbb{R}^{n \times (n-1)}$ es una componente resultado de la descomposición de la matriz Laplaciana L , de forma que $L = G G^T$. El calculo de G se obtiene mediante el método de descomposición en valores singulares (método SVD) donde $G^T \mathbf{1} = 0$. Su valor calculado para la L del ejemplo anterior es $G = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{pmatrix}$.

Finalmente las ecuaciones (21) y (22) se pueden transformar en las ecuaciones matriciales:

$$\dot{\xi} = u \quad (23)$$

$$\dot{\theta} = G^T R(\xi)^{-1} \zeta \quad (24)$$

que relacionan el error de seguimiento ζ de todos los vehículos con el error de cooperación θ , entendido como la diferencia de posición coordinada entre cada vehículo y el líder de la formación. El error θ_i tiene sentido únicamente para los vehículos seguidores del líder. Por definición siempre se cumple $\theta_{\mathcal{L}} = 0$.

Finalmente se obtiene una expresión para u_i adaptada al punto de vista de cada vehículo:

$$u_i = -d_i \mu_i - b_i \zeta_i - \frac{e_i}{R_i} \sum \xi_{ij}, \quad (25)$$

donde los términos $\mu_i = -(\eta_{ref}^y)^T R(\psi) z_1 - (\alpha^y)^T M z_2$ y $\alpha^y = \frac{\partial \alpha(t, \gamma)}{\partial \gamma}$ son expresiones obtenidas en las derivaciones del controlador en [2].

5.2 Resultados

En esta sección se mostrarán resultados ilustrativos de comportamiento para el controlador cooperativo implementado. Todas las simulaciones se han efectuado con SIMULINK v8.8 y las figuras se ha obtenido de las gráficas generadas en las simulaciones desde la propia aplicación MATLAB. Las formaciones se han generado con tres vehículos idénticos: V_1 , V_2 y V_3 con dinámicas según el modelo parcialmente linealizado explicado en la sección 3.4 y con los valores de parámetros mostrados en la Tabla 2. Además se han fijado las ganancias para el controlador de trayectoria con valores: $K_1 = 0.3 I$, $K_2 = 300 I$, $\Sigma^+ = 0.001 \text{diag}([1, 1])$ y

$\Gamma = \text{diag}([10, 10^2, 10^2, 10^2])$. Los valores para las ganancias se han hallado de manera experimental para las simulaciones tomando como referencia los indicados en [2]. Las perturbaciones por corrientes se fijan en $v_c = [-1, -1]^T \text{m/s}$ con una estimación inicial $\hat{v}_c = [-1, -1]^T \text{m/s}$. Las estimaciones iniciales para los parámetros indeterminados son: $X_{|u} = -23.1$, $Y_{|v} = -339.0$, $Y_{vv} = -121.2$ y $N_{|r} = -2000$. Enfatizar que el valor inicial para las estimaciones de parámetros y

corrientes tiene relevancia a la hora de obtener unas estimaciones precisas, ya que el resultado final depende tanto del tiempo de simulación como de la cercanía de los valores reales. Por lo tanto, todas las estimaciones iniciales para corrientes y parámetros se encuentran en el 30% de margen de error. El tiempo de simulación se ha fijado en 300 segundos. Finalmente, el grafo de comunicación entre los vehículos es el mostrado en la Fig.19.

En el método cooperativo implementado existen dos elementos que se pueden variar para generar una formación:

- La trayectorias individuales de cada vehículo, predefinidas según los parámetros de construcción de su geometría.
- La relación de posiciones sobre trayectoria entre los componentes de la formación y el líder.

A continuación se mostrarán dos ejemplos de geometrías que se pueden obtener modificando los elementos indicados: formaciones con trayectoria rectilínea y formaciones con trayectoria circular. Sobre ambas geometrías se mostrará un ejemplo de formación en paralelo y una formación en flecha.

5.2.1 Formaciones en trayectoria rectilínea

Las trayectorias rectilíneas se construyen en base a rectas con pendiente m y punto de inicio $X_o=[x_0, y_0]^T$. Las ecuaciones para la trayectoria son:

$$\eta_{ref}(\gamma)=[x_0+\gamma \cos(\beta), y_0-\gamma \sin(\beta), \beta],$$

donde $\beta=atan(m)$ recordando que γ es la distancia sobre trayectoria y que el sistema de coordenadas tiene orientación NED.

Las derivadas parciales para la trayectoria se evalúan según las expresiones $\eta_{ref}^y=[\cos \beta, -\sin \beta, 0]^T$, $\eta_{ref}^{y^2}=[0, 0, 0]^T$ y $v_{ref}^y=0$ (la velocidad de referencia es constante).

En las formaciones se establece como vehículo líder $V_{\mathcal{L}}=V_1$ y las velocidades sobre la trayectoria, que dependen de las variables de coordinación según $\dot{\gamma}_i=R_i \dot{\xi}_i$, se configuran con valores $R_2=R_3=1$, recordando que la relación del vehículo líder es siempre $R_{\mathcal{L}}=1$.

Como primer ejemplo se simula una formación con configuración paralela sobre trayectoria rectilínea. Las posiciones iniciales de los vehículos son: $P_1=[-10, -60, \frac{\pi}{4}]^T$, $P_2=[-10, -20, -\frac{\pi}{2}]^T$ y $P_3=[-20, 20, \frac{\pi}{2}]^T$ respectivamente y la velocidad para el líder es $v_{\mathcal{L}}=1m/s$. Las trayectorias se han construido con pendiente $m=0.3$ y puntos iniciales $X_{o1}=[0, -25]^T m$, $X_{o2}=[0, 0]^T m$, y $X_{o3}=[0, 25]^T m$. Las ganancias para la tarea cooperativa del controlador (ganancias cooperativas) se han establecido en $E=0.1I_3$, $B=I_3$ y $D=0.001I_3$. De nuevo, se ha tomado como referencia [2] para las ganancias indicadas.

Los resultados de la simulación del primer ejemplo se muestran en la Fig.20. La gráfica de la izquierda muestra la evolución con el tiempo de la formación, la traza para cada vehículo se representan en un mismo color. A la derecha se muestran, respecto del tiempo, los errores de seguimiento (arriba) y errores de coordinación (abajo). El error de seguimiento ζ indica la diferencia entre la velocidad de un vehículo y su velocidad de referencia necesaria para mantener la formación en paralelo. El error de coordinación θ muestra la diferencia entre el estado de coordinación del vehículo y los estados de coordinación de los vehículos con los que se puede comunicar. Según el esquema de comunicación de la Fig.19, el vehículo líder V_1 se comunica únicamente con el vehículo V_2 y éste, de manera exclusiva, con el vehículo V_3 . Se puede observar en las trazas cómo la evolución del error θ depende de dicho esquema de comunicación y mientras el vehículo V_2 se sincroniza con V_1 , en un tiempo aproximado de 50 segundos, el vehículo V_3 no tiene una referencia fija. El vehículo V_3 sólo puede sincronizarse con la formación cuando V_2 ya está estabilizado.

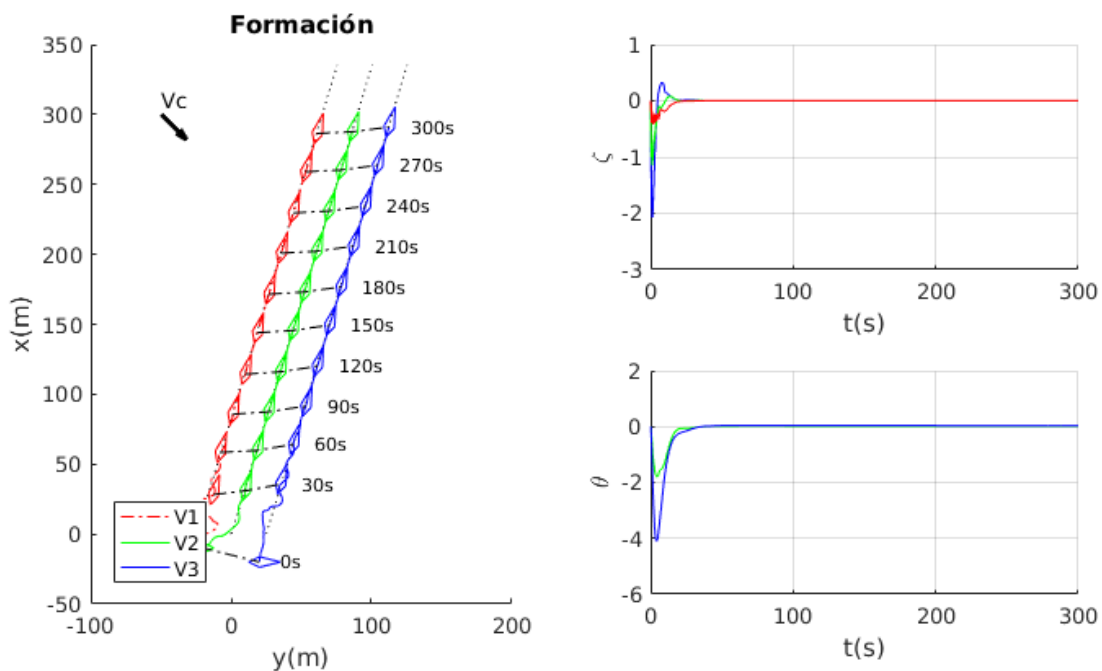


Fig.20: Control cooperativo: formación en paralelo sobre trayectoria rectilínea.

Como segundo ejemplo se muestra una formación con configuración en flecha y trayectoria rectilínea, con datos de simulación análogos al primer ejemplo, donde el vehículo V_2 actúa de avanzada. La formación en flecha se construye en base a trayectorias rectilíneas con la misma pendiente pero variando los puntos iniciales. Las trayectorias generadas en el ejemplo tienen pendiente $m=0.3$ y puntos iniciales $X_{o1}=[7.1837, -23.9457]^T m$, $X_{o2}=[19.1565, 5.7470]^T m$, y $X_{o3}=[-7.1837, 23.9457]^T m$ respectivamente.

El resultado de la simulación del segundo ejemplo se puede ver en la Fig.21. En la gráfica se observa cómo se alcanza una formación estable aproximadamente antes de los 50 segundos. La interpretación de los datos mostrados en la gráfica para θ es análoga a la obtenida en el primer ejemplo. Se puede observar, sobre la traza para el error ζ (error de seguimiento), cómo el comportamiento del error ζ de cada vehículo depende del error de su vehículo de referencia; así el error ζ_2 oscila centrado en ζ_1 y el error ζ_3 oscila sobre ζ_2 .

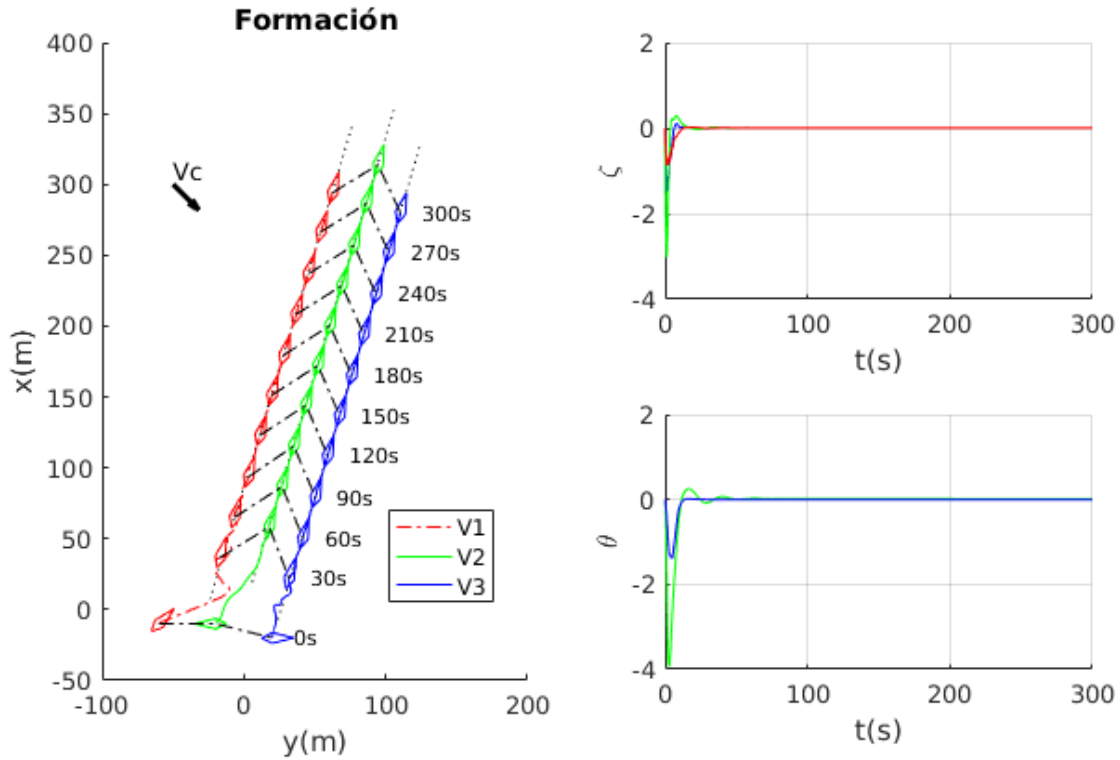


Fig.21: Control cooperativo: formación en flecha sobre trayectoria rectilínea.

5.2.2 Formaciones en trayectoria circular

Las trayectorias circulares se construyen en base a arcos concéntricos parametrizados según un punto de inicio $X_o=[x_o, y_o]^T$, un radio r_i y un ángulo de desarrollo α . Una trayectoria circular cumple la relación $\alpha = \frac{y}{r}$ y se genera con la ecuación:

$$\eta_{ref}(y) = [x_o + r \cos(\frac{y}{r}), y_o \mp r(1 - \sin(\frac{y}{r})), \pm \frac{y}{r}]^T$$

Las derivadas parciales para la trayectoria se evalúan según las expresiones $\eta_{ref}^y = [-\sin(\frac{y}{r}), \pm \cos(\frac{y}{r}), \pm \frac{1}{r}]^T$, $\eta_{ref}^{y^2} = [-\frac{1}{r} \cos(\frac{y}{r}), \mp \frac{1}{r} \sin(\frac{y}{r}), 0]^T$ y $v_{ref}^y = 0$. El signo variable en las expresiones indica un sentido de giro antihorario u horario según el orden de aparición. Además, en una formación circular la relación de velocidades es proporcional al radio que

configura cada trayectoria según $v_i = \frac{R_i}{R_{\mathcal{L}}} v_{\mathcal{L}}$. De igual manera se cumple $\dot{\gamma} = R_i \dot{\xi}_i$, entendido ξ como el ángulo de avance dentro del arco trayectoria. El estado de coordinación se mantiene siempre que $\xi_{\mathcal{L}} = \xi_2 = \xi_3$.

Se han efectuado dos ejemplos ilustrativos de simulaciones para formaciones sobre trayectoria curva: el primero con configuración en paralelo y el segundo con configuración en flecha. Este último ejemplo se incluye por completitud respecto de los ejemplos mostradas para formaciones sobre trayectorias rectilíneas, en la sección anterior. Una formación en flecha se construye adelantando el ángulo de desarrollo para la trayectoria del vehículo en avanzada mediante la adición de un ángulo de fase. El ángulo de fase se calcula según $\Delta \xi_i = a \sin \frac{x_i}{r_i}$ donde x_i es la posición de adelanto del vehículo i en la formación y r_i es el radio que configura la trayectoria. Las posiciones iniciales de los vehículos son: $P_1 = [-20, 10, -\pi]^T$, $P_2 = [-50, 50, -\frac{\pi}{2}]$ y $P_3 = [-20, 50, \frac{\pi}{2}]$. Las ganancias para los controladores de trayectoria se mantienen como en el primer ejemplo y las ganancias cooperativas se establecen en los valores: $E = 0.1 I_3$, $B = 2.0 I_3$ y $D = 0.001 I_3$. Las trayectorias circulares se han parametrizado con radios $r_1 = 400 m$, $r_2 = 415 m$ y $r_3 = 430 m$. Los puntos iniciales de dichas trayectorias son $X_{o,1} = [0, 0]^T m$, $X_{o,2} = [0, 15]^T m$ y $X_{o,3} = [0, 30]^T m$ respectivamente. En el caso de la configuración en flecha el adelanto del vehículo V_2 es $x_2 = 10 m$. La velocidad para el líder es $v_{\mathcal{L}} = 1 m/s$ en ambos ejemplos.

Los resultados de las simulaciones se muestran en la Fig.22. En la gráfica superior se puede ver una configuración en paralelo y en la gráfica inferior una configuración en flecha. En ambas figuras se observa que la estabilidad en la formación se alcanza aproximadamente a los 150 segundos. Se observa en este ejemplo (trayectorias circulares) cómo los errores θ y ζ tienen un carácter oscilatorio con amplitud decreciente a medida que la formación va estabilizándose. Se observa, en la traza para θ , la dependencia de V_3 respecto del vehículo V_2 para alcanzar un estado sincronizado en la formación, de esa forma, primero debe estabilizarse V_2 y después V_3 . Esta dependencia es consecuencia del esquema de comunicación establecido. Se aprecia además, en las trazas para ζ , cómo la estabilización en la velocidad de seguimiento no es alcanzada, por parte de ningún vehículo, hasta que lo ha conseguido el vehículo líder, así de manera habitual se estabiliza primero V_2 y después V_3 .

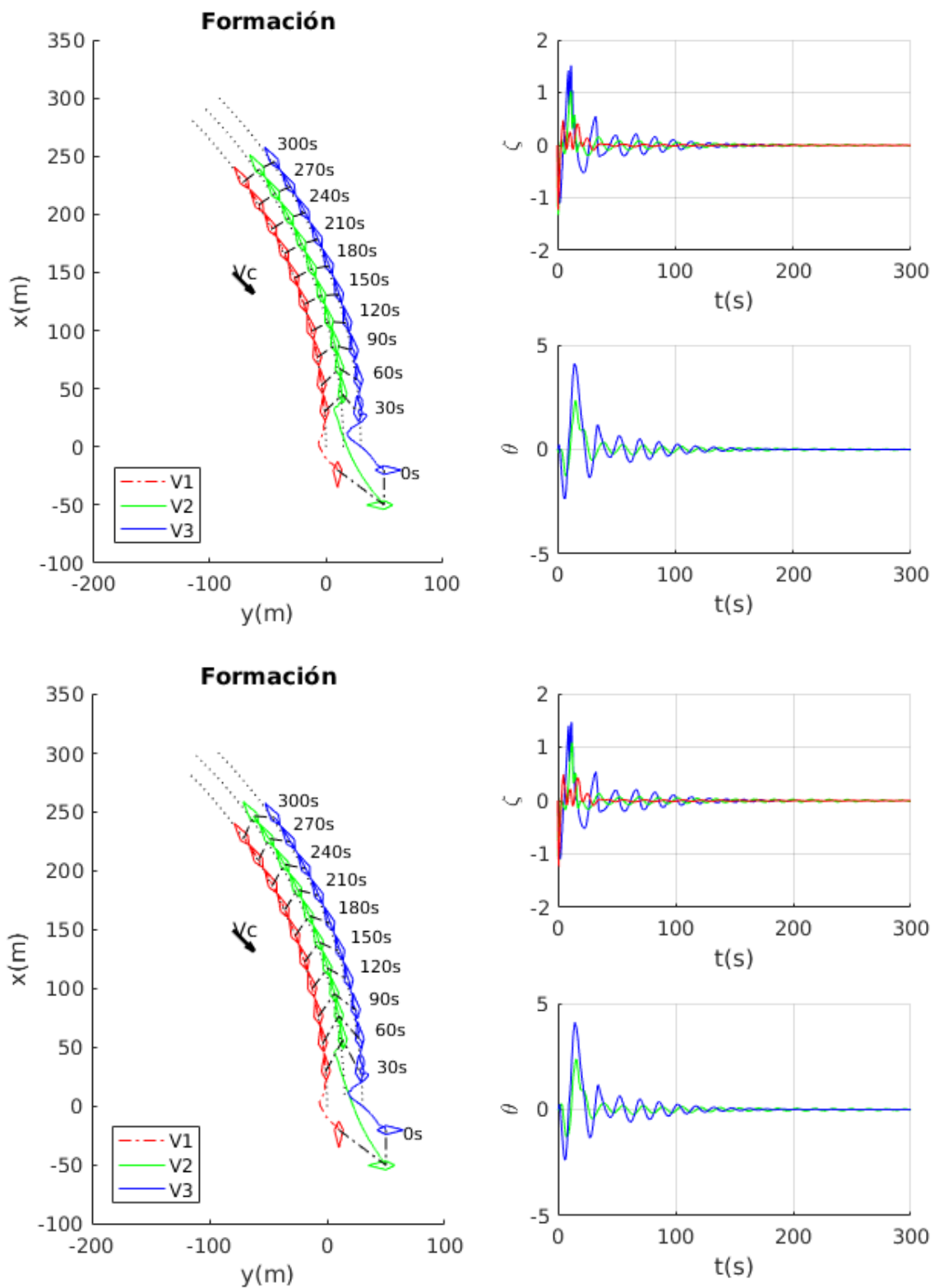


Fig.22: Control cooperativo: formaciones sobre trayectoria curva. Sup) Configuración paralelo. Inf) Configuración flecha.

5.3 Limitaciones del algoritmo.

Los resultados mostrados en la sección anterior establecen un punto de referencia sobre el que realizar modificaciones para obtener los límites en la aplicación del método de control cooperativo implementado. Se identificarán aquí dichos límites en base a variación de parámetros de configuración, elegidos entre las ganancias que configuran el controlador. Se identificarán además las carencias principales del algoritmo.

Como modelo de referencia, y para los datos de simulación, se tomará el ejemplo de formación sobre trayectoria curva y configuración en paralelo mostrado en la Fig.22. Las ganancias de referencia para el controlador de trayectoria son: $K_1=0.5I$, $K_2=250I$ y los valores de ganancias cooperativas son: $E=0.5I$, $B=I$ y $D=0.001I$. El vehículo líder es $V_1=V_{\mathcal{L}}$ con velocidad de referencia $v_{\mathcal{L}}=1m/s$. El esquema de comunicación para el conjunto es el mostrado en la Fig.19. Como resultado “tipo” se muestra la Fig.23 donde se ha establecido un tiempo de simulación de 300 segundos,

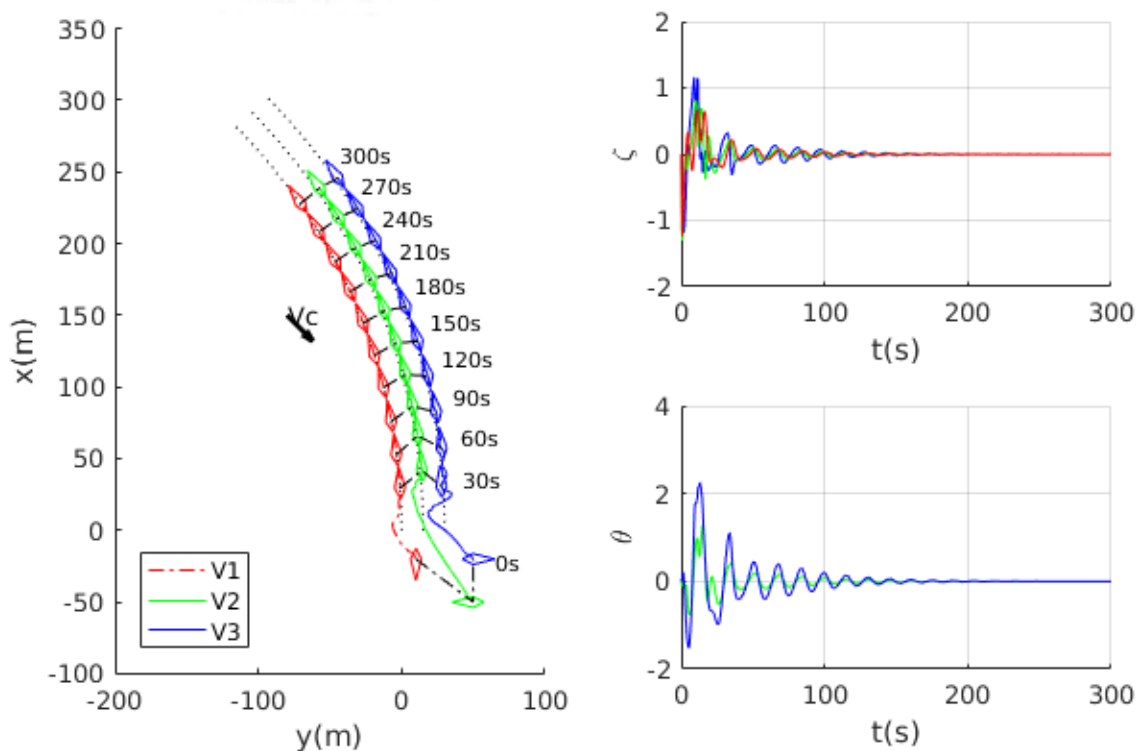


Fig.23: Formación “modelo” para variación de ganancias en control cooperativo.

5.3.1 Variación de los parámetros de controlador

Los parámetros que influyen sobre las dinámicas individuales de cada vehículo son las ganancias K_1 y K_2 que ponderan, como se explicó en la sección 3.4, los errores z_1 (error de

posicionamiento) y z_2 (error de velocidad). Aunque el controlador converge a la trayectoria y velocidad de referencia para cualquier valor $K_1 > 0$ y $K_2 > 0$, se determinarán, de manera simple, unos valores límite de K_1 y K_2 donde el comportamiento de las formaciones no es aceptable.

Ganancia K_1

Los efectos de la variación de K_1 se muestran en la Fig.24. Esta figura se compone de dos gráficas: una superior donde se muestra el efecto del límite inferior propuesto para K_1 y una gráfica inferior equivalente para el límite superior propuesto. Junto a cada gráfica se muestran las trazas, respecto del tiempo, de los errores z_1 y z_2 asociados a la simulación y que se obtienen del vehículo líder.

La ganancia K_1 se utiliza en la función ficticia α , según la expresión (20), como amplificador del error de posición z_1 . El valor inferior propuesto $K_1=0.01$ se ha obtenido reduciendo el valor de referencia hasta obtener el efecto mostrado mientras la formación de vehículos aún fuera distinguible. La reducción de dicha ganancia pondera a la baja el error de posición en el cálculo de α y la compensación necesaria en la trayectoria se obtiene cuando el error z_1 crece lo suficiente. La consecuencia de ello es que la corrección de trayectoria se efectúa con oscilaciones tanto mayores cuanto más alejado está el vehículo de la trayectoria de referencia. Dado que el error de trayectoria z_1 incluye la diferencia de rumbo $\psi - \psi_{ref}$, la corrección de rumbo es también más lenta.

El valor superior propuesto $k_1=5.0$ se ha visto limitado, por un lado a consecuencia del tiempo de máquina necesario para completar la simulación de 300 segundos en SIMULINK¹ y por otro lado con intención de mostrar los efectos de la variación de ganancia de manera que las trazas aún fueran legibles. Así al incrementar K_1 hay una amplificación del error z_1 y consecuentemente se producen las oscilaciones con amplitud descendiente y alta frecuencia observadas en la gráfica para ese error. Se aprecia además un comportamiento errático en los vehículos cuando toman contacto con la trayectoria, causado por el valor de z_1 amplificado y que tiene reflejo en las oscilaciones observadas. El error z_2 se ve afectado, en consecuencia, ya que las correcciones de posición alteran el error de velocidad.

Ganancia K_2

Los efectos de la variación de K_2 en la formación se muestra en la Fig.25. La composición de la figura es análoga a la Fig.24 y muestra la evolución de la formación así como las trazas de los errores z_1 y z_2 , resultado de la simulación y que se obtienen del vehículo líder. La ganancia K_2 amplifica el error de velocidad z_2 e influye directamente en la expresión para el cálculo del control

1 El tiempo de máquina necesario para completar cualquier simulación se ha limitado a 3 minutos aproximadamente. Se ha establecido así una vez comprobado que un tiempo excesivo es síntoma de un sistema "rígido". Los resultados de simulación obtenidos cuando un sistema se vuelve "rígido", a consecuencia de una excesiva ganancia, no suelen aportar una información visual adecuada. En lo sucesivo, la referencia en el texto a "tiempo de máquina" hace referencia a esta circunstancia.

(19). El valor mínimo propuesto $K_2=15$ pondera a la baja el error z_2 provocando un control insuficiente, con un razonamiento análogo al efecto observado para la ganancia K_1 . Las correcciones en la velocidad y consecuentemente las correcciones en la trayectoria se producen con un carácter oscilatorio y la convergencia a cero necesita más tiempo de simulación. En las trazas mostradas, esa convergencia no se alcanza en los 300 segundos y se observa un comportamiento oscilatorio puro tanto en el error de velocidad como en el error de posición. En la gráfica de la formación se aprecia cómo el vehículo líder no es capaz de mantenerse sobre su trayectoria.

El valor superior $K_2=10^5$ se ha visto limitado por el tiempo de máquina necesario para completar los 300 segundos de simulación en SIMULINK. El efecto observado es que a mayor valor de K_2 se obtienen una formación más estable, además las trazas para los errores no muestran oscilaciones y convergen a cero desde el principio de la simulación.

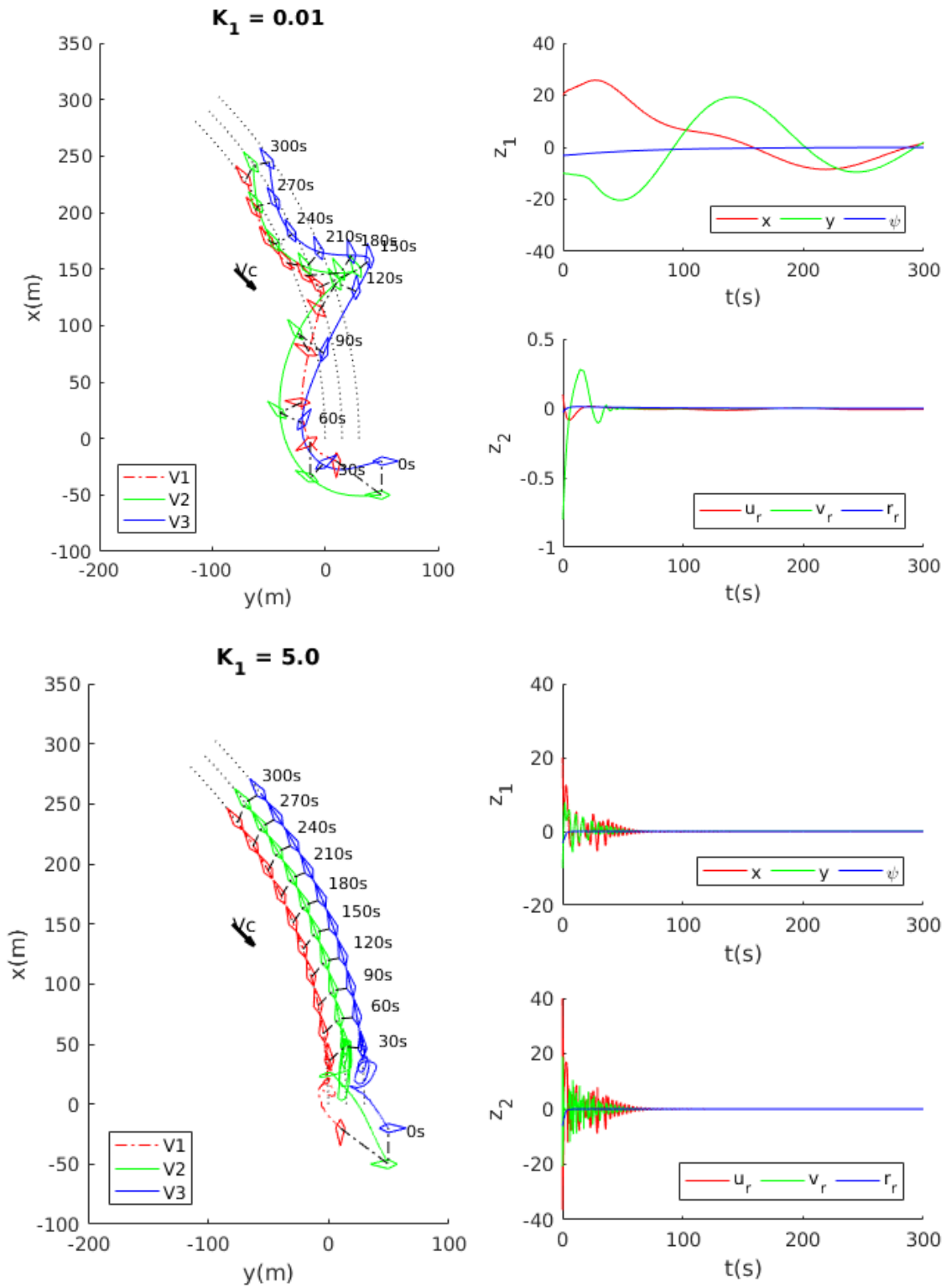


Fig.24: Resultados de la variación de la ganancia K_1 en el control cooperativo. Sup) Efectos para límite inferior $K_1 = 0.01$. Inf) Efectos para límite superior $K_1 = 5$.

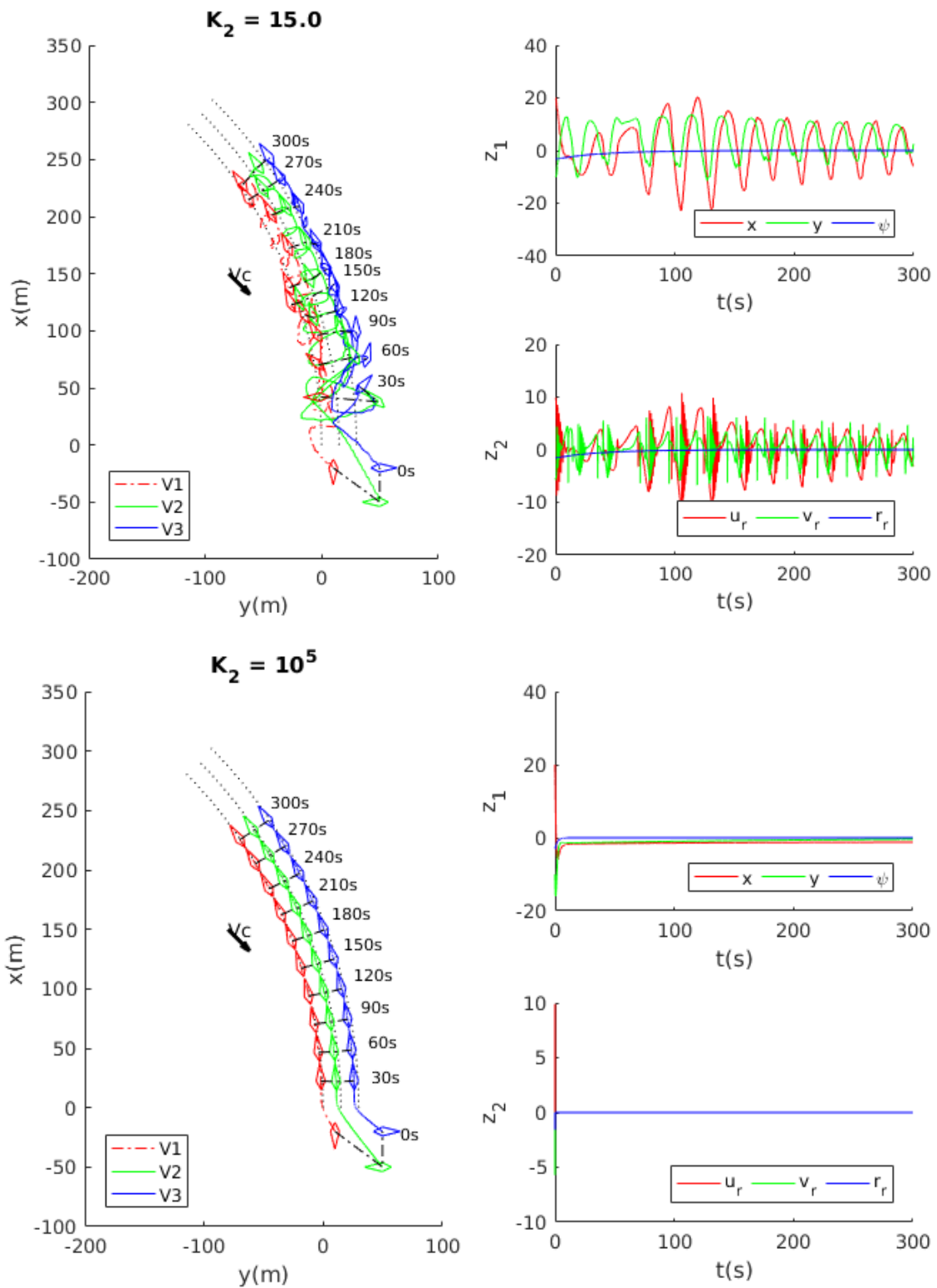


Fig.25: Resultados de la variación de la ganancia K_2 en el control cooperativo. Sup) Efectos para límite inferior $K_2 = 15$. Inf) Efectos para límite superior $K_2 = 10^5$.

5.3.2 Variación de los parámetros de coordinación

En la expresión (25) se muestra la ponderación de términos según las ganancias cooperativas D , B y E en el cálculo de la expresión para control cooperativo u . La ganancia D actúa sobre el término $\mu_i = -(\eta_{ref}^y)^T R(\psi) z_1 - (\alpha^y)^T M z_2$, que agrupa los errores z_1 (posición) y z_2 (velocidad) propios del estado de cada vehículo y calculados en el controlador. La ganancia B actúa sobre el error de seguimiento ζ_i y la ganancia E amplifica los errores de posición intra-formación expresado por las variables θ_i .

Ganancia D

La exploración de los límites superior e inferior propuestos para esta ganancia está condicionado por el tiempo de máquina necesario para completar una simulación de 300 segundos en SIMULINK. Los efectos de la variación de la ganancia D se muestran en la Fig.26. Esta figura se compone de dos gráficas: una superior con los efectos de la ganancia para su límite inferior propuesto y una inferior análoga con los efectos de la ganancia para su límite superior. Cada gráfica muestra en la izquierda la evolución de la formación y a la derecha las trazas, respecto al tiempo, de los errores ζ y θ obtenidos de los vehículos durante la simulación. Para el límite inferior propuesto de ganancia $D=10^{-6}I$ no se observan efectos determinantes en la geometría de la formación y los errores ζ y θ tienen un valor de pico máximo del orden de 10^{-3} lo que se considera despreciable para las circunstancias. En sucesivas pruebas se observa que cuanto menor es el valor de la ganancia D se obtiene un mejor comportamiento respecto de los errores de coordinación, en el contexto de la simulación, por lo que puede establecerse, como límite inferior para la ganancia, un valor $D>0$.

El límite superior propuesto para la ganancia $D=0.04I$ genera las oscilaciones observadas en los errores ζ y θ semejantes a las encontradas en la variación de ganancias K_1 y K_2 de la sección anterior. Puesto que la ganancia D pondera el término μ , que introduce los errores de posición z_1 y velocidad z_2 en el cálculo de u , se puede afirmar que la amplificación de estos errores afecta negativamente, en el contexto de simulación, la sincronización de velocidades en la formación.

Ganancia B

Los efectos de la variación de la ganancia B se muestran en la Fig.27. Esta figura tiene la misma estructura que la Fig.26. Para el límite inferior propuesto en la ganancia $B=0.002I$ se aprecian errores de seguimiento observables en los vehículos. Dado que B amplifica el error ζ (error de seguimiento), una ganancia pequeña ocasiona que dicho error no pondere lo suficiente en el cálculo de la acción de control y que ésta sea insuficiente. En la traza mostrada no existe convergencia para ζ en el tiempo de simulación y la tendencia es oscilatoria. Estas oscilaciones observadas en ζ inducen un efecto similar en θ , ya que las velocidades en formación no pueden sincronizarse. Los efectos en la formación son: que se necesita un mayor tiempo de estabilización y que los vehículos muestran un desplazamiento en vaivén sobre la trayectoria, consecuencia de las continuas correcciones de velocidad.

En el otro extremo, para el límite superior propuesto $B=1000I$ los errores ζ y θ , aunque con carácter oscilatorio, se pueden considerar prácticamente nulos. Se aprecia una formación de vehículos estable durante toda la simulación. Éste límite superior ha se visto limitado por el tiempo de máquina necesario para completar los 300 segundos de simulación en SIMULINK.

Ganancia E

El efecto de la variación de la ganancia E sobre la formación de vehículos se muestra en la Fig.28, con estructura de gráficas análoga a la Fig.26. Para el valor inferior propuesto $E=10^{-4}I$ la formación no alcanza un estado sincronizado en el tiempo de simulación. El error θ , debido al valor de ganancia, no pondera en el calculo de la acción de control y ésta es insuficiente, como consecuencia los errores de posición relativa sobre la trayectoria no convergen. En otras palabras, el valor de cada u_i no es capaz de mantener la formación a medida que los vehículos siguen sus referencias η_i . Éste efecto se aprecia sobretodo en el error θ para el vehículo V_3

El límite superior propuesto $E=10^4I$ hace que ambos errores ζ y θ converjan a cero rápidamente y que la formación se estabilice desde el principio pero, como se aprecia en la figura, se genera un efecto semejante a “chattering”², en ambos errores, que se debe evitar.

2 En teoría de control el termino “chattering” describe el comportamiento de una señal caracterizado por oscilaciones de amplitud pequeña y frecuencia alta. Las causas del chattering son principalmente dinámicas rápidas en los bucles de control y la existencia de dinámicas no modeladas en el sistema a controlar.

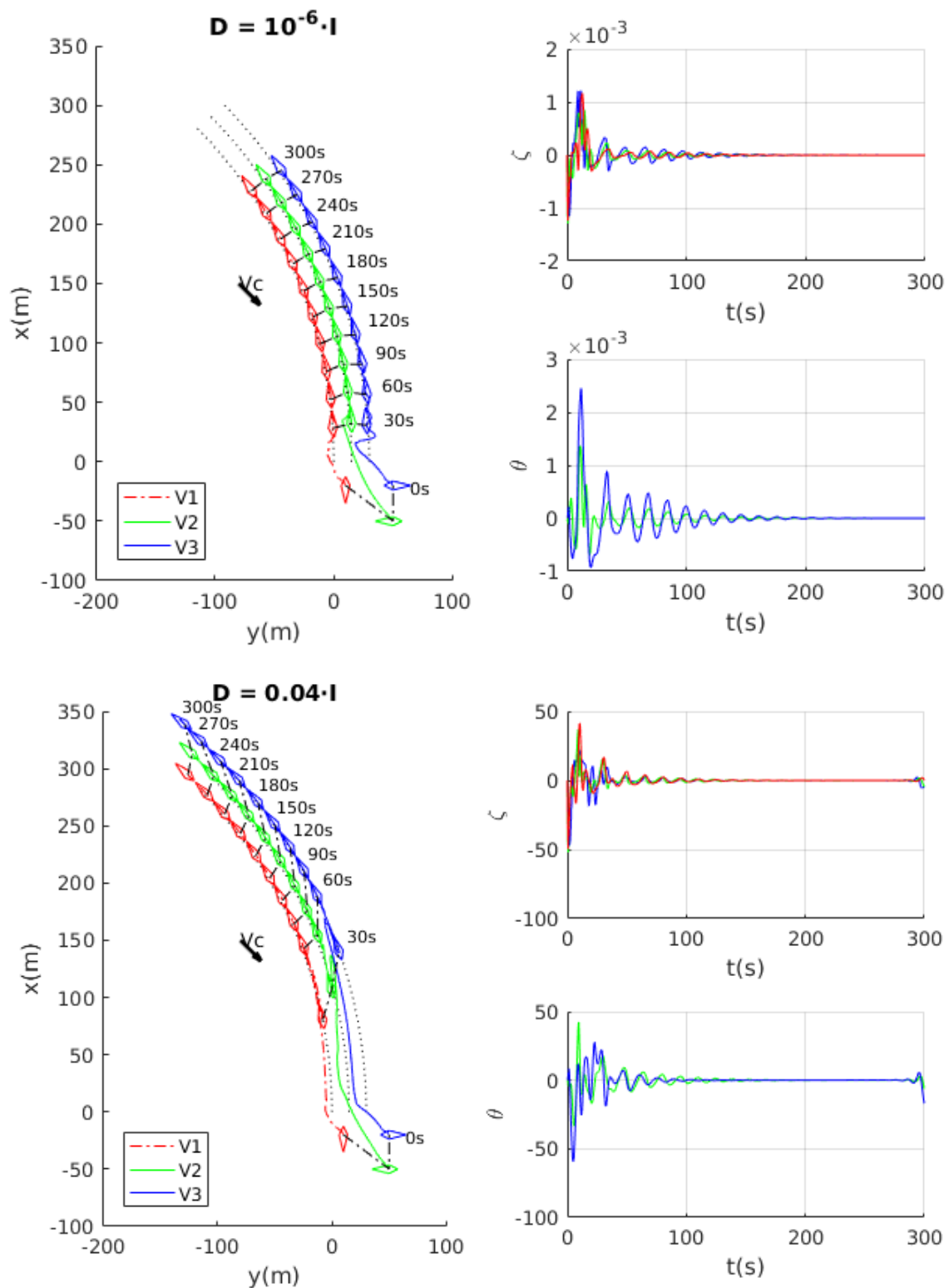


Fig.26: Resultados de la variación de la ganancia D en el control cooperativo. Sup) Efectos para límite inferior $D = 10^{-6} \cdot I$. Inf) Efectos para límite superior $D = 0.04 \cdot I$.

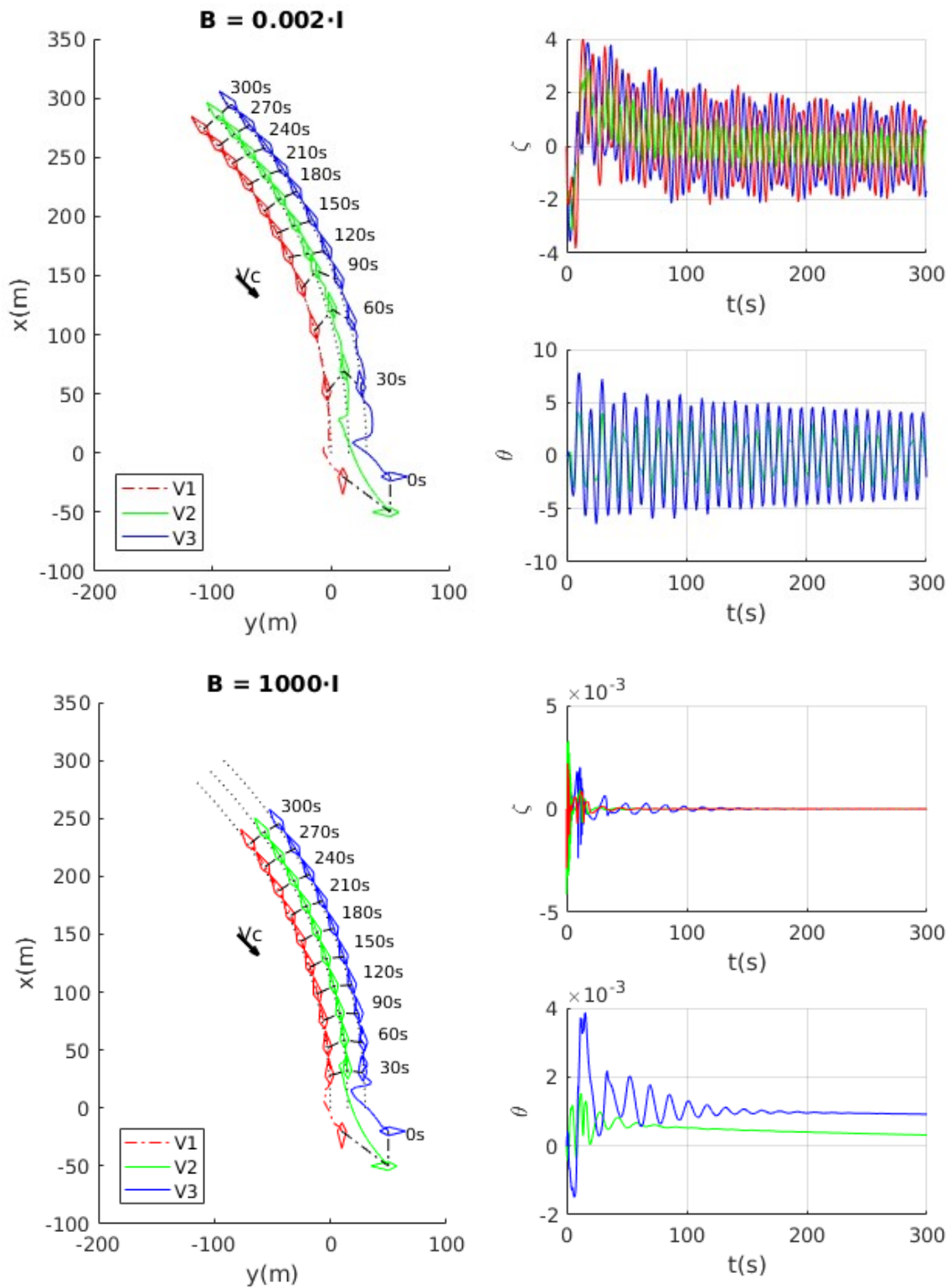


Fig.27: Resultados de la variación de la ganancia B en el control cooperativo. Sup) Efectos para límite inferior $B = 0.002 \cdot I$. Inf) Efectos para límite superior $B = 10^3 \cdot I$.

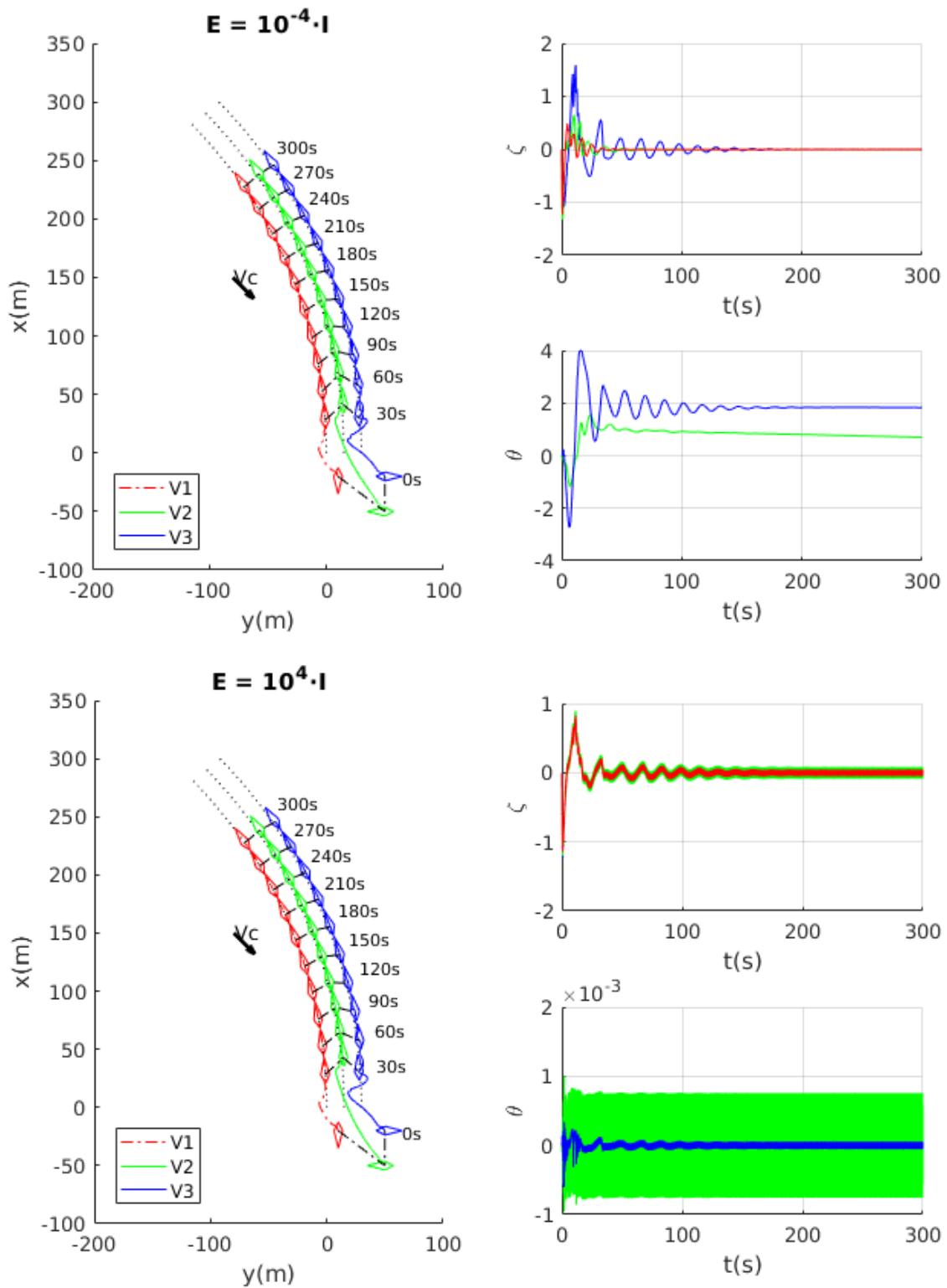


Fig.28: Resultados de la variación de la ganancia E en el control cooperativo. Sup) Efectos para límite inferior $E = 10^{-4} \cdot I$. Inf) Efectos para límite superior $E = 10^4 \cdot I$.

5.3.3 Rangos de parámetros válidos

En base a las simulaciones realizadas, cuyos casos límite se presentan en las secciones 5.3.1 y 5.3.2, se sugieren y presentan en la Tabla 4 unos rangos de valores, para las ganancias: K_1 , K_2 , D , B y E , en los cuales el método de control cooperativo tiene un comportamiento aceptable sobre las características del modelo de vehículo y el escenario propuesto. Es importante destacar que los valores “reales” para las ganancias deberían localizarse hacia el centro de cada rango propuesto, ya que los extremos establecidos pueden presentar comportamientos no deseables.

Parámetro	Límite Inferior	Límite Superior
K_1	$0.01 I$	$5.0 I$
K_2	$15 I$	$10^5 I$
D	$10^{-6} I$	$0.04 I$
B	$2 \cdot 10^{-2} I$	$10^3 I$
E	$10^{-4} I$	$10^4 I$

Tabla 4: Valores límite establecidos para los parámetros del método de control cooperativo.

5.4 Conclusiones para el método de control cooperativo

Aparte de las limitaciones relacionadas con la variación de los parámetros existen otras características del método cooperativo implementado que tienen relevancia para el análisis de resultados y que se exponen en los siguientes párrafos.

La construcción de trayectorias requiere una planificación previa del trazado y una composición de los tramos en base a primitivas puesto que el algoritmo de control requiere el cálculo de las derivadas parciales $\eta_{ref}^y = \frac{\partial \eta_{ref}(y)}{\partial y}$, $\eta_{ref}^{y^2} = \frac{\partial^2 \eta_{ref}(y)}{\partial y^2}$ y $v_{ref}^y(y) = \frac{\partial v_{ref}(y)}{\partial y}$ para la generación de la señal de control. Estos cálculos tienen complicaciones en la fase de simulación cuando se realizan en tiempo real, mediante el procesamiento de los datos de trayectoria y con una estructura de bloques predefinidos (SIMULINK). Existen problemas de acondicionamiento de las señales que aparecen como resultado de sucesivas diferenciaciones de variables y el tratamiento de tales señales hace necesario el uso de filtros paso bajo en la mejor de las situaciones. La solución elegida y mostrada en las secciones anteriores ha sido el uso de geometrías predefinidas junto con sus derivadas parciales determinadas de forma analítica, en concreto las trayectorias mostradas han sido geometrías rectilíneas y circulares. En una aplicación real del método de guiado se pueden añadir más geometrías al catálogo de primitivas complementadas con las expresiones de sus derivadas parciales, así una trayectoria se puede componer de diferentes tramos parametrizados según los parámetros de construcción de la primitiva y una adaptación de la variable y , necesaria para mantener la distancia sobre la trayectoria y la referencia de coordinación dentro de la formación.

Otras limitaciones son intrínsecas del diseño. La primera de ellas es la falta de una medida de contingencia para fallos de comunicación. En un grafo de comunicación como el mostrado en la Fig.19 la eliminación de cualquier arco generaría dos componentes conexas independientes, que en el contexto de una formación de vehículos significaría que un grupo de ellos quedaría fuera de dicha formación y aislados del líder. Una manera de evitar esto es diseñar formaciones con esquemas de comunicación en los cuales cada vehículo se comunica con más de un vecino. En caso de un fallo grave de comunicaciones, donde un vehículo quedara aislado, una solución de compromiso, que puede depender del contexto de la formación, podría ser la detención del vehículo o al contrario, continuar con una velocidad predefinida a la espera de que la comunicación se restablezca.

La segunda limitación es la incapacidad de evitar obstáculos por parte de los vehículos de la formación. El método cooperativo implementado está concebido para resolver la problemática general de las formaciones de vehículos sin tener en cuenta una aplicación real. Una adaptación del método para incluir la evitación de obstáculos requeriría la capacidad de modificación instantánea de la trayectoria y velocidad planificadas mientras se mantiene la coordinación del valor y necesario para no perder sincronismo. De igual manera sería necesario establecer varios modos de funcionamiento para cada vehículo, estableciendo niveles de seguridad según la presencia y cercanía a un obstáculo. Así en un nivel de seguridad de “riesgo” el vehículo abandonaría la formación para iniciar una maniobra evasiva y una vez el riesgo haya disminuido retomar la vuelta a la formación. En [22] se propone una solución similar al problema de los obstáculos en formaciones con esquema de seguimiento al líder estableciendo estados globales de actividad para la formación al completo así como estados locales para cada vehículo. El estado de normalidad para la formación es el “Seguimiento al Líder” y el estado de normalidad para cada vehículo de la formación es el de “Seguimiento al Líder Local”. Cuando un vehículo detecta un obstáculo cambia su estado local a “Espera Local” y el estado global de la formación pasa a un estado de “Espera”. Además el resto de miembros de la formación pasa a un estado local de “Espera Remota”. Cuando una formación se encuentra en un estado de espera puede detenerse. Una vez que el vehículo ha rebasado el obstáculo pasa a un estado local de “Recuperación de la Formación” y los demás miembros pasan a un estado local de “Recuperación Remota”. Tras recuperar su posición en la formación, el vehículo pasa a un estado local de “Seguimiento del Líder Local” y toda la formación pasa al estado global de “Seguimiento al Líder” recuperándose la normalidad de operación.

6 Observaciones Finales

Los métodos de guiado de vehículos en formación presentados e implementados en el trabajo se encuentran entre las líneas principales de investigación en la actualidad. Así lo demuestra la cantidad de publicaciones relacionadas existentes en la literatura, de las cuales sólo se incluyen en la memoria de este trabajo, entre las consultadas, las más relevantes para su desarrollo.

Aunque existen infinidad de aproximaciones a la problemática con diferentes enfoques, las limitaciones inherentes a cada método impiden su aplicación en el mundo real de forma generalizada. En otras palabras, los estudios consultados abordan determinadas características del problema o proponen mejoras sobre trabajos previos. Como ejemplos de estas características se puede mencionar la aplicación de teoría de grafos para modelar restricciones en las comunicaciones, las soluciones aportadas para abordar la problemática de la flexibilidad geométrica en las formaciones de vehículos o la capacidad de evitar obstáculos. En definitiva, cada uno de los métodos enfoca su atención sobre una parte de la problemática y el desarrollo de un método que incorpore las ventajas más notables de todos ellos terminará siendo una solución de compromiso en la que se requiera realizar una labor importante de integración.

También es importante destacar que a pesar de la claridad de la documentación consultada, siempre es un reto transformar la teoría descrita en un artículo técnico en un modelo de simulación que funcione. Las variables que influyen en el resultado final son muchas: comenzando por la asimilación de los conceptos expuestos, pasando por las decisiones de diseño del modelo, y terminando por el manejo y el conocimiento de la herramienta de modelado elegida (en este caso SIMULINK).

De manera general, las principales dificultades técnicas encontradas han sido consecuencia de las interpretaciones de los artículos, situación habitual cuando se abordan nuevas áreas de conocimiento. Además la dificultad se ha visto incrementada por las diferencias conceptuales inherentes a los dos métodos implementados, las características de cada vehículo marino y a la problemática tratada en cada caso.

Finalmente, es importante destacar que el análisis de los efectos de los cambios de los valores de los parámetros recogidos en esta memoria, además de ser una de las aportaciones novedosas de este trabajo, no solo ha permitido encontrar límites adecuados para dichos valores según los ejemplos propuestos, sino que también ha permitido comprender su influencia real en las diferentes variables del problema.

6.1 Conclusiones

Aunque al final de los capítulos 4 y 5 se han incluido conclusiones propias de cada método, a continuación se destacan las más relevantes.

El método de guiado basado en comportamientos, expuesto en el capítulo 4, está clasificado como método centralizado puesto que necesita conocer el estado de todos los vehículos en la formación para generar el conjunto de trayectorias. La ventaja de ello es la sencillez del esquema del control, ya que un único proceso gestiona toda una formación de vehículos. Pero tiene la desventaja de una dependencia absoluta de un canal de comunicación fiable, puesto que el método no cuenta con medidas de contingencia ante un fallo de comunicaciones. Otra cualidad del método es la descomposición de tareas, según la cual, una tarea compleja se divide en varias subtareas simples que se priorizan y combinan para la consecución del objetivo primario. Esto permite incorporar características al comportamiento general de control, como por ejemplo “evitar obstáculos”, pero añade un efecto de imprevisibilidad resultado de los cambios de prioridad entre tareas no planificados y causados por las condiciones de operación.

El método de guiado cooperativo, expuesto en el capítulo 5, está clasificado como un método no centralizado ya que la trayectoria de cada vehículo es generada por él mismo en base a su trayectoria de referencia y el estado de coordinación, dentro de la formación, de un conjunto de vehículos con los que se puede comunicar. Las principales ventajas son: la escalabilidad en el número de componentes de una formación y la tolerancia a fallos en las comunicaciones, siempre que dicho esquema de comunicaciones admita redundancias. Una desventaja del método se deriva de la rigidez con la que se definen las trayectorias de referencia, ya que están prefijadas. Como consecuencia, el método no provee de una técnica para evitar obstáculos.

Finalmente, es importante destacar que en ambos métodos es necesario sintonizar un elevado número de parámetros cuyos valores, tal y como se ha puesto de manifiesto en las simulaciones recogidas en la memoria, pueden tener un efecto importante en las formaciones mostradas.

6.2 Líneas de trabajo futuro

Igualmente al final de los capítulos 4 y 5 se han incluido algunas propuestas de mejora, para cada método, que pueden enfocarse como trabajos futuros, a continuación se destacan las más relevantes.

El método de guiado basado en comportamientos tiene un punto débil en las comunicaciones y una línea de mejora estaría en el diseño de una medida de contingencia ante fallos de comunicación. Esta medida debería definir el comportamiento de un vehículo en caso de ausencia de referencia de velocidad, como consecuencia de un corte de comunicaciones. Una solución simple supondría generar referencias de velocidad “por defecto” en tales circunstancias, sea detener el vehículo o seguir avanzando con la última referencia recibida. Otras soluciones más sofisticadas requerirían un cambio en el modelo de comunicación, usando por ejemplo un proceso de transmisión a “rafagas” que, en un breve espacio de tiempo, enviase a cada vehículo, una serie de puntos de trayectoria con una estimación de las posiciones futuras del baricentro, evitando así un uso continuado del ancho de banda. Por lo general, las medidas de contingencia referentes a fallos en comunicaciones requieren añadir componentes con diseños basados en esquemas no centralizados.

El método de guiado cooperativo debe incorporar un mecanismo para que los vehículos de la formación tengan la capacidad de evitar obstáculos. La solución no es sencilla y supondría un rediseño de los controladores de trayectoria aportados por el método. La dificultad inherente, en la modificación de la trayectoria de un vehículo, aparece cuando hay que mantener el valor de la variable de coordinación según una trayectoria de referencia. Una solución propuesta, que sería una interesante línea de trabajo, consistiría en efectuar una proyección del trazado de la trayectoria modificada sobre el trazado de la trayectoria original como mecanismo para mantener actualizado el valor de la mencionada variable de coordinación.

Existen además dos mejoras que afectan a ambos métodos. La primera es añadir la capacidad de gestionar formaciones dinámicas de vehículos, de manera que se permita la variación de la geometría según necesidad. Estas variaciones pueden ser, bien transformaciones geométricas tales como rotaciones o bien una reconfiguración de las relaciones espaciales, lo que provocaría el cambio de la formación. Una segunda mejora se aplicaría a la manera en la que se asigna una posición, dentro de la formación, a cada vehículo. En los métodos implementados esta característica se obvia y se presupone una asignación prefijada. La línea de trabajo, en éste punto, trataría de diseñar e integrar, en los métodos expuestos, un mecanismo para asignar dinámicamente una posición, dentro de la formación, a un vehículo según criterios varios.

Finalmente, para permitir el uso de las técnicas desarrolladas, a pesar de sus limitaciones, sobre vehículos marinos reales, sería necesario también: analizar su funcionamiento y las parametrizaciones adecuadas para los modelos propios de los vehículos marinos con los que se vaya a trabajar, e implementarlos sobre la plataforma software que controla cada vehículo.

7 Bibliografía

- [1]. F. Arrichiello , S. Chiaverini , and T.I. Fossen, "Formation Control of Marine Surface Vessels Using the Null-Space-Based Behavioral Control", Group Coord. and Cooperat. Cntrl., Pg:1-19, Vol.336, 2006.
- [2]. J. Almeida, C. Silvestre and A. Pascoal, "Cooperative control of multiple surface vessels in the presence of ocean currents and parametric model uncertainty", Int. J. Robust Nonlinear Control 2010, Pg:1549-1549, N°.20, 2009.
- [3]. Cohen, J.E., Small, C., Mellinger, A., Gallup, J., and Sachs, J., "Estimates of coastal populations", Science, Pg:1211-1212, 278(5341), 1997.
- [4]. "Informe sobre el transporte marítimo", Conferencia de las Naciones Unidas sobre comercio y desarrollo, Naciones Unidas, 2015.
- [5]. David A. Schoenwald, "AUVs: In Space, Air, Water, and on the Ground", IEEE Control Systems Magazine, Pg:15-18, Diciembre, 2000.
- [6]. R. Parasuraman, T. B. Sheridan, Fellow, IEEE, and C. D. Wickens, "A Model for Types and Levels of Human Interaction with Automation", IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, Pg:287, Vol.30, 2000.
- [7]. Volker Bertram, "Unmanned Surface Vehicles – A Survey", Access on: 10/09/2017 URL: http://intpowertechcorp.com/USVsurvey_DTU.pdf .
- [8]. R.M. Murray, "Recent Research in Cooperative Control of Multivehicle Systems", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Pg:572-573, Septiembre, 2007.
- [9]. N. E. Leonard et All, "Collective Motion, Sensor Networks, and Ocean Sampling", Proceedings of the IEEE, Pg:48-74, Enero, 2007.
- [10]. A. Pedro Aguiar et all., "Cooperative Control of Multiple Marine Vehicles", Instituto Superior Tecnico - Institute for Systems and Robotics, 2008.
- [11]. M. A. Lewis and K. H. Tan, "High Precision Formation Control of Mobile Robots Using Virtual Structures", Autonomous Robots, Pg:387-403, N°.4, 1997.
- [12]. H. Takahashi, H. Nishi, K. Ohnishi, "Autonomous decentralized control for formation of multiple mobile robots considering ability of robot", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Pg:1272-1279, Vol.51, 2004.
- [13]. O. Khatib, "Real time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots", Int. J. Robot. Res., Pg:90-99, N°.5, 1986.
- [14]. P. Ögren, E. Fiorelli, N. E. Leonard, "Cooperative Control of Mobile Sensor Networks: Adaptive Gradient Climbing in a Distributed Environment", IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, Pg:1292-1302, Agosto, 2004.
- [15]. Matusiak, J, "Dynamics of a Rigid Ship", Aalto University publication series, ISBN:978-952-60-5205-2, 2013.
- [16]. Fossen T., "Guidance and Control of Ocean Vehicles", Wiley:New York, U.S.A., ISBN:978-0-471-94113-2, 1994.
- [17]. Skjetne, R. Smogeli, Ø. Fossen, T., "Modeling, Identification, and Adaptive maneuvering of CYBERSHIP II: A Complete Design with Experiments", Proc. IFAC Conf. Contr. Appl. Marine Systems, 2004.

- [18]. Triantafyllou Michael S, Hover Franz S., "Maneuvering and Control of Marine Vehicles", Department of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Pg:13-17, Noviembre, 2003.
- [19]. G. Antonelli ,S. Chiaverini, "Kinematic Control of Platoons of Autonomous Vehicles", IEEE Transactions On Robotics, Pg:1285-1292, Diciembre, 2006.
- [20]. G. Antonelli, F.Arrichiello, S. Chiaverini, "Experimental kinematic comparison of behavioral approaches for mobile robots.", IFAC Proceedings Volumes, Pg:295 -300, Vol.38, 2005.
- [21]. R. Skjetne, T. I. Fossen, "On Integral Control in Backstepping:Analysis of Different Techniques", Proceeding of the 2004 American Control Conference, Boston, Massachusetts, Pg:1899-1904, Junio , 2004.
- [22]. S. Carpin, L.E. Parker, "Cooperative Leader Following in a Distributed Multi-Robot System", Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Washington, DC, Pg:2994-3001, Mayo, 2002.