



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

---

Departament d'Enginyeria Electrònica

***Diseño del sistema de navegación en inmersión del  
vehículo Guanay II para aplicaciones de detección y  
seguimiento de vertidos de hidrocarburos en zonas  
costeras***

Tesis doctoral presentada como requisito parcial para la obtención del título de Doctor por la Universitat Politècnica de Catalunya, dentro del Programa de Doctorado en Ingeniería Electrónica.

Cesar Mauricio Galarza Bogotá

Director:

Doctor Spartacus Gomáriz Castro

Diciembre 2017





## Acta de calificación de tesis doctoral

Curso académico: 2017 - 2018

Nombre y apellidos

CESAR MAURICIO GALARZA BOGOTA

Programa de doctorado

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Unidad estructural responsable del programa

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

### Resolución del Tribunal

Reunido el Tribunal designado a tal efecto, el doctorando / la doctoranda expone el tema de su tesis doctoral titulada Diseño del sistema de navegación en inmersión del vehículo Guanay II para aplicaciones de detección y seguimiento de vertidos de hidrocarburos en zonas costeras.

Acabada la lectura y después de dar respuesta a las cuestiones formuladas por los miembros titulares del tribunal, éste otorga la calificación:

NO APTO       APROBADO       NOTABLE       SOBRESALIENTE

(Nombre, apellidos y firma)		(Nombre, apellidos y firma)	
Presidente/a		Secretario/a	
(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)	(Nombre, apellidos y firma)
Vocal	Vocal	Vocal	Vocal

\_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

El resultado del escrutinio de los votos emitidos por los miembros titulares del tribunal, efectuado por la Comisión Permanente de la Escuela de Doctorado, otorga la MENCIÓN CUM LAUDE:

SÍ       NO

(Nombre, apellidos y firma)		(Nombre, apellidos y firma)	
Presidente/a de la Comisión Permanente de la Escuela de Doctorado		Secretario/a de la Comisión Permanente de la Escuela de Doctorado	

Barcelona, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_



*A mis padres y hermano*

*En memoria de A & M*



## Resumen

El estudio de los mares es un campo de la ciencia que se encuentra en constante desarrollo. A nivel tecnológico, en los últimos años, se han producido importantes avances en el diseño de plataformas y sistemas de medición de variables oceanográficas con importantes mejoras en su sensibilidad, así como en su capacidad de resolución espacial y temporal. Actualmente, debido a los altos costos de las técnicas tradicionales (barcos oceanográficos) se ha incrementado el uso de vehículos no tripulados como los ROV (*Remotely Operated Vehicle*), los ASV (*Autonomous Surface Vehicle*), los AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*) y los AUV Glider.

Desde el punto de vista de la realización de estudios oceanográficos, los AUV ofrecen mayores beneficios por su mayor maniobrabilidad y autonomía. Un ejemplo de este caso es el estudio del comportamiento de las especies marinas en función de variables ambientales. En estos estudios es indispensable la medida con buena resolución espacial de múltiples parámetros, como la salinidad, a diversas profundidades de una misma columna de agua. Para los sectores industriales y de conservación del medio ambiente no hay un uso específico de los AUV. Pueden ser utilizados en la obtención de mapas batimétricos y en la monitorización de las características físico-químicas específicas del agua del mar.

La motivación de este trabajo se centra en la adaptación del vehículo Guanay II como plataforma de mediciones oceanográficas, con la capacidad de navegar en inmersión, así como la reducción de la posibilidad de colisión contra otros vehículos o estructuras marinas mediante el diseño e implantación de un sistema de detección y evasión de obstáculos. Esta adaptación permitiría en el futuro utilizar el vehículo Guanay para realizar la detección y seguimiento de vertidos contaminantes de hidrocarburos en el mar, así como la monitorización de datos oceanográficos para su utilización en modelos predictivos del desplazamiento del vertido.

El Guanay II es un vehículo híbrido entre AUV y ASV, es decir, navega en superficie y realiza inmersiones verticales en puntos programados. Con base en la motivación descrita se han realizado modificaciones mecánicas y electrónicas en el vehículo, acompañadas de un proceso de estudio, análisis y de desarrollo matemático para obtener un modelado hidrodinámico desacoplado del vehículo sobre el plano

vertical. Se ha diseñado e implementado un sistema de inmersión por propulsión vectorial utilizando los propulsores laterales para controlar la inclinación del vehículo durante la inmersión. Este sistema ha sido simulado en Matlab e implementado en el vehículo, lo que ha permitido probarlo en el canal olímpico de Castelldefels. Los resultados obtenidos en estas pruebas han sido satisfactorios, permitiendo que el vehículo entre en inmersión, se mantenga en inmersión durante el tiempo definido y posteriormente vuelva a superficie.

Por otra parte, en paralelo al diseño e implementación de este sistema, se ha llevado a cabo el diseño e implementación de un sistema de detección y evasión de obstáculos de arquitectura reactiva implementado bajo un sistema fuzzy, basado en un sensor SONAR MK3. Este sistema ha sido simulado e implementado en la unidad de control del vehículo. Esta implementación ha permitido realizar múltiples pruebas de campo, las cuales se realizaron en el canal olímpico de Castelldefels. Los resultados obtenidos en estas pruebas han sido satisfactorios, logrando en todos casos la evasión de los obstáculos presentes en el entorno de navegación.



## Abstract

The study of the seas is a field of science that is in constant development. At the technological level, in recent years, important advances have been made in the design of platforms and measurement systems for oceanographic variables with significant improvements in their sensitivity, as well as in their capacity for spatial and temporal resolution. Currently, given the high costs of traditional techniques (oceanographic vessels), vehicles such as the ROV (Remotely Operated Vehicle), the ASV (Autonomous Surface Vehicle), the AUV (Autonomous Underwater Vehicle) and the AUV Glider are being used instead.

From the point of view of the realization of oceanographic studies, the AUV offers more benefits due to its maneuverability and autonomy. An example of this would be the case study of the behavior of marine species based on environmental variables. In this situation, it is essential to carry out a good spatial resolution of multiple parameters, such as salinity, at various depths of the same water column. For the industrial and environmental conservation sectors, there is no specific use of the AUV. However, they can be used in order to obtain bathymetric maps and in the monitoring the specific physical-chemical characteristics of seawater.

The motivation of this work is focused on the adaptation of the Guanay II vehicle as a platform for oceanographic measurements, with the ability to navigate in immersion, as well as reducing its possibility of collision with other vehicles or marine structures through its design and implementation of a detection and obstacle avoidance system. This adaptation would allow in the future to use the Guanay II vehicle to perform the detection and monitoring of polluting discharges of hydrocarbons in the sea, as well as monitoring oceanographic data for use in predictive models of the displacement of the spill.

The Guanay II is a hybrid vehicle between AUV and ASV, that is, it sails on the surface and performs vertical dives at programmed points. Based on the motivation described, mechanical and electronic modifications have been made to the vehicle, accompanied by a process of study, analysis and mathematical development to obtain a hydrodynamic modeling uncoupled from the vehicle on the vertical plane. A vector propulsion immersion system has been designed and implemented using the lateral

thrusters to control the vehicle's inclination during the dive. This system has been simulated in Matlab and implemented in the vehicle, which has allowed testing in the Olympic channel of Castelldefels, the results obtained in these tests have been satisfactory, allowing the vehicle to enter in immersion, remain in immersion during the time defined and then return to surface.

On the other hand, in parallel to the design and implementation of this system. A new design has been carried out with the implementation of an obstacle detection and reactive avoidance system incorporated with a fuzzy system, based on a SONAR MK3. This system has been simulated and implemented in the control unit of the vehicle. This system has allowed multiple field tests, which were performed at the Olympic Castelldefels canal. The results obtained in these tests have been satisfactory, achieving in all cases the avoidance of the obstacles present in the navigation environment.

## Agradecimientos

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a un gran número de personas que de diferentes maneras me han alentado o han contribuido a la realización de la presente Tesis Doctoral.

En primer lugar, quiero agradecer al Dr. Spartacus Gomáriz, director de esta investigación, por su orientación científica, su apoyo, confianza, esfuerzo y paciencia en el desarrollo de las múltiples tareas vinculadas a la presente Tesis Doctoral. También me gustaría agradecer a Jordi Prat por su continuo apoyo y esfuerzo en el desarrollo de este trabajo.

Me gustaría agradecer también a mis compañeros del grupo de investigación SARTI, en especial a Ivan Masmitjà, David Sarria, Marc Nogueras, Javier Cadena, Dan Toma, Albert García y otras personas que pertenecieron al grupo SARTI como Julián González, Normandino Carreras y Oriol Pallares por colaboración en diferentes aspectos de esta Tesis.

Finalmente, quiero agradecer de un modo muy especial y sincero a mis padres José, Liliana y mi hermano Fabian. Al financiar este trabajo y por su continuo apoyo, paciencia y confianza; sin ellos no hubiera sido posible llegar hasta aquí. Por esto me gustaría dedicarles esta Tesis a ellos y a las personas que ya no están Ana & Merlín.



# Contenido

Resumen .....	vii
Abstract .....	ix
Agradecimientos .....	xi
Nomenclatura .....	xxxí
Acrónimos.....	xxxii
Capítulo 1.    Introducción .....	1
1.1 - Trabajos previos .....	3
1.2 - Motivación .....	4
1.3 - Objetivos de la tesis.....	8
1.4 - Principales contribuciones .....	8
Capítulo 2.    Revisión - vehículos autónomos submarinos y el vehículo Guanay II.	11
2.1 - Vehículos autónomos submarinos (AUV) .....	11
2.1.1 - Superficies de control móviles .....	12
2.1.2 - Propulsión fija o vectorial .....	14
2.1.3 - Control de flotabilidad (AUV con propulsores).....	16
2.1.4 - Control de flotabilidad (AUV sin propulsores).....	18
2.2 - Vehículo Guanay II .....	18
Capítulo 3.    Vertido de hidrocarburos en zonas costeras (detección, seguimiento, monitorización y predicción) y uso de vehículos AUV.....	25
3.1 - Sensores para la detección y seguimiento de hidrocarburos en el mar.....	26
3.2 - Sensores para para realizar batimetría del lecho marino .....	27
3.3 - Seguimiento de hidrocarburos en el mar y posicionamiento en inmersión ...	29
Capítulo 4.    Sistema de detección de obstáculos para el vehículo Guanay II.....	31
4.1 - Revisión de sistemas de detección de obstáculos .....	31
4.1.1 - Sensor SONAR.....	32
4.1.2 - Plano de detección de los obstáculos .....	35

4.1.3 - Detección de los obstáculos .....	35
4.2 - Diseño del sistema de detección de obstáculos para el vehículo Guanay II. 36	
4.2.1 - Adquisición de señales y hardware.....	37
4.2.1.1 - Características y especificaciones del SONAR MK3.....	37
4.2.1.2 - Comunicación y adquisición de datos .....	38
4.2.1.3 - Visualización de las señales adquiridas .....	40
4.2.2 - Pruebas experimentales para verificar la adquisición de datos .....	42
4.2.3 - Pruebas experimentales para verificar la adquisición de datos y caracterizar el funcionamiento del SONAR MK3 .....	44
4.2.4 - Configuración de los parámetros de medición del SONAR .....	47
4.2.4.1 - Área de detección del haz.....	47
4.2.4.2 - Relación entre: la distancia entre los centros de haz (L), el rango mecánico de giro (RMG) y el porcentaje de sobremuestreo del área de detección (PSM)...	48
4.2.4.3 - Relación entre: la distancia máxima de operación (DM), tiempo de ejecución del sistema (TE) y la máxima distancia recorrida por el vehículo (DR). 50	
4.2.4.4 - Relación entre: el número de puntos por medida (NP), la distancia máxima de operación (DM), resolución de imagen (RI), rango mecánico de giro (RMG) y tiempo de ejecución (TE).....	51
4.2.4.5 - Análisis de las relaciones y determinación de los valores óptimos de los parámetros de medición del SONAR. ....	53
4.2.5 - Algoritmo para la detección de obstáculos.....	56
4.2.5.1 - Detección de obstáculos por detección de bordes en imagen.....	56
4.2.5.2 - Detección de obstáculos por determinación de la distancia mínima al obstáculo por sectores.....	58
4.3 - Simulación del sistema de adquisición de señales y detección de obstáculos .....	63
Capítulo 5. Diseño de un sistema fuzzy para la evasión de obstáculos.....	67
5.1 - Introducción .....	67
5.2 - Revisión de sistemas para la evasión de obstáculos .....	69
5.3 - Estructura del Sistema fuzzy .....	70
5.3.1 - Variables lingüísticas de entrada y salida .....	71

5.3.2 - Funciones de pertenencia de entrada y salida .....	71
5.3.3 - Fucificación.....	72
5.3.4 - Base de reglas.....	72
5.3.5 - Evaluación de las reglas e Inferencia.....	73
5.3.6 - Agregado y defucificación.....	73
5.3.7 - Configuración del sistema de evasión.....	74
5.4 - Estrategia 1: Evasión de obstáculos por cambio del ángulo de guiñada y velocidad de referencia del vehículo .....	75
5.4.1 - Estructura del control de evasión .....	75
5.4.2 - Variables de entrada.....	77
5.4.3 - Variables de salida .....	78
5.4.4 - Base de reglas e inferencia.....	79
5.4.5 - Simulación y análisis de resultados .....	84
5.5 - Estrategia 2: Evasión de obstáculos por generación de nuevos waypoints..	87
5.5.1 - Generación de waypoint de evasión por adición de una constante .....	89
5.5.1.1 - Simulación en escenarios con obstáculos circulares.....	91
5.5.1.2 - Simulación en escenarios con obstáculos planos .....	100
5.5.1.3 - Simulación en el escenario del Canal Olímpico de Castelldefels .....	105
5.5.1.4 - Conclusiones .....	111
5.5.2 - Generación de waypoints de evasión por un sistema fuzzy .....	113
5.5.2.1 - Variables de entrada.....	114
5.5.2.2 - Variables de salida.....	116
5.5.2.3 - Base de reglas # 1 .....	117
5.5.2.4 - Simulaciones y análisis de resultados con base de reglas # 1 .....	121
5.5.2.5 - Base de reglas # 2.....	123
5.5.2.6 - Simulaciones y análisis de resultados con base de reglas # 2 .....	127
5.6 - Pruebas de campo del sistema de detección y evasión de obstáculos .....	133
5.6.1 - Prueba de campo # 1.....	134
5.6.2 - pruebas de campo # 2 .....	136

5.6.3 - pruebas de campo # 3 .....	138
Capítulo 6. Sistema de inmersión para el vehículo Guanay II.....	141
6.1 - Ajuste de la flotabilidad inicial .....	141
6.2 - Inmersión por cambio en la flotabilidad.....	142
6.3 - Inmersión por propulsión vectorial .....	143
6.3.1 - Actuador .....	144
6.3.1.1 - Servomotor DA 22-SUB-30-4128 - Volz-servos [109] .....	145
6.3.1.2 - Servomotor SSPS105 - CK design Technology [110] .....	145
6.3.1.3 - Servomotor SW-1211SG - Savox USA [111] .....	146
6.3.2 - Diseño e implantación del soporte de transmisión mecánica de movimiento .....	147
6.3.3 - Sistema electrónico para el control del actuador.....	149
6.3.4 - Algoritmo de control del sistema de inmersión por propulsión vectorial ..	150
6.3.5 - Pruebas de campo.....	151
6.3.5.1 - Prueba de campo 1.....	154
6.3.5.2 - Prueba de campo 2.....	157
6.3.6 - Conclusiones de las pruebas de campo .....	161
Capítulo 7. Propuesta del modelo hidrodinámico del Guanay II en el plano vertical .	163
7.1 - Modelo hidrodinámico general.....	165
7.1.1 - Cinemática.....	165
7.1.2 - Modelo dinámico de vehículos submarinos.....	167
7.1.2.1 - Cinética – fuerzas cuerpo rígido.....	168
7.1.2.2 - Cinética – fuerza hidrodinámica .....	169
7.1.3 - Modelo dinámico de vehículos submarinos con simetría en el plano $XZ$ . 172	
7.1.3.1 - Matriz de inercia y de masa añadida.....	172
7.1.3.2 - Matriz Coriolis y centrípeta de cuerpo rígido .....	172
7.1.3.3 - Matriz fuerza centrífuga y de Coriolis de la masa añadida .....	173
7.1.3.4 - Matriz de amortiguamiento.....	173



7.2 - Modelo hidrodinámico en el plano vertical (Longitudinal).....	174
7.2.1 - Cinemática.....	174
7.2.2 - Modelo dinámico en el plano vertical para el vehículo Guanay II .....	175
7.2.2.1 - Matriz de inercia y de masa añadida.....	175
7.2.2.2 - Matriz Coriolis y centrípeta de cuerpo rígido .....	175
7.2.2.3 - Matriz fuerza centrífuga y de Coriolis de la masa añadida .....	176
7.2.2.4 - Matriz de fuerzas centrífugas y Coriolis del cuerpo rígido y masa añadida .....	176
7.2.2.5 - Matriz de amortiguamiento.....	177
7.2.2.6 - Vector generalizado de la fuerza de restablecimiento .....	177
7.2.2.7 - Ecuación de movimiento en el plano vertical para el vehículo Guanay II .....	178
7.3 - Determinación de los valores de los coeficientes del modelo hidrodinámico en el plano vertical.....	179
7.3.1 - Fuerza de flotabilidad ( $B$ ) y peso del vehículo ( $W$ ),.....	179
7.3.2 - Calculo de los valores del vector de fuerza .....	182
7.3.3 - Estimación de los coeficientes de la ecuación cinemática de cuerpo rígido .....	187
7.4 - Simulación del modelo hidrodinámico del Guanay II en el plano vertical ...	191
7.4.1 - Simulación # 1: Trayectoria sobre el plano vertical (Flotabilidad muy positiva) .....	191
7.4.2 - Simulación # 2: Trayectoria sobre el plano vertical. (Flotabilidad muy positiva, diferentes orientaciones de los propulsores laterales) .....	192
7.4.3 - Simulación # 3: Trayectoria sobre el plano vertical. (Diferentes flotabilidades, diferentes orientaciones de los propulsores laterales) .....	193
7.4.4 - Simulación # 4: Trayectoria sobre el plano vertical. (Diferentes flotabilidades, diferentes orientaciones de los propulsores laterales) .....	195
7.5 - Comparación entre los resultados obtenidos en pruebas de campo y simulación.....	197
7.6 - Planteamiento del procedimiento para ajuste de los coeficientes del modelo hidrodinámico del Guanay II en el plano vertical.....	201

Capítulo 8. Propuesta de control de la profundidad y sistema de inmersión híbrido para el vehículo Guanay II.....	205
8.1 - Control de la profundidad por histéresis.....	205
8.2 - Control de la profundidad por PID.....	210
8.2.1 - Control de la profundidad por PD.....	213
8.2.2 - Control de la profundidad por PID.....	215
8.3 - Sistema de inmersión y navegación híbrido para el vehículo Guanay II.....	219
8.3.1 - Simulación 1: Efecto del cambio de flotabilidad instantáneo o con tiempo de llenado en la navegación del vehículo Guanay II .....	223
8.3.2 - Simulación 2: sistema de inmersión híbrido .....	225
8.3.2.1 - Simulación 1: referencia de la profundidad de 2m .....	225
8.3.2.2 - Simulación 2: referencia de la profundidad de 20m.....	226
8.4 - Conclusiones .....	227
Capítulo 9. Conclusiones y trabajo futuro .....	229
9.1 - Trabajo futuro .....	233
9.2 - Publicaciones asociadas a la tesis.....	235
Referencias .....	239

## Tabla de Figuras

Figura 2.1.	AUV MAYA [37] .....	12
Figura 2.2.	JAMSTEC [38] .....	13
Figura 2.3.	MUN Explorer [39] .....	13
Figura 2.4.	Iver 2 [40] .....	13
Figura 2.5.	AUV SPARUS [43] .....	14
Figura 2.6.	Starbug [45] .....	15
Figura 2.7.	MONSUN II [46] .....	15
Figura 2.8.	Odyssey IV [49] .....	16
Figura 2.9.	Dorado del MBARI [50] .....	16
Figura 2.10.	Theseus AUV [55] .....	17
Figura 2.11.	Diagrama general del Urashima AUV [56] .....	17
Figura 2.12.	Slocum G3 [57] .....	18
Figura 2.13.	SEAGLIDER C2 [58] .....	18
Figura 2.14.	Sistema Guanay .....	20
Figura 2.15.	Diagrama estructural del AUV Guanay II .....	20
Figura 2.16.	CTD XR-420 .....	21
Figura 2.17.	Componentes hardware nivel inferior .....	21
Figura 2.18.	Componentes hardware nivel intermedio .....	21
Figura 2.19.	Componentes hardware nivel superior .....	22
Figura 2.20.	Diagrama de la arquitectura del AUV Guanay II Julio 2015 .....	22
Figura 2.21.	Diagrama de la arquitectura del AUV Guanay II Julio 2017 .....	23
Figura 3.1.	Sensor HydroC™ [31] .....	27
Figura 3.2.	Sensor C3™ [63] .....	27
Figura 3.3.	Vehículos y sistemas para batimetría (a) Remus [68] (b) Gavia [70] (c) GeoSwath plus (Multibeam echosounder) de KONGSBERG [66] (d) Sparus II [77] [78] [79] - multibeam Delta T IMAGENEX [80] .....	29
Figura 3.4.	Boceto de las posibles ubicaciones de los diferentes sensores seleccionados en el vehículo Guanay II .....	30
Figura 4.1.	Características del funcionamiento de SONAR tipo monotonic .....	33
Figura 4.2.	Características del funcionamiento de SONAR tipo CHIRP .....	33
Figura 4.3.	Características del funcionamiento de SONAR tipo multihaz (MULTIBEAM IMAGING SONAR) .....	34

Figura 4.4.	Diagrama de generación de matriz (imagen) del área escaneada .....	35
Figura 4.5.	Diagrama general del sistema de detección de obstáculos.....	36
Figura 4.6.	Diagrama de conexión del SONAR en el Guanay II.....	37
Figura 4.7.	Micron Sonar MK3 [93] [97] .....	37
Figura 4.8.	Diagrama del algoritmo de control, configuración y adquisición de señales del SONAR MK3.....	39
Figura 4.9.	Parámetros de medición del SONAR.....	39
Figura 4.10.	Interfaz de usuario del software desarrollado donde se configuran los parámetros de operación del sonar.....	40
Figura 4.11.	Pestaña de verificación de los parámetros de operación del sonar. ....	40
Figura 4.12.	Proceso para generar la matriz de señales y la imagen del área escaneada. ....	41
Figura 4.13.	Pestaña SONAR, visualización de las señales adquiridas. ....	42
Figura 4.14.	Acuario utilizado para las pruebas en el laboratorio .....	43
Figura 4.15.	Comparación de los resultados obtenidos en pruebas de laboratorio, entre los datos inicialmente generados por (a) el software desarrollado y (b) software del fabricante del SONAR.....	43
Figura 4.16.	Resultado obtenido en pruebas de laboratorio .....	44
Figura 4.17.	Pruebas experimentales (a) ubicación del sonar, (b) ubicación de los objetos .....	44
Figura 4.18.	Imagen satelital (Google Earth) del puerto donde se puede observar la distribución general de los objetos .....	45
Figura 4.19.	Imagen generada a partir de las señales adquiridas por el sonar.....	46
Figura 4.20.	Análisis subjetivo de la imagen obtenida.....	46
Figura 4.21.	Comparación entre la imagen generada a partir de las señales adquiridas y la imagen satelital obtenida de Google Earth .....	46
Figura 4.22.	Área de detección generada por un haz.....	48
Figura 4.23.	“L” Distancia entre los centros de haz .....	49
Figura 4.24.	Porcentaje de sobremuestreo del área de detección.....	49
Figura 4.25.	La resolución de imagen (RI) .....	51
Figura 4.26.	Rango mecánico de operación (RMO) .....	54
Figura 4.27.	Velocidad máxima de avance con respecto al radio de curvatura [14]55	
Figura 4.28.	Diagrama general del proceso de detección de obstáculos.....	56
Figura 4.29.	Detección de obstáculo (a) Imagen correspondiente a las señales adquiridas, (b) imagen procesada (filtrada), (c) resultado de la identificación automatizada de obstáculos y (d) el mapa de la zona tomado de Google Earth (latitud 41°12'54"N longitud 1°43'53"E).....	57

Figura 4.30.	Identificación de obstáculos (a) Imagen correspondiente a las señales adquiridas, (b) imagen procesada (filtrada), (c) resultado de la identificación automatizada de obstáculos y (d) el mapa de la zona tomado de Google Earth (latitud 41°12'53.76"N longitud 1°43'51.79"E)	57
Figura 4.31.	Diagrama general detección de obstáculos por sectores	58
Figura 4.32.	Segmentación del área de escaneo (RMO)	59
Figura 4.33.	Relación entre vector de datos y distancia máxima (DM)	59
Figura 4.34.	Ventana de detección	60
Figura 4.35.	Ubicación del obstáculo	60
Figura 4.36.	Guanay II (a) Zodiac y Guanay II (b) Ubicación del SONAR MK3 en el vehículo Guanay	62
Figura 4.37.	Resultados (a) Trayectoria recorrida: azul el vehículo Guanay II, rojo Zodiac, (b) resultados proporcionado por el sistema de detección de obstáculos	62
Figura 4.38.	Generación del entorno de navegación	63
Figura 4.39.	Entorno de navegación	64
Figura 4.40.	Simulación (a) Área de escaneo (detección) (b) Entorno de navegación (c) Objetos (obstáculos) en el área de escaneo	64
Figura 4.41.	Análisis (a) Segmentación del área escaneada (b) Cálculo de la mínima distancia entre el vehículo y objeto (obstáculo), por cada uno de los tres sectores	64
Figura 5.1.	Diagrama general del control de navegación	68
Figura 5.2.	Diagrama de bloques general del sistema fuzzy	71
Figura 5.3.	Diagrama de bloques general de control de trayectoria	75
Figura 5.4.	Diagrama de bloques del sistema evasión de obstáculos	75
Figura 5.5.	Velocidad máxima de avance con respecto al radio de curvatura [14]	76
Figura 5.6.	Comparación entre radios de giro para diferentes velocidades del vehículo (a) velocidad de 1m/s radio 50m, (b) velocidad de 0.9m/s radio 25m (c) velocidad de 0.5m/s radio 10m	76
Figura 5.7.	Variables de entrada y funciones de pertenencia para el controlador difuso CFLS	78
Figura 5.8.	Variables de entrada y funciones de pertenencia para el controlador difuso CFHS	78
Figura 5.9.	Establecimiento de los límites de las funciones de pertenencia de alto (H) riesgo de colisión sector central para alta velocidad	78
Figura 5.10.	Funciones de pertenencia de salida para el control difuso CFLS	79
Figura 5.11.	Funciones de pertenencia de salida para el control difuso CFHS	79

Figura 5.12.	Análisis de diferentes escenarios de navegación con posibilidades de colisión y la respuesta inicial del sistema de evasión .....	80
Figura 5.13.	Simulación de la navegación del vehículo Guanay II con el algoritmo de evasión de obstáculos (primera parte). .....	85
Figura 5.14.	Simulación de la navegación del vehículo Guanay II con el algoritmo de evasión de obstáculos (segunda parte).....	85
Figura 5.15.	Simulación de la navegación del vehículo Guanay II con el algoritmo de evasión de obstáculos.....	86
Figura 5.16.	Simulación de la navegación del vehículo Guanay II con el algoritmo de evasión de obstáculos.....	87
Figura 5.17.	Diagrama del proceso de actualización de la lista de waypoints .....	88
Figura 5.18.	Diagrama de bloques general de control de trayectoria de navegación.. .....	89
Figura 5.19.	Diagrama de bloques, conversión de la salida del sistema de evasión (coordenadas polares) a coordenadas geográficas del nuevo waypoint... .....	89
Figura 5.20.	Definición del nuevo waypoint en coordenadas polares .....	90
Figura 5.21.	Diagrama configuración detección de obstáculos .....	90
Figura 5.22.	Grupo 1 de simulación (a) Escenario de simulación “A” para el primer grupo, resultado obtenido del sistema de evasión para: (b) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 22°, (c) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 45°, (d) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 90°, (e) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 135°, (f) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 180°. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados).....	92
Figura 5.23.	Grupo 2 de simulación (a) Escenario de simulación “B” para el segundo grupo, resultado obtenido del sistema de evasión para: (b) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 22°, (c) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 45°, (d) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 90°, (e) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 135°, (f) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 180°. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados).....	95
Figura 5.24.	Grupo 3 de simulación (a) Escenario de simulación “C” para el tercer grupo, resultado obtenido del sistema de evasión para: (b) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 22°, (c) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 45°, (d) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 90°, (e) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de	

	135°, (f) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 180°. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados).....	97
Figura 5.25.	Grupo 4 de simulación (a) Escenario de simulación “D” para el cuarto grupo, resultado obtenido del sistema de evasión para: (b) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 22°, (c) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 45°, (d) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 90°, (e) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 135°, (f) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 180°. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados).....	99
Figura 5.26.	Grupo 5 de simulación (a) Escenario de simulación “E” para el quinto grupo, resultado obtenido del sistema de evasión para: (b) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 22°, (c) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 90°. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados).....	101
Figura 5.27.	Grupo 6 de simulación (a) Escenario de simulación “F” para el sexto grupo, resultado obtenido del sistema de evasión para: (b) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 22°, (c) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 90°. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados).....	102
Figura 5.28.	Grupo 7 de simulación (a) Escenario de simulación “G” para el séptimo grupo, resultado obtenido del sistema de evasión para: (b) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 22°, (c) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 90°. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados).....	104
Figura 5.29.	Imagen satelital del canal Olímpico de Castelldefels en Barcelona obtenidas de Google Earth.....	105
Figura 5.30.	Grupo 8 de simulación (a) Escenario de simulación para el octavo grupo, resultado obtenido del sistema de evasión para: (b) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 22°, (c) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 90°. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados).....	106
Figura 5.31.	Grupo 9 de simulación (a) Escenario de simulación para el noveno grupo, resultado obtenido del sistema de evasión para: (b) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 22°, (c) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 90°. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados).....	108

Figura 5.32.	Grupo 10 de simulación (a) Escenario de simulación para el décimo grupo, resultado obtenido del sistema de evasión para: (b) 1m de radio con un ángulo de ajuste de 22°, (c) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 90°. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados).....	110
Figura 5.33.	Grupo 11 de simulación (a) Escenario de simulación para el onceavo grupo, resultado obtenido del sistema de evasión para: (b) 1m de radio con un ángulo de ajuste de 22°, (c) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 90°. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados).....	111
Figura 5.34.	Diagrama de bloques general del sistema evasión de obstáculos estrategia 2 .....	113
Figura 5.35.	Variables de entrada y funciones de pertenencia para el controlador difuso 1 (Baja velocidad).....	114
Figura 5.36.	Variables de entrada y funciones de pertenencia para el controlador difuso 2 (alta velocidad) .....	115
Figura 5.37.	Variables de entrada y funciones de pertenencia para el controlador difuso 3 (Baja velocidad).....	115
Figura 5.38.	Variables de entrada y funciones de pertenencia para el controlador difuso 4 (Alta velocidad).....	115
Figura 5.39.	Variables de salida y funciones de pertenencia para los controladores difusos 1 y 3.....	116
Figura 5.40.	Variables de salida y funciones de pertenencia para los controladores difusos 2 y 4.....	116
Figura 5.41.	Resultados (a) Escenario de simulación y ubicación de los waypoints (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados).....	121
Figura 5.42.	Resultados (a) Escenario de simulación y ubicación de los waypoints (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados).....	122
Figura 5.43.	Resultado (a) Escenario de simulación y ubicación de los waypoints (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados).....	122
Figura 5.44.	Resultado (a) Escenario de simulación y ubicación de los waypoints (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados).....	122



Figura 5.45.	Resultado (a) Escenario de simulación “A” y ubicación de los waypoints, utilizado en primer grupo de simulaciones (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)	128
Figura 5.46.	Resultado (a) Escenario de simulación “B” y ubicación de los waypoints, utilizado en primer grupo de simulaciones (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)	128
Figura 5.47.	Resultado (a) Escenario de simulación “C” y ubicación de los waypoints, utilizado en primer grupo de simulaciones (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)	128
Figura 5.48.	Resultado (a) Escenario de simulación “D” y ubicación de los waypoints, utilizado en primer grupo de simulaciones (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)	128
Figura 5.49.	Resultado (a) Escenario de simulación “E” y ubicación de los waypoints, utilizado en primer grupo de simulaciones (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)	129
Figura 5.50.	Resultado (a) Escenario de simulación “F” y ubicación de los waypoints, utilizado en primer grupo de simulaciones (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)	129
Figura 5.51.	Resultado (a) Escenario de simulación “G” y ubicación de los waypoints, utilizado en primer grupo de simulaciones (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)	129
Figura 5.52.	Análisis de la distribución de los waypoint generados para evadir el obstáculo .....	131
Figura 5.53.	Resultado a) Escenario de simulación y ubicación de los waypoints (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados).....	131
Figura 5.54.	Resultado a) Escenario de simulación y ubicación de los waypoints (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados).....	132
Figura 5.55.	Resultado a) Escenario de simulación y ubicación de los waypoints (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados).....	132
Figura 5.56.	Resultado a) Escenario de simulación y ubicación de los waypoints (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados).....	132
Figura 5.57.	Escenario de simulación y ubicación de los waypoints.....	134

Figura 5.58.	Simulación, trayectoria de navegación desarrollada por el vehículo utilizando el modelo ajustado a la realidad del sistema de detección de obstáculos (apartado 4.3).....	135
Figura 5.59.	Trayectoria de navegación desarrollada por el vehículo. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados).....	135
Figura 5.60.	Comparación entre los resultados obtenidos en la prueba de campo (negro) y los resultados obtenidos en simulación (rojo).....	135
Figura 5.61.	Escenario de simulación y ubicación de los waypoints.....	136
Figura 5.62.	Simulación, trayectoria de navegación desarrollada por el vehículo utilizando el modelo ajustado a la realidad del sistema de detección de obstáculos (apartado 4.3).....	137
Figura 5.63.	Trayectoria de navegación desarrollada por el vehículo. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados).....	137
Figura 5.64.	Comparación entre los resultados obtenidos en la prueba de campo (negro) y los resultados obtenidos en simulación (rojo).....	138
Figura 5.65.	Escenario de simulación y ubicación de los waypoints.....	139
Figura 5.66.	Simulación, trayectoria de navegación desarrollada por el vehículo utilizando el modelo ajustado a la realidad del sistema de detección de obstáculos (apartado 4.3).....	139
Figura 5.67.	Trayectoria de navegación desarrollada por el vehículo. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados).....	139
Figura 5.68.	Comparación entre los resultados obtenidos en la prueba de campo (negro) y los resultados obtenidos en simulación (rojo).....	140
Figura 6.1.	Distribución de componente para el ajuste de la flotabilidad del vehículo Guanay II .....	142
Figura 6.2.	Sistema de inmersión por cambio en la flotabilidad para vehículo Guanay II .....	143
Figura 6.3.	Comportamiento del sistema de inmersión por cambio en la flotabilidad para vehículo Guanay II.....	143
Figura 6.4.	Sistema de propulsión vehículo Guanay II.....	144
Figura 6.5.	Actuador volz-servos DA 22-SUB-30-4128 [109].....	145
Figura 6.6.	Actuador SSPS-105 [110].....	146
Figura 6.7.	Actuador SAVSW1211SG [111] .....	147
Figura 6.8.	Partes del actuador SAVSW1211SG.....	147
Figura 6.9.	Despiece de la estructura de transmisión de movimiento (modelo 3D - Autodesk Inventor).....	148

Figura 6.10.	Partes y piezas de la estructura de transmisión de movimiento (modelo ensamblado) .....	148
Figura 6.11.	Fotografía de los propulsores laterales en diferentes posiciones de operación .....	149
Figura 6.12.	Fotografía de popa del AUV Guanay II. Sistema de propulsión fija (main thruster) y vectorial (lateral thrusters).....	149
Figura 6.13.	Pines de conexión actuador SAVOX SW1211SG .....	150
Figura 6.14.	Diagrama de conexión general de los actuadores SAVOX SW1211SG . .....	150
Figura 6.15.	Algoritmo de control de los actuadores .....	151
Figura 6.16.	Interfaz de usuario para ajustar la posición del actuador, dentro del vehículo .....	151
Figura 6.17.	Canal olímpico de Castelldefels – Barcelona – España .....	152
Figura 6.18.	Puntos para anclaje de masas externas utilizados en las pruebas de campo.....	152
Figura 6.19.	Configuración del test 1.....	154
Figura 6.20.	Resultado obtenido test 1, caso 1, ángulo de inclinación del AUV (Pitch). .....	155
Figura 6.21.	Resultado obtenido test 1, caso 2, ángulo inclinación del AUV (Pitch). .. .....	155
Figura 6.22.	Resultado obtenido test 1, caso 1, comportamiento del AUV sobre el plano vertical.....	156
Figura 6.23.	Resultado obtenido test 1, caso 2, comportamiento del AUV sobre el plano vertical.....	156
Figura 6.24.	Configuración del test 2.....	157
Figura 6.25.	Resultado obtenido test 2, caso 2, inclinación del AUV (Pitch angle). .... .....	158
Figura 6.26.	Resultado obtenido test 2, caso 3, inclinación del AUV (Pitch angle). .... .....	158
Figura 6.27.	Resultado obtenido test 2, caso 4, inclinación del AUV (Pitch angle). .... .....	159
Figura 6.28.	Resultado obtenido test 2, caso 2, comportamiento del AUV sobre el plano vertical.....	159
Figura 6.29.	Resultado obtenido test 2, caso 3, comportamiento del AUV sobre el plano vertical.....	160
Figura 6.30.	Resultado obtenido test 2, caso 4, comportamiento del AUV sobre el plano vertical.....	160

Figura 7.1.	Representación de los 6 grados de libertad sobre el vehículo Guanay II ...	163
Figura 7.2.	Relación entre la fuerza de flotabilidad y el peso; con respecto a la densidad de líquido.....	181
Figura 7.3.	Ubicación de los propulsores del vehículo Guanay II.....	182
Figura 7.4.	Vector de propulsión (a) Generalizado en 3D, (b) Descomposición vectorial del vector de propulsión, (c) Vector de propulsión de los motores laterales del vehículo Guanay-II.....	184
Figura 7.5.	Simulación 1. Trayectoria sobre el plano vertical (Flotabilidad muy positiva).....	192
Figura 7.6.	Simulación 2. Trayectoria sobre el plano vertical. (Flotabilidad muy positiva, diferentes orientaciones de los propulsores laterales) .....	193
Figura 7.7.	Simulación 3. Trayectoria sobre el plano vertical. (Diferentes flotabilidades, diferentes orientaciones de los propulsores laterales) .....	194
Figura 7.8.	Simulación 3. Trayectoria sobre el plano vertical. (Diferentes flotabilidades, diferentes orientaciones de los propulsores laterales) .....	195
Figura 7.9.	Simulación: Trayectoria sobre el plano vertical. (Diferentes flotabilidades, orientaciones de los propulsores laterales +/- 15°) .....	195
Figura 7.10.	Simulación: Trayectoria sobre el plano vertical. (Diferentes flotabilidades, orientaciones de los propulsores laterales +/- 5°) .....	196
Figura 7.11.	Simulación: Trayectoria sobre el plano vertical. (Diferentes flotabilidades, orientaciones de los propulsores laterales +/- 0°) .....	196
Figura 7.12.	Comparación entre datos obtenidos en pruebas de campo y simulaciones para el test 1 caso 1 .....	197
Figura 7.13.	Comparación entre datos obtenidos en pruebas de campo y simulaciones para el test 2 caso 2 .....	198
Figura 7.14.	Comparación entre datos obtenidos en pruebas de campo y simulaciones para el test 2 caso 3 .....	198
Figura 7.15.	Comparación entre datos obtenidos en pruebas de campo y simulaciones para el test 2 caso 4 .....	200
Figura 7.16.	Comparación entre datos obtenidos en pruebas de campo y simulaciones para el test 2 caso 4 .....	200
Figura 8.1.	Navegación en inmersión control por histéresis.....	205
Figura 8.2.	Diagrama de bloques general del sistema de navegación en inmersión en lazo cerrado con control del nivel de profundidad por histéresis .....	206
Figura 8.3.	Interfaz de usuario del proceso de navegación en inmersión.....	206

Figura 8.4.	Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control por histéresis (ángulo de posicionamiento de los actuadores +/- 25°) .....	207
Figura 8.5.	Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control por histéresis (ángulo de posicionamiento de los actuadores +/- 25°) .....	208
Figura 8.6.	Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con control por histéresis para diferentes casos de flotabilidad. (ángulo de posicionamiento de los actuadores +/- 25°).....	209
Figura 8.7.	Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control por histéresis (ángulo de posicionamiento de los actuadores +/- 5°) .....	209
Figura 8.8.	Diagrama de bloques general del sistema de navegación en inmersión en lazo cerrado con control PID del nivel de profundidad .....	210
Figura 8.9.	Repuesta del sistema en lazo cerrado con $Ku=30$ .....	212
Figura 8.10.	Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control PD en el dominio del tiempo .....	213
Figura 8.11.	Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control PD con respecto a la distancia.....	213
Figura 8.12.	Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control PD en el dominio del tiempo para diferentes casos de flotabilidad (Tabla 7-7) y una referencia de la profundidad de 2m. ....	214
Figura 8.13.	Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control PD en el dominio del tiempo para diferentes casos de flotabilidad (Tabla 7-7) y una referencia de la profundidad de 20m. ....	214
Figura 8.14.	Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control PID en el dominio del tiempo, flotabilidad ligeramente positiva .....	215
Figura 8.15.	Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control PID en el dominio de la distancia, flotabilidad ligeramente positiva .....	216
Figura 8.16.	Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control PID en el dominio del tiempo, flotabilidad positiva.....	216
Figura 8.17.	Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control PID en el dominio de la distancia, flotabilidad positiva .....	217
Figura 8.18.	Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control PID en el dominio del tiempo para diferentes casos de flotabilidad (Tabla 7-7) y una referencia de la profundidad de 2m. ....	217
Figura 8.19.	Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control PID en el dominio del tiempo para diferentes casos de flotabilidad (Tabla 7-7) y una referencia de la profundidad de 20m. ....	218
Figura 8.20.	Sensor FESTO MLO-POT-2000-TLF .....	220

Figura 8.21.	Sistema de inmersión por cambio en la flotabilidad modificado.....	220
Figura 8.22.	Comparación entre el porcentaje de ideal / real de llenado del pistón .... .....	221
Figura 8.23.	Comparación entre el tiempo de llenado y vaciado del pistón .....	222
Figura 8.24.	Diagrama de bloques general del sistema de inmersión híbrido.....	222
Figura 8.25.	Diagrama electrónico general del sistema de inmersión híbrido.....	223
Figura 8.26.	Trayectoria del vehículo ante cambios en la flotabilidad con tiempo de llenado del pistón cero .....	224
Figura 8.27.	Trayectoria del vehículo ante cambios en la flotabilidad teniendo en cuenta el tiempo de llenado del pistón Figura 8.23.....	224
Figura 8.28.	Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con control PD para diferentes porcentajes de llenado de pistón y una referencia de la profundidad de 2m. ....	226
Figura 8.29.	Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con control PD para diferentes porcentajes de llenado de pistón y profundidad de referencia de 20m. ....	226

## Nomenclatura

$\phi$	Angulo de balanceo (roll)
$\theta$	Angulo de cabeceo (pitch)
$\psi$	Angulo de guiñada (yaw)
$x$ (N)	Posición norte
$y$ (E)	Posición este
$z$ (D)	Posición abajo, profundidad (Depth)
$u$	Velocidad en dirección $x$
$v$	Velocidad en dirección $y$
$w$	Velocidad en dirección $z$
$p$	Velocidad angular del eje $x$
$q$	Velocidad angular del eje $y$
$r$	Velocidad angular del eje $z$
$X$	Fuerza sobre el eje $x$
$Y$	Fuerza sobre el eje $y$
$Z$	Fuerza sobre el eje $z$
$K$	Momento sobre el eje $x$
$M$	Momento sobre el eje $y$
$N$	Momento sobre el eje $z$
$\eta$	Posición generalizada en el marco de referencia $\{n\}$
$J(\eta)$	Transformación entre los marcos de cuerpo y de referencia
$M_{RB}$	Matriz de masa de cuerpo rígido
$C_{RB}$	Matriz coriolis de cuerpo rígido y centrípeta debida a la rotación de vehículo $\{b\}$ sobre el marco geográfico $\{n\}$
$\tau_{RB}$	Vector de fuerzas externas y momentos expresados sobre el marco de referencia del vehículo $\{b\}$
$M_A$	Matriz de masa hidrodinámica debida a la aceleración $\dot{v}$
$C_A$	Matriz coriolis hidrodinámica
$D(v)$	Matriz de amortiguamiento
$g(\eta)$	Vector generalizado de la fuerza de restablecimiento
$\tau$	Vector de fuerzas aplicadas
$B$	Matriz de control de propulsión
$U$	Vector de propulsiones

## Acrónimos

AUV	Autonomous Underwater Vehicle
ROV	Remotely Operated Vehicle
ASV	Autonomous Surface Vehicle
SONAR	Sound Navigation And Ranging
DVL	Doppler Velocity Log
CG	Centro de Gravedad
GDL	Grados de libertad
DOF	Degrees Of Freedom



# Capítulo 1.

## Introducción

El estudio de los mares y los océanos es un campo de la ciencia que se encuentra en constante desarrollo. Durante los últimos siglos, gracias al avance de la tecnología se han podido llegar a tener medidas con mayor detalle y fundamento. Las principales características que se pretenden mejorar con el uso de nuevas tecnologías se resumen en tres: la resolución frecuencial, que permita obtener un gran volumen de datos en un punto concreto a estudiar; la resolución espacial, que garantice pequeñas distancias entre dos puntos de muestreo; y la extensión total observable, para poder obtener conclusiones de los estudios hechos en una región específica.

A mediados del siglo XX la exploración se caracterizó por el uso de boyas oceanográficas y barcos dedicados exclusivamente para este fin. Esto permitió obtener unos muestreos con mayor frecuencia temporal y a la vez con misiones de mayor duración, para así capturar un mayor volumen de datos en puntos concretos de estudio. Al mismo tiempo que se hacía la exploración usando barcos exploradores, otro tipo de tecnología fue surgiendo desde el espacio. El uso de los satélites para monitorizar los mares y océanos ha permitido tener una mayor extensión observable, de forma que se ha podido hacer un estudio general de grandes regiones en concreto. Sin embargo, estas técnicas no permiten obtener las muestras ni con buena resolución frecuencial ni con la resolución espacial necesarias para realizar un estudio detallado.

Adicionalmente, se suma el problema de los costos necesarios para realizar estudios submarinos con buques ya que implican un gran trabajo de planificación de la misión y el uso de esta infraestructura es costoso.

Como respuesta a estas necesidades, a partir de la década de los 50's surgieron los vehículos no tripulados como los ROV (Remotely Operated Vehicle), los AUV (Autonomous Underwater Vehicle) y los AUV Glider. Su principal función es abaratar los costos que implican los vehículos tripulados y a la vez proporcionar mayor robustez en las operaciones.

## Capítulo 1

En un comienzo fueron desarrollados para realizar operaciones militares (como detección de minas y avistamiento del entorno para la guerra), pero se adaptaron y se siguieron desarrollando para los campos científico e industrial.

Hoy en día se puede encontrar una gran variedad de vehículos submarinos comerciales que permiten dar cobertura a un gran número de aplicaciones submarinas, ya sean de inspección o de intervención y manipulación. Entre ellos se encuentran los ROV que se caracterizan por ser operados a distancia por un humano a través de un cable umbilical que permite el control y el suministro de energía. Estos vehículos son utilizados para inspección de pequeñas áreas, dado las limitaciones del cable umbilical. El conjunto de estos vehículos en el sector comercial viene dado principalmente por las empresas: Saab Underwater Systems, Oceaneering International, International Submarine Engineering, Schilling Robotics LLC, ECA SA, SMD products, ARGUS Remote Systems. Los AUVs a diferencia de los ROVs, son vehículos pensados para navegar autónomamente sin la ayuda de un operario y por tanto prescinden del uso de un cable umbilical. Su propósito de creación está enfocado a nivel científico en el ámbito de observación y recolección de datos.

Fundamentalmente se utilizan en la obtención de mapas batimétricos y monitorización de las características físico-química específicas del agua del mar, aunque no son sus únicos usos. Es muy importante el uso de los AUV como tecnología no tripulada en el ámbito de defensa, concretamente en la lucha contra minas, aunque también en vigilancia, exploraciones, reconocimientos, búsquedas y rescates. Existen diversas empresas que comercializan este tipo de vehículos como: Bluefin Robotics, Hydroid, Teledyne Gavia, Kongsberg Maritime, Teledyne Webb Research, iRobot, Ocean Server Tehcnology, CSIP-ECA Group, International Submarine Engineering (ISE).

Este amplio conjunto de vehículos permite dar cobertura a un gran número de aplicaciones. Sin embargo, a medida que se avanza en el estudio del mar van apareciendo nuevas aplicaciones singulares en las que se requieren adaptar y diseñar nuevas prestaciones dinámicas y de control de navegación para los vehículos.

Un ejemplo de nuevas aplicaciones surge en el sector pesquero, dentro del campo de la biología marina, el estudio del mar y los océanos. Las especies marinas cambian su comportamiento en función de variables ambientales como la temperatura, salinidad, pH, clorofila, nitratos, entre otros [1] [2]. Algunos peces, por ejemplo, son eurihalinos, lo

que implica que pueden adaptarse a las variaciones de la concentración de salinidad. En cambio, otros tipos de peces son estenohalinos, es decir, no son capaces de vivir con variaciones de concentración de sales y tienen que emigrar a otras aguas [3]. Estas variables ambientales también dependen de la profundidad, donde términos como haloclina, zona vertical en la que la salinidad del agua cambia rápidamente, o termoclina, zona vertical en la que la temperatura cambia rápidamente, deben ser estudiados a través de la obtención de perfiles verticales de una columna de agua. Estos perfiles permitirán estimar las migraciones o poblaciones de peces en una determinada área [4].

A nivel mundial existen varios AUVs capaces de realizar este tipo de movimiento vertical, como el Tethys [5], MiniOE [6], Folaga [7], AVP [8] y Girona 500 [9]. En otros AUVs actúan timones horizontales para sumergirse y por tanto no obtienen una inmersión completamente vertical. De los citados, el MiniOE, el AVP y el Girona 500 son vehículos que utilizan hélices para la inmersión, por lo que generan perturbaciones en el medio. En cambio, Tethys y Folaga son vehículos que integran diferentes tipos de movimientos gracias a que incluyen un sistema de lastre que permite cambiar su flotabilidad y realizar inmersiones verticales con perturbaciones mínimas en el medio marino. Dentro de este grupo se puede incluir al vehículo Guanay II que es un vehículo desarrollado por el grupo de investigación de Sistemas de Adquisición Remotos y Tratamiento de la Información (SARTI), de la Universidad Politécnica de Catalunya [10]. El Guanay II es un vehículo híbrido entre un AUV y un ASV (Autonomous Surface vehicle). El vehículo navega por la superficie del mar, hasta alcanzar un punto determinado, donde se detiene y realiza una inmersión vertical, manteniendo la posición horizontal mediante la variación de su flotabilidad, permitiendo obtener el perfil de una columna de agua.

## 1.1 - Trabajos previos

El grupo de investigación de Sistemas de Adquisición Remotos y Tratamiento de la Información (SARTI), de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), ha desarrollado un prototipo de vehículo autónomo submarino durante los últimos años denominado Guanay.

El vehículo Guanay [11] [12] [13] fue diseñado principalmente para navegar en zonas costeras, y realizar inmersiones verticales en puntos específicos. Los últimos trabajos realizados sobre el prototipo han estado enfocados en mejorar las prestaciones del

vehículo [14] [15] [16] [17] [18] en la navegación sobre el plano horizontal, dando lugar al prototipo conocido como Guanay II.

### 1.2 - Motivación

Siguiendo la línea de adaptar los vehículos autónomos submarinos no tripulados para que puedan dar soporte a aplicaciones singulares, la motivación de este trabajo se enmarca en la adaptación del vehículo Guanay II para que en un futuro pueda ser utilizado como plataforma de medición. Concretamente para la detección y seguimiento de vertidos contaminantes en el mar, como por ejemplo los hidrocarburos, así como la monitorización de datos oceanográficos para su utilización en modelos predictivos del desplazamiento del vertido.

En la lucha contra la contaminación marina se pueden distinguir tres fases claramente diferenciadas: la detección del vertido, el seguimiento del vertido y la predicción de su desplazamiento.

Para la detección de vertidos de hidrocarburos en el mar los sistemas de teledetección son unas herramientas poderosas. Instalados a bordo de buques, aeronaves o satélites, son capaces de obtener imágenes de alta resolución empleando diversas bandas del espectro electro-magnético (no sólo la banda visible, sino también en frecuencias de infrarrojos y microondas).

Existen sistemas de detección desarrollados por diferentes empresas como el Miros OSD™ de la empresa Miros AS [19], y el SIGMA6 de la empresa Rutter [20]. Son sistemas que se basan en la utilización de un sistema radar y además el Miros OSD™ combina imágenes térmicas.

De todos los sistemas desarrollados actualmente hay un consenso entre los expertos que el SAR (Radar de Apertura Sintética) es la herramienta más útil para localizar y delimitar un vertido de hidrocarburo en fases iniciales [21] [22] [23] [24]. El SAR es un sensor activo que mide la rugosidad de la superficie marina. Sin embargo, presenta algunos problemas como la imposibilidad de diferenciar capas muy finas de manchas de mayor grosor, de detectar manchas situadas debajo de la superficie, de distinguir inequívocamente masas de fuel con zonas de calma y de alta resolución geométrica para estudiar la zona costera. A todo esto, se le une el elevado costo que puede suponer

el procesamiento de datos en tiempo real, tanto de satélite como de avión, y los altos costes de operación.

El problema del elevado coste de operación se puede minimizar gracias a que el creciente desarrollo de los vehículos aéreos no tripulados, UAV (Unmanned Aerial Vehicle) o UAS (Unmanned Aircraft Systems), usualmente llamados “*dron*”, ha hecho posible su uso para transportar sensores de teledetección. En los trabajos [25] [26] [27] se presentan diferentes vehículos aéreos no tripulados diseñados para este fin y cuya operatividad queda demostrada con unos costes muy reducidos. También existen compañías como AeroVironment Corporate [28] y Aeronautics Ltd [29] que ofrecen sistemas UAV, para la detección de manchas de petróleo. Son aviones no tripulados que comúnmente incorporan una combinación de diferentes sensores de teledetección como un Radar de Apertura Sintética (SAR) e imágenes infrarrojas/Ultravioletas (IR/UV).

El problema de la detección de las manchas sumergidas, así como su grosor se pueden resolver mediante la utilización complementaria de vehículos submarinos. Como ya se ha comentado, existen una gran variedad de vehículos que permiten transportar diferentes sensores de teledetección, como un sonar. Sin embargo, la ventaja de utilizar un sonar en el interior del medio acuoso es que permite detectar diferentes parámetros de la mancha, entre ellos su grosor. En el trabajo de Wilkinson et al [30] se utiliza un ROV y un AUV en una campaña en el mar Ártico para la detección de hidrocarburos en las capas de hielo. Los vehículos integran un sonar y un sensor de espectros ultravioleta (UV Fluorescence). La combinación de estos sensores les permite obtener buenos resultados en la detección del grosor de las capas de petróleo.

Otra posibilidad que brinda ubicar el sensor en el agua es la posibilidad de utilizar espectrógrafos en tiempo real. Estos sensores ópticos sumergibles permiten detectar la concentración de moléculas asociadas a los hidrocarburos. En 2012, la compañía Subctech [23] utilizó un ROV que integraba una serie de sensores y entre ellos el fluorímetro HidroC™ CH<sub>4</sub> de CSS Contros [31] para la detección de hidrocarburos.

Una vez detectada la mancha de hidrocarburo la siguiente etapa es su seguimiento y monitorización del desplazamiento. A fin de que la respuesta operativa frente a un vertido de hidrocarburos u otros contaminantes químicos en el medio marino resulte rápida y eficaz, es necesario disponer de la máxima información posible, en tiempo real o en un mínimo de tiempo de retorno, sobre la evolución del derrame y su localización.

## Capítulo 1

El método más utilizado es la observación visual desde buques, helicópteros o avionetas de vigilancia, siendo actualmente el método más rápido, económico y fiable puesto que no depende de la disponibilidad de imágenes de otras plataformas de recepción y permite comprobar in situ la veracidad de la alerta. Sin embargo, la detección visual requiere de observadores experimentados o con una formación previa, puesto que existen diversos fenómenos o elementos naturales que desde una aeronave pueden presentar el mismo aspecto visual que manchas de hidrocarburo. El seguimiento de una mancha mediante observación visual puede facilitarse mediante la dispersión sobre la mancha de tarjetas trazadoras de colores.

Para asegurar un seguimiento permanente de las manchas, otro mecanismo muy efectivo consiste en la colocación sobre las mismas de boyas emisoras posicionadas por satélite (Iridium, ARGO o GPS), comparables a las balizas de socorro. Este tipo de boyas ya existen en el mercado (ARGOSPHERE, iSPHERE, CODE/DAVIS de MetOcean, LCDrifter de INNOVA, MD03 de Albatros Marine Technologies) y proporcionan información de la dinámica de corrientes en la zona de estudio.

Muchas de estas balizas han sido puestas en funcionamiento en casos de contaminación por hidrocarburos procedente de accidentes tales como el del Erika o el Prestige, o más recientemente, en septiembre de 2014, el lanzamiento de 34 boyas de deriva en el Estrecho de Gibraltar en el marco del proyecto MEDESS-4MS del Programa MED de la Unión Europea dedicado a la prevención de riesgos y el fortalecimiento de la seguridad marítima con relación a los vertidos de hidrocarburos en el Mediterráneo.

No obstante, la dificultad reside en que hay que asegurarse de que las balizas deriven como las manchas, con la misma sensibilidad al viento y a la corriente, y esto dependerá del espesor y la naturaleza del contaminante. Dada la imposibilidad de garantizar la misma deriva para las balizas y el contaminante una solución es recurrir de nuevo a un vehículo aéreo o marino no tripulado con capacidad de movilidad para desplazarse simultáneamente con el vertido.

Finalmente, dentro de las tareas asociadas a la lucha contra la contaminación marina, es necesario disponer de la capacidad para predecir el comportamiento de una mancha contaminante. Si se dispone de los datos meteorológicos y oceanográficos con relativa periodicidad es posible realizar modelizaciones numéricas que faciliten información sobre la trayectoria y la evolución físico-química del contaminante. Existen variedad de

modelos que simulan la evolución de vertidos al medio marino y que parten de datos océano-meteorológicos para predecir la deriva de los mismos.

Por ejemplo, el Delft3D desarrollado por el consorcio Deltares [32] es un modelo de simulación en 3D para investigación hidrodinámica, transporte de sedimentos, morfología y calidad de agua en entornos costeros. Ha sido utilizado para simular derrames y la dispersión de fragmentos de hidrocarburos en estudios realizados en Paranaguá, Brasil [33]. Utiliza la velocidad del agua, el nivel del agua y la concentración de sedimentos en suspensión para calcular la trayectoria de las partículas de los hidrocarburos.

Otro modelo es el Oil Modeling Environment (GNOME). Se trata de un modelo público de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) que simula el movimiento de los hidrocarburos sometido a la acción de vientos, corrientes, mareas y dispersión superficial [34]. Entre los parámetros de entrada para este modelo en aguas costeras se destacan [35]: localización del derrame, tipo de sustancia derramada, descripción del litoral, batimetría, datos meteorológicos y factores hidrodinámicos que requieren conocer la temperatura y la conductividad en una columna de agua, lo cual se obtiene a través de un sensor de CTD (*Conductivity, Temperature, and Depth*).

De todos estos parámetros, las batimetrías y los factores hidrodinámicos se pueden obtener a través de la utilización de vehículos autónomos submarinos. Para ello es necesario que estos vehículos, además de poder navegar en inmersión manteniendo una determinada profundidad para realizar las batimetrías, realicen el movimiento de un perfilador vertical para obtener los datos de una columna de agua.

Como se comentó anteriormente, el vehículo Guanay II fue diseñado para navegar en la superficie y en puntos específicos realizar la función de un perfilador vertical, pero para poder realizar batimetrías es necesario dotar al vehículo de la capacidad de navegar manteniendo una profundidad determinada y, para ello, deben realizarse modificaciones en los actuadores y en el sistema de navegación que permitan la orientación del vehículo en el plano vertical en inmersión. Por otra parte, también se considera la inclusión de un sistema de detección y evasión de obstáculos que permita garantizar la seguridad del vehículo durante la navegación autónoma en superficie reduciendo la posibilidad de colisionar con otras embarcaciones o estructuras marinas.

Por tanto, una vez realizadas estas modificaciones en el vehículo, se dispondrá de una plataforma de medición sobre la cual se podrán instalar los sensores adecuados para realizar las tareas en la lucha contra la contaminación marina por hidrocarburos en sus tres fases, detección del vertido, seguimiento del vertido y obtención de datos para la predicción de su desplazamiento.

### 1.3 - Objetivos de la tesis

El propósito general de esta tesis se centra en dotar al vehículo Guanay II de un sistema de detección y evasión de obstáculos. De este modo, se podrá reducir la posibilidad de colisión contra otros vehículos o estructuras marinas. También se considera realizar las modificaciones necesarias en el vehículo que permitan la navegación en inmersión. De este modo dispondremos de una plataforma mucho más versátil para la medición de parámetros oceanográficos.

### 1.4 - Principales contribuciones

- Capítulo 4:
  - Diseño e Implementación en LabVIEW del sistema para la detección de obstáculos por detección de bordes en imagen
  - Diseño e Implementación en LabVIEW del sistema para la detección de obstáculos por determinación de la distancia mínima al obstáculo por sectores
- Capítulo 5:
  - Diseño e implementación en simulación (Matlab) del sistema para la evasión de obstáculos por cambio del ángulo de guiñada y velocidad de referencia del vehículo
  - Diseño e implementación en simulación (Matlab) del sistema para la evasión de obstáculos por generación de nuevos waypoints
  - Diseño e implementación en hardware y software (LabVIEW) del sistema para la evasión de obstáculos de arquitectura reactiva-fuzzy por generación de waypoints.



- Capítulo 6:
  - Diseño e implementación en hardware y software (LabVIEW) del sistema de navegación en inmersión por propulsión vectorial.
  
- Capítulo 7:
  - Diseño e implementación en simulación (Matlab) del modelo hidrodinámico del vehículo Guanay II sobre el plano vertical.
  
  - Estimación de los coeficientes del modelo hidrodinámico del vehículo Guanay II sobre el plano vertical.
  
- Capítulo 8:
  - Diseño de un control del nivel de profundidad para navegación en inmersión de lazo cerrado para el sistema de inmersión por propulsión vectorial.
  
  - Diseño de un sistema de inmersión híbrido para el vehículo Guanay II



## Capítulo 2.

# Revisión - vehículos autónomos submarinos y el vehículo Guanay II

Los vehículos autónomos submarinos (Autonomous Underwater Vehicle AUV), son utilizados como plataformas de medición, inspección e investigación. Estos vehículos pueden ser ubicados en distintas zonas y realizar trayectorias previamente determinadas de forma autónoma, para la adquisición de datos oceanográficos.

### 2.1 - Vehículos autónomos submarinos (AUV)

Los AUV pueden ser clasificados en diferentes grupos, dependiendo de su forma, autonomía, sistema de inmersión entre otros factores. Estos factores limitan las aplicaciones en las cuales puede ser utilizado un vehículo específico. Las aplicaciones más comunes se dividen en tres áreas:

- Militar
  - Detección y control de minas submarinas
  - Guerra antisubmarina
  - Vigilancia y seguridad
  - Búsqueda y rescate
- Científico
  - Análisis oceanográfico
  - Hidrografía
  - Batimetrías
  - Arqueología
- Empresarial
  - Batimetría
  - Análisis ambiental
  - Exploración y construcción
  - Inspección de estructuras, tuberías y plataformas

Dado que en esta tesis se propone un sistema de inmersión, a continuación, se presenta una clasificación de los vehículos en función de su sistema de inmersión. Existen diferentes mecanismos o actuadores que permiten que un AUV se sumerja siguiendo diferentes dinámicas. Algunos permiten que los vehículos se sumerjan verticalmente y otros en diagonal [36]. Principalmente, existen tres tipos de actuadores que permiten conseguir ubicar el vehículo a una profundidad determinada: superficies de control móviles, propulsores fijos o vectoriales y control de flotabilidad. Cada uno estos métodos se describen a continuación.

### 2.1.1 - Superficies de control móviles

Algunos AUV disponen de superficies de control móviles para el control del movimiento vertical. Estos timones se encuentran comúnmente instalados por pares opuestos, es decir un timón en babor y otro en estribor. Pueden estar ubicados en popa, proa y/o en el centro del vehículo. Los timones generan una reorientación del flujo que modifica la hidrodinámica del vehículo provocando un movimiento de cabeceo, que se convierte en un desplazamiento sobre el eje Z (profundidad). Entre los vehículos que utilizan este sistema se destacan:

- AUV MAYA [37], dispone de dos timones horizontales en popa cerca del motor principal para controlar el proceso de inmersión y un timón en la parte inferior del vehículo para controlar el rumbo del vehículo. Estos timones se controlan individualmente mediante el uso de un servomotor.

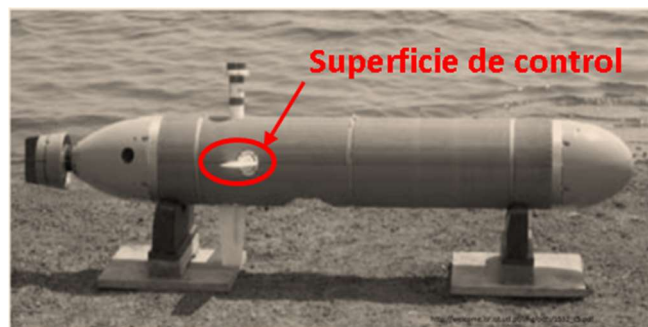


Figura 2.1. AUV MAYA [37]

- JAMSTEC [38] se compone de cuatro timones dispuestos en forma de aspa, en proa y otros cuatro timones dispuestos en forma también de aspa en popa.

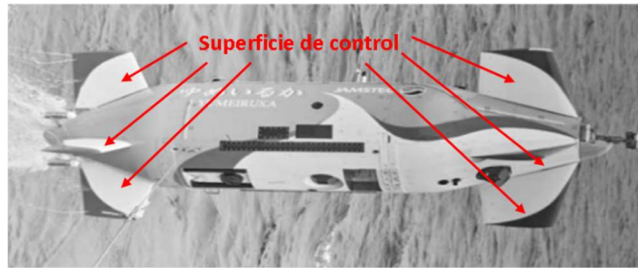


Figura 2.2. JAMSTEC [38]

- MUN Explorer [39] dispone de cuatro timones dispuestos en forma de aspa en popa y dos timones ubicados horizontalmente en el centro del vehículo, en estribor y babor respectivamente. En ambos casos cada uno de los timones se controla de modo independiente. Estos timones ajustan los movimientos del vehículo en las 3 dimensiones.

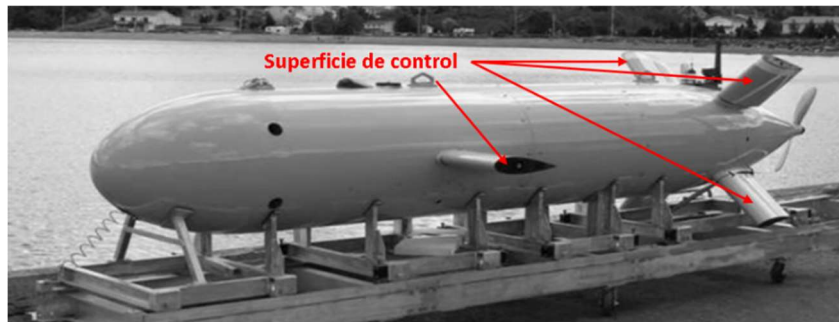


Figura 2.3. MUN Explorer [39]

- Iver 2 [40] y el STARFISH [41] [42], utilizan 4 timones en popa dispuestos en forma de cruz, es decir, dos timones sobre el plano horizontal, ubicados en babor y estribor respectivamente, utilizados para el control del cabeceo y otros dos timones sobre el plano vertical, utilizados para controlar el rumbo del vehículo.



Figura 2.4. Iver 2 [40]

Estos vehículos realizan un proceso de inmersión describiendo una trayectoria en diagonal. La pendiente dependerá de la dinámica del vehículo con respecto a la posición

(ángulo) de los timones y la velocidad de propulsión. Estos son sistemas energéticamente eficientes dado que la maniobra de inmersión solo consume energía para ajustar la posición del timón. Sin embargo, son sistemas de una maniobrabilidad limitada y siempre necesitan tener la propulsión activa para realizar la inmersión y mantenerse en un nivel de profundidad.

### 2.1.2 - Propulsión fija o vectorial

Otro de los sistemas utilizados en los vehículos autónomos sumergibles; para realizar el proceso de inmersión y mantener una profundidad estable durante la navegación, es la inmersión por propulsión fija o vectorial. Este sistema se basa en el uso de propulsores para obtener la fuerza necesaria para hundir el vehículo. En general, existen dos grupos: el primero utiliza propulsores fijos orientados sobre el plano vertical y el segundo utiliza un sistema de orientación de los propulsores que permite cambiar el vector de empuje denominado "propulsión vectorial". En el caso de vehículos que utilizan impulsores verticales fijos encontramos algunos ejemplos, como:

- AUV SPARUS [43], tiene la forma de un torpedo, en babor y estribor en el sector de popa, dispone de dos propulsores horizontales, para controlar el avance horizontal y la guiñada, también dispone de un propulsor vertical fijo, ubicado en el centro del vehículo para controlar el proceso de inmersión y mantener la profundidad en el nivel deseado.

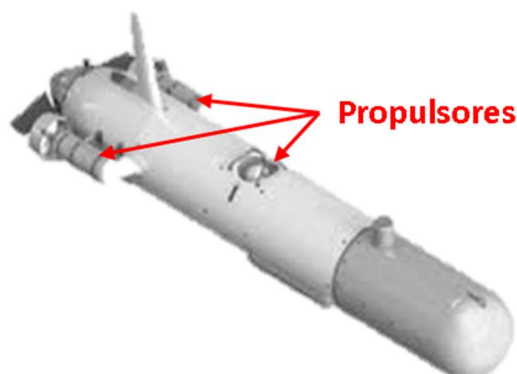


Figura 2.5. AUV SPARUS [43]

- USM AUV [44], con forma de torpedo, utiliza dos propulsores ubicados en el centro del vehículo, en el plano horizontal, para la orientación y la propulsión horizontal. También tiene otros dos propulsores en plano vertical para controlar la inmersión, ubicados en popa y proa.

- El Starbug [45] y el MONSUN II [46], están equipados cada uno con 6 propulsores, cuatro propulsores para controlar la inmersión y dos para la propulsión horizontal.

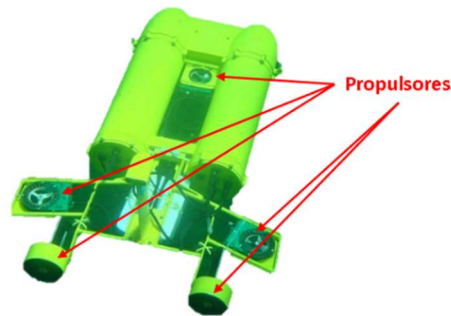


Figura 2.6. Starbug [45]



Figura 2.7. MONSUN II [46]

El sistema de impulsores verticales fijos, permite tener un descenso vertical, pero su consumo energético es elevado al tener activos los propulsores durante toda la inmersión. Sin embargo, este sistema dispone de una excelente maniobrabilidad en las 3 dimensiones.

Entre los vehículos que cambian la orientación del vector de empuje se destacan:

- SIA-4500AUV [47], desarrollado en Shenyang Institute of Automation (SIA) y Chinese Academy of Sciences (CAS). Con el fin de mejorar la maniobrabilidad en el plano vertical, el SIA-4500AUV está diseñado como un perfil de pescado. Está equipado con dos propulsores que pueden girar  $\pm 90$  grados en la popa, y en la proa dispone de dos conjuntos de propulsores de túnel, uno en juego con los propulsores de popa, para maniobras en el plano vertical, y el otro para maniobras en el plano horizontal.
- AUV Sentry [48] utiliza una configuración de cuatro propulsores móviles.

- Odyssey IV [49] tiene dos propulsores fijos ubicados horizontalmente en popa y en proa respectivamente para controlar el rumbo y otros dos propulsores localizados en el centro del vehículo para controlar el proceso de inmersión y la propulsión horizontal.

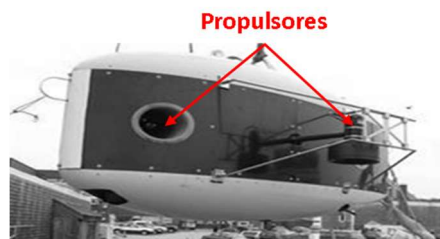


Figura 2.8. Odyssey IV [49]

- Finalmente encontramos vehículos como el Dorado del MBARI [50], SWAN [51] [52] y MicroAUV [53], que tienen un perfil tipo torpedo. Sus movimientos en las 3 dimensiones dependen de un solo propulsor ubicado en popa, el cual cuenta con un sistema de orientación que le permite girar hasta  $25^\circ$  en cualquier dirección.

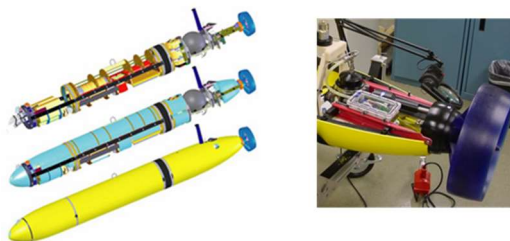


Figura 2.9. Dorado del MBARI [50]

Los vehículos que incorporan propulsores vectoriales, pueden tener en algunos casos un descenso en forma vertical, aunque con el consiguiente incremento de consumo energético. En los casos en los que se utiliza un solo propulsor móvil omnidireccional para variar el control de empuje y, de este modo, controlar el movimiento en las 3 dimensiones, se dispondrá siempre de un descenso en diagonal debido a la ubicación del propulsor en popa. Este sistema es de maniobrabilidad reducida y no puede realizar giros cerrados debido a que el ángulo de movimiento suele ser de, aproximadamente,  $25^\circ$ .

### 2.1.3 - Control de flotabilidad (AUV con propulsores)

Este tipo de sistema es utilizado por diversos vehículos submarinos como un método de control de planeo y de propulsión. Consiste básicamente en un dispositivo para



mantener una flotabilidad neutra a través de pequeños cambios en la densidad del fluido [36]. Este método de control de profundidad cambia el porcentaje de flotabilidad a través, fundamentalmente, de: i) un tanque de lastre con pistón; ii) un sistema de lastre con una bomba hidráulica y iii) un sistema de compresión de aire. Este sistema se divide en tres partes: un tanque, una bomba o un pistón dentro del vehículo y un tanque de almacenamiento en el exterior del vehículo, el cual puede estar lleno de agua, aceite, aire u otros líquidos. Cuando el agua (aire u otra sustancia) llena el tanque interno, se logra flotabilidad negativa, por lo que el vehículo comienza a descender. Cuando se vacía el tanque interno, el AUV recupera la flotabilidad positiva, por lo que asciende.

Este sistema permite controlar la profundidad de vehículo, pero en la mayoría de casos no permiten controlar la inclinación del vehículo. Esto lleva a la implementación de sistemas de inmersión híbridos (Qianlong I [54], Theseus AUV [55], Urashima AUV [56]). Estos sistemas híbridos, utilizan el sistema de control de flotabilidad, para ajustar el trimado o para la realización de inmersiones verticales, pero para la navegación en inmersión se usan timones móviles o propulsión vectorial.



Figura 2.10. Theseus AUV [55]

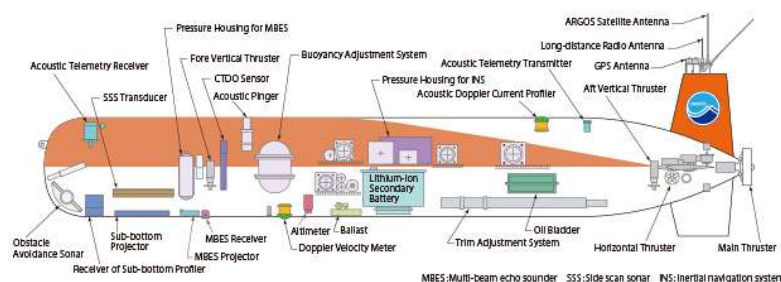


Figura 2.11. Diagrama general del Urashima AUV [56]

En general estos sistemas consumen menos energía, son más eficientes, pero con poco control de dirección. El consumo energético se genera durante el llenado o el vaciado del pistón ya que no existe ningún consumo energético cuando el vehículo se ha posicionado en profundidad. Este proceso de inmersión tiende a ser lento lo cual permite un posicionamiento adecuado del vehículo. Los sistemas que utilizan agua de mar

durante el proceso de inmersión sufren un deterioro mecánico mayor y deben estar sujetos a un continuo mantenimiento.

### 2.1.4 - Control de flotabilidad (AUV sin propulsores)

Existe un tipo de AUV conocido como Glider o planeador submarino, como el Slocum G3 [57] y el SEAGLIDER C2 [58] que, mediante cambios en su flotabilidad y superficies fijas, convierte el movimiento vertical en horizontal, con un sistema de propulsión de bajo consumo y sin el uso de propulsores. Aunque la velocidad alcanzada es menor a la de los AUV que usan propulsores, estos AUV son utilizados para misiones de monitorización oceanográfica de larga duración y gran recorrido. El perfil de la trayectoria de estos AUV es en forma de diente de sierra, lo que genera que las escalas de medición espacial y temporal no sean comparables con los AUV convencionales.

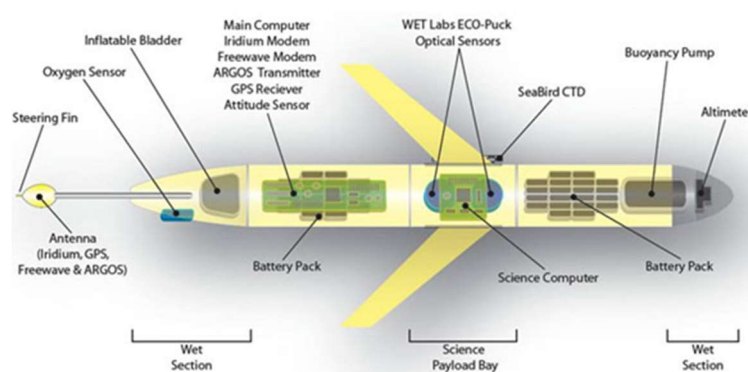


Figura 2.12. Slocum G3 [57]

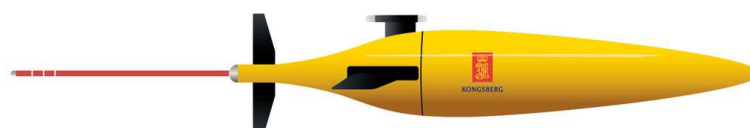


Figura 2.13. SEAGLIDER C2 [58]

## 2.2 - Vehículo Guanay II

El vehículo Guanay II, es un vehículo desarrollado por el grupo de investigación SARTI de la Universidad Politécnica de Catalunya [12], este es un vehículo híbrido entre un AUV y un ASV (Autonomous Surface vehicle). El vehículo navega por la superficie del mar, hasta alcanzar un punto determinado, donde se detiene y realiza una inmersión vertical; mediante la variación de su flotabilidad, permitiendo obtener el perfil de una columna de agua.

El vehículo Guanay II [13] tiene unas dimensiones de 2300mm de longitud y 320mm de diámetro y un peso en vacío de 90kg. Puede transportar una carga útil de 4kg, su profundidad máxima de trabajo es de 30m y su velocidad de navegación máxima es de 1,2m/s. Durante los últimos tres años han sido incorporadas al vehículo diversas mejoras [14] [16] [59] [60]. Uno de estos avances se relaciona con la obtención de su modelo hidrodinámico en tres grados de libertad; que describe el movimiento del vehículo en el plano horizontal. A partir de este modelo hidrodinámico se diseñó un sistema de control de navegación, basado en las técnicas de seguimiento de trayectoria pure pursuit y path following, lo que permite que el vehículo pueda navegar autónomamente por la superficie del mar. Todas las modificaciones y mejoras realizadas se han orientado a disponer de una operatividad completa del vehículo, rentabilizando su operación durante el periodo de misión y disminuyendo el tiempo de puesta a punto.

El sistema Guanay está compuesto por el vehículo Guanay II, un sistema de ubicación acústico (Pinger) y una estación base (ver Figura 2.14). La estación base está compuesta por:

- Un computador.
- Una unidad de comunicación wifi (alcance máximo 15m); que permite tener acceso al panel de control del vehículo para visualizar y ajustar los parámetros de navegación del vehículo y transferir a través de una interfaz TFTP los waypoints que componen la trayectoria a seguir, y el script con los parámetros de navegación.
- Un enlace RF (alcance máximo 100m); este enlace permite controlar el vehículo remotamente, iniciar una trayectoria o en caso de una emergencia parar el vehículo.

El vehículo Guanay II (ver Figura 2.15) está compuesto por una estructura externa (carcasa) en fibra de vidrio; en forma de torpedo, con cinco superficies de estabilización, que reducen el movimiento de cabeceo y de balanceo. Incorpora tres propulsores, el propulsor central (principal) solo brinda fuerza de propulsión sobre el eje de avance del vehículo, mientras los propulsores laterales son utilizados para controlar el rumbo del vehículo. Sobre esta carcasa reposan la antena del módulo RF y la antena GPS-WIFI.

En la parte inferior de la estructura, se dispone de un soporte (ver Figura 2.16) el cual es utilizado para ajustar la flotabilidad inicial del vehículo y sujetar sensores externos como el CTD XR-420.

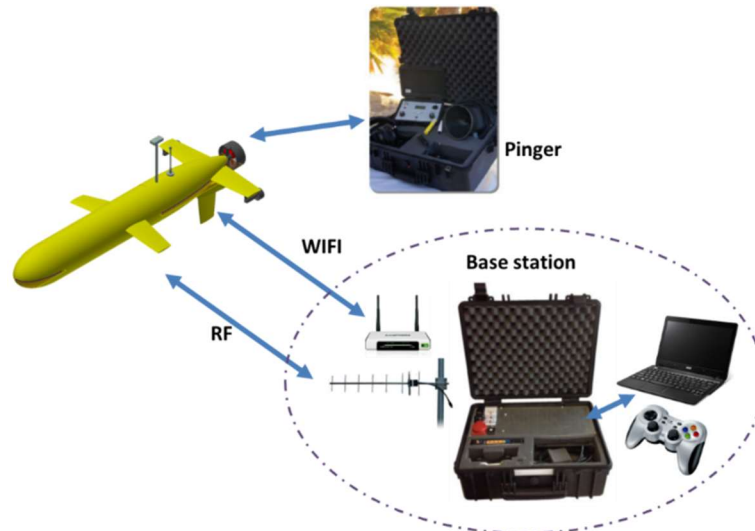


Figura 2.14. Sistema Guanay

Como se muestra en la Figura 2.15; dentro de la carcasa se encuentra alojado un cilindro estanco, el cual contiene la electrónica del vehículo (ver Figura 2.19). Una de las tapas del cilindro estanco contiene los conectores tipo subcon (estancos) utilizados para conectar la electrónica con los periféricos (propulsores, antenas, sensores externos, etc).

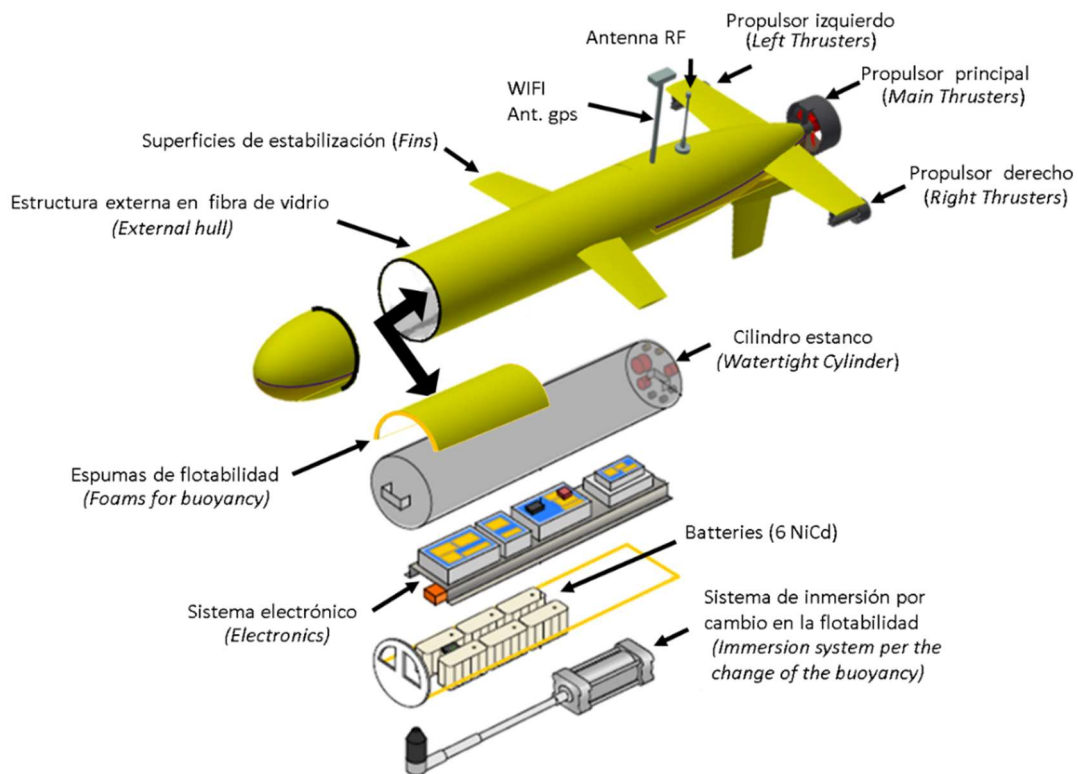


Figura 2.15. Diagrama estructural del AUV Guanay II



Figura 2.16. CTD XR-420

En el interior del cilindro estanco; encontramos una estructura dividida en 3 niveles o subestructuras que se denominan nivel inferior, intermedio y superior:

- Nivel inferior corresponde al sistema de inmersión por cambio en la flotabilidad que se compone por un motor DC y un pistón.

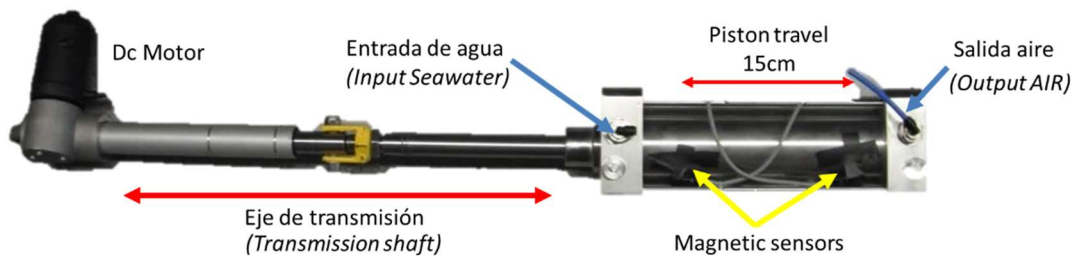


Figura 2.17. Componentes hardware nivel inferior

- En el nivel intermedio, encontramos el sistema de alimentación; compuesto por 6 baterías de 7A/h a 12Vdc que proporcionan al vehículo una tensión máxima de 24 Vdc (21 A/h).

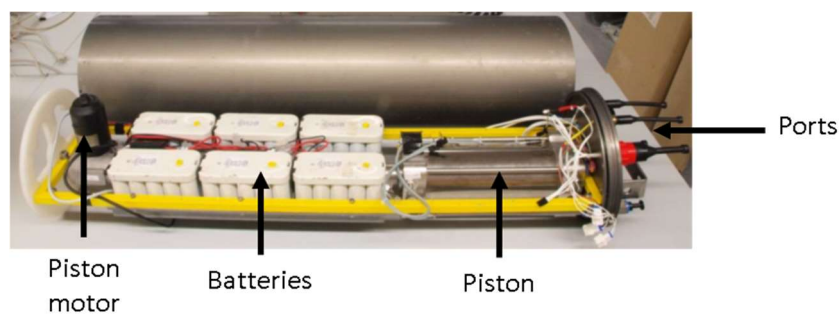


Figura 2.18. Componentes hardware nivel intermedio

- Nivel superior encontramos la electrónica del vehículo, compuesta por un encable RF, un GPS, los controles de potencia de los propulsores, la etapa de regulación de la alimentación, un sensor INS, una brújula y la unidad de control compuesta por un PC104+ (ver Tabla 2-1).

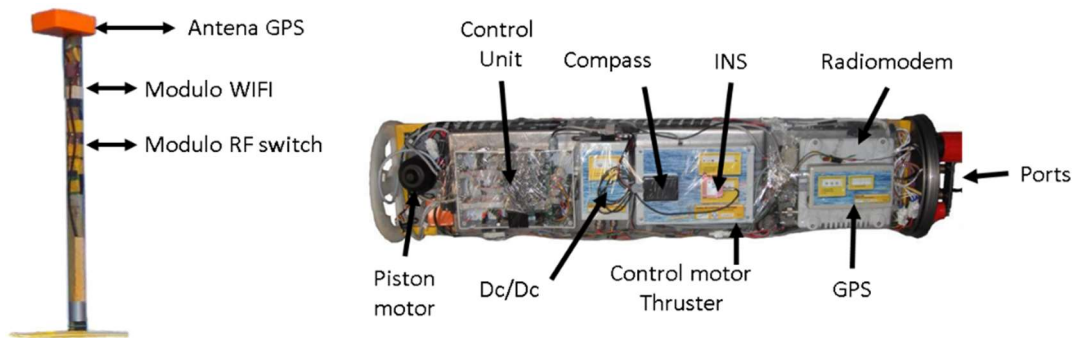


Figura 2.19. Componentes hardware nivel superior

Tabla 2-1. Unidad de control

Parámetro	Característica
<b>CPU</b>	AMD Geode LX800, 500MHz
<b>Memoria</b>	DDR333/400 1GB
<b>SSD</b>	Compact flash 16GB
<b>Sistema operativo</b>	Linux Ubuntu 10.04 Lucid
<b>Plataforma de programación</b>	LabVIEW 2010
<b>% de uso del procesador</b>	>93%
<b>Niveles de tensión</b>	+5v, +12v
<b>Potencia consumida</b>	9.9w

Finalmente, en la Figura 2.20 se muestra el diagrama de la arquitectura del vehículo. En este diagrama se pueden observar los diversos sensores que componen en vehículo y una descripción más detallada de los componentes electrónicos.

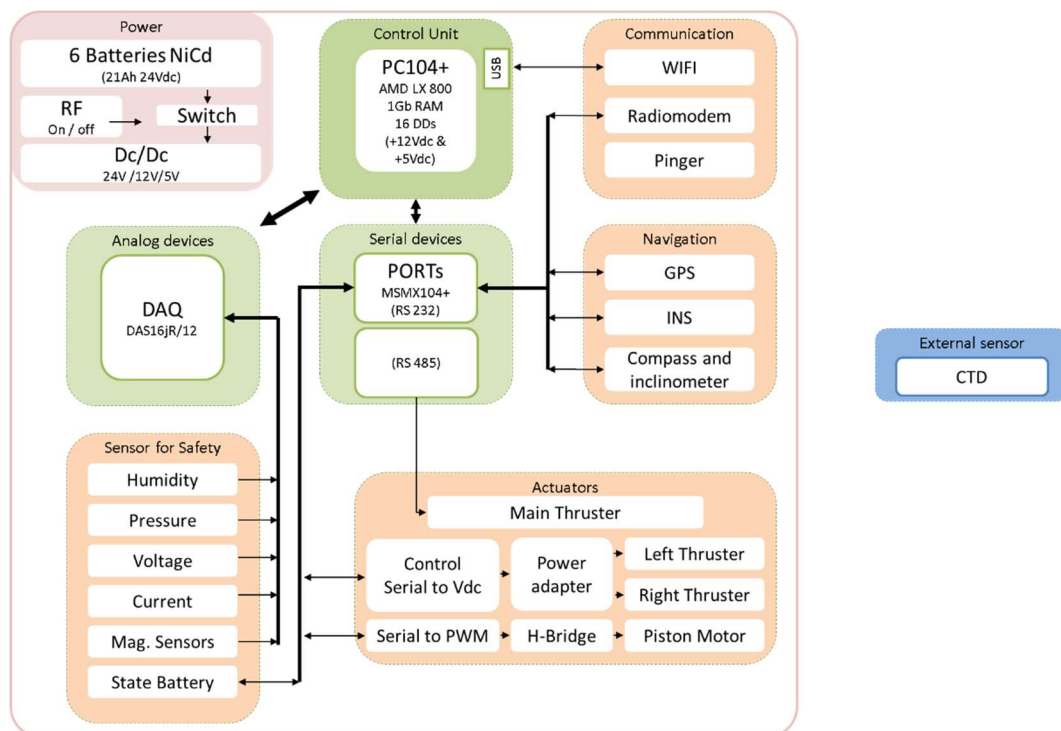


Figura 2.20. Diagrama de la arquitectura del AUV Guanay II Julio 2015

En resumen, actualmente se dispone de un vehículo que navega por la superficie del mar, es capaz de seguir una ruta predeterminada y demarcada por puntos referenciados por GPS, hasta alcanzar un punto de inmersión prefijado donde el vehículo se detiene y realiza un descenso vertical para obtener el perfil de una columna de agua (profundidad temperatura y salinidad).

En la Figura 2.21, se muestra el diagrama general de la arquitectura del vehículo Guanay II, que incluye las modificaciones realizadas al vehículo en la presente tesis.

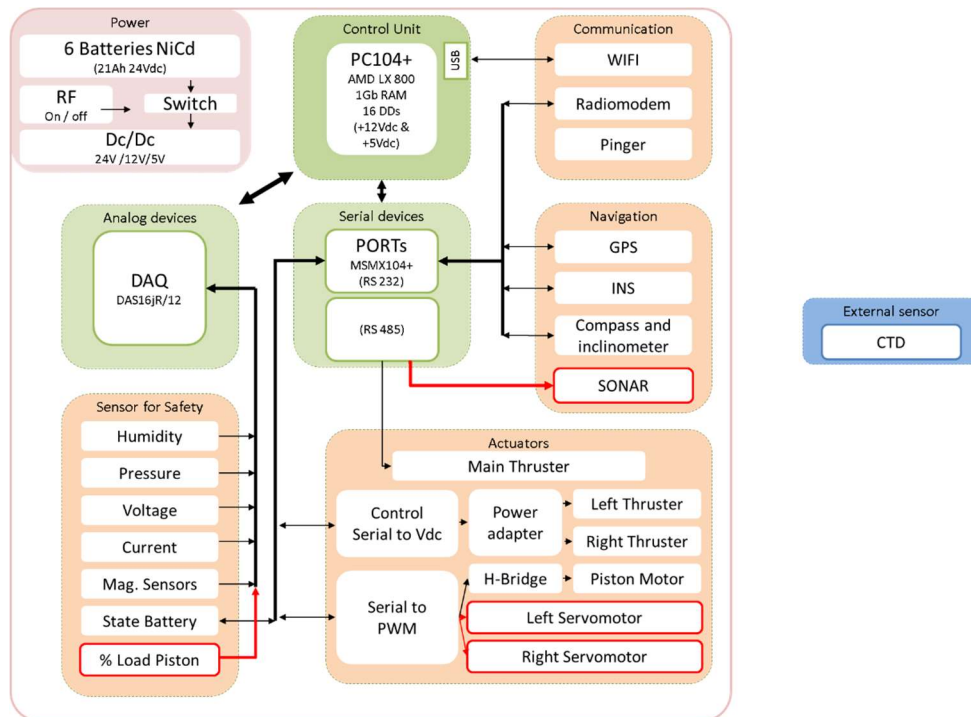


Figura 2.21. Diagrama de la arquitectura del AUV Guanay II Julio 2017





## Capítulo 3.

# **Vertido de hidrocarburos en zonas costeras (detección, seguimiento, monitorización y predicción) y uso de vehículos AUV**

El estudio de los mares a nivel global tiene un gran interés. En los últimos años muchos de los estudios se centran en la evaluación del daño causado por el hombre al medio ambiente marino y a la biodiversidad [61]. Una de las fuentes de daño ambiental de mayor consideración corresponde a la industria del petróleo (oil & gas), que contamina los ríos, mares y océanos. En el 2012 Greenpeace reportó que se vierten 3800 millones de litros de hidrocarburos (petróleo crudo o refinado) en el mar. En el 2016 el ITOPF (The International Tanker Owners Pollution Federation Limited) [62] reportó 6000 toneladas de hidrocarburos vertidos al mar en diferentes incidentes como: incendios, operaciones de carga y descarga, fracturas del casco de los buques, descarga de aguas residuales y fallas en las tuberías submarinas. Estos vertidos afectan el medio ambiente generado: la muerte de los organismos (aves y peces, entre otros) por asfixia, aumento de las infecciones en las especies, cambios en la reproducción y propagación de la fauna y flora amarina, cambios negativos en la cadena alimenticia, entre otros efectos.

Las tareas para controlar un vertido de hidrocarburos en el mar se pueden dividir en cinco fases claramente diferenciadas, que son:

- La detección del vertido
- El seguimiento y monitorización del desplazamiento del vertido
- La predicción del desplazamiento del vertido
- Contención y limpieza
- Evaluación del daño ambiental

Dadas de las características de los vehículos autónomos submarinos, estos pueden llegar a ser utilizados en las tres primeras fases. Para ello el vehículo deberá cumplir con determinadas especificaciones, como son:

- El vehículo debe estar en la capacidad de incorporar sensores para la detección de hidrocarburos.
- El vehículo debe tener la capacidad de navegar en superficie siguiendo y monitorizando los diferentes parámetros ambientales en tiempo real.
- El vehículo debe tener la capacidad de realizar perfiles verticales para determinar el comportamiento de las diferentes variables oceanográficas.
- El vehículo debe tener la capacidad de navegar en inmersión por debajo del vertido para generar la batimetría del lecho marino utilizada en los modelos de predicción del desplazamiento.

Tal como se comentó en el apartado 2.2, el Guanay II es un vehículo diseñado para navegar en la superficie y, en puntos específicos, realizar la función de un perfilador vertical. Este vehículo dispone de un peso útil para la instalación de nuevos sensores de hasta 4kg. Para poder realizar batimetrías en inmersión es necesario dotar al vehículo de la capacidad de navegar manteniendo una profundidad determinada y, para ello, se deben realizar modificaciones en los actuadores de navegación para permitir la orientación del vehículo en inmersión, así como añadir un sistema de posicionamiento en inmersión. También se considera la incorporación de un sistema de detección y evasión de obstáculos, que permita la navegación autónoma al vehículo, limitando el riesgo de colisión y permitiendo al vehículo navegar en conjunto con otros vehículos autónomos o embarcaciones.

Por tanto, realizando estas actuaciones y añadiendo los sensores adecuados es factible la utilización del vehículo autónomo Guanay II en la lucha contra la contaminación marina por hidrocarburos en sus tres fases, detección del vertido, seguimiento del vertido y obtención de datos para la predicción de su desplazamiento.

### **3.1 - Sensores para la detección y seguimiento de hidrocarburos en el mar**

La detección de hidrocarburos en el agua se realiza habitualmente con radares ubicados en barcos o en aviones como el Miros OSD™ de la empresa Miros AS [19] , ó el SIGMA6 de la empresa Rutter [20]. Sin embargo, para realizar la detección y seguimiento de

vertido, el equipo que se puede instalar en el vehículo es un sensor óptico sumergible (Fluorímetro - fluometer). Este tipo de sensores detectan las concentraciones de moléculas de una sustancia en particular. El sensor HydroC™ [31] permite identificar la presencia de hidrocarburo aromático policíclico (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons “PAH”), compuesto orgánico que se encuentra en el petróleo, el carbón y en los depósitos de alquitrán. Otro sensor es el C3™ [63] que es capaz de diferenciar entre hidrocarburos crudos y refinados y realizar la medición de la turbidez del medio. Entre estos sensores se selecciona el C3, para ser instalado en el vehículo, en base a sus características operacionales, el peso (1.64 kg) y sus dimensiones físicas (23 cm de largo con un diámetro de 10 cm), que permiten ubicarlo en la proa del vehículo como se muestra en la Figura 3.4.



Figura 3.1. Sensor HydroC™ [31]



Figura 3.2. Sensor C3™ [63]

### 3.2 - Sensores para para realizar batimetría del lecho marino

Para la aplicación de seguimiento y predicción del desplazamiento de las manchas de hidrocarburos en zonas costeras se ha de recurrir a modelos de simulación donde es necesario conocer el relieve del suelo marino (profundidad oceánica) o batimetría.

Para realizar esta medición se pueden utilizar diferentes sensores entre los que se destacan el side scan y el multibeam sonar [21] [49] [64] [65] [66] [67]. El funcionamiento de un sonar se basa en el envío de una señal acústica (haz) orientada hacia el fondo marino a un determinado rango de frecuencias que determinan el máximo alcance y la

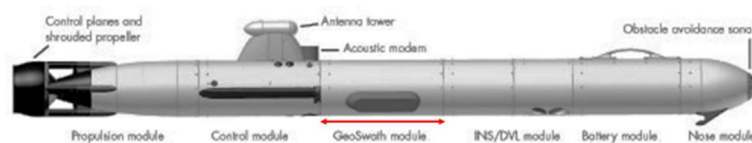
### Capítulo 3

resolución. El análisis de la onda reflejada permite realizar un mapa de la zona irradiada por el haz. El multibeam sonar es un instrumento que genera varios haces al mismo tiempo, dirigidos a diferentes zonas, con lo cual se logra el análisis de un franja o área en menos tiempo que si se utilizara un único haz, aunque el costo computacional para el análisis de los datos es mayor.

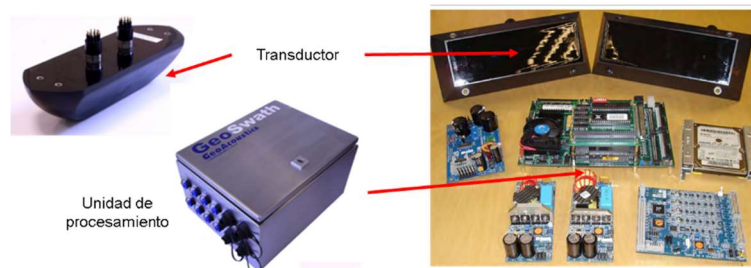
En la literatura se encuentran vehículos modulares como el Remus [68] [69] y el Gavia [70] [71] [72] que incluyen módulos con el sistema GeoSwath plus (Multibeam echosounder) de KONGSBERG [66] [67] [69] [73] [74] [75]. Aunque en el caso del vehículo Gavia existe otro modulo que puede ser utilizado para hacer batimetrías, que corresponde al MB-2250 que utiliza un BlueView 2250 de Teledyne [76]. Otros vehículos como el Sparus II [77] [78] [79] que utilizan un multibeam Delta T de la compañía IMAGENEX [80]. También existen otros Multibeam como el Gemini 620pd de Tritech [81]. En general la resolución de estos sistemas sobre el plano vertical se encuentra entre 36mm y 1.5mm, dependiendo de la frecuencia de operación. Sus dimensiones físicas varían como se muestra en la Figura 3.3. La imagen de la batimetría, es generada a través de diversos softwares, cada fabricante tiene su propio paquete de software. Pero en general todos requieren conocer la posición del vehículo en 3D y en algunos casos el perfil de velocidad del sonido.



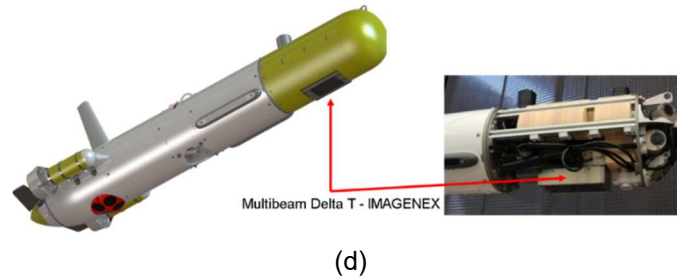
(a)



(b)



(c)



(d)  
Figura 3.3. Vehículos y sistemas para batimetría (a) Remus [68] (b) Gavia [70] (c) GeoSwath plus (Multibeam echosounder) de KONGSBERG [66] (d) Sparus II [77] [78] [79] - multibeam Delta T IMAGENEX [80]

En la literatura también se encuentran trabajos en los cuales procesando los datos obtenidos de un sensor DVL-ADCP (acoustic Doppler current profiler) se obtiene una batimetría del lecho marino [82] [83]. Otros trabajos combinan los datos obtenidos del sensor CTD con la información del sensor ADCP [84] para obtener la batimetría. El ADCP es un sensor que se utiliza para medir la velocidad y las corrientes del agua y utiliza el principio del efecto Doppler.

Del análisis realizado de los diferentes sistemas para realizar batimetrías instalables en el vehículo Guanay II, se selecciona el GeoSwath plus (Multibeam echosounder) de KONGSBERG. Este sistema como se mostró anteriormente (Figura 3.3c) es modular y permite instalar los transductores en la parte inferior del vehículo y la electrónica que compone el módulo de procesamiento puede ser combinada con la electrónica del vehículo e instalada dentro del cilindro estanco propio del vehículo (ver Figura 3.4).

### 3.3 - Seguimiento de hidrocarburos en el mar y posicionamiento en inmersión

Para realizar el seguimiento de rutas durante la navegación en inmersión, es necesario conocer la posición del vehículo cuando está sumergido. Actualmente el vehículo cuenta con un GPS para conocer su posición en superficie, pero este no es útil durante la navegación en inmersión. También dispone de un sistema inercial (INS, *Inertial Navigation System*). Estos sensores proporcionan mediciones de velocidad o aceleración en unos ejes de referencia ubicados sobre el propio sensor [85]. Así pues, son sistemas de posicionamiento relativo que mediante la integración de la aceleración o velocidad se conoce la posición relativa del vehículo respecto a la posición anterior. Aunque el Guanay II dispone de un INS IG-500A [85], que es adecuado para conocer el comportamiento del vehículo, este sensor no dispone de una resolución adecuada para

obtener una buena aproximación de la posición en inmersión y poder realizar la navegación en inmersión.

Por esta razón, para poder navegar en inmersión, es necesario adicionar otro sensor al vehículo que permita conocer su ubicación bajo el agua. Uno de los sensores más populares y asequible, utilizados en AUV's [86] [87] para este propósito, es el DVL (Doppler Velocity Log). Es un sensor basado en un sonar activo que proporciona mediciones de velocidad del vehículo en un eje de referencia ubicado sobre el propio sensor. Por tanto, es un sistema de posicionamiento relativo que mediante la integración de la velocidad se conoce la posición relativa del vehículo respecto a la posición anterior. Combinando los datos del DVL con los datos del GPS y del sensor de presión del vehículo, se podrá determinar la posición en las tres dimensiones durante la navegación. De los DVL comerciales que existen en el mercado, existe el Pathfinder DVL [88] [89] de Teledyne que se ajusta a los requerimientos operacionales necesarios por el vehículo.

En la Figura 3.4, se muestra un boceto de las posibles ubicaciones de los diferentes sensores seleccionados en este capítulo en el vehículo Guanay II. Aunque en el desarrollo de la presente Tesis, no serán instalados estos sensores en el vehículo, y, por tanto, no se realizarán pruebas reales de detección de hidrocarburos. En los siguientes capítulos se mostrarán las modificaciones realizadas para ajustar la maniobrabilidad del vehículo, para en el futuro utilizar el vehículo Guanay II en la detección, seguimiento y medición de parámetros oceanográficos para el control de derrames de hidrocarburos.

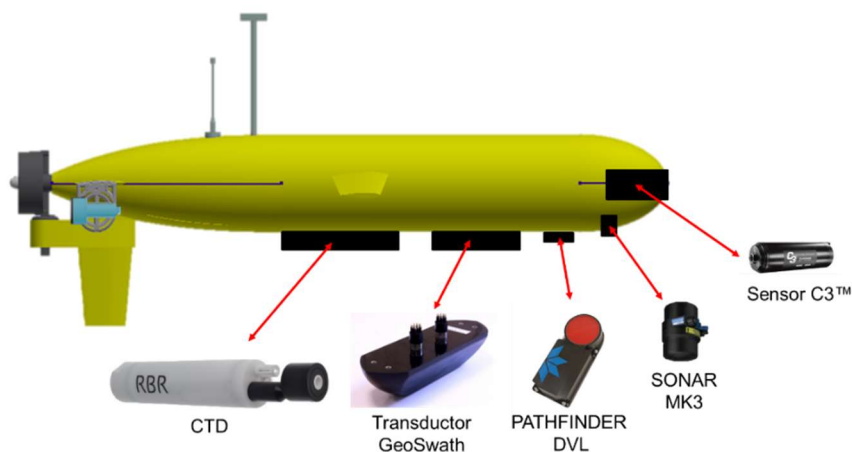


Figura 3.4. Boceto de las posibles ubicaciones de los diferentes sensores seleccionados en el vehículo Guanay II

## Capítulo 4.

# Sistema de detección de obstáculos para el vehículo Guanay II

El vehículo Guanay II, fue diseñado inicialmente para navegar autónomamente por la superficie del agua en zonas costeras, siguiendo una trayectoria previamente definida. Sin tener en cuenta los obstáculos presentes en el entorno de navegación y asumiendo que los puntos de control de la trayectoria son fácilmente accesibles.

En busca de aumentar la versatilidad y seguridad del vehículo durante la navegación en zonas costeras, superando los obstáculos presentes, y evitando cualquier posibilidad de colisión se ha propuesto el diseño de un sistema de detección y evasión de obstáculos. En este capítulo se explican las características del diseño e implantación de la etapa de detección de obstáculos y en el siguiente capítulo las características de la etapa de evasión de obstáculos.

A partir de las características operacionales y de navegación propias de vehículo Guanay II se han definido los siguientes requerimientos que debe cumplir el sistema de detección de obstáculos:

- Baja carga computacional
- Bajo tiempo de detección de obstáculos en el entorno
- Funcionar autónomamente, en tiempo real y en paralelo con los otros sistemas del vehículo
- Compatibilidad con el sistema de alimentación, la unidad de control y la estructura física del vehículo

### 4.1 - Revisión de sistemas de detección de obstáculos

En la literatura es posible encontrar diferentes vehículos que disponen de sistemas que pueden ser utilizados para la detección de obstáculos como lo son el REMUS, SAUV II, MAYA AUV, SPARUS II y NPS ARIES [90] entre otros [91]. Como lo indica Lane [92], la

detección de obstáculos requiere de un instrumento SONAR (Sound Navigation And Ranging) multi-haz de alta resolución y de gran confiabilidad.

### 4.1.1 - Sensor SONAR

El dispositivo SONAR, en nuestro caso es un dispositivo de tipo activo, el cual genera una onda mecánica (pulso acústico - haz) que se propaga por el agua. Ante la presencia de un obstáculo dentro del área de medición, la onda mecánica choca contra el obstáculo, generando una reflexión que es recibida por el dispositivo. En el interior del dispositivo existe un sistema de muestreo y cuantificación de la señal, la tasa de muestreo se relaciona con el número de puntos de medida o la resolución (ver Tabla 4-1).

En general existen dos tipos de ondas mecánicas enviadas por un SONAR. Las ondas que tienen una sola frecuencia (Monotonic) y las ondas que hacen un barrido de frecuencias (CHIRP Compressed High Intensity Radar Pulse). En la Figura 4.1 se muestra el comportamiento de un SONAR Monotonic, en este caso la reflexión generada por el primer obstáculo, se combina con la reflexión generada por el segundo obstáculo, de un modo que no se puede detectar correctamente la presencia y ubicación del segundo obstáculo. En el caso de la Figura 4.2 que corresponde a un SONAR CHIRP, la onda recibida de la combinación de las reflexiones del obstáculo 1 y 2 es clara y permite detectar la presencia y ubicación de cada uno de los obstáculos.

Comercialmente se encuentran dos tipos de SONAR: mecánicos y multi-haz. Los SONAR mecánicos (ver Figura 4.1y Figura 4.2), generan un solo haz (Monotonic o CHIRP) de una apertura vertical que generalmente está en un rango de 20° a 40° y con una apertura horizontal pequeña en el rango de 1° a 3°. Este único haz es rotado mecánicamente, en un rango ajustable de 0° a 360°. Típicamente estos dispositivos arrojan un vector con las muestras correspondientes a cada haz. Los SONAR multi-haz (ver Figura 4.3), generan entre 256 y 512 haces al mismo tiempo, y cubren un área de detección de 120° aproximadamente.

En la Tabla 4-1 se realiza una comparación cuantitativa de tres modelos de SONAR comerciales. Los dos primeros son SONAR mecánicos, se observa que el Trittech Micron [93] tiene mejores características operacionales que el SONAR Imagenex. Entre el SONAR Micron y el Gemini se observa que el sonar Gemini, tiene mejores prestaciones;



dato que permite analizar una superficie mayor instantáneamente y con mayor resolución. En contrapartida el tamaño, peso y costo son excesivos. Por esta razón se escoge el SONAR Tritech Micron MK3.

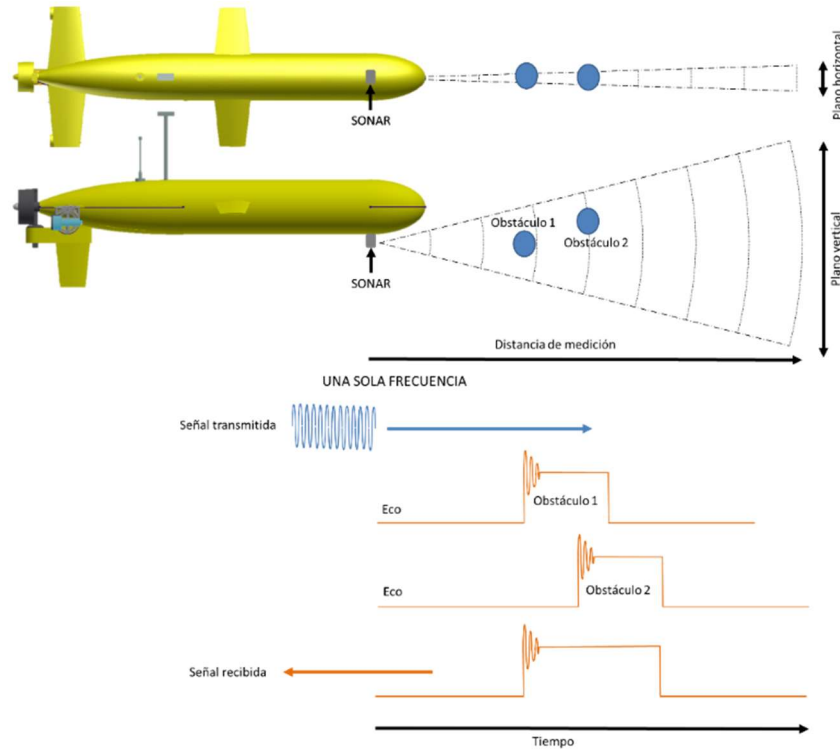


Figura 4.1. Características del funcionamiento de SONAR tipo monotonic

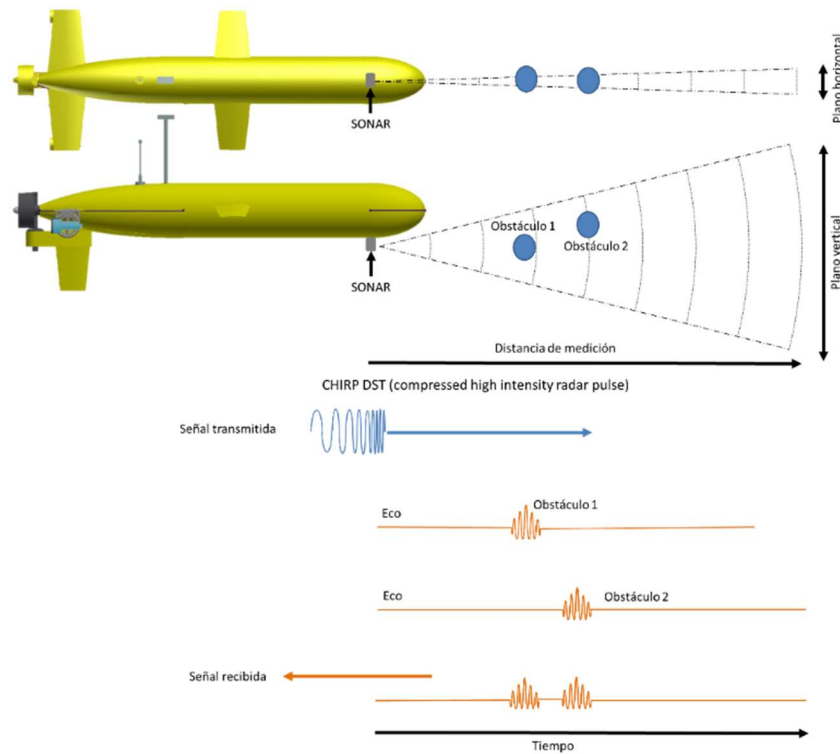


Figura 4.2. Características del funcionamiento de SONAR tipo CHIRP

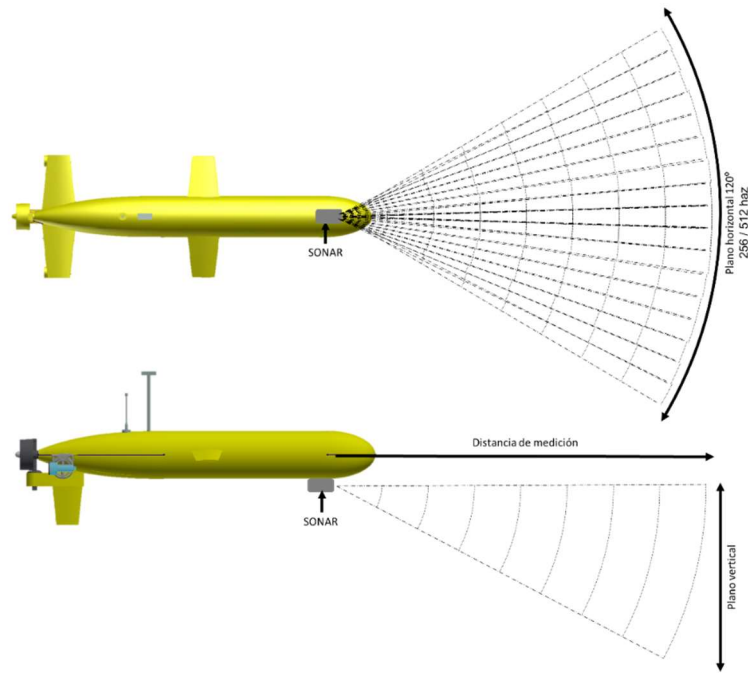


Figura 4.3. Características del funcionamiento de SONAR tipo multihaz (MULTIBEAM IMAGING SONAR)

Tabla 4-1. Comparación entre las características de diferentes tipos de SONAR

Parámetro	IMAGENEX 852	TRITECH Micron MK3	TRITECH Gemini 720is
Frecuencia de operación	675/850 kHz	700 kHz (CHIRP)	720 kHz (CHIRP)
Número de haces	1	1	512
Apertura vertical	22°	35°	20°
Apertura horizontal	2.5°	3°	120°
Rango mecánico de operación	360° (ajustable)	360° (ajustable)	120° (fijo)
Resolución mecánica de giro	3°/6°	0.45°/ 0.9°/ 1.8°	1°
Número de puntos por medida	250	800	1500
Resolución	20 mm	7.5 mm	8 mm
Distancia máxima	50 m	75 m	120 m
Profundidad máxima	300 m	750 m (3000 m)	1000/4000 m
Dimensiones	Alto = 62 mm Ancho = 45 mm Largo= 120 mm	Alto = 79 mm Ancho = 50 mm Largo= 68 mm	Alto = 81 mm Ancho = 135 mm Largo= 271 mm
Peso en agua	200 g	180 g	1.3 kg / 3 kg
Alimentación	22 a 30 V (2.5 W)	12 a 48 V	19 a 74V (16 -27W)
Aplicaciones	-Navegación ROV -Inspección -Búsqueda y recuperación	-Evasión de obstáculos en ROV (pequeños) -Reconocimiento de objetivo -Guía AUV	-Navegación - Evasión de obstáculos -Reconocimiento de objetivo -Detección de objetos
Precio	5445 €	(5600 - 11979) €	35000€

#### 4.1.2 - Plano de detección de los obstáculos

El plano de detección de los obstáculos está referenciado con la ubicación del SONAR en el vehículo, clásicamente el centro del haz, es ubicado sobre el plano horizontal de modo que solo se puede saber la ubicación del obstáculo en dos dimensiones (XY) (ver Figura 4.2). Sin embargo, es posible girar el SONAR, y orientarlo sobre el plano vertical para ubicar el obstáculo sobre (XZ).

En el vehículo REMUS el diseño del sistema de evasión ha sido dividido en dos etapas. En la primera etapa se diseñó el sistema para el plano horizontal [94] [95] y en la segunda para el plano vertical [90]. Utilizan un sonar de 2 dimensiones (forward-looking), de doble frecuencia de operación con una apertura de  $120^\circ$  en horizontal, una apertura vertical de  $24^\circ$  y un radio de exploración de 110 metros.

En esta Tesis, se plantea realizar la detección de obstáculos sobre el plano horizontal exclusivamente, dado que el SONAR MK3 no permite determinar la altura del obstáculo.

#### 4.1.3 - Detección de los obstáculos

La detección de obstáculos en general se realiza a partir de la matriz (imagen) [92] [96], que se genera de las señales proporcionadas por el SONAR (ver Figura 4.4). Esta matriz es de 3 dimensiones, las dos primeras ubican al obstáculo en XY y la tercera dimensión hace referencia a la existencia del obstáculo. A partir del valor generado por el cuantificador interno del sonar, el cual en el caso del SONAR MK3 es de 8 bits, se generan valores 0 a 255.

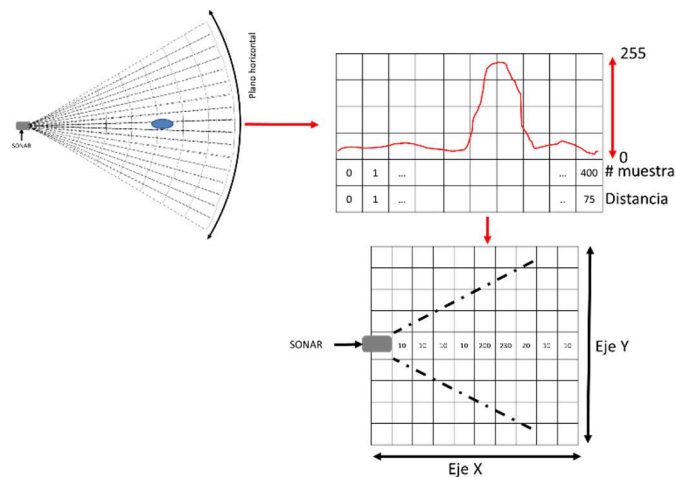


Figura 4.4. Diagrama de generación de matriz (imagen) del área escaneada

A las señales proporcionadas por el sonar [92] [96], que conforman la matriz, se les aplica un filtro para la eliminación del ruido. Posteriormente se aplica un filtro threshold [96], con el propósito de discriminar los obstáculos. Sobre la matriz resultante se buscan los obstáculos presentes, en base a:

- El tamaño del objeto
- El área
- El perímetro
- La superficie
- El centro de masa

Esta identificación se realiza a partir del análisis de cada una de las posiciones de la matriz o de la media y la varianza, de las distribuciones estadísticas. En este trabajo, inicialmente se realiza la construcción de una matriz (imagen) y posteriormente su procesado para detectar los obstáculos presentes.

## 4.2 - Diseño del sistema de detección de obstáculos para el vehículo Guanay II

El diseño de este sistema se centra en la utilización de un sensor del tipo SONAR MK3 fabricado por Tritech y la detección de obstáculos sobre el plano horizontal. El sistema está dividido en tres bloques, el primer bloque corresponde a la adquisición de señales e incluye el hardware. El segundo bloque corresponde al tratamiento y caracterización de las señales adquiridas y finalmente, en el tercer bloque se realiza la interpretación del escenario (Detección de obstáculo). En los siguientes apartados se describen las características de cada uno de estos bloques.

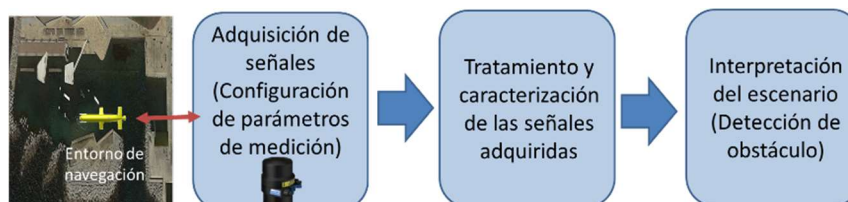


Figura 4.5. Diagrama general del sistema de detección de obstáculos

#### 4.2.1 - Adquisición de señales y hardware

El SONAR MK3 de Tritech, que se conecta a la unidad de control del Guanay II (PC-104) (Ver Figura 4.6) a través de un conversor RS485. Dada la configuración de la unidad de control del vehículo, los algoritmos para el control del SONAR se desarrollan mediante el software LabVIEW de National Instruments. En los siguientes apartados se muestran las particularidades del sensor y las características del algoritmo desarrollado para controlarlo.

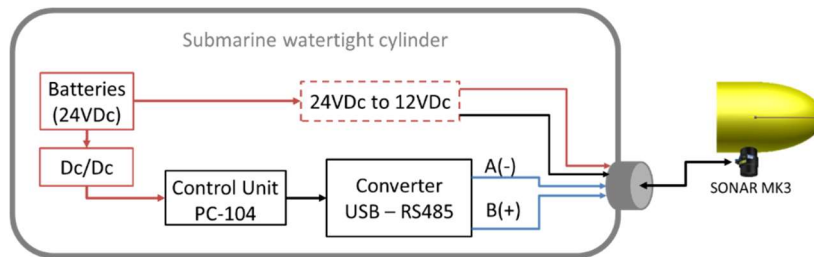


Figura 4.6. Diagrama de conexión del SONAR en el Guanay II

##### 4.2.1.1 - Características y especificaciones del SONAR MK3

El SONAR MK3 es un dispositivo de barrido mecánico, de forma cilíndrica de pequeñas dimensiones, 79mm de largo x 68 mm de sección (ver Figura 4.7) que se ajusta a las dimensiones del vehículo y se ubica en la parte inferior de la proa del Guanay II. De acuerdo con las indicaciones del fabricante [93] [97], este dispositivo ha sido diseñado para la detección de obstáculos en ROVs de bajo costo, reconocimiento de objetivos y guía de AUV. Este sensor utiliza la tecnología CHIRP (Compressed High-Intensity Radiated Pulse), tecnología que permite enviar un barrido de frecuencias, centrado en 700kHz, consiguiendo imágenes de mayor resolución. Dentro de las especificaciones operacionales de este SONAR se encuentra que la profundidad máxima a la que puede ser sumergido es de 750m y que el rango de alimentación es de 12-48VDC a 4VA.



Figura 4.7. Micron Sonar MK3 [93] [97]

Este sensor genera un solo haz con una apertura sobre el plano vertical de 35° y 3° sobre el plano horizontal. El sistema mecánico interior, permite escanear el entorno en un rango variable de hasta los 360°. La resolución de giro es ajustable entre los valores 0.45°, 0.9° y 1.8°, la mínima distancia de medición es de 0.3m y el máximo alcance es de 75 m. El número de medidas que pueden ser adquiridas en un haz son 800, 400 o 200.

Este SONAR puede ser configurado por medio del protocolo RS485. Tritech dispone de un software propio para Windows que permite gestionar desde un PC o laptop la configuración y la adquisición de las señales en modo manual. Dado que el vehículo Guanay II opera bajo la plataforma Linux y de forma autónoma, se ha diseñado un algoritmo compatible con la unidad de control del vehículo para realizar la configuración, control, adquisición y procesado de las señales del sonar, que se explica en el siguiente apartado.

### **4.2.1.2 - Comunicación y adquisición de datos**

El algoritmo de control, configuración y adquisición de señales está dividido en cinco fases (ver Figura 4.8). En la primera fase se establece la comunicación entre la unidad de control y el dispositivo, abriendo el puerto de comunicación destinado al SONAR y verificando el estado de la conexión mediante la recepción del comando "Alive". Si la unidad de control verifica la comunicación, se ejecuta la segunda fase (BBuserData). Esta segunda fase permite verificar la configuración de los parámetros de operación como: sentido giro, giro continuo o segmentado, orientación de la cabeza arriba / abajo. Una vez superada esta fase, se verifica la existencia de los parámetros de medición, si no existen se ejecuta la fase de configuración y si existen el sistema pasa a la fase de adquisición de datos.

En la quinta fase, para la adquisición de datos la unidad de control envía al sonar una solicitud de toma de datos y el sonar responde con los datos correspondientes a la medición. Al recibir este mensaje el algoritmo organiza la información proveniente de la medición formando una imagen, y se guarda una copia del mensaje en un archivo txt. Este algoritmo de solicitud y respuesta se ejecuta en un bucle indefinidamente.

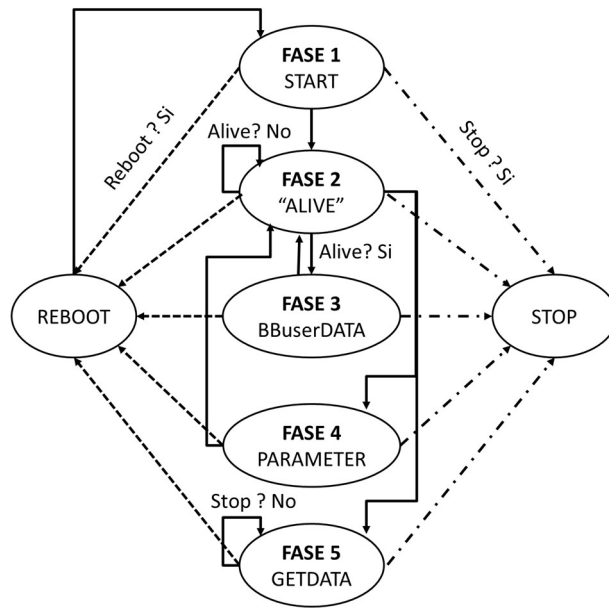


Figura 4.8. Diagrama del algoritmo de control, configuración y adquisición de señales del SONAR MK3

Los parámetros de medición que se pueden configurar (ver Figura 4.9) son:

- Rango mecánico de operación (RMO): Se define como los puntos de inicio y de final del barrido (recorrido) que realiza el sonar, entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ .
- Resolución mecánica de giro (RMG): Corresponde a la distancia existente entre los puntos donde se emiten los haces ( $0.45^\circ$ ,  $0.9^\circ$  o  $1.8^\circ$ )
- Distancia máxima (DM): Determina la distancia máxima de medición 75 m.
- Número de puntos por medida ("NP"): Determina el número de muestras que se adquieren por cada haz con un máximo de 800.

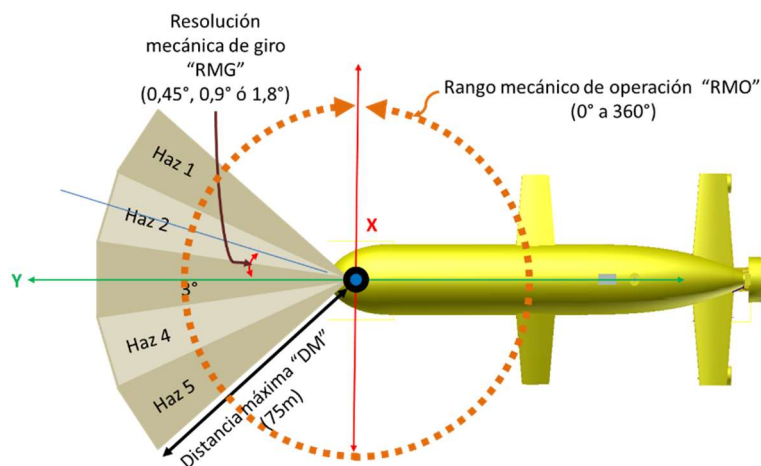


Figura 4.9. Parámetros de medición del SONAR

## Capítulo 4

Estos parámetros son configurados desde la interfaz de usuario desarrollada (ver Figura 4.10), también se puede configurar el puerto de comunicación, y la dirección donde se guardan los archivos de medición.

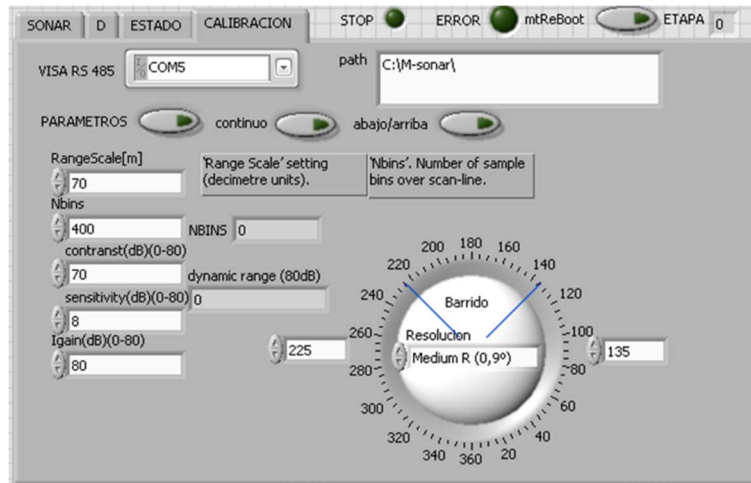


Figura 4.10. Interfaz de usuario del software desarrollado donde se configuran los parámetros de operación del sonar.

En la pestaña de estado, se puede observar la configuración de los parámetros de operación del sonar (ver Figura 4.11)

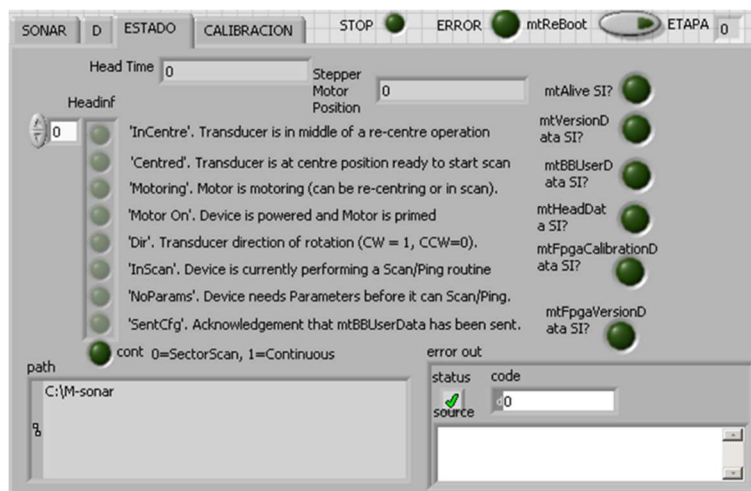


Figura 4.11. Pestaña de verificación de los parámetros de operación del sonar.

### 4.2.1.3 - Visualización de las señales adquiridas

Como se ha comentado anteriormente, el MK3 es un SONAR de barrido mecánico, que envía un solo haz en cada posición. Este SONAR genera un vector de la medición que se divide en dos sub-vectores:



- Vector de parámetros configurados en el SONAR. Contiene la configuración utilizada en la medición (RMO, RMG, DM, NP) y la posición mecánica relativa del haz.
- Vector de datos. Contiene NP muestras cuantificadas de la amplitud de señal recibida por el SONAR. Cada una de las muestras corresponde a un valor cuantificado por el dispositivo en 8 bits (0 a 255).

A partir de la posición del haz y de las NP muestras, se genera una matriz es de 3 dimensiones (Ver Figura 4.12). Las dos primeras ubican cada una de las NP muestras en el espacio (XY) y la tercera dimensión corresponde al valor proporcionado por el cuantificador de 8 bits. Esta matriz permite generar una imagen 2D, donde la tercera dimensión está representada por una escala de color.

En la interfaz de usuario, en la pestaña SONAR, se visualizan las señales adquiridas (ver Figura 4.13) en el mismo formato que el software del fabricante. En esta pestaña, hay botones que permiten activar el SONAR, limpiar el puerto de comunicación, reiniciar el SONAR y guardar archivos, entre otros procesos.

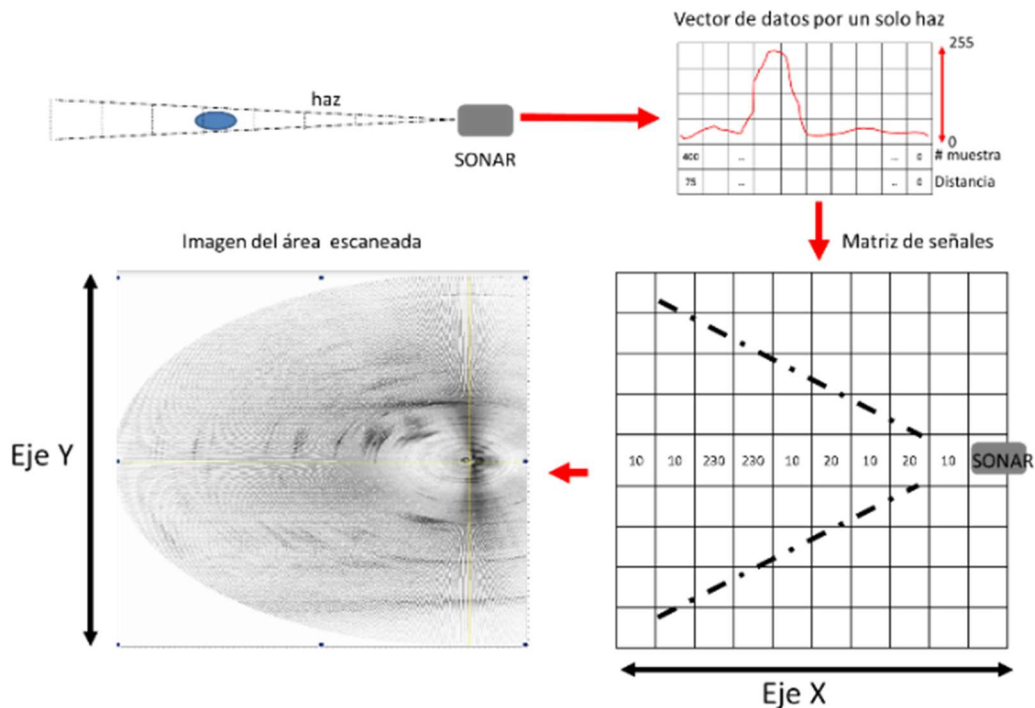


Figura 4.12. Proceso para generar la matriz de señales y la imagen del área escaneada.

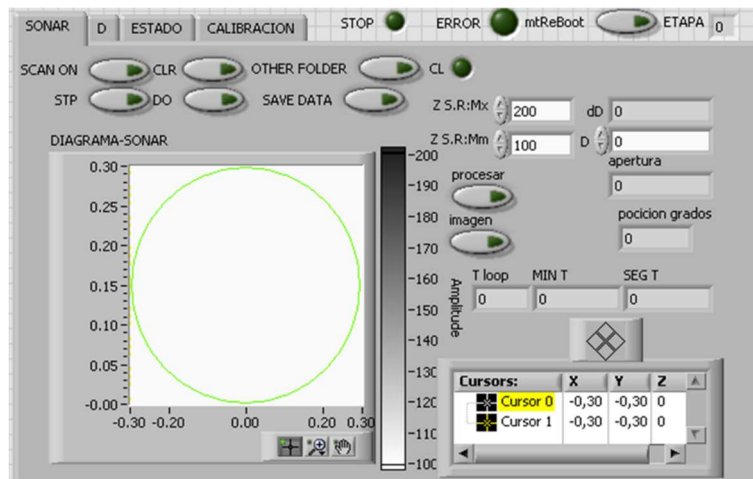


Figura 4.13. Pestaña SONAR, visualización de las señales adquiridas.

En los siguientes apartados se explicará cómo definir el valor apropiado para cada uno de los parámetros de medición.

#### 4.2.2 - Pruebas experimentales para verificar la adquisición de datos

Se han realizado una serie de pruebas experimentales para verificar el correcto funcionamiento del algoritmo diseñado para la adquisición de datos con el SONAR. Estas pruebas se han realizado en un acuario en un laboratorio (ver Figura 4.14), el acuario utilizado tiene 80cm de largo, 35cm de ancho y 40cm de alto. Para estas pruebas, se ha llenado a 10 cm, y se ha ubicado el SONAR en estado de flotación en el centro de una de las paredes laterales, la configuración de los parámetros de medición utilizada corresponde a:

- Rango mecánico de operación: 360°
- Resolución mecánica de giro: 0.45°
- Distancia máxima: 2m
- Profundidad del sonar: 5cm
- Número de puntos por medida: 800

Esta configuración se ha establecido en base a las dimensiones del acuario, y con el propósito de tener una imagen con la mayor resolución se ha utilizado el máximo valor del rango mecánico de operación, el máximo número de puntos por medida y la mínima resolución mecánica de giro.

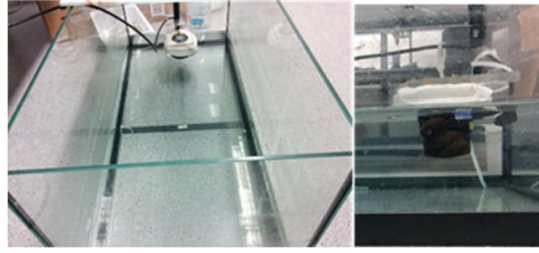


Figura 4.14. Acuario utilizado para las pruebas en el laboratorio

En la Figura 4.15 se muestran la imagen generada por el software del fabricante (b) y la obtenida con el software desarrollado (a). Al comparar ambas imágenes se aprecia que son similares y las diferencias existentes corresponden a los parámetros de escala de color utilizados en cada una. Esto corrobora el buen funcionamiento del software desarrollado.

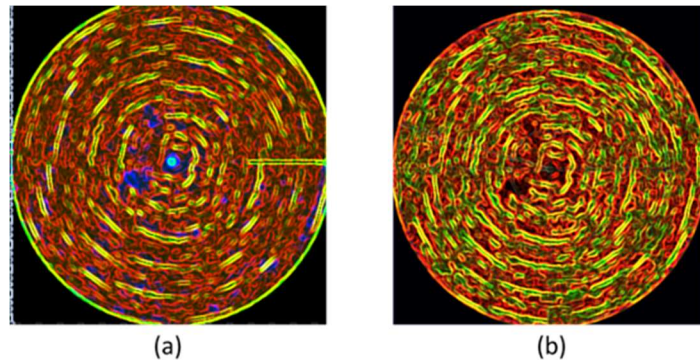


Figura 4.15. Comparación de los resultados obtenidos en pruebas de laboratorio, entre los datos inicialmente generados por (a) el software desarrollado y (b) software del fabricante del SONAR.

En la Figura 4.16, se observa la respuesta del sistema de adquisición en una segunda prueba, en la cual se han modificado la escala de color para discriminar mejor los obstáculos (color rojo). Para esta prueba la configuración utilizada es:

- Rango mecánico de operación:  $90^\circ$
- Resolución mecánica de giro:  $0.45^\circ$
- Distancia máxima: 1m
- Profundidad del SONAR: 5cm
- Número de puntos por medida: 400

El rectángulo en amarillo sobrepuesto, corresponde a la ubicación real de las paredes del acuario. Al analizar la imagen podemos ver que se aprecian las reflexiones

generadas por las paredes del acuario, pero aparecen otras debido a las dimensiones del acuario y a las reflexiones de las ondas en las esquinas del acuario.

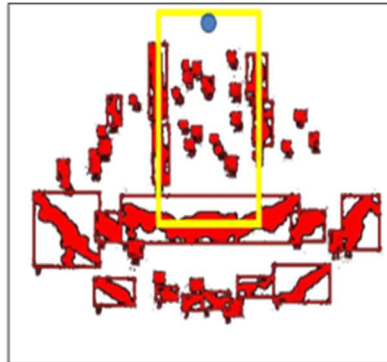


Figura 4.16. Resultado obtenido en pruebas de laboratorio

### 4.2.3 - Pruebas experimentales para verificar la adquisición de datos y caracterizar el funcionamiento del SONAR MK3

También, se han de desarrollado pruebas en el embarcadero del puerto de Vilanova i la Geltrú, Barcelona (41.215030, 1.731398) (ver Figura 4.17), con el propósito de verificar la adquisición de datos y caracterizar el funcionamiento del SONAR MK3.



Figura 4.17. Pruebas experimentales (a) ubicación del sonar, (b) ubicación de los objetos

En la Figura 4.17y Figura 4.18, se observa la distribución general de los objetos presentes en este entorno, En la Figura 4.18 se especifican las dimensiones generales del entorno y la ubicación del sonar. El SONAR se ubica a 10cm de profundidad y a 1.5m de una de las paredes del embarcadero. Esta prueba consiste en hacer un barrido de 360° con un radio de 30m. El objetivo de hacer pruebas en este escenario es determinar si sobre la imagen resultante, es posible discriminar los muros o paredes, botes y otros objetos de menor tamaño presentes en este entorno.

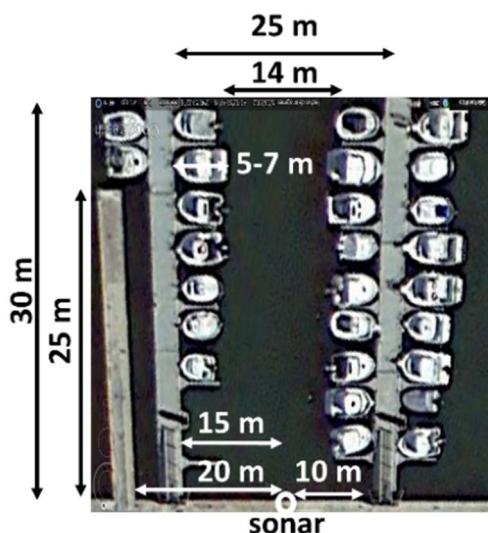


Figura 4.18. Imagen satelital (Google Earth) del puerto donde se puede observar la distribución general de los objetos

Para esta prueba se han utilizado los siguientes parámetros de configuración:

- Rango mecánico de operación:  $360^\circ$
- Resolución mecánica de giro:  $0.45^\circ$
- Distancia máxima: 30m
- Profundidad del SONAR: 10cm
- Número de puntos por medida: 400

El resultado obtenido en el escaneo realizado en esta zona del embarcadero se presenta en la Figura 4.19. El color blanco se asocia con baja reflexión de la señal, es decir con que no hay un objeto. Por el contrario, el color negro se asocia con el máximo valor de la reflexión de la señal que corresponde a la presencia de un objeto en esa posición.

Analizando la imagen cualitativamente, se determinan los sectores donde el color es más oscuro. Con base a esto y a la ubicación del SONAR, se pueden identificar (ver Figura 4.20) la pared donde se soporta el SONAR (a) y las pasarelas del puerto (b). También, existen otros sectores que se pueden asumir como objetos (c). Es importante considerar en este análisis, que este SONAR dispone de una tecnología (CHIRP) que permite discriminar diferentes obstáculos ubicados en forma escalonada (ver Figura 4.2). Aunque, es imposible determinar el tipo de objeto.

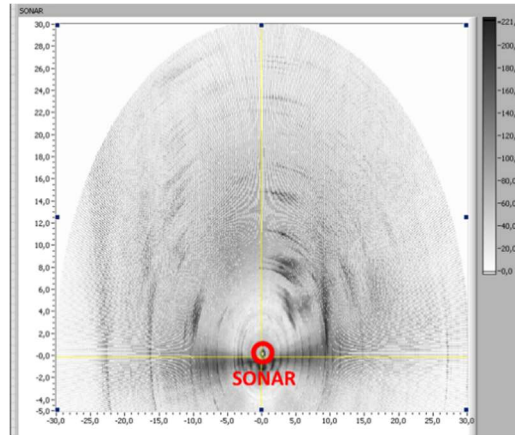


Figura 4.19. Imagen generada a partir de las señales adquiridas por el sonar

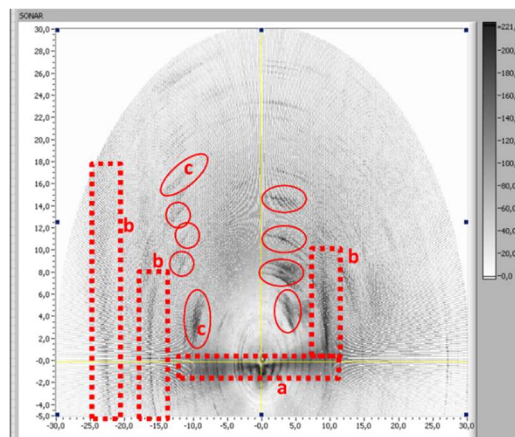


Figura 4.20. Análisis subjetivo de la imagen obtenida

En la Figura 4.21 se realiza una comparación entre la imagen satelital y la imagen generada. Esta comparación permite ratificar la discriminación de las paredes del embarcadero, y otros objetos como barcos presentes durante las pruebas.

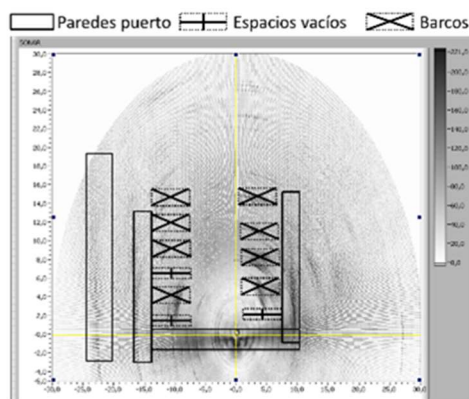


Figura 4.21. Comparación entre la imagen generada a partir de las señales adquiridas y la imagen satelital obtenida de Google Earth

Los resultados experimentales obtenidos han permitido verificar el correcto funcionamiento del algoritmo de adquisición y establecer la capacidad del algoritmo y del SONAR, para discriminar la existencia de objetos en el entorno.

#### 4.2.4 - Configuración de los parámetros de medición del SONAR

El SONAR MK3, dispone de cuatro parámetros indispensables que deben ser configurados para realizar una correcta medición. Estos parámetros son:

- Rango mecánico de operación (RMO)
- Resolución mecánica de giro (RMG)
- Número de puntos por medida (NP)
- Distancia máxima (DM)

En este apartado, se realiza un estudio para determinar los valores óptimos de estos parámetros; para obtener un tiempo de ejecución bajo, una buena resolución de imagen y una capacidad de detección de obstáculos de pequeño tamaño.

Este estudio se basa en la realización de comparaciones del funcionamiento del sonar realizadas con diferentes configuraciones de parámetros de medición. Los análisis de estas comparaciones reflejan relaciones y correlaciones entre los parámetros que permite determinar la configuración más apropiada.

##### 4.2.4.1 - Área de detección del haz

Este SONAR genera un haz (ver Figura 4.22) con una apertura vertical de 35° y una apertura horizontal de 3°, formando un área de detección rectangular cuyas dimensiones dependerá de la distancia con respecto al SONAR. Cualquier objeto que se encuentre dentro de esta área debería ser detectado. Las dimensiones del área de detección, es decir el ancho (W) y el alto (H) se pueden determinar a partir de las siguientes ecuaciones:

$$H[m] = 2 * d[m] * \tan(35^\circ/2) \quad (4-1)$$

$$W[m] = 2 * d[m] * \tan(3^\circ/2) \quad (4-2)$$

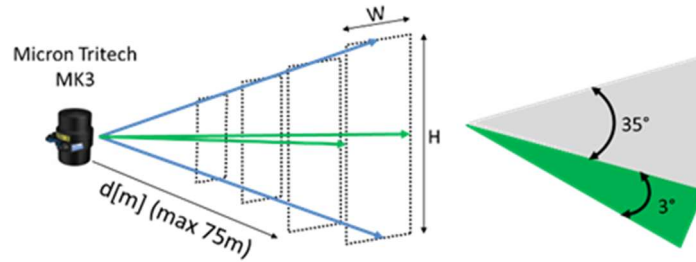


Figura 4.22. Área de detección generada por un haz

Aplicando las ecuaciones (4-1) y (4-2), para diferentes casos de distancia ( $d$ ), se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 4-2. Estos resultados relacionan el área de detección con la distancia. Se observa que cuanto mayor es la distancia existente entre el sonar y el punto de medición ( $d$  [m]) mayor será el área de detección.

Tabla 4-2. Dimensiones del área de detección

$d$ [m]	Dimensiones del área de detección (H X W)
70	44 X 3.6 [m]
60	37 X 3 [m]
50	31 X 2.6 [m]
40	25 X 2 [m]
30	18 X 1.5 [m]
20	12 X 1 [m]
15	9 X 0.7 [m]
10	6 X 0.5 [m]
5	3 X 0.2 [m]
1	0.63 X 0.05 [m]

#### 4.2.4.2 - Relación entre: la distancia entre los centros de haz ( $L$ ), el rango mecánico de giro (RMG) y el porcentaje de sobremuestreo del área de detección (PSM)

Entre los centros de dos haces consecutivamente enviados por el sonar, existe una distancia " $L$ " (ver Figura 4.23), que depende de la resolución mecánica de giro (RMG) y cambia con respecto a la distancia " $d$ ". " $L$ " puede ser calculada a partir de la ecuación (4-3). En la Tabla 4-3 se muestran algunos valores de " $L$ " para diferentes valores de RMG y " $d$ ".



$$L = 2 * d * \sin\left(\frac{RMG}{2}\right) \quad (4-3)$$

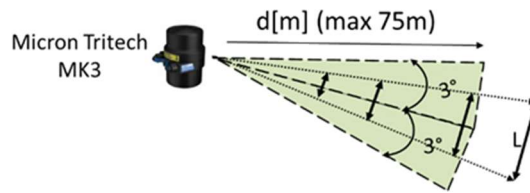


Figura 4.23. "L" Distancia entre los centros de haz

Tabla 4-3. Distancia entre centros de haz

d [m]	L[m] RMG=0.45°	L[m] RMG=0.9°	L[m] RMG=1.8°
70	0.549	1.09	2.2
60	0.47	0.94	1.88
50	0.392	0.78	1.6
40	0.32	0.62	1.25
30	0.25	0.47	0.94

Relacionando los resultados de la Tabla 4-2 y Tabla 4-3, se encuentra que, al enviar dos haces consecutivos, cada uno genera su propia área rectangular de detección (Tabla 4-2). Debido a las dimensiones de este rectángulo y a la distancia existente entre los centros de los haces "L" (Tabla 4-3), existirá una porción de espacio que será muestreada por ambos haces, es decir habrá un sobremuestreo (ver Figura 4.24) de una porción del área de detección.

El porcentaje del área sobre muestreada, para cada uno de los tres casos de resolución mecánica de giro se muestra en la Tabla 4-4. Este sobremuestreo permite aumentar la probabilidad de detección de obstáculos de menor tamaño. Pero genera un aumento en el costo computacional y en el tiempo de ejecución del algoritmo.

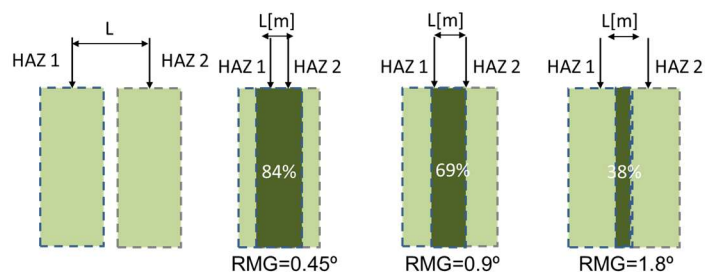


Figura 4.24. Porcentaje de sobremuestreo del área de detección

Tabla 4-4. Porcentaje de sobre muestreo (PSM)

<b>PSM [%] RMG=0.45°</b>	<b>PSM [%] RMG=0.9°</b>	<b>PSM [%] RMG=1.8°</b>
84%	69%	38%

#### 4.2.4.3 - Relación entre: la distancia máxima de operación (DM), tiempo de ejecución del sistema (TE) y la máxima distancia recorrida por el vehículo (DR)

El propósito de este apartado es establecer y analizar la relación existente entre la distancia máxima de operación (DM), el tiempo de ejecución del sistema (TE) y la máxima distancia recorrida por el vehículo (DR) en el tiempo de ejecución del sistema (TE). El tiempo de ejecución del sistema (TE), corresponde al tiempo que requiere el sistema para realizar el barrido de una área. Este tiempo de ejecución del sistema está compuesto por: los tiempos de: adquirir las señales, generar la imagen del área escaneada y ejecutar un algoritmo de detección de obstáculos (apartado 4.2.5.1).

Para determinar el valor del tiempo de ejecución del sistema se han realizado una serie de pruebas en el laboratorio, que permiten medir experimentalmente el tiempo de ejecución del sistema. Se ha configurado el parámetro de rango mecánico de operación en 90°, la resolución de giro en 0.45°, el número de puntos por medida en 400 y una variación del parámetro de distancia máxima de operación (DM) entre 0.3 y 75m, que corresponden al valor mínimo y máximo que se pueden asignar a este parámetro. En la columna 2 de la Tabla 4-5 se muestran los valores del tiempo de ejecución (TE) medido experimentalmente para cada uno de los casos.

A partir del tiempo de ejecución del sistema (TE) es posible calcular la distancia recorrida por el vehículo en este tiempo (DR), a partir de la siguiente ecuación:

$$DR = v_{max} \cdot TE \tag{4-4}$$

En la Tabla 4-5 columna 3, se muestra el resultado del cálculo de la distancia recorrida (DR); para una velocidad máxima del vehículo de 1 m/s y diferentes valores de tiempo de ejecución (TE).

Es posible comparar la distancia máxima de medida (DM) y la distancia recorrida por el vehículo (DR), a través del cálculo de la diferencia entre las dos distancias (DM-DR). Esta distancia permite establecer el punto de inflexión en el cual la distancia máxima de barrido (DM) es mayor que la distancia recorrida por el vehículo; y define la mínima distancia (DM) que se puede configurar para realizar la adquisición de datos.

Tabla 4-5. Resultados experimentales de las relaciones entre las variables DM, TE y DR.

DM [m]	TE [s]	DR [m]	DM-DR [m]
0,3	12	12	-11.7
5	12,02	12,02	-7.02
15	12,035	12,035	2.965
25	12,036	12,036	12.964
35	13,037	13,037	21.962
45	15,62	15,62	29.38
55	18,23	18,23	36.77
65	21,03	21,03	43.97
75	23,41	23,41	51.59

#### 4.2.4.4 - Relación entre: el número de puntos por medida (NP), la distancia máxima de operación (DM), resolución de imagen (RI), rango mecánico de giro (RMG) y tiempo de ejecución (TE)

La resolución de imagen (RI), se establece a partir del número de puntos de medida (NP) y la resolución mecánica de giro (RMG). La resolución mecánica de giro define el área de escaneo y el número de puntos de medida define las dimensiones de la matriz que se genera con las señales adquiridas, teniendo como punto central al SONAR (ver Figura 4.25) (ver Tabla 4-6).

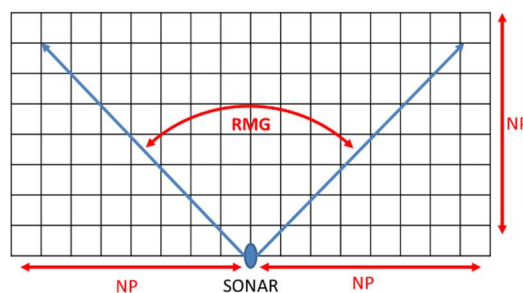


Figura 4.25. La resolución de imagen (RI)

A partir del número de puntos por medida (NP) y de la distancia máxima de operación (DM), se calcula la distancia entre puntos (Dpp) de medición siguiendo la siguiente ecuación:

$$D_{PP} = \frac{DM}{NP} \tag{4-5}$$

En la Tabla 4-6 se muestran los valores obtenidos de Dpp, para DM de 70m y NP de 800, 400 y 200. La distancia entre puntos, permite establecer el tamaño mínimo de un obstáculo para ser detectado.

La ecuación (4-5) indica que, para un valor de DM, se puede disminuir la distancia entre puntos Dpp incrementando el valor de NP. Sin embargo, se producirá un aumento del tiempo de ejecución del sistema (TE). Se han realizado pruebas experimentales en el laboratorio para cuantificar este efecto. Para estas pruebas se ha utilizado la siguiente configuración: rango mecánico de operación 90°, resolución mecánica de giro 0.9° y distancia máxima de operación 70m. Se ha modificado el número de puntos de medición, entre los valores de 800, 400 y 200. En cada una de las tres pruebas se ha medido el tiempo de ejecución del sistema (TE), los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4-6. En base a estos resultados se establece que, cuanto mayor es el número de puntos por medida (NP), mayor es la resolución de la imagen (RI) y por tanto se puede detectar un obstáculo de menor tamaño. Sin embargo, el tiempo de ejecución (TE) es mayor.

Tabla 4-6. Correlación entre los parámetros NP, RI, Dpp y TE

NP	RI [píxel]	Dpp [m]	TE [s]
<b>800</b>	1600x800	0.087	12
<b>400</b>	800x400	0.175	11.5
<b>200</b>	400x200	0.35	11

Se completa el análisis de la Tabla 4-6, estudiando la influencia que hay sobre el tiempo de ejecución (TE) si se varía el parámetro de resolución mecánica de giro (RMG) y el número de puntos por medida (NP).

Para ello se han realizado pruebas experimentales en el laboratorio para medir el valor de (TE). En estas pruebas la configuración utilizada ha sido: distancia máxima de operación de 70m y rango mecánico de operación de 90°. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4-7. Se establece que cuanto menor sea el valor del parámetro de rango mecánico de giro (RMG) y mayor el número de puntos (NP), mayor será el tiempo de ejecución (TE).

Tabla 4-7. Correlación entre los parámetros NP, RMG y TE

NP	TE [s] RMG=0.45°	TE [s] RMG=0.9°	TE [s] RMG=1.8°
800	23	12	5.75
400	22.75	11.5	5.75
200	22	11	5.5

#### 4.2.4.5 - Análisis de las relaciones y determinación de los valores óptimos de los parámetros de medición del SONAR.

En este apartado, se analizan las diferentes relaciones entre los parámetros de medición del sonar obtenidas en los apartados anteriores. Se propone un valor para el rango mecánico de operación (RMO), la resolución mecánica de giro (RMG), el número de puntos por medida (NP), y la distancia máxima (DM), que permite optimizar el proceso de adquisición de datos, para las condiciones de navegación del vehículo Guanay II, bajo los siguientes criterios:

- Obtener un pequeño tiempo de ejecución del algoritmo
- Obtener una buena resolución de imagen
- Capacidad de detección de obstáculos de pequeño tamaño

De los apartados anteriores se puede resumir que:

- La Tabla 4-5, indica que a mayor distancia de medición (DM) mayor es el tiempo de ejecución (TE), y que el mínimo tiempo de ejecución es aproximadamente 12s. Esto conlleva que no se puede configurar la distancia máxima de medición (DM) por debajo de los 15m, dado que la distancia recorrida por el vehículo (DR) en 12s será mayor que la distancia máxima de medición (DM), y el vehículo podría entrar en una zona donde no se analizó la existencia de obstáculos.
- La Tabla 4-6, indica que para un valor elevado de número de puntos de medición (NP) la distancia entre puntos (Dpp) será pequeña, aumentando la resolución de la imagen (RI). Sin embargo, se tendrá un mayor tiempo de ejecución del sistema (TE).
- La Tabla 4-7, indica que cuanto menor sea el valor del parámetro de rango mecánico de giro (RMG) y mayor el número de puntos (NP), mayor será el tiempo de ejecución (TE).

### Rango mecánico de operación (RMO)

El rango mecánico de operación (RMO) se calcula para garantizar un área de detección del SONAR adecuada a las dimensiones del vehículo Guanay II. Dado que las dimensiones físicas del vehículo son 0.7 m de alto, 1 m de ancho y 2.36 m de largo, y teniendo en cuenta la ubicación del sonar dentro del vehículo se propone disponer de un área de detección de 0.7 x 1 m a una distancia de 50 cm del SONAR. Con el propósito de asegurar un espacio libre de obstáculos, en el cual el vehículo pueda maniobrar o en el peor escenario detenerse sin colisionar.

Para conseguir esta área de detección se calcula el valor del rango mecánico de operación (RMO) a partir de la ecuación (4-6). Esta ecuación se obtiene a partir del análisis matemático de la Figura 4.26.

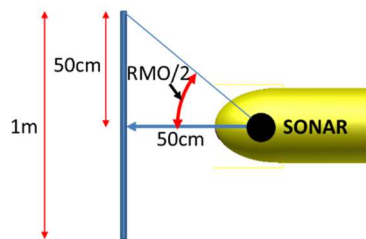


Figura 4.26. Rango mecánico de operación (RMO)

$$RMO = 2 * \tan^{-1} \left( \frac{0.5m}{0.5m} \right) = 90^\circ \quad (4-6)$$

De la ecuación (4-6) se obtiene que el valor del rango mecánico de operación (RMO) debe ser de 90°.

### Distancia máxima de medición

La distancia máxima de medición, es definida a partir de la correlación de los datos de la Tabla 4-5 y con la relación que existe entre la velocidad de avance y el radio de giro del vehículo [14] (ver Figura 4.27).

Cuando el rango mecánico de operación (RMO) es de 90°, se observa en la Tabla 4-5 que la distancia recorrida (DR) por el vehículo, varía entre 12m y 23m, respecto al valor de la distancia máxima de medición (DM). De acuerdo con la Figura 4.27, si el vehículo se desplaza a una velocidad constante de 1m/s, necesita un radio de giro de 50m. Con

estas dos consideraciones, se propone que distancia máxima sea la suma de la distancia recorrida (DR) y el radio de giro del vehículo. Por tanto, Dm esta entre 62m y 73 m. Por esta razón se define una distancia máxima de operación de 70m.

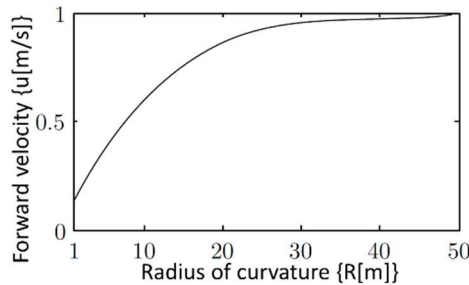


Figura 4.27. Velocidad máxima de avance con respecto al radio de curvatura [14]

### Resolución mecánica de giro (RMG) y número de puntos por medida (NP)

A partir de la correlación de la Tabla 4-4, Tabla 4-6 y Tabla 4-7, se definen tres tipos de resolución de imagen: alta resolución, media resolución y baja resolución. Sus características de configuración se muestran en la Tabla 4-8.

Tabla 4-8. Tipos de resolución de imagen y sus características

Tipo	Características				
	NP	Dpp [m]	RMG	TE [s]	PSM [%]
<b>Alta</b>	800	0.087	0.45°	23	84
<b>Media</b>	400	0.175	0.9°	11.5	69
<b>Baja</b>	<200	0.35	1.8°	5.5	38

Los valores de resolución mecánica de giro (RMG) y número de puntos por medida (NP), son establecidos a partir de la Tabla 4-8 y seleccionados para cumplir con los criterios cualitativos propuestos inicialmente que corresponden a: obtener un pequeño tiempo de ejecución del algoritmo, una buena resolución de imagen y una detección de obstáculos de pequeño tamaño. En la Tabla 4-9, se muestran los valores establecidos para los parámetros de medición.

Tabla 4-9. Parámetros de configuración óptimos para la adquisición de datos

Parámetros	Valor
<b>Rango mecánico de operación (RMO)</b>	90°
<b>Resolución mecánica de giro (RMG)</b>	0.9°
<b>Número de puntos por medida (NP)</b>	400
<b>Distancia máxima (DM)</b>	70 m

### 4.2.5 - Algoritmo para la detección de obstáculos

En este apartado se diseñan dos estrategias para realizar el tratamiento, caracterización de las señales adquiridas y finalmente la interpretación del escenario para obtener la estimación de la ubicación de los obstáculos.

La primera estrategia que se presenta, realiza la detección de obstáculos mediante el procesamiento de la imagen que se genera en el bloque de adquisición. Mientras que la segunda estrategia, procesa directamente cada una de las señales adquiridas y divide el área de detección en tres sectores.

#### 4.2.5.1 - Detección de obstáculos por detección de bordes en imagen

Este algoritmo de detección de obstáculos (ver Figura 4.28) se inicia reduciendo el clutter y la incertidumbre de la imagen, proporcionada por el algoritmo de adquisición de señales. Para ello, se corrige el brillo, el contrastes, se ajusta la gama de colores y se aplica un filtro gaussiano.

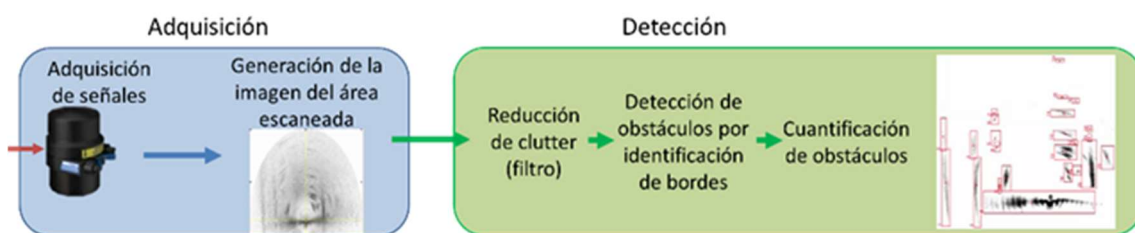


Figura 4.28. Diagrama general del proceso de detección de obstáculos

Utilizando esta nueva imagen se realiza la identificación automática de obstáculos, basada en la identificación de bordes, el tamaño, la forma, la ubicación y la tonalidad del objeto por medio de las librerías IMAG CannyEdgeDetection y IMAG Count Objects del módulo visión del software LabVIEW de National Instruments. Como resultado de este procesado se obtiene una gráfica en la cual se señalan cada uno de los obstáculos detectados y una tabla de datos con las coordenadas de ubicación de dichos obstáculos y sus dimensiones.

Utilizando esta estrategia se han realizado dos pruebas en el puerto de Vilanova i la Geltrú. Los resultados obtenidos en estas pruebas se presentan en la Figura 4.29 y Figura 4.30. Para la prueba correspondiente a la Figura 4.29 la configuración de los parámetros de medición del SONAR es:



- Rango mecánico de operación (RMO): 360°
- Resolución mecánica de giro (RMG): 0.45°
- Distancia máxima (DM): 30m
- Profundidad del sonar: 10cm
- Número de puntos por medida (NP): 400

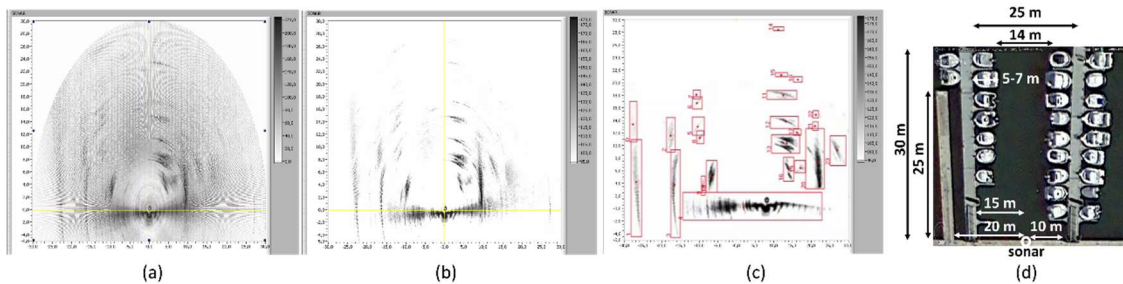


Figura 4.29. Detección de obstáculo (a) Imagen correspondiente a las señales adquiridas, (b) imagen procesada (filtrada), (c) resultado de la identificación automatizada de obstáculos y (d) el mapa de la zona tomado de Google Earth (latitud 41°12'54"N longitud 1°43'53"E)

Mientras que, para la prueba correspondiente a la Figura 4.30 la configuración de los parámetros de medición del SONAR es:

- Rango mecánico de operación (RMO): 90°
- Resolución mecánica de giro (RMG): 0.9°
- Distancia máxima (DM): 70m
- Profundidad del sonar: 10cm
- Número de puntos por medida (NP): 400

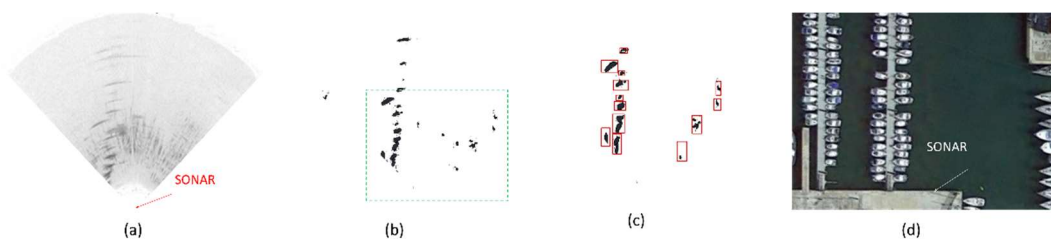


Figura 4.30. Identificación de obstáculos (a) Imagen correspondiente a las señales adquiridas, (b) imagen procesada (filtrada), (c) resultado de la identificación automatizada de obstáculos y (d) el mapa de la zona tomado de Google Earth (latitud 41°12'53.76"N longitud 1°43'51.79"E)

En la Figura 4.29a y Figura 4.30a se muestran las señales adquiridas por el SONAR. La Figura 4.29b y Figura 4.30b representan las imágenes procesadas para reducir el clutter

y la incertidumbre. La Figura 4.29c y Figura 4.30c muestran el resultado obtenido de la identificación automática de objetos, cada uno de los obstáculos se encuentra resaltado por un rectángulo de color rojo.

Al analizar los resultados obtenidos es posible verificar el correcto funcionamiento de esta estrategia. Esta estrategia permite detectar y ubicar los obstáculos presentes en el entorno de navegación, la configuración del módulo visión permite ajustar la detección automática de obstáculos al entorno de navegación.

Para esta estrategia, el tiempo total del proceso de detección de obstáculo medido en la prueba de la Figura 4.30, es de 22.7s. Este valor se descompone en: el tiempo de adquisición de datos por parte del sonar y generar la imagen (10.89s). Y el tiempo de procesar la imagen y de detectar los obstáculos (11.89s).

Para valorar el tiempo computacional de esta estrategia, se debe considerar que, si el vehículo Guanay II se desplaza a una velocidad de 1m/s, la distancia recorrida durante la ejecución de este proceso es de 23m. Esto conlleva un riesgo de colisión con obstáculos repentinos. Para reducir la probabilidad de este tipo de colisiones, se propone reducir el tiempo de ejecución del algoritmo encargado de procesar la información y realizar la detección de objetos. Para este propósito se diseña e implementa un algoritmo de bajo coste computacional que se explica en el siguiente apartado.

#### 4.2.5.2 - Detección de obstáculos por determinación de la distancia mínima al obstáculo por sectores

Con el propósito de reducir el tiempo de ejecución del algoritmo de detección se ha diseñado un algoritmo que utiliza el vector de datos generado por el SONAR (ver Figura 4.31), divide el área de escaneo en tres sectores y estima la mínima distancia entre el vehículo y el obstáculo; para cada uno de los tres sectores. De este modo, se determinará la ubicación del obstáculo más cercano al vehículo para cada uno de los tres sectores.

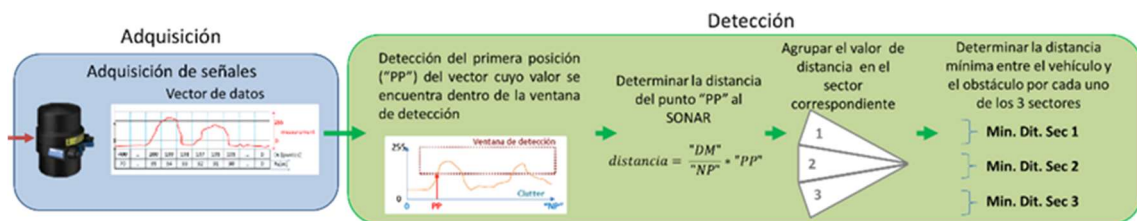


Figura 4.31. Diagrama general detección de obstáculos por sectores

El área de escaneo (RMO) del SONAR se divide en tres sectores iguales (Sec1, Sec2 y Sec3), como se puede ver en la Figura 4.32. Todos los sectores tendrán el mismo número de mediciones, donde cada medición corresponde a los datos adquiridos en la ejecución de un haz del sonar. El número de mediciones por sector se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$\# \text{ de medidas por sector} = \frac{(RMO)}{(RMG)} / 3 \quad (4-7)$$

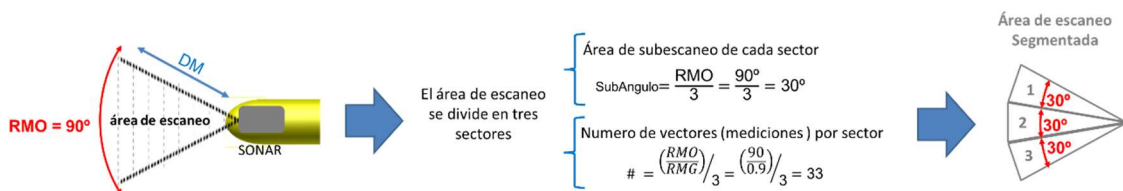


Figura 4.32. Segmentación del área de escaneo (RMO)

El SONAR proporciona un solo vector de datos por cada haz, este vector está constituido por NP posiciones, donde cada posición tiene un valor entre 0 y 255, que representa la amplitud de la señal recibida por el SONAR cuantificada. Los valores cercanos a 0 corresponden a la no presencia de obstáculo o ruido y los valores cercanos a 255 representan la existencia de un obstáculo de gran tamaño.

Cada una de las NP posiciones del vector de datos (ver Figura 4.33), está asociada a través de la ecuación (4-8) a la distancia (DV) física existente entre el vehículo y una posición específica (PP) de las NP posiciones que tiene el vector de datos. Esta distancia se encuentra en el rango de 0 a la distancia máxima (DM).

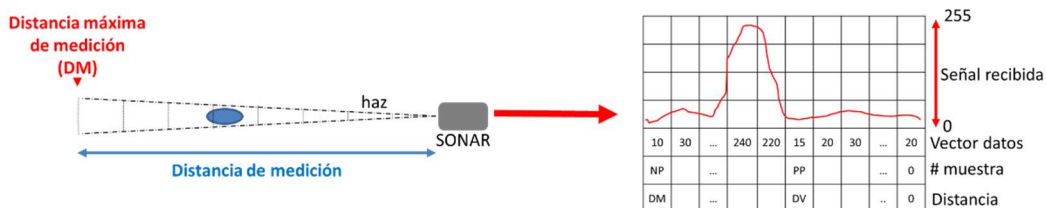


Figura 4.33. Relación entre vector de datos y distancia máxima (DM)

$$\text{Distancia al vehiculo (DV)} = \frac{DM}{NP} * PP \quad (4-8)$$

## Capítulo 4

En esta estrategia de detección de obstáculos, se busca determinar la distancia existente entre el vehículo y el primer obstáculo en cada vector de datos. Para discriminar el primer obstáculo, se ha implementado una ventana de detección (ver Figura 4.34), esta ventana de detección filtra el vector de datos, eliminando el clutter y las primeras reflexiones ocasionadas por la posición del sonar en el vehículo y el movimiento del vehículo. Al aplicar la ventana de detección al vector de datos, se establece la ubicación del primer obstáculo (PP) y a través de la ecuación (4-8) se calcula la distancia entre el vehículo y el obstáculo más cercano (DV). Si el vector de datos no contiene ningún dato que entre en la ventana de detección, el sistema asigna el valor de DM a DV para este vector.

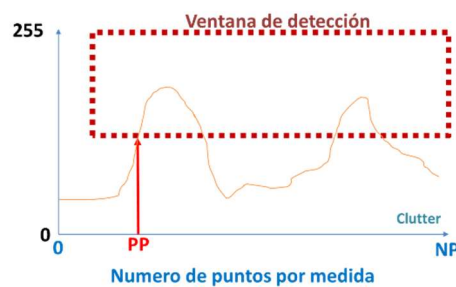


Figura 4.34. Ventana de detección

Para cada uno de los vectores de datos, que genera el SONAR al realizar el escaneo del área, se establece la distancia entre el vehículo y el obstáculo más cercano (DV). Cada una de estas distancias (DV) es agrupada en el sector correspondiente (Sec1, Sec2 y Sec3) dependiendo de la posición del haz. En cada uno de los tres sectores se establece la mínima distancia entre el vehículo y el obstáculo. De este modo se determinan la ubicación global del obstáculo más cercano al vehículo, por cada uno de los tres sectores (ver Figura 4.35).

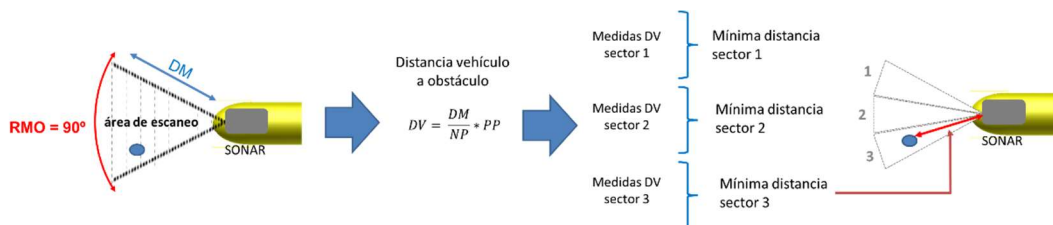


Figura 4.35. Ubicación del obstáculo

El MK3 es un SONAR de barrido mecánico, que solo permite enviar un haz a la vez. Por tanto, solo proporciona información de una pequeña área de escaneo, que corresponde a un sector en específico. Con lo cual, solo se actualiza el valor de la distancia mínima entre el vehículo y el obstáculo de un solo sector. Cada uno de los tres sectores se

actualizará solo cuando la rotación mecánica del haz, situé el haz en el respectivo sector.

Este comportamiento generara que el sistema asuma una distancia (vehículo – obstáculo) fija, en los dos sectores que no se actualizan durante la navegación. Generando un riesgo de colisión para el vehículo. Para compensar esa situación se ha planteado ajustar el valor de la distancia mínima entre el vehículo y el obstáculo de los dos sectores que no son actualizados, restándole a cada sector la distancia recorrida por el vehículo.

Para comprobar el correcto funcionamiento y la reducción del tiempo de ejecución del algoritmo de detección diseñado, se han realizado diferentes pruebas experimentales.

En primer lugar, se ha podido comprobar que para el sistema configurado con un rango mecánico de operación (RMO) de 90° y con un rango mecánico de giro (RMG) de 0.9°, por tanto, cada sector estará conformado por 33 mediciones, el tiempo de ejecución del algoritmo de detección de obstáculos es de 0.198s. Esto significa una reducción del 98% respecto al algoritmo de detección de obstáculos presentado en el apartado anterior.

El tiempo total del proceso de detección incluyendo la etapa de adquisición de datos por parte del SONAR es de 10.08s (55% menos que la estrategia inicial), es decir que el vehículo recorrerá una distancia máxima de 10.08m (velocidad 1m/s), permitiendo disminuir el riesgo de colisión con obstáculos repentinos.

Se han realizado diferentes pruebas a 1km de la costa de Vilanova i la Geltrú. Con el propósito de evaluar el sistema de detección de obstáculos, en esta ocasión se ha decidido utilizar como obstáculo un bote tipo Zodiac en movimiento (ver Figura 4.36a), cuya trayectoria se presenta en color rojo (ver Figura 4.37a).

El SONAR MK3 se ha instalado en la parte inferior de la proa del vehículo Guanay II como se muestra en la Figura 4.36b. Durante esta prueba el vehículo ha funcionado en modo manual. La trayectoria del vehículo Guanay II se representa en color azul en la Figura 4.37a. En la Figura 4.37b y c se muestran los resultados obtenidos.

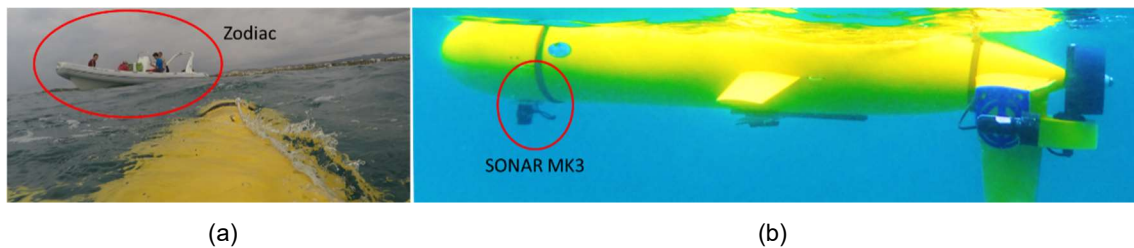


Figura 4.36. Guanay II (a) Zodiac y Guanay II (b) Ubicación del SONAR MK3 en el vehículo Guanay

En esta prueba la configuración de los parámetros de medición del SONAR utilizada es:

- Rango mecánico de operación:  $90^\circ$
- Resolución mecánica de giro:  $0.9^\circ$
- Distancia máxima: 70m
- Profundidad del sonar: 35cm
- Número de puntos por medida: 400

En la Figura 4.37b se muestran los resultados obtenidos por el sistema de detección de obstáculos. El color rojo representa la distancia mínima al obstáculo para el sector 1, el verde la distancia mínima al obstáculo para el sector 2 y el azul la distancia mínima al obstáculo para el sector 3. Al analizar estos resultados se debe tener en cuenta que el obstáculo y el vehículo también están en movimiento. Como se observa en la Figura 4.37b, el sistema detecta al obstáculo primero en el sector 1 luego en el sector 2 y posteriormente en el sector 3. Pasado un tiempo, el sistema detecta al obstáculo solo en los sectores 1 y 2. Finalmente, solo se detecta al obstáculo en el sector 1.

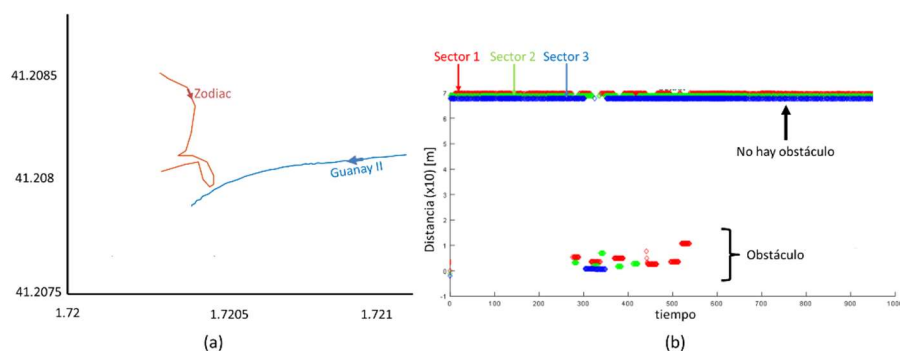


Figura 4.37. Resultados (a) Trayectoria recorrida: azul el vehículo Guanay II, rojo Zodiac, (b) resultados proporcionado por el sistema de detección de obstáculos

Esta prueba experimental valida el correcto funcionamiento de esta estrategia de detección con una optimización del tiempo de ejecución.

### 4.3 - Simulación del sistema de adquisición de señales y detección de obstáculos

En este apartado se desarrolla una aplicación (algoritmo) de simulación del sistema de adquisición de señales del SONAR y detección de obstáculos (estrategia 2 apartado 4.2.5.2). Esta aplicación permite simular en un entorno de navegación, el funcionamiento del SONAR con unos parámetros de medición y posteriormente, la ejecución del algoritmo de detección de obstáculos.

Esta aplicación de simulación parte de la digitalización de la imagen real del entorno de navegación. Para ello se convierte la imagen en una matriz de tres dimensiones. Dos dimensiones indican una posición sobre los ejes XY (Norte Este o Latitud Longitud), y la tercera dimensión indica si en esa posición hay un objeto (obstáculo) (Ver Figura 4.38).

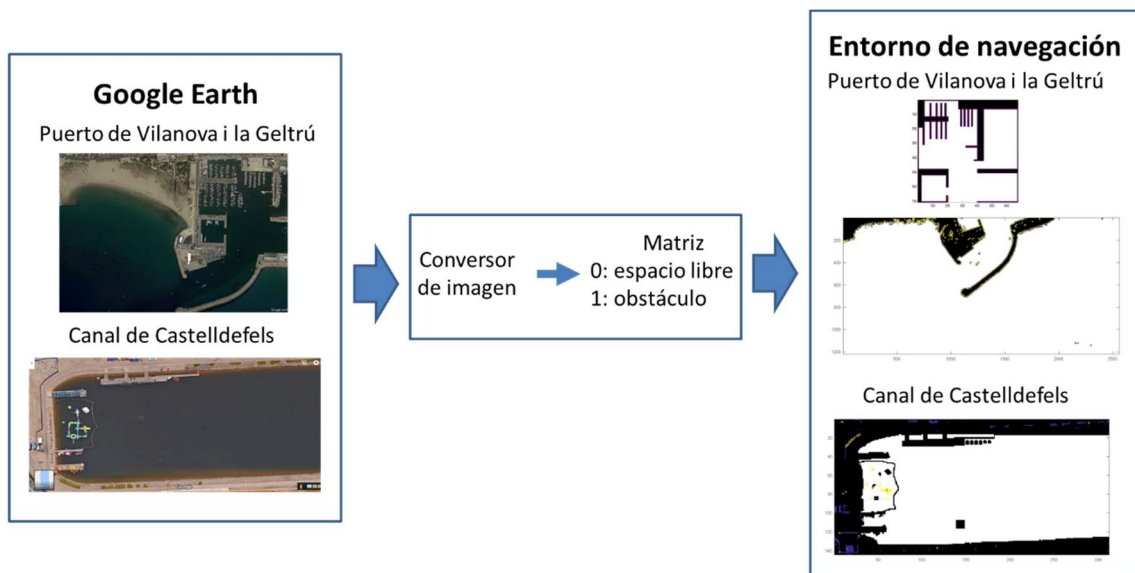


Figura 4.38. Generación del entorno de navegación

Una vez se tiene el entorno de navegación digitalizado (Figura 4.39), se realiza la simulación de la lectura del sonar. Para esto se debe conocer la ubicación del vehículo y su orientación. En la Figura 4.39 se indica la posición del vehículo con "S".

Una vez determinada la ubicación del vehículo se mapea sobre ese punto el área de escaneo (detección) definido por RMO, DM y RMG (Figura 4.40a). Posteriormente, para simular el conjunto de los vectores de datos proporcionados por el SONAR se solapan la Figura 4.40a y b, y se obtiene las áreas comunes (Figura 4.40c), obteniendo los objetos presentes en el área escaneada.

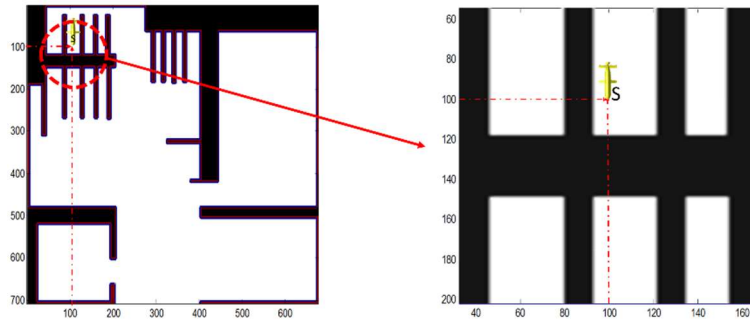


Figura 4.39. Entorno de navegación

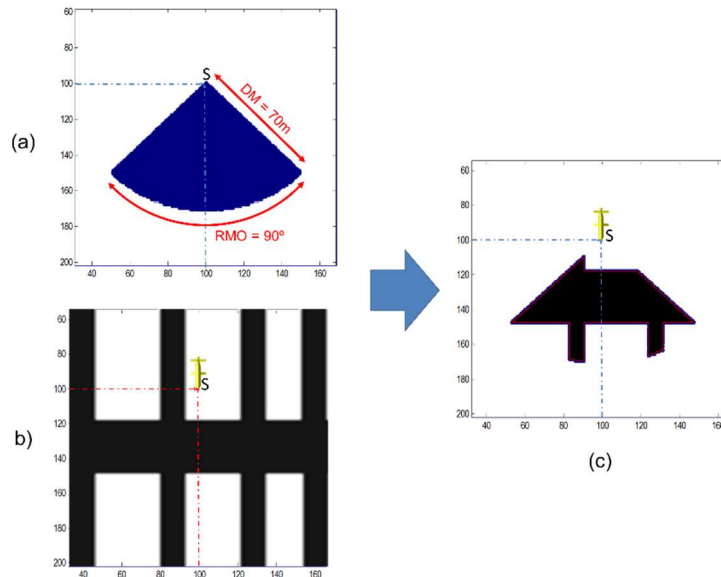


Figura 4.40. Simulación (a) Área de escaneo (detección) (b) Entorno de navegación (c) Objetos (obstáculos) en el área de escaneo

A continuación, se aplica el algoritmo de detección por sectores. El área completa de detección es dividida en 3 sectores como se indica en la Figura 4.41a y sobre cada sector se establece la distancia mínima del vehículo al obstáculo como muestra la Figura 4.41b.

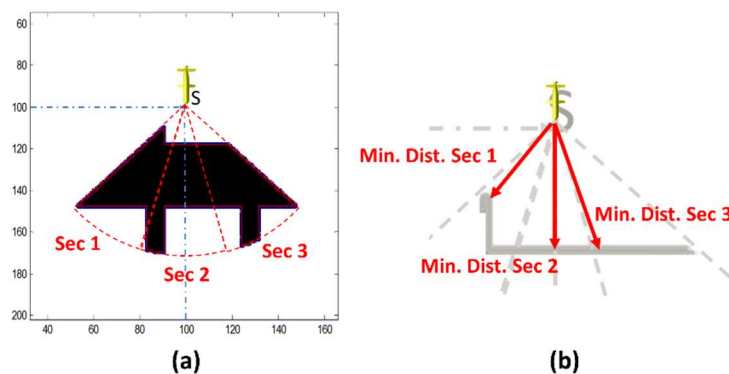


Figura 4.41. Análisis (a) Segmentación del área escaneada (b) Cálculo de la mínima distancia entre el vehículo y objeto (obstáculo), por cada uno de los tres sectores



Esta aplicación de simulación del sistema de detección de obstáculos considera dos casos de funcionamiento:

- Un modelo de funcionamiento ideal, en el cual los tres sectores son actualizados simultáneamente, cada vez que se ejecuta la aplicación.
- Un modelo de funcionamiento ajustado a la realidad, en el cual se tiene en cuenta la rotación del haz entre los sectores y solo se actualiza un sector a la vez. También se considera el tiempo de ejecución del sistema real, es decir el tiempo que requiere el sistema de adquisición y detección de obstáculos, en cada punto de medición (Haz).

En el próximo capítulo se presentan simulaciones utilizando esta aplicación, que validan su funcionamiento.



## Capítulo 5.

# Diseño de un sistema fuzzy para la evasión de obstáculos

### 5.1 - Introducción

En busca de aumentar la versatilidad del vehículo durante la navegación en zonas costeras, superando los obstáculos presentes, y evitando cualquier posibilidad de colisión, se propone, como una de las contribuciones de esta tesis, el diseño de un sistema de detección y evasión de obstáculos. En el capítulo anterior se ha presentado el sistema de detección, en este capítulo se muestra el diseño e implementación de un sistema para la evasión de obstáculos y su relación con el de seguimiento de la trayectoria de navegación del vehículo Guanay.

En el control de misión se define la trayectoria de navegación del vehículo mediante la utilización waypoints, puntos que conforman la ruta. Aunque en la ubicación de los waypoints se evite la presencia de obstáculos en la trayectoria, no se puede garantizar que no se puedan presentar posteriormente. Para evitar poner en riesgo la seguridad del vehículo se considera necesario implementar un sistema que modifique la trayectoria de navegación del vehículo en caso de colisión.

El sistema de control de navegación implementado en el vehículo Guanay II (ver Figura 5.1) permite el seguimiento de una trayectoria de navegación predeterminada y demarcada por waypoints. En el trabajo [14], J. González et al. obtuvo el modelo hidrodinámico del vehículo Guanay II con 3 grados de libertad: avance (surge), lateral (sway) y guiñada (yaw). Este modelo permitió el diseño del control de navegación, compuesto por dos lazos. Un lazo externo (control de trayectoria), que realiza el seguimiento de la ruta de navegación preestablecida en base a estrategias de Pure pursuit y Path Following, y a un lazo interno, que regula la velocidad de avance del vehículo y el ángulo de guiñada.

Una de las premisas a cumplir en el diseño de las propuestas de sistemas de evasión que se realizan en este capítulo, es garantizar su compatibilidad con el control de

navegación del vehículo. Dado la estructura del control de navegación, descrito en la Figura 5.1, se proponen dos sistemas de evasión que interactúan de forma diferente con el control de navegación. Uno modifica las consignas del lazo interno y otro la consigna del lazo externo para modificar las trayectorias de navegación y evadir los obstáculos.

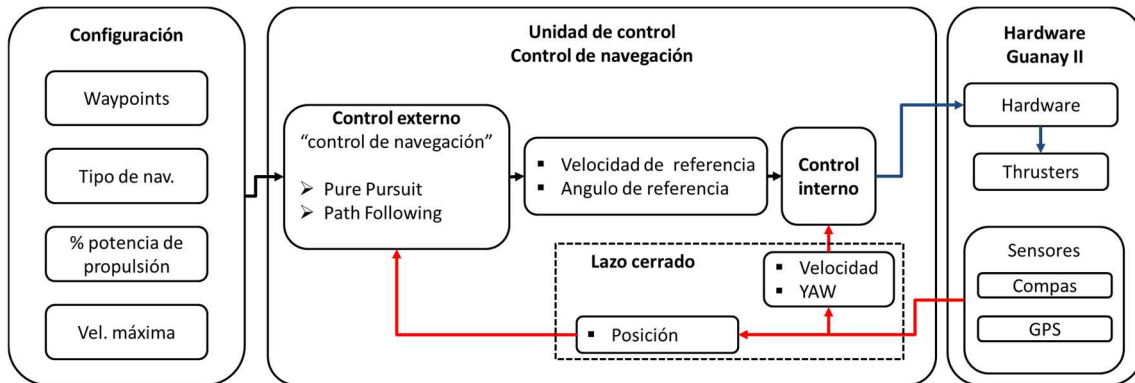


Figura 5.1. Diagrama general del control de navegación

A partir de las características operacionales y de navegación propias de vehículo Guanay II se han definido los siguientes requerimientos que debe cumplir el sistema de evasión de obstáculos:

- Baja carga computacional
- Bajo tiempo de replanificación de la trayectoria de navegación
- Funcionar autónomamente, en tiempo real y en paralelo con los otros sistemas del vehículo
- No necesitar un mapa del entorno de navegación
- Maniobras ajustadas a las dimensiones, velocidad de navegación y radio de giro del vehículo
- Compatibilidad con el sistema de alimentación, la unidad de control y la estructura física del vehículo
- Compatibilidad con el sensor SONAR MK3 y el algoritmo de detección de obstáculos expuesto en el capítulo anterior
- Compatibilidad con el sistema de control de trayectoria del vehículo
- Incluir en la estrategia de evasión de obstáculos los parámetros de la normativa COLREGS [98] aplicables a este tipo de vehículos

## 5.2 - Revisión de sistemas para la evasión de obstáculos

De acuerdo a la literatura consultada, algunos autores como Siegwart [99] Øystein [96] y Seto [100] plantean diferentes estrategias de evasión de obstáculos que en general se pueden clasificar en: reactiva, deliberativa e híbrida. Estas estrategias necesitan para reconocer o detectar los obstáculos, la utilización de un sensor tipo SONAR de imagen de las categorías multi haz, mecánico o side scan [96] [100].

La arquitectura reactiva se basa en una estructura de flujo de sensor y acción [99] [96]. Se emplea un SONAR para percibir el entorno y activar comportamientos específicos basados en reglas predefinidas ante la presencia de un obstáculo. El rendimiento de esta arquitectura a menudo es excelente respecto a los parámetros de tiempo de reacción y robustez, cuando se trata de obstáculos repentinos y entornos desconocidos. En esta categoría se pueden clasificar los algoritmos de tipo: Bug 1, Bug 2, Curvature velocity, entre otros [96] [99] [100].

En este tipo de arquitectura, el sistema de evasión interactúa con el sistema de control de trayectoria solo cuando se detecta un obstáculo en la ruta del vehículo. Si se valida la presencia del obstáculo el algoritmo de evasión envía la información de referencia al control de trayectoria [96].

La arquitectura deliberativa se basa en una estructura de flujo sensor, plan y acción. Esta arquitectura puede ser utilizada si se conoce el mapa del entorno de navegación con los obstáculos presentes, y si el vehículo dispone la capacidad de localizarse por sí mismo dentro de ese mapa. Como desventaja, presenta un alto coste computacional debido al uso de algoritmos del tipo: Tangent bug, Bubble band, vector field histogram (VFH), Wavefront, potential fields, A\*, Genetic algorithms, RRT, entre [96] [99] [100].

Finalmente, la arquitectura híbrida combina las ventajas y desventajas de las estrategias anteriores, proporcionando un tiempo corto de reacción ante la presencia de obstáculos repentinos, robustez en la toma de decisiones, un alto costo computacional y una trayectoria de navegación óptima. Pero, como la arquitectura anterior necesita el mapa del entorno de navegación.

Analizando las características de cada una de estas arquitecturas y considerando los requerimientos del sistema de evasión especificados en el apartado anterior, se ha seleccionado la arquitectura reactiva. Dado que esta arquitectura aporta una mayor

versatilidad, menor tiempo de reacción, mayor robustez ante obstáculos repentinos desconocidos y una baja carga computacional.

La estrategia para la planificación de la trayectoria de navegación para el vehículo Guanay II, ha sido diseñada en base a la combinación de la estrategia de seguimiento de trayectoria Pure pursuit, con una estrategia de evasión de obstáculos basada en una arquitectura reactiva. En general, durante navegación en superficie el control de trayectoria guiará al vehículo, pero ante la presencia de un obstáculo el sistema de evasión tomará el control de la trayectoria del vehículo.

La estrategia Pure pursuit, considera el waypoint al que se quiere llegar y la posición actual del vehículo. A partir de la posición actual del vehículo y de la ubicación del siguiente waypoint esta estrategia calcula el ángulo de guiñada de referencia y la velocidad de avance, que son los parámetros de referencia para el lazo de control interno.

De las diferentes posibilidades para implementar una arquitectura reactiva, se opta por utilización de un sistema fuzzy [101] [102] [103] [104]. Este tipo de sistema ha sido descrito por algunos autores como un sistema similar a los sistemas expertos, dado que puede representar el conocimiento en un conjunto de reglas de estructura condicional. Esto permite implementar las reglas de navegación no solo acordes a la normativa COLREGS (International Regulations for Preventing Collisions at Sea), sino también acordes a las características físicas y operacionales del vehículo Guanay II. Otras de las ventajas de la utilización de un sistema fuzzy se centra en la respuesta del sistema ante la incertidumbre y el manejo de la información real.

### 5.3 - Estructura del Sistema fuzzy

Por definición los sistemas fuzzy están divididos en 6 etapas principales (ver Figura 5.2):

- Variables lingüísticas de entrada y salida
- Asignación de funciones de pertenencias
- Fucificación
- Base de reglas
- Evaluación de las reglas e Inferencia
- Agregado y defucificación

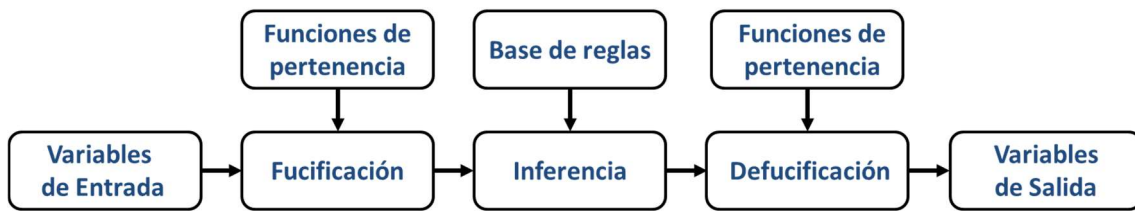


Figura 5.2. Diagrama de bloques general del sistema fuzzy

### 5.3.1 - Variables lingüísticas de entrada y salida

Las variables lingüísticas representan, en palabras, las variables de entrada y las variables de salida del sistema que se desea controlar. Combinan múltiples categorías subjetivas que describen el sistema. Para los sistemas de evasión diseñados se ha considerado que:

- Las variables de entrada son proporcionadas por el sistema de detección de obstáculos. Se tomaron como variable de entrada la distancia mínima entre el vehículo y el obstáculo en cada uno de los tres sectores definidos en el sistema de detección.
- Las variables de salida se han definido para actuar sobre el lazo interno o sobre el lazo externo del control de navegación del Guanay. En el primer caso las variables de salida corresponden a la velocidad y al ángulo de referencia. En el segundo caso las variables de salida corresponden a un punto en coordenadas polares (ángulo y un radio) con lo cual se generan las coordenadas de un nuevo waypoint.

### 5.3.2 - Funciones de pertenencia de entrada y salida

Las funciones de pertenencia representan el grado de pertenencia de un elemento a un subconjunto definido por una etiqueta. Existen diferentes tipos de funciones de pertenencia entre los que se destacan: triangulares, trapezoidal y singleton. Los tipos de funciones de pertenencia y sus límites; para las variables de entrada y salida utilizadas en este trabajo son definidos en los siguientes apartados.

### 5.3.3 - Fucificación

La fucificación es el proceso de asociación de los valores de entrada numéricos con las funciones de pertenencia asignadas a la variable lingüística de entrada correspondiente. Dependiendo de la distribución de las funciones de pertenencia, el valor numérico podría corresponder a una o más funciones de pertenencia.

### 5.3.4 - Base de reglas

Las reglas describen, en palabras, las relaciones existentes entre las variables de entrada (premisas) y las variables de salida (consecuencias) en función de sus funciones de pertenencia. La base de reglas es equivalente a la estrategia de control del controlador. En este estudio, la base de reglas es definida acorde a COLREGS y a las características operacionales del vehículo.

Con el propósito de mantener un elevado nivel de seguridad en el mar y reducir la probabilidad de colisiones, en 1960 se formalizó uno de los primeros reglamentos internacionales para prevenir las colisiones en el mar, este reglamento ha sido actualizado principalmente en 1972, 2001 y en el 2005 (versión 9.4) [105]. El reglamento rige a todo tipo de buque, en cualquier océano, mar, río, lago, puerto o aguas interiores. Es responsabilidad del patrón el uso y cumplimiento de estas reglas, por otra parte; el constructor y dueño deben cumplir con el equipamiento del vehículo (luces, marcas, señales, etc). Teniendo en cuentas las características operacionales del vehículo Guanay II, se ha analizado el reglamento encontrando las siguientes normativas que pueden ser aplicables al vehículo Guanay II:

- Cada vehículo hará uso de todos los medios de que disponga a bordo y sean apropiados a las circunstancias y condiciones del momento, para determinar si existe riesgo de colisión. En caso de existir alguna duda, se considera que existe un riesgo de colisión. [ [98] - Regla 7.a]
- Las maniobras que se efectúen para evitar una colisión, deben ser realizadas en conformidad con lo expuesto en el reglamento, si es posible debido a las circunstancias las maniobras deben ser claras y realizadas con antelación y respetando las buenas prácticas. [ [98] - Regla 8.a]



- Si las circunstancias lo permiten, los cambios que se realicen en el rumbo y/o velocidad deben ser lo suficientemente amplios para ser fácilmente reconocidos por otros vehículos. [ [98] - Regla 8.b]
- Las maniobras que se realicen deben ser apropiadas para prevenir una situación de aproximación excesiva que pueda generar una colisión. [ [98] - Regla 8.c]
- Las maniobras que se realicen para evitar una colisión entre vehículos deben permitir tener una distancia de seguridad [ [98] - Regla 8.d]
- En caso de ser necesario el vehículo debe detenerse en totalidad hasta evaluar la situación y generar una solución apropiada. [ [98] - Regla 8.e]
- La navegación en canales angostos se debe realizar manteniendo el vehículo lo más cerca posible al límite exterior del paso o canal por el costado de estribor sin generar peligro de daño del vehículo. [ [98] - Regla 9.a]
- Los vehículos de eslora menor a 20 metros no estorbarán el tránsito de buques de mayor tamaño. [ [98] - Regla 9.b]
- Cuando exista la posibilidad de colisión frontal entre dos vehículos, cada uno debe tomar rumbo a estribor, sin poner en riesgo la seguridad de vehículo. [ [98] - Regla 14.c]

### 5.3.5 - Evaluación de las reglas e Inferencia

Después de realizar la fuzzificación de los valores numéricos de entrada, el controlador fuzzy utiliza la base de reglas y ecuación condicional (regla general) del tipo Mamdani (5-1), para inferir el conjunto de salida (función de pertenencia) para cada una de las reglas.

$$\text{SI...AND ...ENTONCES ...} \quad (5-1)$$

El conector AND especifica cómo el controlador fuzzy relaciona las diferentes variables de entrada (premisas), para determinar el valor de salida (consecuencia) en cada una de las reglas [106].

### 5.3.6 - Agregado y defuzzificación

Al realizar la evaluación de las reglas se genera un conjunto de salida o un valor de salida por cada una de las reglas. Estos conjuntos se agrupan en un solo conjunto

(conjunto resultante) y este proceso es llamado agregado. En este trabajo ha optado por un agregado por valor máximo.

La defucificación es un proceso que permiten obtener el valor más representativo de la variable de salida a partir del conjunto resultante anterior. Se ha escogido una defucificación por centroide.

### 5.3.7 - Configuración del sistema de evasión

Se estudia una primera estrategia de configurar el sistema de evasión de obstáculos utilizando como variables de salida la velocidad y el ángulo de guiñada que actúan sobre el lazo interno (ver Figura 5.1). Siendo esta una de las estrategias clásicas y conocidas, que utilizan menos recursos y su respuesta es instantánea. Sin embargo, puede limitar el rendimiento en la navegación al considerar únicamente la velocidad actual y la distancia al obstáculo para determinar las nuevas consignas del lazo interno del control de navegación. Otra consideración que restringe la aplicación de esta estrategia es que, aunque en el Guanay II el acceso a las consignas de velocidad y guiñada es factible no siempre se permite en otros vehículos el acceso a esta capa física.

Ante estas consideraciones, se diseña una segunda estrategia para realizar la evasión de obstáculos utilizando como variables de salida waypoints que actúan sobre el lazo externo (ver Figura 5.1). Los cuales serían incluidos instantáneamente en la lista de general de waypoint que definen la trayectoria en el control de navegación. Esta estrategia permite obtener un mejor rendimiento en la navegación del vehículo, debido a que el control Pure Pursuit será el encargado de calcular la velocidad y el ángulo de referencia en cada instante de tiempo. Por otra parte, esta estrategia permite la posibilidad de utilizar los algoritmos desarrollados en vehículos comerciales, dado que este algoritmo se ejecuta sobre la capa de aplicación y no sobre la capa física. Esta estrategia también permite la integración del sistema actual; con un sistema deliberativo; por ejemplo, del tipo RRT (rapidly-exploring random trees), para conformar un sistema de evasión híbrido que permitirá optimizar la trayectoria de navegación. En los siguientes apartados se presenta el desarrollo de estas estrategias.

## 5.4 - Estrategia 1: Evasión de obstáculos por cambio del ángulo de guiñada y velocidad de referencia del vehículo

### 5.4.1 - Estructura del control de evasión

El sistema de evasión de obstáculos se ejecuta en paralelo con el control de trayectoria (ver Figura 5.3) y solo toma el control de la trayectoria cuando hay riesgo de colisión. Se propone como primera estrategia de evasión que la salida del sistema de evasión corresponda a una velocidad y un ángulo que permitan cambiar la trayectoria del vehículo actuando sobre el lazo interno de control de navegación.

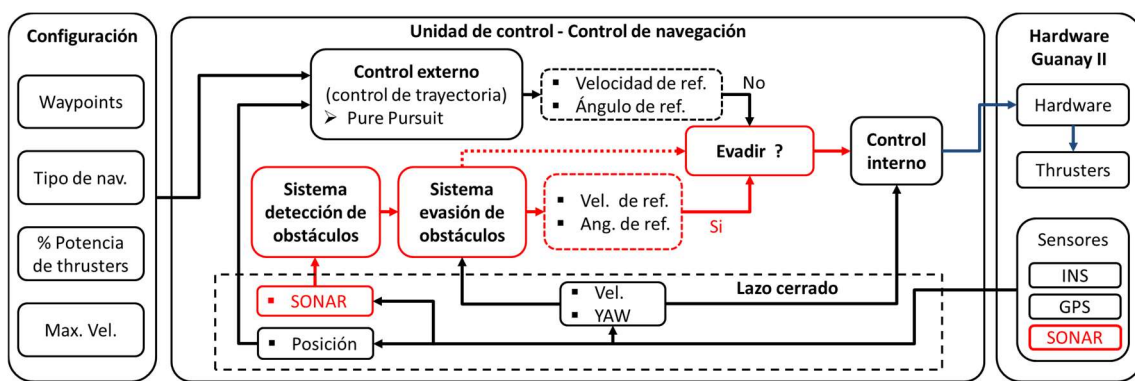


Figura 5.3. Diagrama de bloques general de control de trayectoria

En el estudio de esta primera estrategia de evasión, se definen cuatro variables de entrada que son: la velocidad de navegación del vehículo y las tres distancias mínimas entre el vehículo y el obstáculo en cada uno de los sectores definidos en el sistema de detección. Las variables de salidas corresponden a las nuevas referencias de la velocidad de navegación y del ángulo de guiñada. En la Figura 5.4, se puede observar el diagrama propuesto.

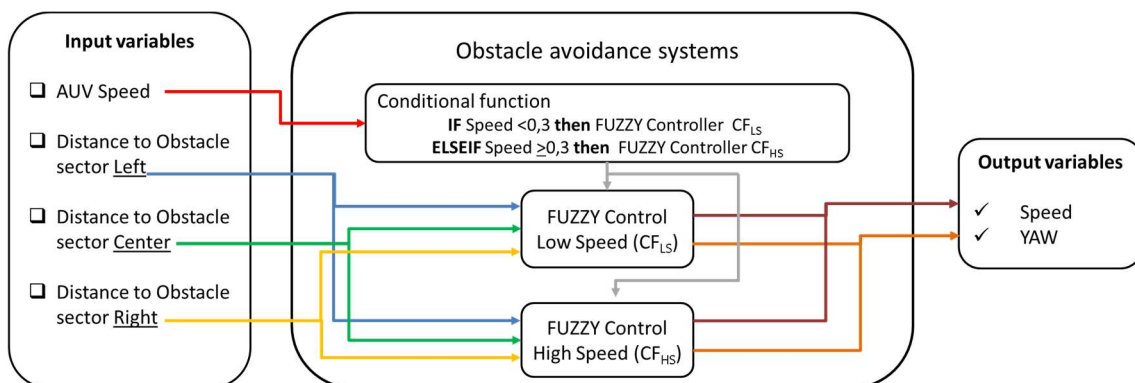


Figura 5.4. Diagrama de bloques del sistema evasión de obstáculos

En este caso el sistema de evasión está compuesto por dos controles fuzzy ( $CF_{LS}$  y  $CF_{HS}$ ). Cada uno de estos controladores responde a una velocidad de navegación del vehículo diferente. Se ha definido un control difuso  $CF_{LS}$  para bajas velocidades (menores a 0.3m/s) y el control difuso  $CF_{HS}$  para velocidades mayores a 0.3m/s. El umbral de 0.3m/s se ha determinado a partir del límite del control interno definido por Gonzales [14].

Esta estructura permite proporcionar una mayor maniobrabilidad al vehículo durante la navegación, debido a que el radio de giro óptimo depende de la velocidad. La relación entre velocidad y radio de giro está dada por la ecuación (5-2) descrita por Gonzales [14] (Ver Figura 5.5). En la Figura 5.6, se comparan los radios de giro para tres valores de velocidad. En el caso (a) se considera que el vehículo navega a una velocidad de 1 m/s que proporciona un radio de giro mínimo de 50m. En el caso (b) el vehículo navega con una velocidad entre 0.9m/s que proporciona un radio de giro mínimo de 25m. En el caso (c) se considera que la velocidad del vehículo es de 0.5m/s que proporciona un radio de giro mínimo de 10m. Cuanto mayor es la velocidad del vehículo, mayor es el radio de giro.

$$U_{max} \left[ \frac{m}{s^2} \right] = 0.0000162R^3 - 0.00183R^2 + 0.0698R^1 + 0.0677 \quad (5-2)$$

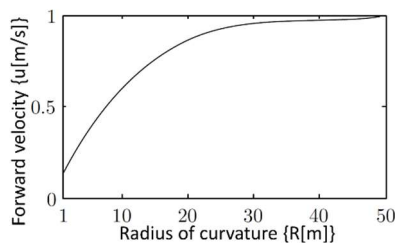


Figura 5.5. Velocidad máxima de avance con respecto al radio de curvatura [14]

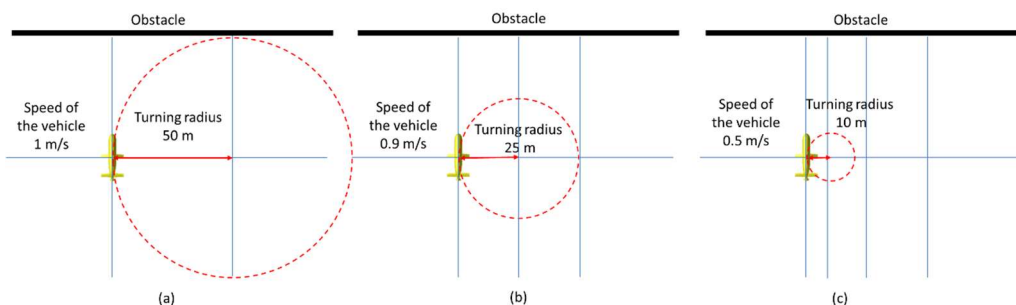


Figura 5.6. Comparación entre radios de giro para diferentes velocidades del vehículo (a) velocidad de 1m/s radio 50m, (b) velocidad de 0.9m/s radio 25m (c) velocidad de 0.5m/s radio

10m

Cuanto más baja sea la velocidad del vehículo, mayor podrá ser el ángulo de guiñada y, por tanto, menor el radio de giro del vehículo.

A continuación, se diseñan cada uno de los bloques de los dos controles fuzzy  $CF_{LS}$  y  $CF_{HS}$  de esta estrategia.

#### 5.4.2 - Variables de entrada

Cada uno de los controladores difusos tiene tres variables de entrada que indican la mínima distancia del vehículo al obstáculo. Estas variables se denominan mínima distancia a obstáculo en el sector derecho (R), mínima distancia a obstáculo en el sector centro (C) y mínima distancia a obstáculo en el sector izquierdo (L).

Para cada una de estas variables de entrada se han definido tres funciones de pertenencia de tipo trapezoidal, denominadas respectivamente alto (H), medio (M) y bajo (L) riesgo de colisión. En la Figura 5.7 se muestran las funciones de pertenencia para el control difuso  $CF_{LS}$ , para bajas velocidades de navegación, y en la Figura 5.8 las funciones de pertenencia para el control difuso  $CF_{HS}$ , para altas velocidades de navegación.

Los límites de las funciones de pertenencias han sido definidos respecto a la velocidad máxima del vehículo, el tiempo de ejecución del software de detección de obstáculos, el radio de giro y la distancia recorrida por el vehículo durante el tiempo de ejecución del software de detección de obstáculos.

Como ejemplo, se explica a continuación el cálculo del límite de la función de pertenencia de alto (H) riesgo de colisión sector central del control  $CF_{HS}$  (ver Figura 5.9). Se considera un radio de seguridad alrededor del vehículo de 4m, debido a que la longitud del vehículo Guanay es de 2m. También se considera una distancia de frenado de 5m. Dado que el tiempo de ejecución del software de detección de obstáculos es de 12s, a una velocidad máxima de 1m/s la distancia recorrida por el vehículo es de 12m. Sumando estas tres longitudes (4m+5m+12m) se establece el límite de la 21m. Este mismo razonamiento (ver Figura 5.9). se aplica para calcular los límites de las otras funciones de pertenencia.

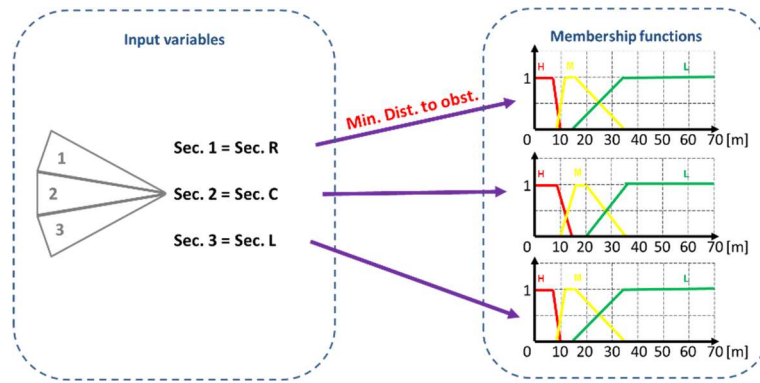


Figura 5.7. Variables de entrada y funciones de pertenencia para el controlador difuso CFLS

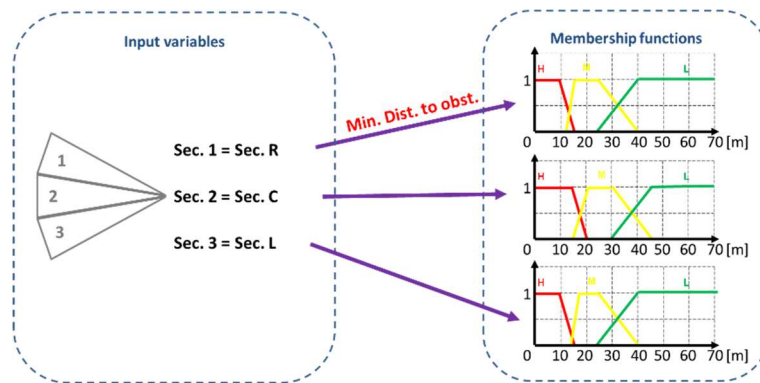


Figura 5.8. Variables de entrada y funciones de pertenencia para el controlador difuso CFHS

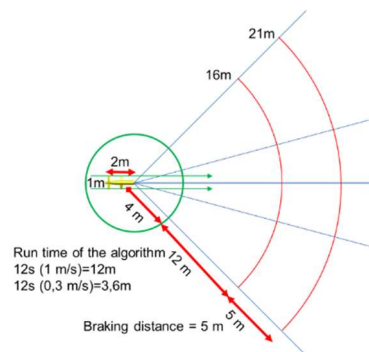


Figura 5.9. Establecimiento de los límites de las funciones de pertenencia de alto (H) riesgo de colisión sector central para alta velocidad

### 5.4.3 - Variables de salida

Cada uno de los controladores difusos  $CF_{LS}$  y  $CF_{HS}$ , tiene dos variables de salida correspondientes al ángulo de guiñada y a la velocidad de navegación (ver Figura 5.10 y Figura 5.11). A la variable, ángulo de guiñada de referencia se le han asignado 6 funciones de pertenencia de tipo triangular. En la Figura 5.10 se definen las funciones

de pertenencia para el control  $CF_{LS}$  en un rango ente  $180^\circ$  y  $-140^\circ$ . En la Figura 5.11 se definen las funciones de pertenencia para el controlador  $CF_{HS}$  en un rango entre  $120^\circ$  y  $90^\circ$ . Estos rangos y los límites de las funciones de pertenencia fueron definidos con respecto a la velocidad de vehículo, el radio de giro y la base de reglas.

Respecto a la variable de la velocidad de navegación se le han asignado 3 funciones de pertenencia de tipo trapezoidal y triangular. En la Figura 5.10 se definen las funciones de pertenencia de para el controlador  $CF_{LS}$ . En la Figura 5.11 se definen las funciones de para el controlador  $CF_{HS}$

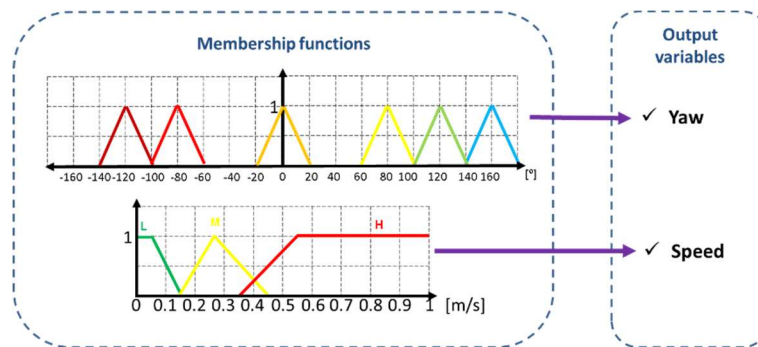


Figura 5.10. Funciones de pertenencia de salida para el control difuso CFLS

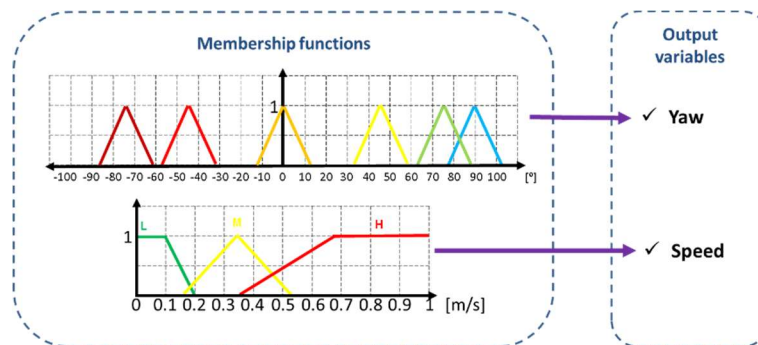


Figura 5.11. Funciones de pertenencia de salida para el control difuso CFHS

#### 5.4.4 - Base de reglas e inferencia

La base de reglas ha sido construida para garantizar la seguridad del vehículo considerando la normativa COLREGS [98], diferentes escenarios de navegación y las características operacionales del vehículo.

Fruto de estas consideraciones se ha establecido que:

- Ante la presencia de un obstáculo en la trayectoria del vehículo, se debe navegar por estribor a baja velocidad, sin poner en riesgo la seguridad vehículo. En la Figura 5.12a, b y g se presenta algunas de estas situaciones.
- En caso de comprometer la seguridad del vehículo, tomar contra medidas como girar a babor (Figura 5.12c y e), teniendo en consideración la maniobrabilidad del vehículo, la distancia de frenado, el radio de giro y siempre evitando colisionar con otro vehículo u obstáculo.
- En general se recomienda que todas las maniobras si las circunstancias lo permiten deben efectuarse de forma clara y con la debida antelación, respetando las buenas prácticas de la navegación.

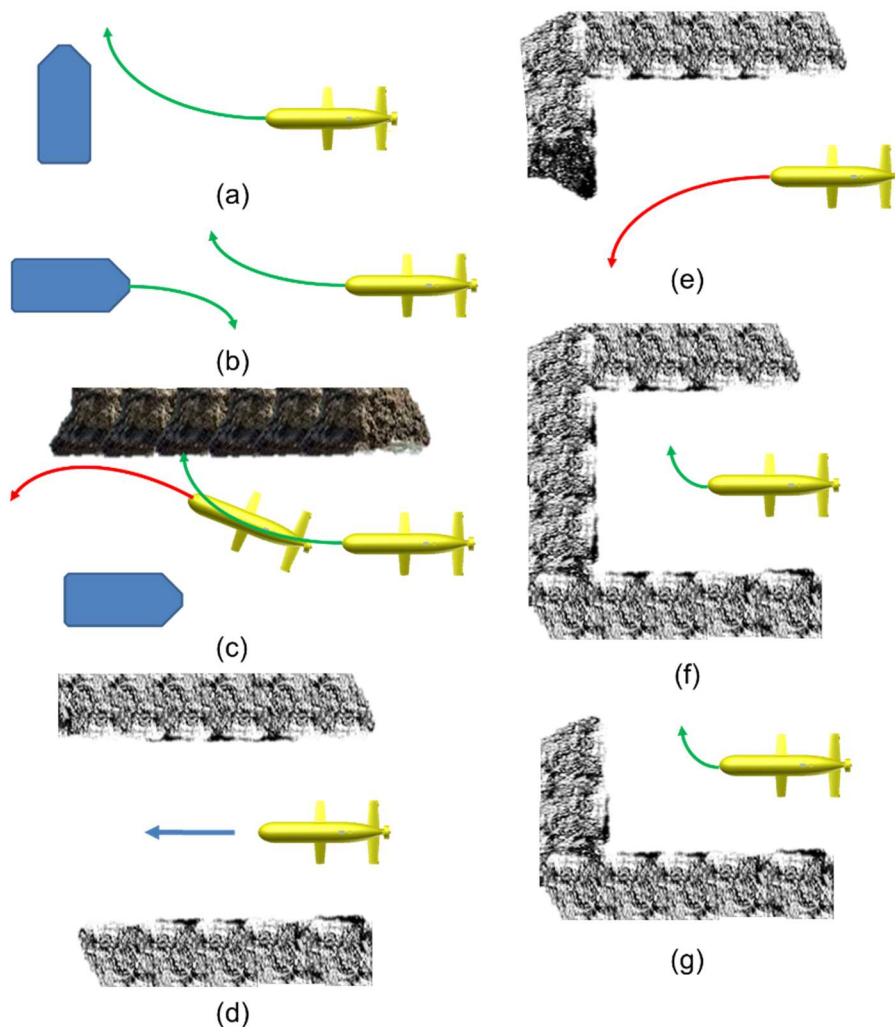


Figura 5.12. Análisis de diferentes escenarios de navegación con posibilidades de colisión y la respuesta inicial del sistema de evasión

La base de reglas implementada para cada uno de los dos controladores difusos está compuesta por 27 reglas. En la Tabla 5-1 se definen los dos conjuntos de reglas,



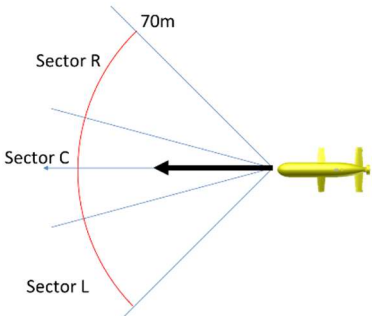
relacionando las variables de entrada con las variables de salida para el  $CF_{LS}$  y  $CF_{HS}$ . La ecuación condicional de inferencia utilizada es de tipo Mamdani [106] y corresponde a:

$$\text{SI } L = \dots \text{ AND } C = \dots \text{ AND } R = \dots \text{ Entonces Speed} = \dots, \text{ Yaw} = \dots \quad (5-3)$$

Tabla 5-1. Base de reglas para los controladores difusos

#	Input variable Sector			Output variable $CF_{LS}$		Output variable $CF_{HS}$	
	L	C	R	Speed	Yaw	Speed	Yaw
1	H	H	H	L	160°	L	90°
2	H	H	M	L	120°	L	75°
3	H	H	L	L	80°	L	45°
4	H	M	H	L	80°	L	45°
5	H	M	M	L	80°	L	45°
6	H	M	L	M	80°	M	45°
7	H	L	H	L	0°	L	0°
8	H	L	M	M	0°	M	0°
9	H	L	L	M	0°	M	0°
10	M	H	H	L	-120°	L	-75°
11	M	H	M	L	80°	L	45°
12	M	H	L	L	80°	L	45°
13	M	M	H	L	-120°	L	-75°
14	M	M	M	L	80°	L	45°
15	M	M	L	M	80°	M	45°
16	M	L	H	L	0°	L	0°
17	M	L	M	L	0°	L	0°
18	M	L	L	H	0°	H	0°
19	L	H	H	L	-80°	L	-45°
20	L	H	M	L	-80°	L	-45°
21	L	H	L	L	80°	L	45°
22	L	M	H	M	-80°	M	-45°
23	L	M	M	L	-80°	L	-45°
24	L	M	L	L	80°	L	45°
25	L	L	H	M	0°	M	0°
26	L	L	M	H	0°	H	0°
27	L	L	L	H	0°	H	0°

Tabla 5-2. Relación entre reglas y los escenarios de navegación de la Figura 5.12

Escenario	# Regla	Comportamiento del vehículo
	27	<p><b>Antecedente:</b> No hay obstáculo.</p> <p><b>Consecuencia:</b> Vehículo avanza, el sistema de evasión <b>NO</b> modifica el rumbo.</p>

	<p>26 25</p>	<p><b>Antecedente:</b> Obstáculo en el sector derecho (R).</p> <p><b>Regla COLREGS aplicable:</b> [ [98] - Regla 8.a] [ [98] - Regla 8.b] [ [98] - Regla 8.d]</p> <p><b>Consecuencia:</b> Vehículo avanza, el sistema de evasión <b>NO</b> modifica el rumbo.</p>
	<p>24 21</p>	<p><b>Antecedente:</b> Obstáculo en el sector central (C).</p> <p><b>Regla COLREGS aplicable:</b> [ [98] - Regla 8.a] [ [98] - Regla 8.b] [ [98] - Regla 8.d] [ [98] - Regla 14.c]</p> <p><b>Consecuencia:</b> El sistema de evasión modifica el rumbo desviando el vehículo hacia Estribor.</p>
	<p>23 22 20 19</p>	<p><b>Antecedente:</b> Obstáculo en el sector derecho (R). Obstáculo en el sector central (C).</p> <p><b>Regla COLREGS aplicable:</b> [ [98] - Regla 7.a] [ [98] - Regla 8.c] [ [98] - Regla 8.d]</p> <p><b>Consecuencia:</b> El sistema de evasión modifica el rumbo desviando el vehículo hacia Babor.</p>
	<p>18 9</p>	<p><b>Antecedente:</b> Obstáculo en el sector izquierdo (L).</p> <p><b>Regla COLREGS aplicable:</b> [ [98] - Regla 8.d]</p> <p><b>Consecuencia:</b> Vehículo avanza, el sistema de evasión <b>NO</b> modifica el rumbo.</p>

<p>70m Sector R Sector C Sector L</p>	<p>17 16 8 7</p>	<p><b>Antecedente:</b> Obstáculo en el sector derecho (R). Obstáculo en el sector izquierdo (L). <b>Regla COLREGS aplicable:</b> [ [98] - Regla 8.c] [ [98] - Regla 8.d] [ [98] - Regla 9.a] <b>Consecuencia:</b> Vehículo avanza, el sistema de evasión <b>NO</b> modifica el rumbo.</p>
<p>70m Sector R Sector C Sector L</p>	<p>15 6</p>	<p><b>Antecedente:</b> Obstáculo en el sector central (C). Obstáculo en el sector izquierdo (L). <b>Regla COLREGS aplicable:</b> [ [98] - Regla 7.a] [ [98] - Regla 8.c] [ [98] - Regla 8.d] [ [98] - Regla 14.c] <b>Consecuencia:</b> El sistema de evasión modifica el rumbo desviando el vehículo hacia Estribor.</p>
<p>70m Sector R Sector C Sector L</p> <p>70m Sector R Sector C Sector L</p> <p>70m Sector R Sector C Sector L</p> <p>70m Sector R Sector C Sector L</p>	<p>14 12 11 5 4 3 2 1</p>	<p><b>Antecedente:</b> Obstáculo en el sector derecho (R). Obstáculo en el sector central (C). Obstáculo en el sector izquierdo (L).  Riesgo de colisión: (L/C/R) M/M/M M/H/L M/H/M H/M/M H/M/H H/H/L H/H/M H/H/H</p> <p><b>Regla COLREGS aplicable:</b> [ [98] - Regla 7.a] [ [98] - Regla 8.c] [ [98] - Regla 8.d] [ [98] - Regla 8.e] [ [98] - Regla 9.a] [ [98] - Regla 14.c]</p> <p><b>Consecuencia:</b> El sistema de evasión modifica el rumbo desviando el vehículo hacia Estribor.</p>

<p>The top diagram shows a U-shaped obstacle with three sectors: Sector R (Right), Sector C (Center), and Sector L (Left). A yellow vehicle is positioned to the right of the obstacle, with a red arrow indicating its path. A 70m range is marked. The bottom diagram shows a single vertical obstacle with the same three sectors and a yellow vehicle to its right, also with a red arrow and a 70m range marked.</p>	<p>13 10</p>	<p><b>Antecedente:</b>                  Obstáculo en el sector derecho (R).                  Obstáculo en el sector central (C).                  Obstáculo en el sector izquierdo (L).</p> <p>Riesgo de colisión: (L/C/R)                  M/M/H                  M/H/H</p> <p><b>Regla COLREGS aplicable:</b>                  [ [98] - Regla 7.a]                  [ [98] - Regla 8.c]                  [ [98] - Regla 8.d]                  [ [98] - Regla 8.e]</p> <p><b>Consecuencia:</b> El sistema de evasión modifica el rumbo desviando el vehículo hacia Babor.</p>
---	------------------	--

### 5.4.5 - Simulación y análisis de resultados

Con el propósito de evaluar el desempeño del sistema en la evasión de obstáculos y el comportamiento del vehículo en navegación, se han desarrollado múltiples simulaciones. Para ello se ha utilizado el modelo de simulación del vehículo Guanay II en tres grados de libertad [14], acompañado del algoritmo de simulación del sistema de detección de obstáculos mostrado en el apartado 4.3.

La plataforma de programación utilizada para realizar las simulaciones es Matlab, donde el sistema de evasión de obstáculos propuesto en este apartado, se ha implementado en un script. Los dos controles difusos diseñados anteriormente han sido implementados usando el Fuzzy Logic Toolbox. Los parámetros de simulación utilizados se encuentran en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3. Parámetros de simulación

Parámetros	Valor
Entorno de navegación	Abierto con obstáculos
Rango mecánico de operación del sonar	90°
Resolución mecánica de giro del sonar	0.9°
Número de puntos de medida del sonar	400
Distancia máxima de operación del sonar	70 m
Resolución de la imagen	1 m
Radio de waypoint	5 m
Velocidad del vehículo	Variable (0-1m/s)
Control de trayectoria	Pure-pursuit
Sistema de evasión de obstáculos	Reactivo-Fuzzy

La primera simulación que se realiza es un recorrido compuesto por 8 waypoints (Wp) fijos y previamente definidos. La primera parte de este recorrido, que corresponde a los 5 primeros waypoints, permite evaluar el comportamiento de esta estrategia de evasión de obstáculos en un entorno complejo, donde el vehículo transita por un camino estrecho, y se encuentra con diferentes obstáculos (círculos de radio 5 y 10 m) (Figura 5.13). La trayectoria entre los waypoints 0 y 1 permite evaluar el comportamiento del vehículo cuando la distancia a entre el vehículo y los obstáculos en los sectores laterales es menor que la distancia entre el vehículo y el waypoints en el sector central (wp1). El waypoints 2 permite evaluar la respuesta del vehículo cuando el obstáculo se encuentra cerca del vehículo (<10m). Las trayectorias entre los waypoints 2-3 y waypoints 4-5 evalúan el comportamiento general del proceso de evasión.

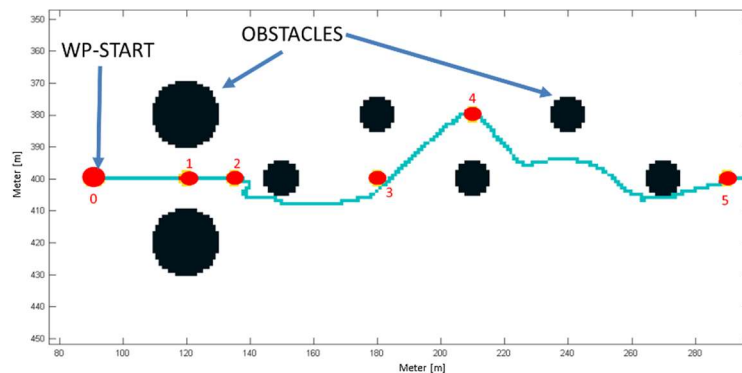


Figura 5.13. Simulación de la navegación del vehículo Guanay II con el algoritmo de evasión de obstáculos (primera parte).

La segunda parte del recorrido comprende los waypoints 6, 7 y 8, esta configuración permite evaluar un escenario de navegación específico, que corresponde a la navegación en una esquina. El waypoint 7 obliga al vehículo a entrar en esta zona, como se puede observar en la Figura 5.14. El waypoint 8 no está ubicado en línea de vista directa, por tanto, el vehículo deberá enfrentar un obstáculo en forma de “L” (punto muerto), el cual representa un alto riesgo de colisión.

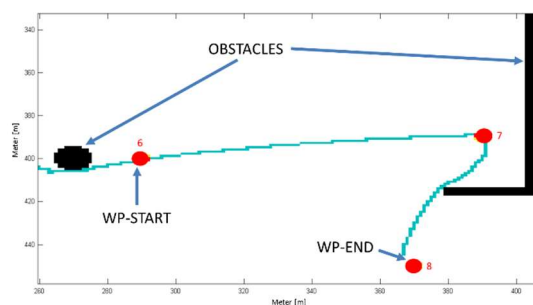


Figura 5.14. Simulación de la navegación del vehículo Guanay II con el algoritmo de evasión de obstáculos (segunda parte).

## Capítulo 5

En la Figura 5.15 se muestran los resultados obtenidos en una segunda simulación en un entorno similar al anteriormente utilizado, pero con una distribución de waypoint diferente. El vehículo inicialmente debe transitar a través de diferentes obstáculos (waypoint 1 al 4) y posteriormente superar nuevamente un obstáculo en forma de “L”. La ubicación de los waypoints 5 y 6 es diferente a la ubicación de los waypoints 7 y 8 de la simulación anterior. Finalmente, existe una trayectoria a recorrer por el vehículo entre el waypoint 6 y 7, la cual se encuentra con un obstáculo de aproximadamente 100 metros.

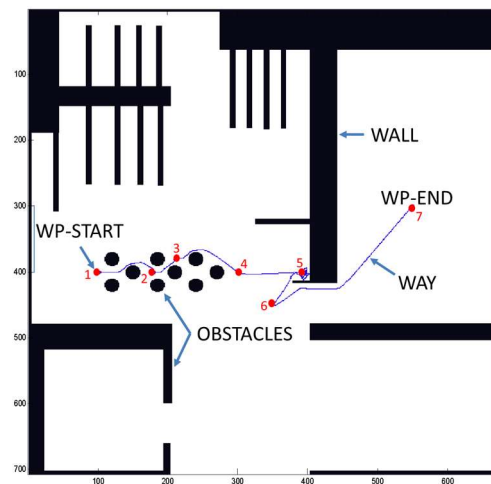


Figura 5.15. Simulación de la navegación del vehículo Guanay II con el algoritmo de evasión de obstáculos.

Al analizar las trayectorias simuladas en las Figura 5.13, Figura 5.14 y Figura 5.15, se puede verificar un correcto funcionamiento del sistema para la evasión de obstáculos que ha permitido la navegación del vehículo a través de diferentes obstáculos, sin perder la trayectoria de navegación y alcanzando cada uno de los waypoints.

Las maniobras que realiza el vehículo para salir del punto muerto (L) y llegar al waypoint 8 en la Figura 5.14 y al waypoint 6 en la Figura 5.15, se basan en realizar pequeños desplazamientos, a baja velocidad y con un rumbo cambiante. Con esta maniobra el vehículo gira en torno a un área pequeña, hasta encontrar una trayectoria libre de obstáculos. A continuación, el control de trayectoria corregirá el rumbo del vehículo llevándolo al siguiente waypoint.

En la Figura 5.16 se muestran los resultados obtenidos en una tercera simulación, después de 40 minutos de simulación. En este caso solo existen tres waypoints. El obstáculo en forma de “L” separa el waypoint 2 del waypoint 3. Esta configuración de

waypoints genera que el vehículo se quede recorriendo una pequeña área, con una velocidad cercana a 0.012m/s y no pueda alcanzar el siguiente waypoint.

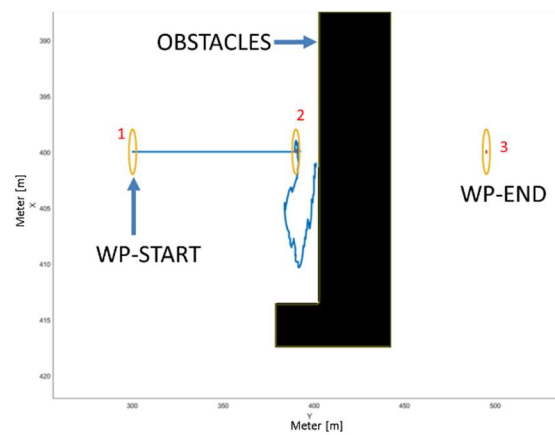


Figura 5.16. Simulación de la navegación del vehículo Guanay II con el algoritmo de evasión de obstáculos.

De acuerdo con los resultados mostrados anteriormente, se puede concluir que esta estrategia tiene un buen comportamiento, aunque existen situaciones que no se pueden solventar. Por otra parte, esta estrategia solo puede ser implementada en vehículos que la capa de aplicación tenga acceso directo a la capa física de modo que se puedan controlar las variables de velocidad y guiñada. Dadas estas situaciones se plantea una segunda estrategia.

### 5.5 - Estrategia 2: Evasión de obstáculos por generación de nuevos waypoints

La segunda estrategia planteada, consiste en generar un nuevo waypoint (para evasión) cuando haya riesgo de colisión. Este waypoint para evasión, será incluido en la lista de general de waypoints que definen la trayectoria, reemplazando al waypoint (original) al que el vehículo se esté dirigiendo (Figura 5.17). Los waypoints de evasión, son generados para cambiar la trayectoria del vehículo, pero no se convierten en puntos obligatorios de la trayectoria. En cada uno de los ciclos de ejecución del algoritmo, se evalúa el riesgo de colisión. Si existe la posibilidad de que el vehículo colisione, se genera o se recalcula la ubicación del waypoint y se sustituye el waypoint para evasión anterior. Esta estrategia permite que el vehículo evada el obstáculo. Posteriormente, una vez superado el obstáculo, el vehículo continuara el seguimiento del waypoint original, manteniendo la trayectoria inicialmente definida.

## Capítulo 5

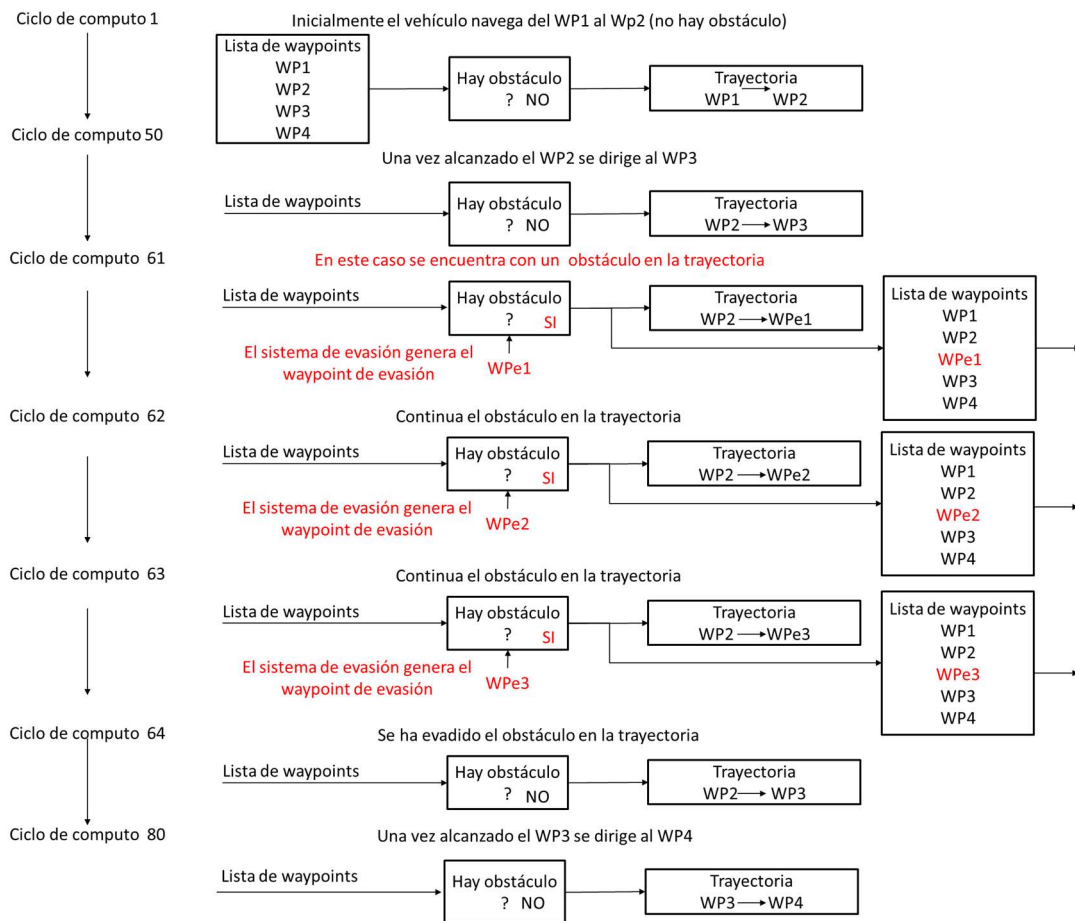


Figura 5.17. Diagrama del proceso de actualización de la lista de waypoints

Esta estrategia, tal como se ha comentado, tiene la gran ventaja frente a la anterior estrategia, de poder ser implementada en vehículos donde no se disponga del acceso a las variables de guiñada y velocidad, que es el caso de muchos vehículos comerciales. Además, esta estrategia también tiene como características positivas que:

- La generación de un nuevo waypoints; permite obtener un mejor rendimiento en la navegación del vehículo, debido a que el control Pure Pursuit será el encargado de calcular la velocidad y el ángulo de referencia en cada instante de tiempo, optimizando el rumbo del vehículo.
- La posibilidad, en un desarrollo futuro, de integrar el sistema actual de evasión con un sistema deliberativo; por ejemplo, del tipo RRT (rapidly-exploring random trees), para conformar un sistema de evasión híbrido que permitirá optimizar la trayectoria de navegación que sigue el vehículo.

Como se observa en la Figura 5.18, el sistema de detección y evasión de obstáculos se ejecuta en paralelo al sistema de control trayectoria y al lazo de control interno.



Cuando se detecta un obstáculo, el sistema genera un nuevo waypoint el cual va al control de trayectoria Pure Pursuit. En este caso, la salida del bloque de evasión de obstáculos, corresponde a las coordenadas polares (ángulo y radio) de un nuevo waypoint con respecto a la ubicación del vehículo. Con base en la posición GPS actual del vehículo, se convierten las coordenadas polares en coordenadas geográficas (Latitud y Longitud). En la Figura 5.19 se describe el procedimiento para realizar este cambio de coordenadas.

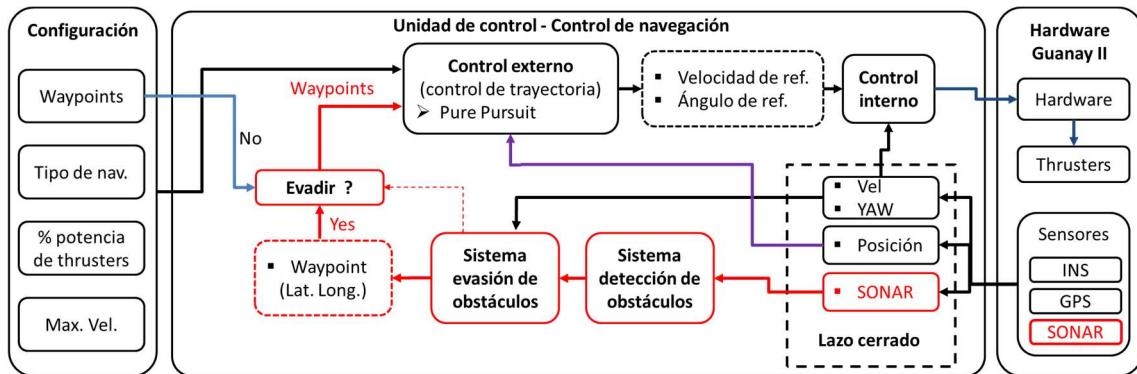


Figura 5.18. Diagrama de bloques general de control de trayectoria de navegación

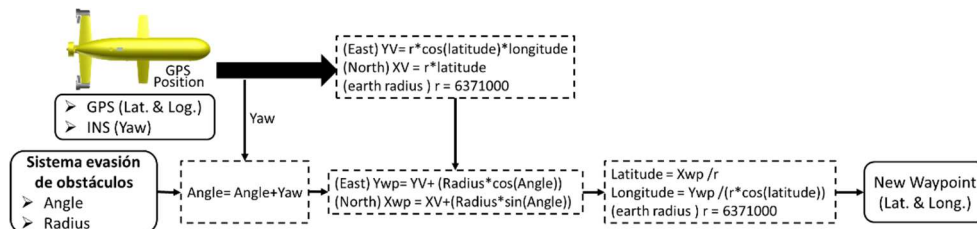


Figura 5.19. Diagrama de bloques, conversión de la salida del sistema de evasión (coordenadas polares) a coordenadas geográficas del nuevo waypoint

### 5.5.1 - Generación de waypoint de evasión por adición de una constante

Como primer criterio para determinar las coordenadas del nuevo waypoint (ángulo y radio), que permitirá la evasión, se considera el rumbo del vehículo y se define un ángulo de cambio constante y un radio constante. Para determinar el ángulo de salida del nuevo waypoint, se suma el ángulo de cambio contante al rumbo actual del vehículo. El radio constante define la distancia del nuevo waypoint (Figura 5.20).

Esta estrategia se activa cuando el sistema de detección detecta un obstáculo a una distancia menor o igual de 30m del vehículo. Ahora bien, si la distancia entre el vehículo y el obstáculo en el sector central del SONAR es mayor que distancia entre vehículo y

el waypoint, no se activa el sistema de evasión y el vehículo alcanza primero el waypoint y después evadirá el obstáculo.

Esta ley de control permitirá un primer análisis del comportamiento del vehículo para posteriormente definir las reglas del control de evasión difuso.

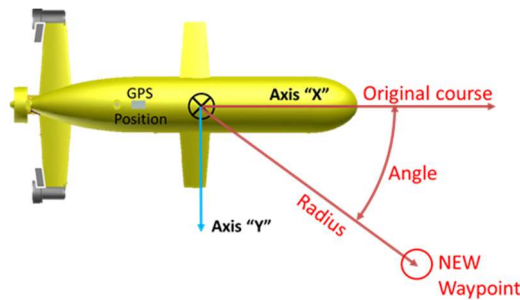


Figura 5.20. Definición del nuevo waypoint en coordenadas polares

También se propone un cambio en la configuración de los parámetros del sonar, respecto a los parámetros que se tenían en el apartado 4.2.4. Se configura el rango mecánico de operación del SONAR a  $30^\circ$ , con lo cual cada uno de los tres sectores de detección es de  $10^\circ$  y la distancia máxima de operación se configura a 30 m (ver Figura 5.21). Se utiliza el mismo método de detección de obstáculo descrito en el apartado 4.2.5.2, estableciendo la distancia mínima entre el vehículo y el obstáculo por cada sector. Para observar cual es el comportamiento del vehículo en diferentes circunstancias dentro del simulador no se ha incluido la condición de parar, cuando el vehículo colisiona contra un obstáculo.

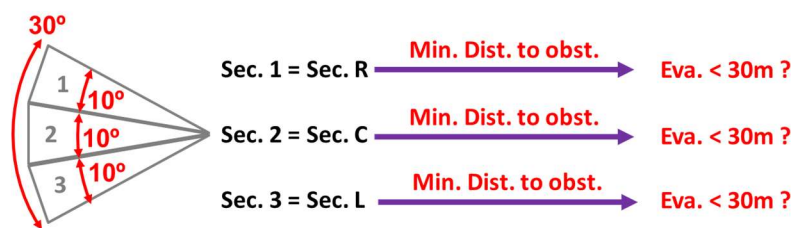


Figura 5.21. Diagrama configuración detección de obstáculos

Para analizar el desempeño y el comportamiento del sistema de evasión de obstáculos, se realizan 11 grupos de simulaciones, con diferentes constantes del ángulo de cambio y del radio, que se utilizan para la generación de los waypoints de evasión. También se analizan diferentes escenarios.

### 5.5.1.1 - Simulación en escenarios con obstáculos circulares

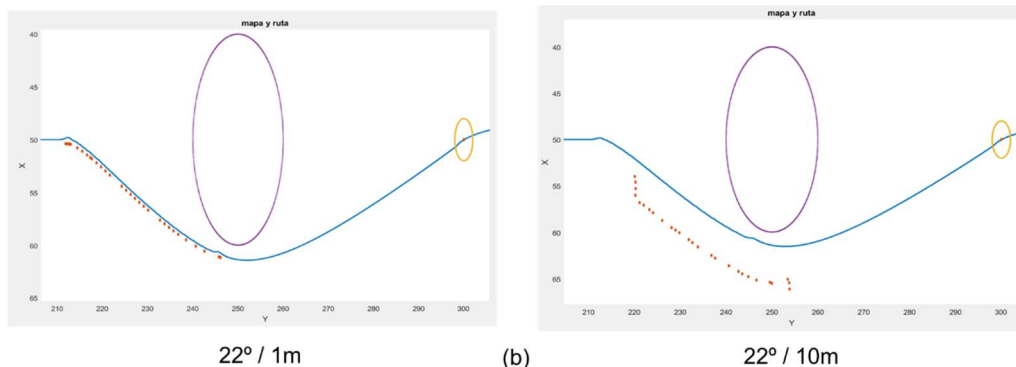
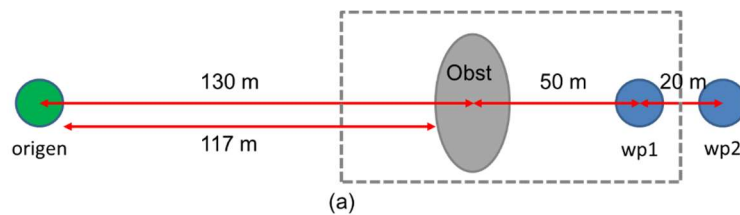
En este apartado se presentan cuatro grupos de simulaciones de evasión de obstáculos circulares para diferentes trayectorias de navegación.

#### Grupo 1 de simulación

El primer grupo de simulaciones está compuesto por 10 simulaciones, utilizando 5 constantes de ángulos diferentes ( $22^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  y  $180^\circ$ ), 2 constantes de radio (1m y 10 m) y un obstáculo circular de 10 m de radio (ver Figura 5.22a). En este escenario, la distancia existente entre el punto de origen y el obstáculo permite garantizar que el vehículo alcance la máxima velocidad (1 m/s). En la Tabla 5-4 se muestra la configuración de los parámetros de simulación utilizados.

Tabla 5-4. Parámetros de simulación (grupo 1, 2, 3 y 4)

Parámetros	Valor
Entorno de navegación	Abierto con obstáculo (circular de 10 m de radio)
Rango mecánico de operación del sonar	$30^\circ$
Distancia máxima de operación del sonar	30 m
Resolución de la imagen	1 m
Radio de waypoint	6 m
Velocidad del vehículo	Variable (0-1m/s)
Control de trayectoria	Pure-pursuit
Sistema de evasión de obstáculos	Reactivo - nuevo waypoint Cte. ángulo: $22^\circ$ , $45^\circ$ , $90^\circ$ , $135^\circ$ y $180^\circ$ Cte. radio: 1m y 10m



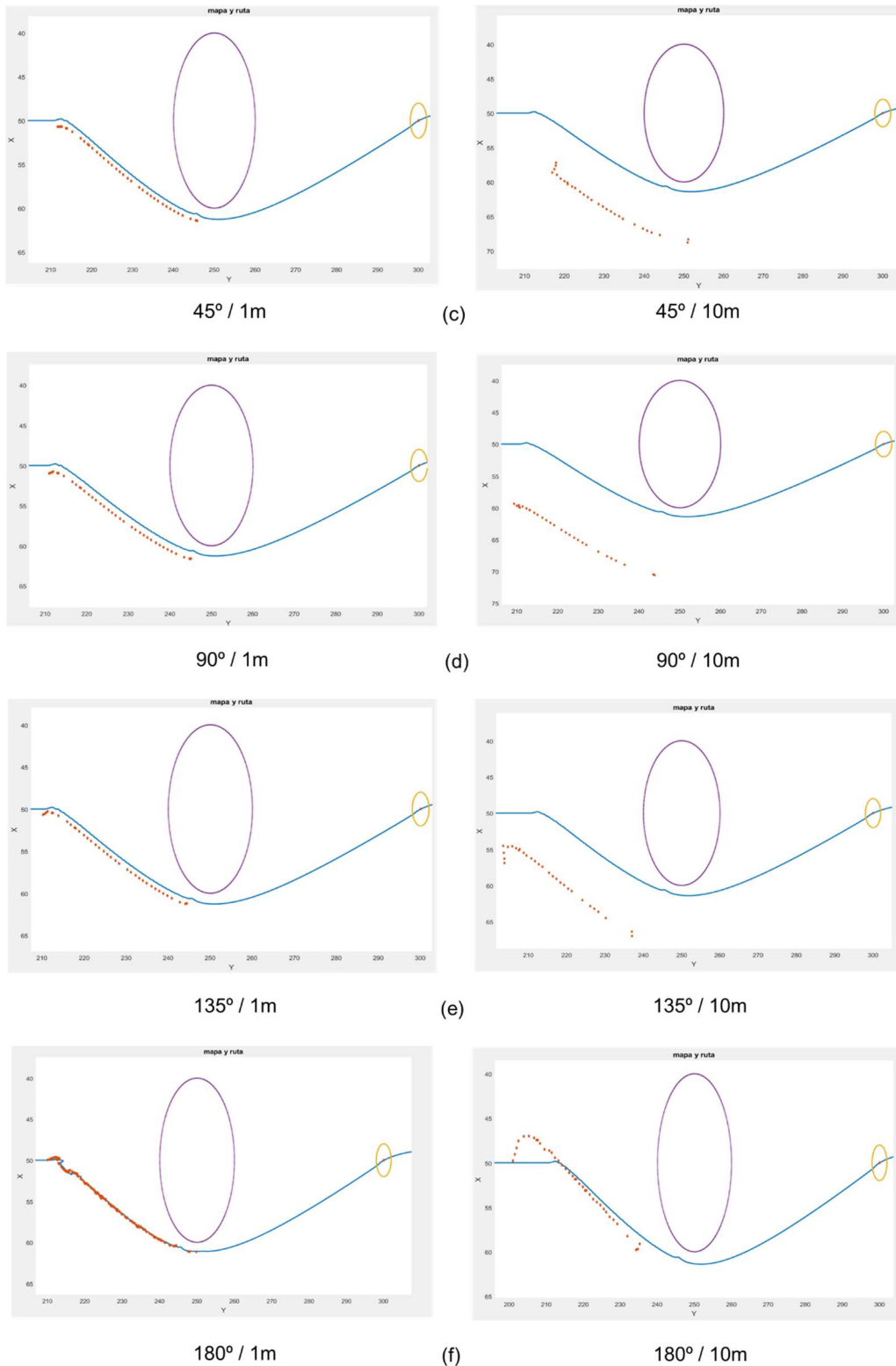


Figura 5.22. Grupo 1 de simulación (a) Escenario de simulación “A” para el primer grupo, resultado obtenido del sistema de evasión para: (b) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 22°, (c) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 45°, (d) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 90°, (e) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 135°, (f) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 180°. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

Los puntos rojos que se observan en las diferentes simulaciones, corresponden a los waypoints generados por el sistema de evasión de obstáculos. En cada ciclo de ejecución del algoritmo, se evalúa el riesgo de colisión y se actualiza la ubicación del waypoints de evasión. Los waypoints de evasión, son generados para cambiar la trayectoria del vehículo, pero no se convierten en puntos obligatorios de la trayectoria.

Al analizar los resultados obtenidos en la Figura 5.22, se puede concluir que, bajo un escenario de navegación y evasión sencillo, todos los casos simulados muestran buenos resultados, es decir en todos los casos el vehículo evade el obstáculo. Aunque, cuando se utiliza la configuración de ángulo 180° y radio 1m, se observa un comportamiento inicial irregular. En la Tabla 5-5 se comparan cuantitativamente las simulaciones realizadas respecto al tiempo de ejecución y la distancia recorrida. La simulación donde el vehículo obtiene un menor tiempo de ejecución, corresponde a una configuración con un ángulo de 22° y un radio de 10m. La distancia recorrida es menor, para las simulaciones de, radio 1m y los ángulos 45°, 90° y 135°. Sin embargo, con un ángulo de 22° y un radio de 10m la diferencia en la distancia recorrida es mínima. En general, el tiempo de ejecución varía entre 787s y 590s mientras que la distancia recorrida está comprendida entre 285m y 281m.

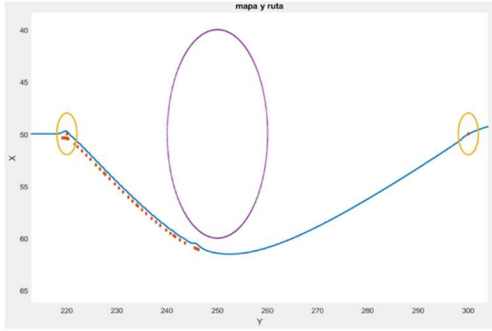
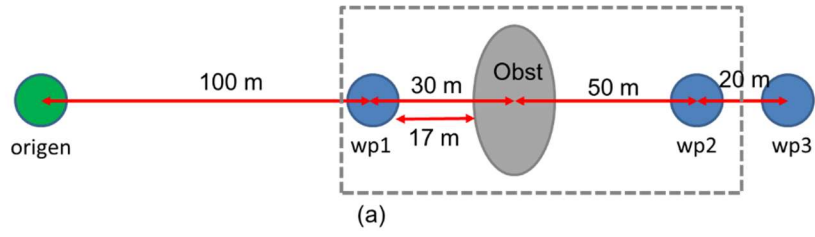
Tabla 5-5. Resultados cuantitativos obtenidos del primer grupo de simulación

Angulo	Tiempo de ejecución [s]	Distancia recorrida [m]	Velocidad promedio [m/s]
	Radio 1m / 10m	Radio 1m / 10m	1m / 10m
22°	608.63 / 589.8	281.6895 / 281.7181	0.46 / 0.47
45°	628 / 610.2	281.6663 / 281.6827	0.44 / 0.46
90°	628 / 610.2	281.6663 / 281.6827	0.44 / 0.46
135°	628 / 610.2	281.6663 / 281.6827	0.44 / 0.46
180°	786.7 / 613.8	284.6651 / 281.7	0.36 / 0.45

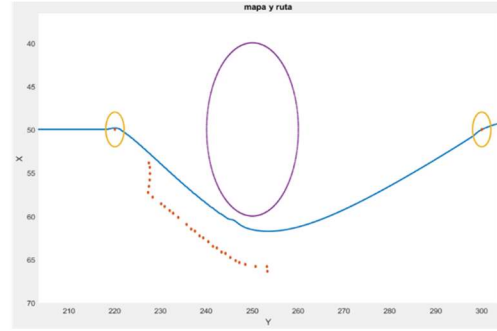
### Grupo 2 de simulación

El segundo grupo de simulación también está compuesto por 10 simulaciones con la mismas contantes de ángulos, radios y tamaño de obstáculo (ver Figura 5.23a). Pero en este escenario se ha puesto un waypoint antes del obstáculo, a una distancia de 30m del centro del obstáculo. Este waypoint permite analizar el comportamiento del vehículo cuando la distancia al obstáculo es menor a 30 metros que es el límite de detección. Para estas simulaciones se han utilizado los mismos parámetros utilizados en el primer grupo de simulación (ver Tabla 5-4).

Capítulo 5

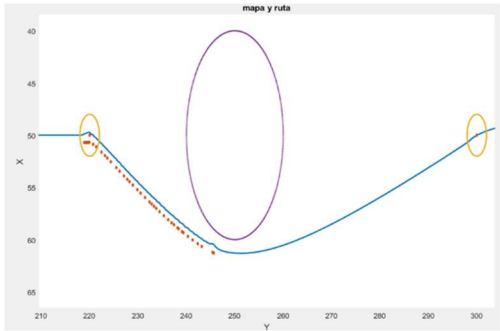


22° / 1m

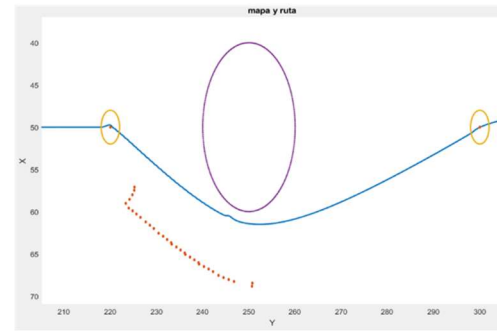


(b)

22° / 10m

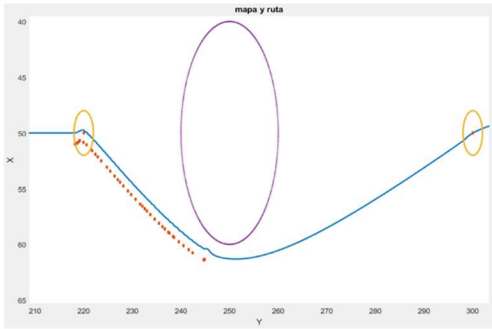


45° / 1m

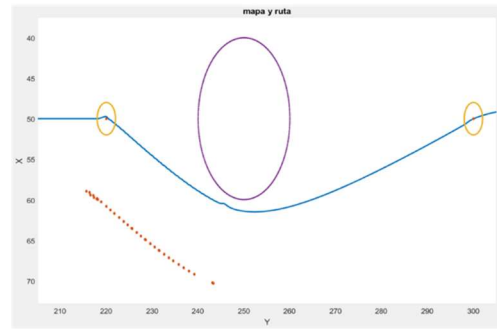


(c)

45° / 10m

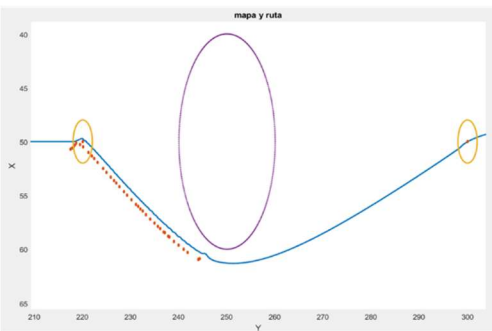


90° / 1m

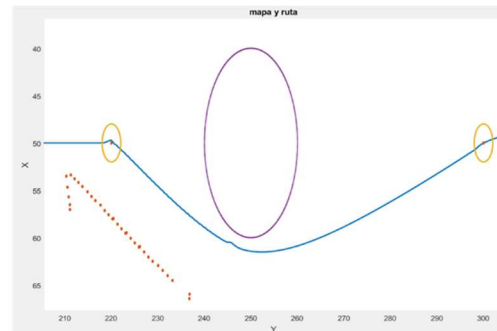


(d)

90° / 10m



135° / 1m



(e)

135° / 10m

## Diseño de un sistema fuzzy para la evasión de obstáculos

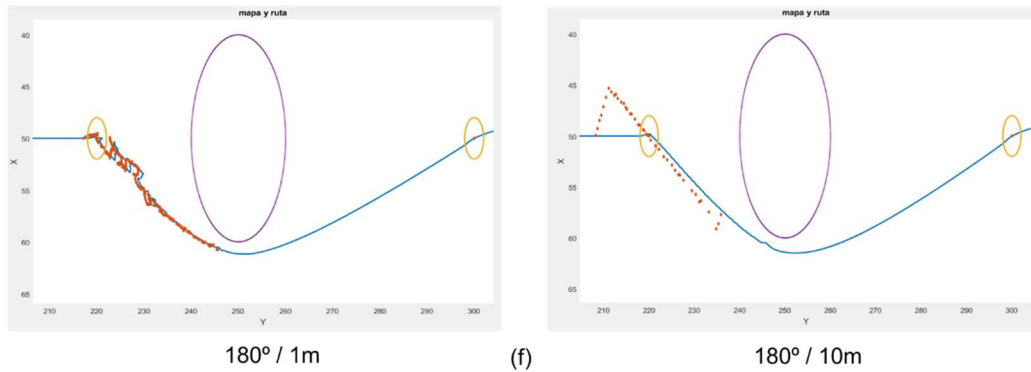


Figura 5.23. Grupo 2 de simulación (a) Escenario de simulación “B” para el segundo grupo, resultado obtenido del sistema de evasión para: (b) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de  $22^\circ$ , (c) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de  $45^\circ$ , (d) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de  $90^\circ$ , (e) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de  $135^\circ$ , (f) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de  $180^\circ$ . (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

Al analizar los resultados obtenidos del segundo grupo de simulaciones, que se muestran en la Figura 5.23, se observa un comportamiento similar al de las simulaciones que componen el primer grupo (ver Figura 5.22). Todos los casos simulados muestran buenos resultados, es decir en todos los casos el vehículo evade el obstáculo. Del mismo modo que en el primer grupo el comportamiento del vehículo en la simulación con configuración de ángulo  $180^\circ$  y radio 1m, tiene un comportamiento irregular.

En la Tabla 5-6, se analizan cuantitativamente las simulaciones realizadas. La simulación donde el vehículo tuvo un menor tiempo de ejecución, corresponde a ángulo de  $22^\circ$  y un radio de 10m. El caso donde la distancia recorrida fue menor, corresponde a un radio de 1m y los ángulos  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$ . En general, el tiempo de ejecución varía entre 976s y 599s, mientras que la distancia recorrida varía entre 298m y 282m.

Tabla 5-6. Resultados cuantitativos obtenidos del segundo grupo de simulación

Angulo	Tiempo de ejecución [s]		Distancia recorrida [m]		Velocidad promedio [m/s]	
	Radio 1m / 10m		Radio 1m / 10m		Radio 1m / 10m	
<b><math>22^\circ</math></b>	621.3 / 598.5		282.2873 / 282.2758		0.45 / 0.47	
<b><math>45^\circ</math></b>	644.5 / 620.9		282.22263 / 282.2771		0.43 / 0.45	
<b><math>90^\circ</math></b>	644.5 / 620.9		282.22263 / 282.2771		0.43 / 0.45	
<b><math>135^\circ</math></b>	644.5 / 620.9		282.22263 / 282.2771		0.43 / 0.45	
<b><math>180^\circ</math></b>	975.7 / 626.8		297.5464 / 282.2422		0.3 / 0.45	

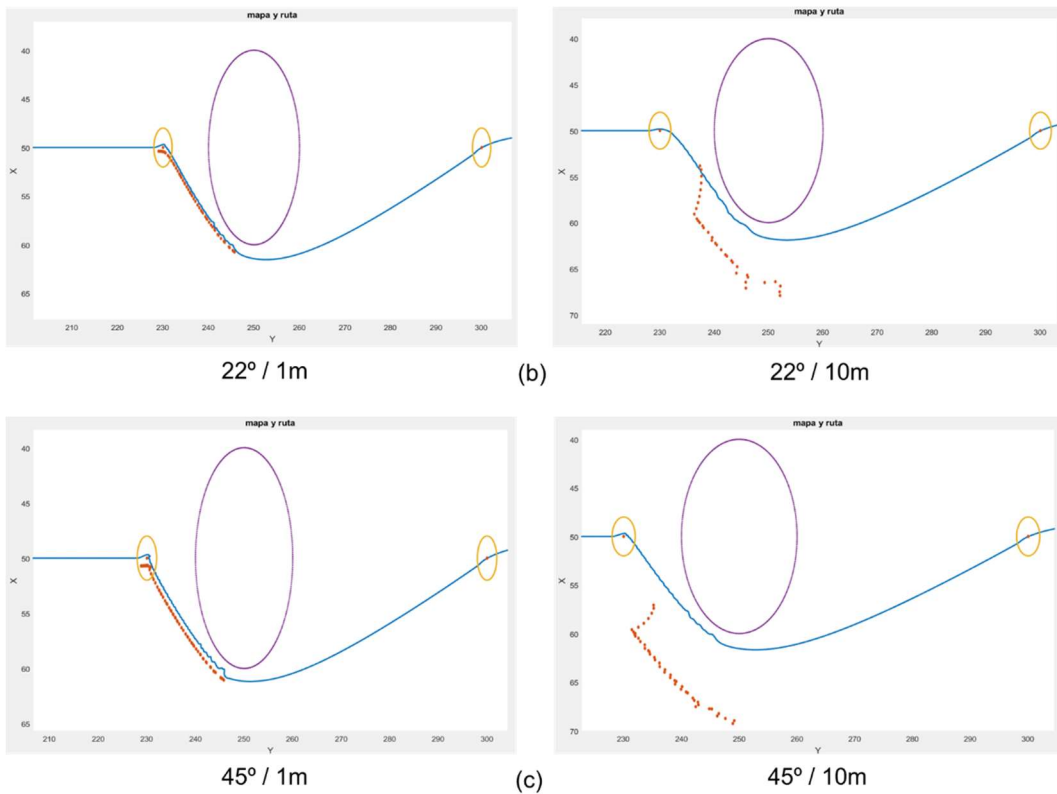
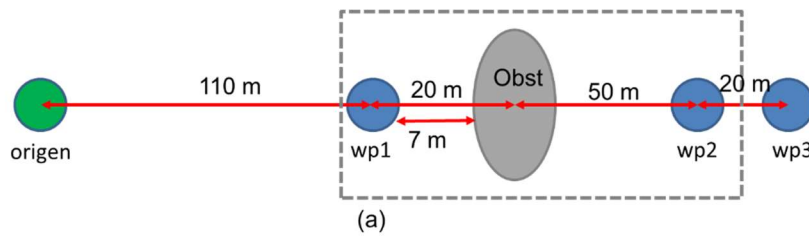
Al comparar los resultados obtenidos en el primer grupo y segundo grupo de simulaciones, se observa que en ambos grupos las simulaciones con los ángulos  $45^\circ$ ,

## Capítulo 5

90° y 135°, presentan valores similares de tiempo de ejecución y de distancia recorrida. En este 2 grupo de simulaciones la configuración de 22° y 10m, continúa siendo la que produce un menor tiempo de ejecución. Mientras que la menor distancia recorrida se alcanza con la configuración de 10m y los ángulos 45°, 90° y 135°, aunque las diferencias son mínimas.

### Grupo 3 de simulación

En el tercer grupo de simulaciones, se utiliza la misma configuración de los grupos anteriores que se encuentra en la Tabla 5-4. En el escenario Figura 5.24a., se ha puesto un waypoint antes del obstáculo, a una distancia de 20m del centro del obstáculo. Los resultados cuantitativos de estos grupos se muestran en la Tabla 5-7.





## Diseño de un sistema fuzzy para la evasión de obstáculos

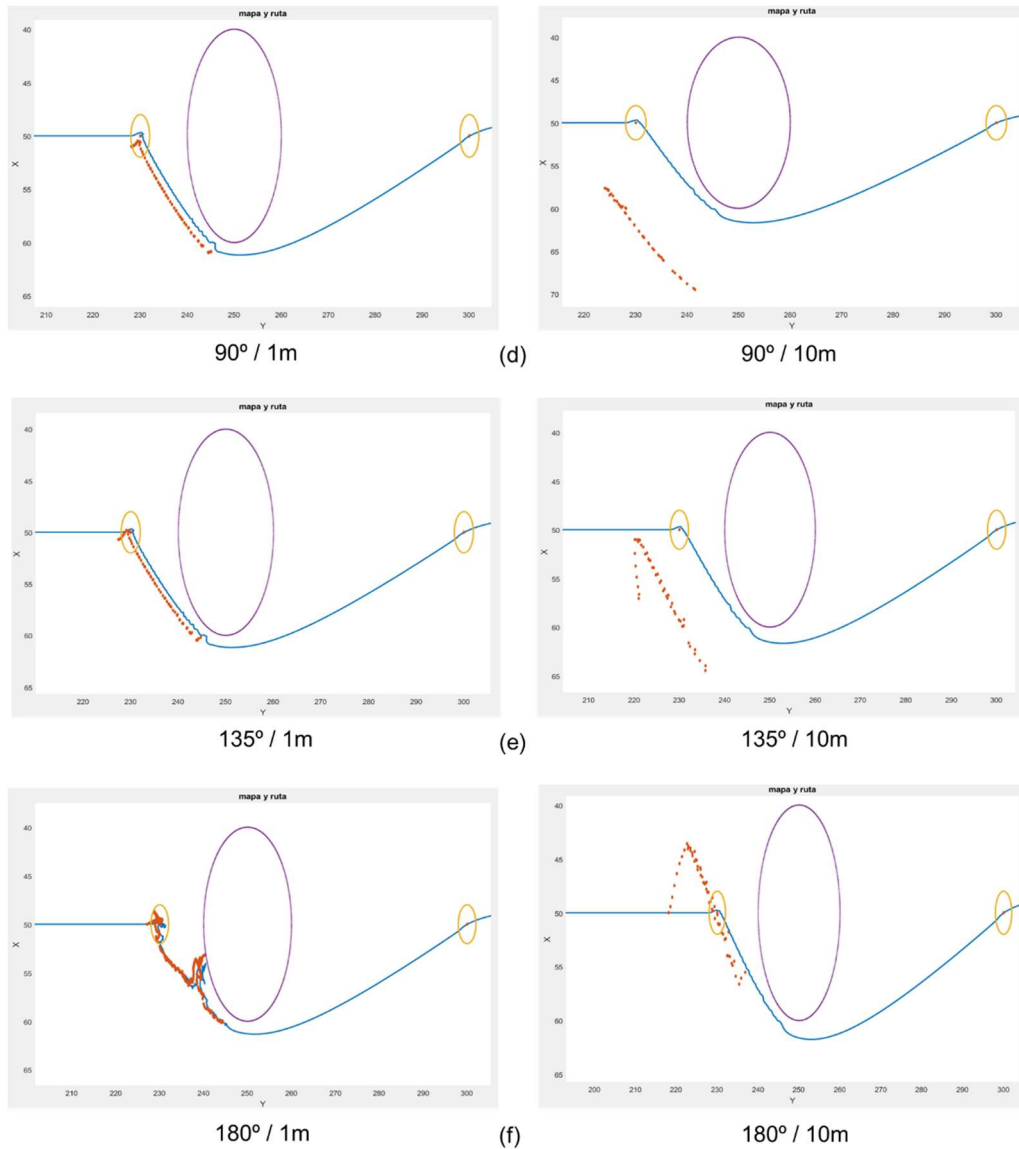


Figura 5.24. Grupo 3 de simulación (a) Escenario de simulación “C” para el tercer grupo, resultado obtenido del sistema de evasión para: (b) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 22°, (c) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 45°, (d) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 90°, (e) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 135°, (f) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 180°. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

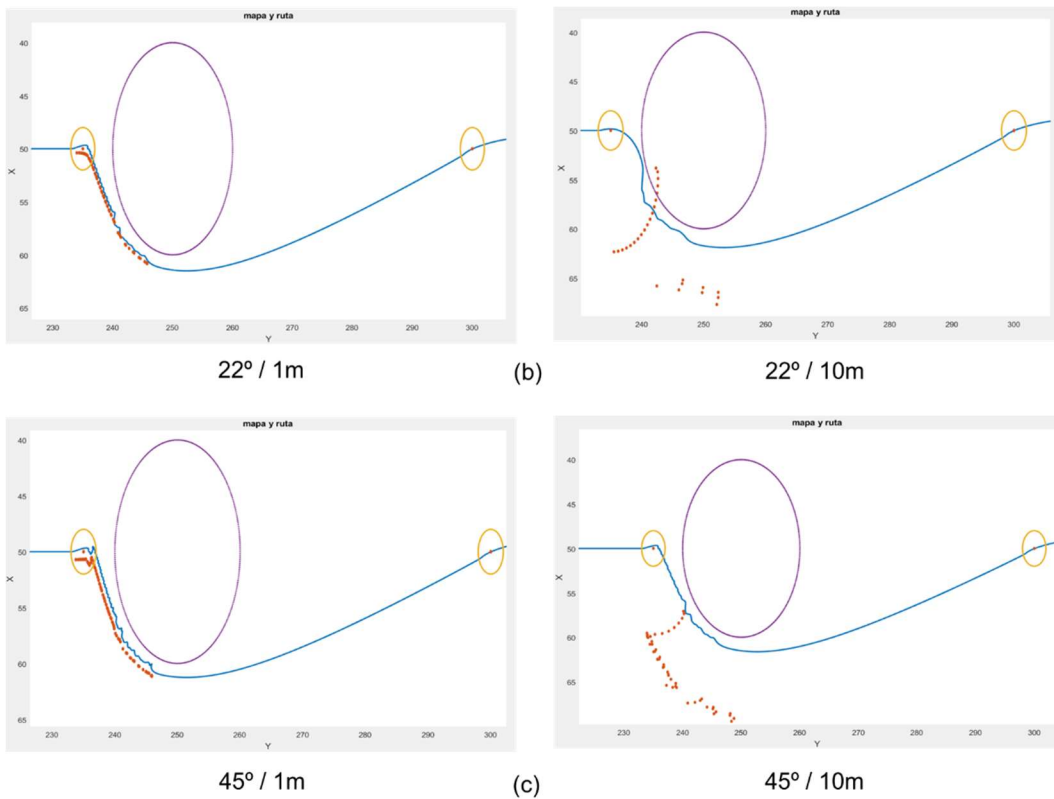
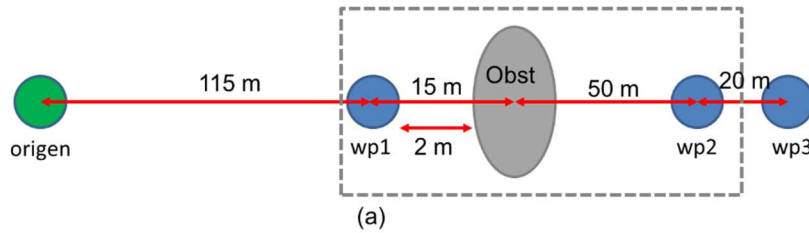
Tabla 5-7. Resultados cuantitativos obtenidos del tercer grupo de simulación

Angulo	Tiempo de ejecución [s]	Distancia recorrida [m]	Velocidad promedio [m/s]
	Radio 1m / 10m	Radio 1m / 10m	1m / 10m
22°	671.5 / 608.7	284.1436 / 283.896	0.42 / 0.46
45°	706 / 652.4	285.3129 / 283.9613	0.4 / 0.43
90°	706 / 652.4	285.3129 / 283.9613	0.4 / 0.43
135°	706 / 652.4	285.3129 / 283.9613	0.4 / 0.43
180°	1232.9 / 656.1	310.0253 / 283.9511	0.25 / 0.43

Los resultados obtenidos en este tercer grupo de simulación, son similares a los resultados vistos en los grupos anteriores. Aunque en este grupo en el caso ángulo  $180^\circ$  y radio 1m, el vehículo no solo tiene un comportamiento irregular (errático), sino que también colisiona contra el obstáculo.

**Grupo 4 de simulación**

Este grupo sigue teniendo la misma configuración de los grupos anteriores (Tabla 5-4). En el escenario se ha puesto un waypoint antes del obstáculo, a una distancia de 15m (Figura 5.25a). Los resultados cuantitativos de estos grupos se muestran en la Tabla 5-8.



## Diseño de un sistema fuzzy para la evasión de obstáculos

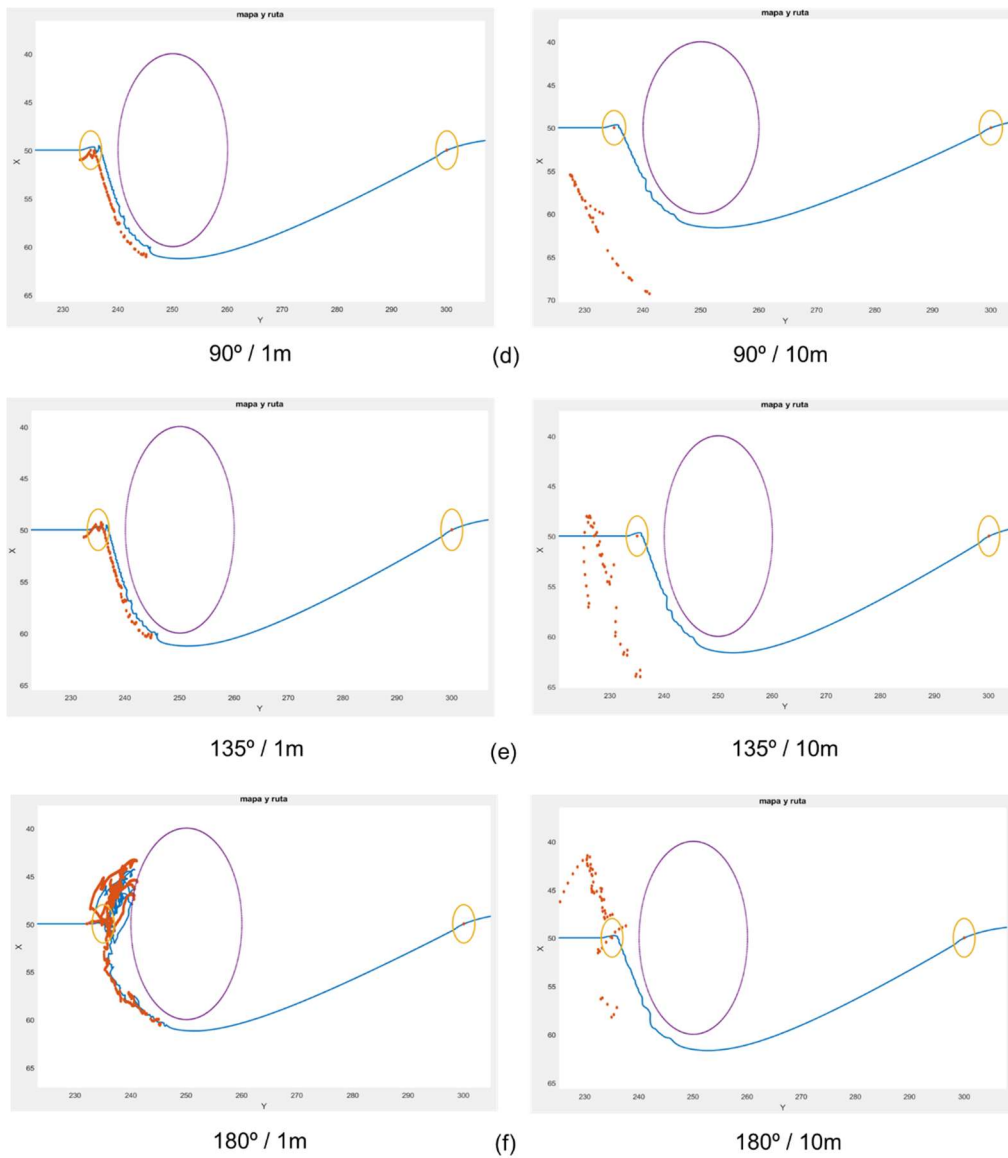


Figura 5.25. Grupo 4 de simulación (a) Escenario de simulación “D” para el cuarto grupo, resultado obtenido del sistema de evasión para: (b) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de  $22^\circ$ , (c) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de  $45^\circ$ , (d) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de  $90^\circ$ , (e) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de  $135^\circ$ , (f) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de  $180^\circ$ . (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

Tabla 5-8. Resultados cuantitativos obtenidos del cuarto grupo de simulación

Angulo	Tiempo de ejecución [s]	Distancia recorrida [m]	Velocidad promedio [m/s]
	Radio 1m / 10m	Radio 1m / 10m	1m / 10m
<b><math>22^\circ</math></b>	671.1 / 605.6	286.6279 / 286.3442	0.42 / 0.47
<b><math>45^\circ</math></b>	750.5 / 651.6	289.8034 / 286.0985	0.38 / 0.43
<b><math>90^\circ</math></b>	750.5 / 651.6	289.8034 / 286.0985	0.38 / 0.43
<b><math>135^\circ</math></b>	750.5 / 651.6	289.8034 / 286.0985	0.38 / 0.43
<b><math>180^\circ</math></b>	- / 651	- / 285.8919	- / 0.43

En este grupo en la mayoría de los casos se observa un comportamiento irregular en alguna parte de la trayectoria de evasión. Específicamente, en el caso de ángulo  $22^\circ$  y radio 10m se observa que el vehículo se acerca excesivamente al obstáculo. En el caso de ángulo  $180^\circ$  y radio 1m, se observa un comportamiento irregular (errático), que lleva al vehículo a colisionar contra el obstáculo.

### Conclusiones sobre los resultados obtenidos en los 4 primeros grupos de simulación

Al comparar los resultados obtenidos en los cuatro primeros grupos de simulaciones, se observa que en todos los grupos las simulaciones con los ángulos  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$  presentan los mismos valores de tiempo de ejecución y de distancia recorrida. La configuración de  $22^\circ$  y 10m, presenta un menor tiempo de ejecución en todas las simulaciones, mientras que la menor distancia recorrida en la mayoría de los grupos se alcanza con la configuración de 10m y los ángulos  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$ , pero con una diferencia muy pequeña respecto a la configuración con  $22^\circ$ .

Consecuentemente, con estos resultados se selecciona las configuraciones con ángulos de  $22^\circ$  y  $90^\circ$  y de radios 1 y 10 metros para realizar nuevas simulaciones con otros tipos de obstáculos. A continuación, se presentan 3 nuevos grupos de simulación con diferentes formas de obstáculos.

#### **5.5.1.2 - Simulación en escenarios con obstáculos planos**

En este apartado se presentarán 3 grupos de simulaciones donde se evalúa el comportamiento del vehículo y del sistema de evasión, ante obstáculos como paredes verticales a la trayectoria, esquinas entre dos paredes y pares inclinadas a la trayectoria. Para realizar estas simulaciones se utiliza la configuración de la Tabla 5-4, exceptuando el número de ángulos.

#### Grupo 5 de simulación

Para desarrollar el quinto grupo de simulaciones, se utiliza un obstáculo rectangular de 30m de largo y 10 metros de ancho ubicado perpendicularmente a la trayectoria del vehículo como se muestra en la Figura 5.26a. En este caso se ha puesto un waypoint

## Diseño de un sistema fuzzy para la evasión de obstáculos

antes del obstáculo a una distancia de 10m. En la Tabla 5-9 se pueden observar los resultados cuantitativos.

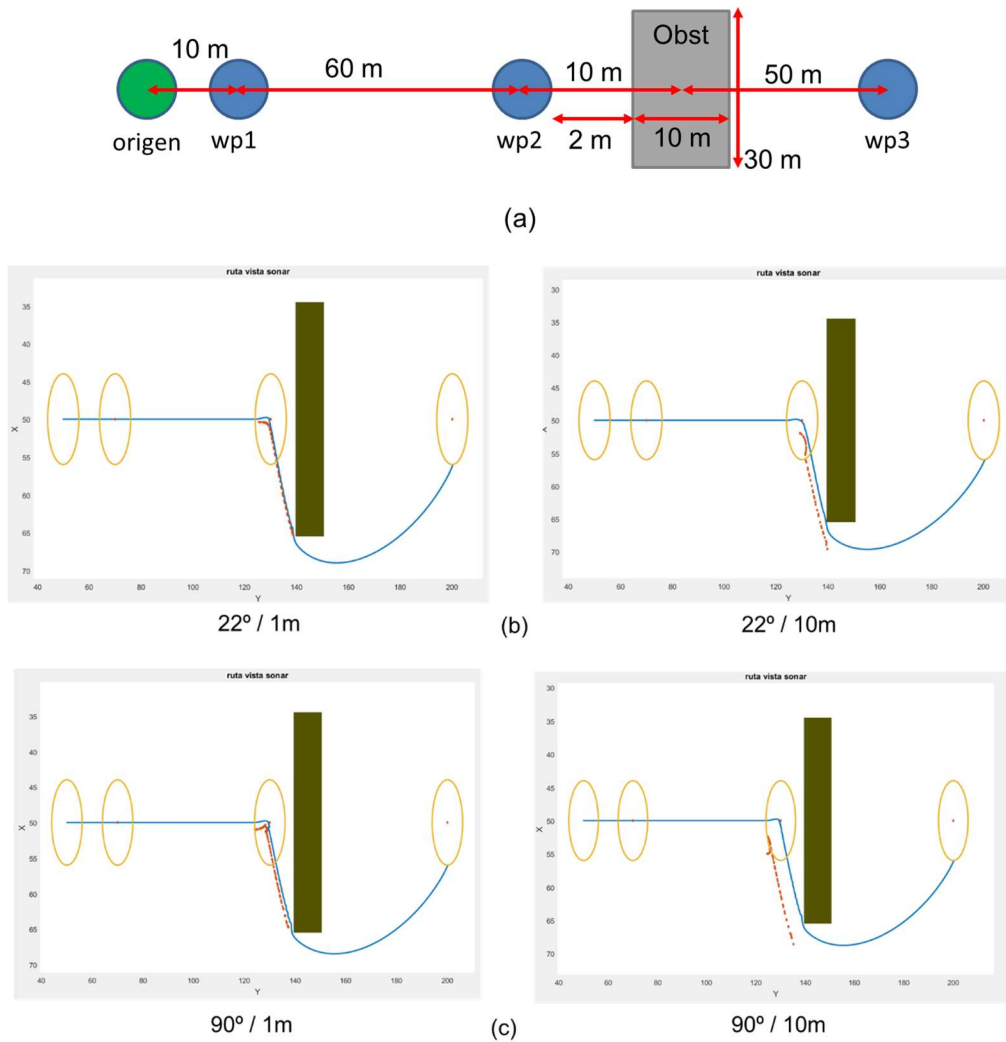


Figura 5.26. Grupo 5 de simulación (a) Escenario de simulación “E” para el quinto grupo, resultado obtenido del sistema de evasión para: (b) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 22°, (c) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 90°. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

Tabla 5-9. Resultados cuantitativos obtenidos en el quinto grupo de simulación

Angulo	Tiempo de ejecución [s]	Distancia recorrida [m]	Velocidad promedio [m/s]
	Radio 1m / 10m	Radio 1m / 10m	1m / 10m
22°	249.4 / 224.9	162.8584 / 163.3572	0.65 / 0.72
90°	303 / 271.6	164.3329 / 162.9619	0.54 / 0.59

Al analizar la Figura 5.26 se observa que, en los cuatro casos simulados, el comportamiento del sistema es correcto, evadiendo el obstáculo. La distancia recorrida

## Capítulo 5

es similar en todos los casos, el menor tiempo de ejecución se obtuvo con el ángulo  $22^\circ$  y radio 10m.

### Grupo 6 de simulación

En el sexto grupo de simulaciones, se utiliza un obstáculo que el vehículo interpreta como una "L" acostada, ubicada perpendicularmente a la trayectoria del vehículo como se muestra en la Figura 5.27a. Se ha puesto un waypoint antes del obstáculo a una distancia de 10m. En la Tabla 5-10 se pueden observar los resultados cuantitativos.

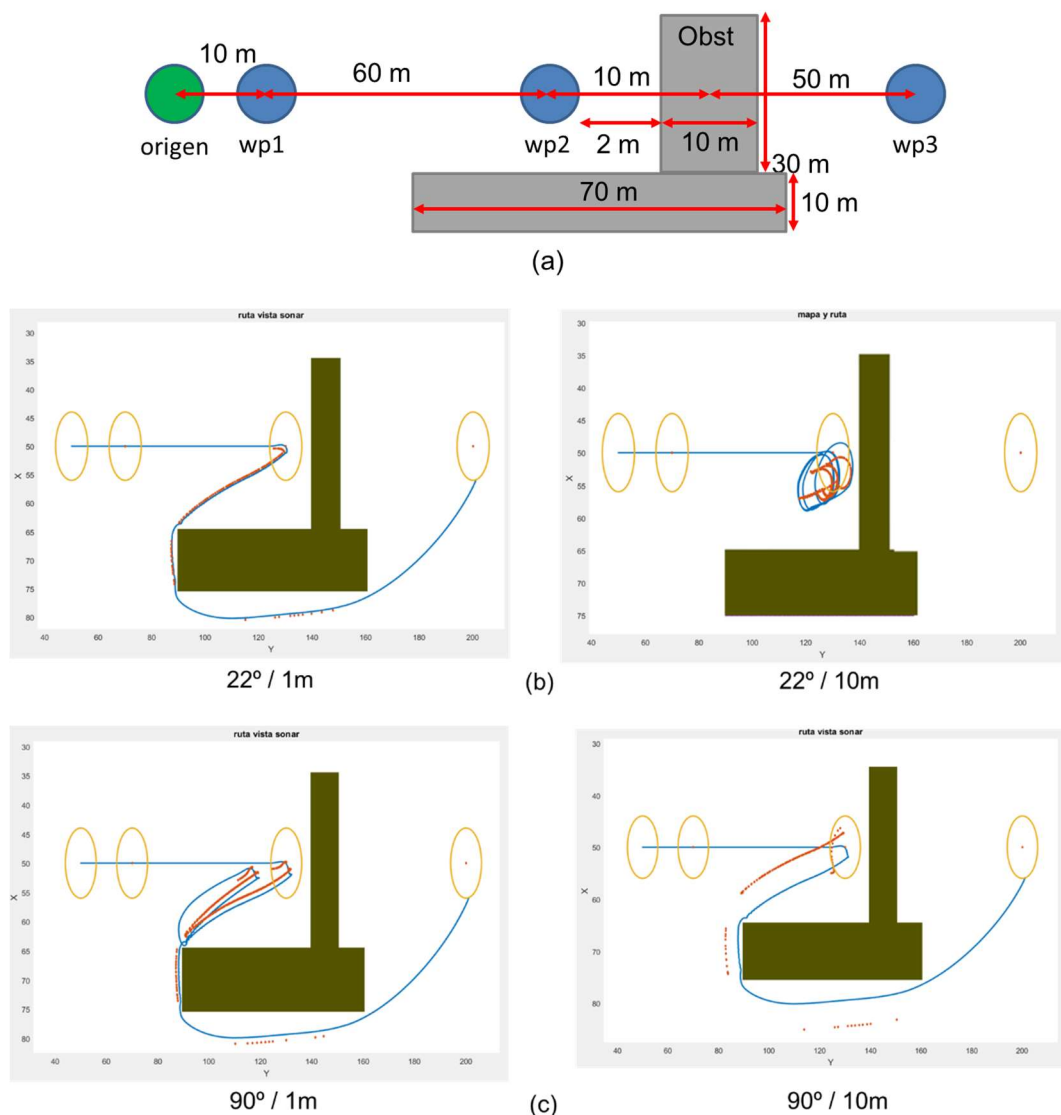


Figura 5.27. Grupo 6 de simulación (a) Escenario de simulación "F" para el sexto grupo, resultado obtenido del sistema de evasión para: (b) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de  $22^\circ$ , (c) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de  $90^\circ$ . (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

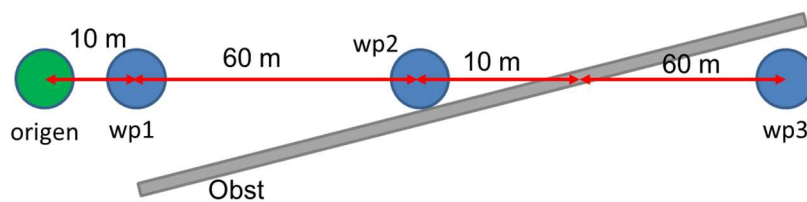
Tabla 5-10. Resultados cuantitativos obtenidos en el sexto grupo de simulación

Angulo	Tiempo de ejecución [s]	Distancia recorrida [m]	Velocidad promedio [m/s]
	Radio 1m / 10m	Radio 1m / 10m	Radio 1m / 10m
22°	483.6 / -	256.9 / -	0.53 / -
90°	905.9 / 532.3	332.43 / 258.87	0.36 / 0.48

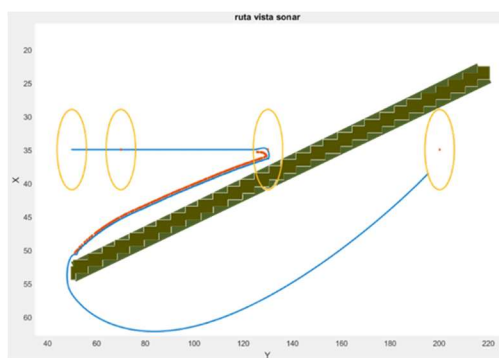
Al analizar la Figura 5.27 se observa que, en los casos de ángulo 22°, radio 10m y ángulo 90°, radio 1m, el comportamiento del sistema no es óptimo. Solo en los casos de ángulo 22°, radio 1m y ángulo 90°, radio 10m el vehículo evade el obstáculo de forma eficiente. La distancia recorrida es similar en estos dos casos y el menor tiempo de ejecución se obtiene con ángulo 22° y radio 1m.

### Grupo 7 de simulación

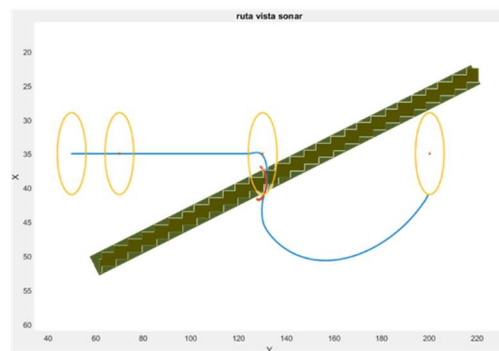
En el séptimo y último grupo de simulaciones con obstáculos planos, se utiliza un obstáculo plano e inclinado, respecto a la trayectoria del vehículo como se muestra en la Figura 5.28a. En este caso se ha colocado un waypoint antes del obstáculo a una distancia de 10m. En la Tabla 5-11 se pueden observar los resultados cuantitativos.



(a)



22° / 1m



(b)

22° / 10m

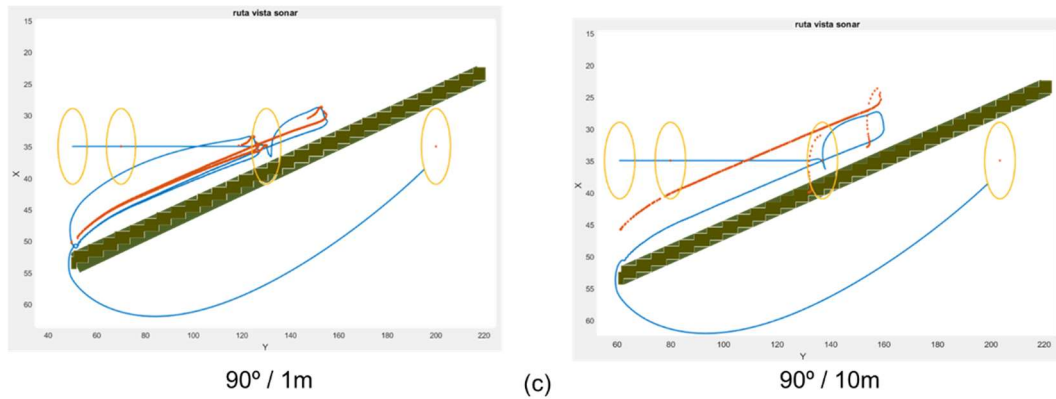


Figura 5.28. Grupo 7 de simulación (a) Escenario de simulación “G” para el séptimo grupo, resultado obtenido del sistema de evasión para: (b) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 22°, (c) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 90°. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

Tabla 5-11. Resultados cuantitativos obtenidos en el séptimo grupo de simulación

Angulo	Tiempo de ejecución [s]	Distancia recorrida [m]	Velocidad promedio [m/s]
	Radio 1m / 10m	Radio 1m / 10m	Radio 1m / 10m
22°	633.8 / -	320.61 / -	0.5 / -
90°	1683 / 884.2	542.57 / 376.53	0.3 / 0.4

Al analizar la Figura 5.28 se observa que con el ángulo 22° y radio 10m, el vehículo colisiona contra el obstáculo. En los casos con ángulo 90°, radio 1 y 10m, el comportamiento del sistema no es óptimo. Solo en el caso con ángulo 22° y radio 1m, el vehículo evade el obstáculo de forma eficiente.

### Conclusiones sobre los resultados obtenidos en los grupos de simulación 5, 6 y 7

Para los grupos de simulación sexto y séptimo con ángulo 22° y radio 10m el comportamiento del vehículo no es el esperado. En el sexto grupo el vehículo da vueltas frente al obstáculo, mientras en el séptimo grupo el vehículo colisiona con el obstáculo.

También se observa que el comportamiento del vehículo en el séptimo grupo con ángulo 90° y radio 1m y 10m se puede considerar como poco óptimo. En estas simulaciones se observa como el vehículo queda atrapado, navegando en una misma área durante algún tiempo, hasta que encuentra las condiciones de navegación que le permiten superar el obstáculo y posteriormente continuar la trayectoria. Consecuentemente, con estos



resultados se establece que las dos configuraciones con mayor eficiencia corresponden a ángulo de 22°, radio 1m y de ángulo 90°, radio 10 metros.

### 5.5.1.3 - Simulación en el escenario del Canal Olímpico de Castelldefels

En este apartado se presentan simulaciones de evasión en el escenario del canal Olímpico de Castelldefels en Barcelona (ver Figura 5.29), que es el escenario en donde se realizan las pruebas experimentales de evasión. El canal olímpico está constituido por una masa de agua de baja salinidad, con unas dimensiones aproximadas de 120 m de ancho y 1200 m de largo, con una profundidad irregular que oscila entre los 3.5 m y 4 m. Las simulaciones se centran en un área de trabajo de 120 m de ancho y 280 m de largo, donde está ubicado el embarcadero principal del canal.

Para las simulaciones se utilizan entornos digitalizados, a partir de imágenes satelitales obtenidas de Google Maps y Google Earth. Se realizan 4 grupos de simulación, utilizando los ángulos 22° y 90°, y los radios 1m y 10m. Los parámetros de simulación utilizados se muestran en la Tabla 5-12.



Figura 5.29. Imagen satelital del canal Olímpico de Castelldefels en Barcelona obtenidas de Google Earth

Tabla 5-12. Parámetros de simulación

Parámetros	Valor
Rango mecánico de operación del sonar	30°
Distancia máxima de operación del sonar	30 m
Resolución de la imagen	1 m
Radio de waypoint	6 m
Velocidad del vehículo	Variable (0-1m/s)
Control de trayectoria	Pure-pursuit
Sistema de evasión de obstáculos	Reactivo - nuevo waypoint Cte. ángulo: 22° y 90° Cte. radio: 1m y 10m

Grupo 8 de simulación

En la Figura 5.30a se muestra el entorno de navegación digitalizado y la distribución de los waypoints.

El punto de origen de la simulación corresponde a un punto cercano al embarcadero. Los waypoints 1 y 2 permiten ubicar el vehículo en medio del canal. La trayectoria entre los waypoints 2 y 3, evalúa el comportamiento del vehículo. El wp3 se ubica en el interior del embarcadero para evaluar el comportamiento del sistema de evasión cuando no es posible llegar al waypoint de destino.

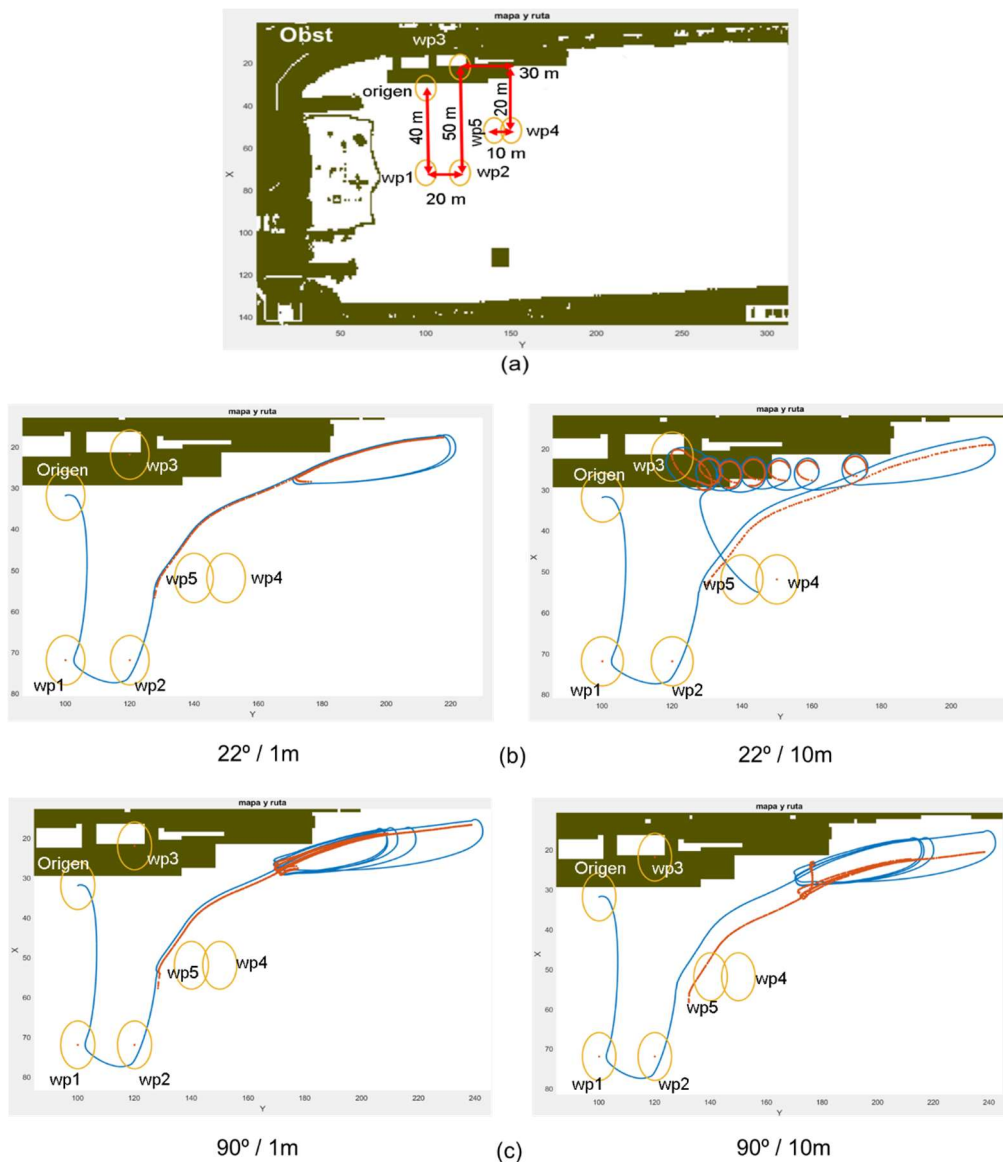


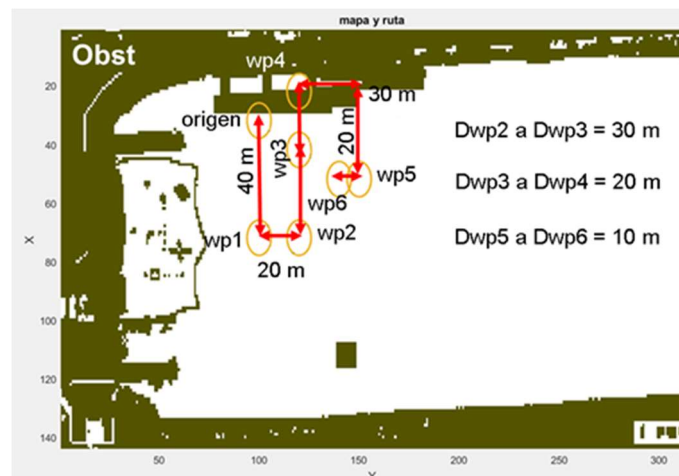
Figura 5.30. Grupo 8 de simulación (a) Escenario de simulación para el octavo grupo, resultado obtenido del sistema de evasión para: (b) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 22°, (c) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 90°. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

En la Figura 5.30, se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones que componen el octavo grupo. Al analizar estos resultados se observa que en la mayoría de los casos el vehículo se mantiene navegando sobre una misma área sin colisionar. Pero con ángulo  $22^\circ$  y radio 10 m, el vehículo colisiona.

Se puede ver en todas las simulaciones, que el sistema de evasión empieza a genera los nuevos waypoint cuando el vehículo está a 30 metros. Después de alcanzar el waypoint 2, el vehículo se desvía hacia estribor y continua sobre esta trayectoria hasta alcanzar la condición de no obstáculo en los tres sectores de detección. En ese momento, el sistema de evasión deja de estar activo y el sistema de control de trayectoria del vehículo lo dirige nuevamente hacia el waypoint 3. Al navegar hacia el waypoint 3, el vehículo encuentra obstáculos a proa y estribor que activan el sistema de evasión haciendo que el vehículo gire nuevamente hacia estribor. Dadas las condiciones de este escenario y la ubicación de los waypoint el vehículo permanece recorrido una misma área indefinidamente.

### Grupo 9 de simulación

En el escenario utilizado para realizar el noveno grupo de simulaciones, correspondiente a la Figura 5.31a, se ha incluido un waypoint a 10 metros de la pared (wp3). Dado que la distancia entre el waypoint 2 y 3 es inferior a la distancia al obstáculo, el sistema de evasión solo se activará cuando el vehículo haya alcanzado el waypoint 3.



(a)

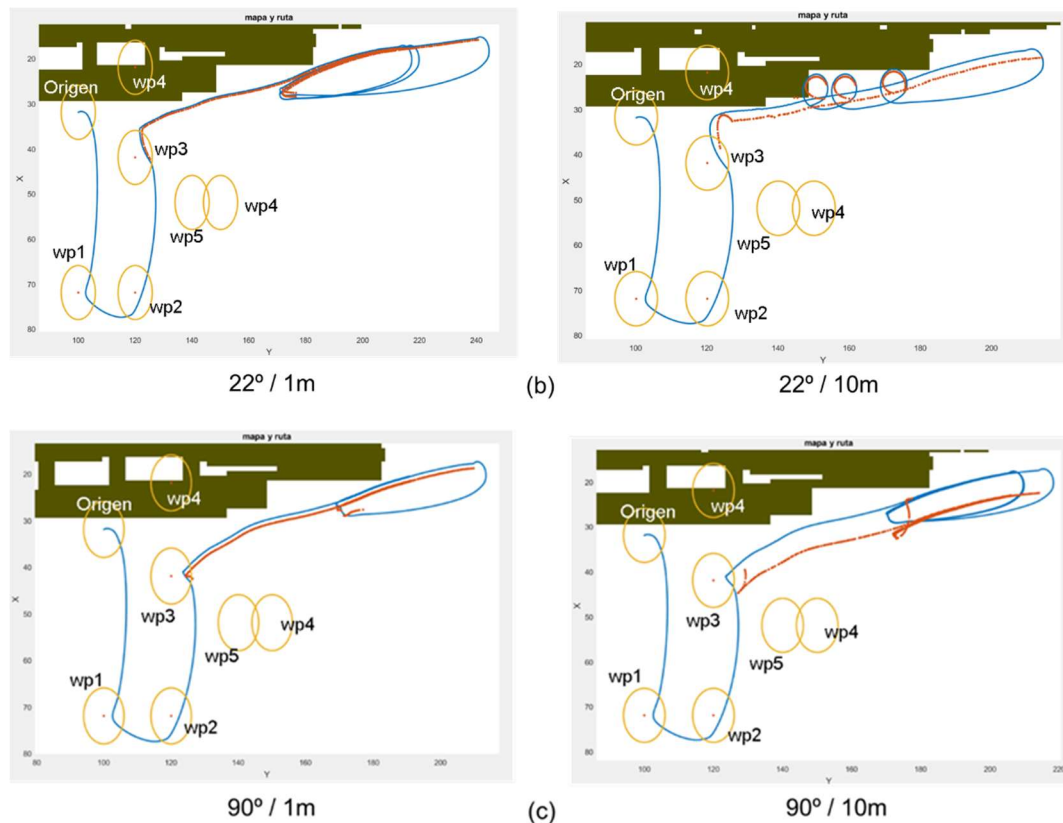


Figura 5.31. Grupo 9 de simulación (a) Escenario de simulación para el noveno grupo, resultado obtenido del sistema de evasión para: (b) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de  $22^\circ$ , (c) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de  $90^\circ$ . (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

Al analizar los resultados de la Figura 5.31 se observa que una vez el vehículo ha alcanzado el waypoint 3, el sistema de evasión genera los nuevos waypoint para evadir el obstáculo. A partir de este punto el comportamiento del vehículo es muy similar al octavo grupo de simulaciones (Figura 5.30). El vehículo se mantiene navegando sobre una misma área indefinidamente, salvo para la configuración de ángulo  $22^\circ$  y radio 10m que colisiona.

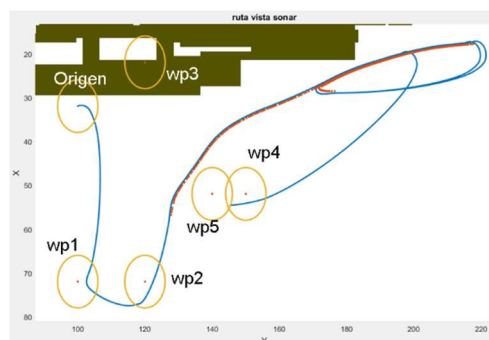
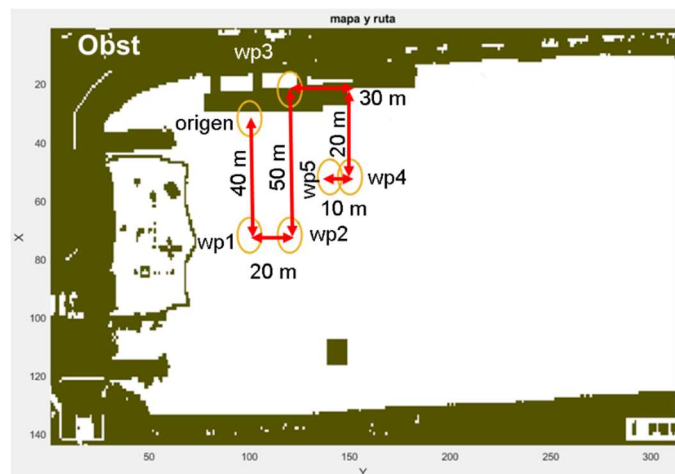
Para evitar esta situación de navegación indefinida por no poder alcanzar un waypoint, se propone habilitar en el sistema de navegación una opción de salto o descarte de un waypoint, de la lista de waypoint de la trayectoria. Esto consiste en descartar el waypoint que se está siguiendo, si en el tiempo definido por la ecuación (5-4) no se ha alcanzado dicho waypoint. La ecuación (5-4) considera la distancia entre el último waypoint alcanzado y el waypoint que se está siguiendo y la velocidad del vehículo. En este caso consideramos una velocidad de navegación de 0.2m/s para definir el tiempo de navegación entre dos waypoints. Esta velocidad corresponde a la mínima velocidad promedio alcanzada por el vehículo entre todas las simulaciones de los grupos 1 al 7.

$$\begin{aligned}
 \text{Tiempo entre waypoint} &= \left( \frac{\text{distancia entre waypoint}}{\text{velocidad}} \right) * 2 \\
 &= \left( \frac{\text{distancia entre waypoint}}{0.2} \right) * 2
 \end{aligned}
 \tag{5-4}$$

En los siguientes dos grupos de simulación, se rehacen las simulaciones correspondientes a los grupos octavo y noveno, habilitando en el sistema de navegación la opción de descarte de waypoint. Dado que en las simulaciones anteriores la configuración de 22° y 10 m, colisiono contra el obstáculo, se descarta el uso de esta configuración en los siguientes grupos de simulación.

### Grupo 10 de simulación

En este grupo se repiten las simulaciones del octavo grupo incorporando en el sistema de navegación la opción de descarte de waypoint.



22° / 1m

(b)

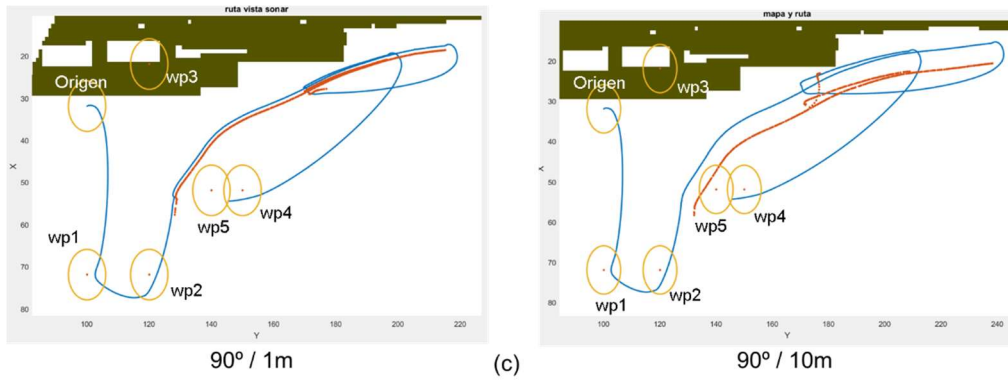
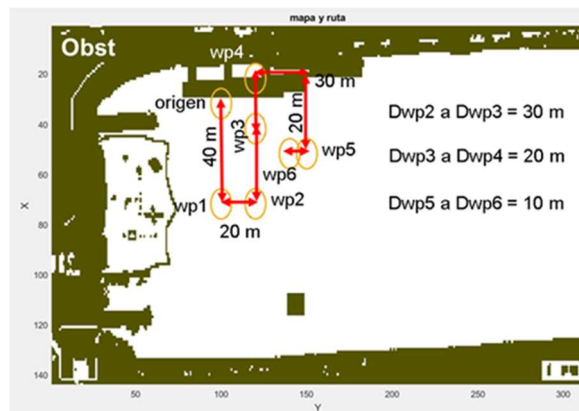


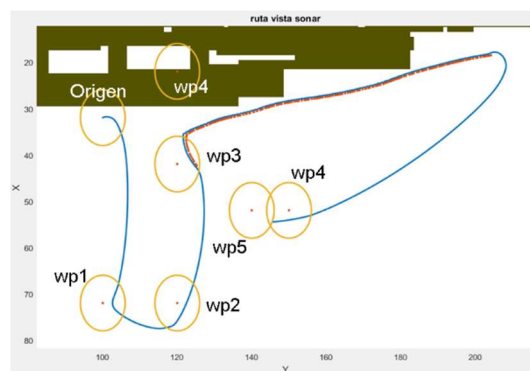
Figura 5.32. Grupo 10 de simulación (a) Escenario de simulación para el décimo grupo, resultado obtenido del sistema de evasión para: (b) 1m de radio con un ángulo de ajuste de 22°, (c) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de 90°. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

**Grupo 11 de simulación**

En este grupo se repiten las simulaciones del noveno grupo incorporando en el sistema de navegación la opción de descarte de waypoint.



(a)



22° / 1m

(b)

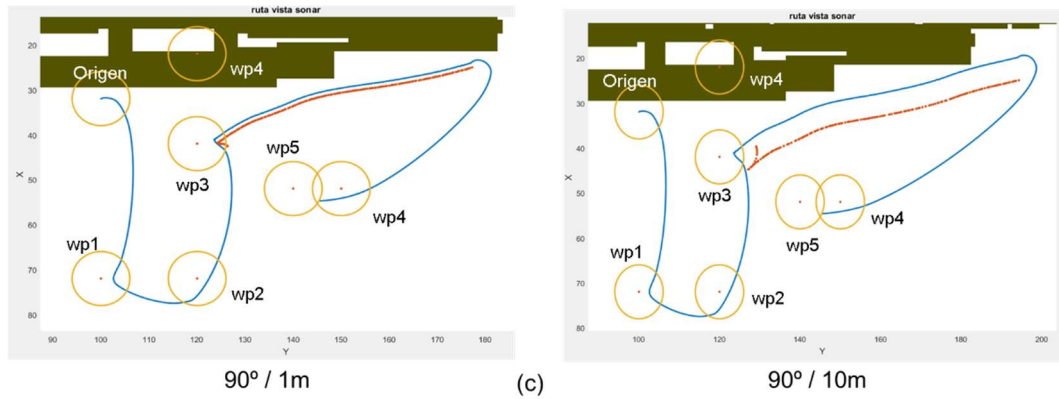


Figura 5.33. Grupo 11 de simulación (a) Escenario de simulación para el onceavo grupo, resultado obtenido del sistema de evasión para: (b) 1m de radio con un ángulo de ajuste de  $22^\circ$ , (c) 1m y 10 metros de radio con un ángulo de ajuste de  $90^\circ$ . (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

Analizando los resultados obtenidos en los dos grupos 10 y 11 de simulación, correspondientes a la Figura 5.32 y Figura 5.33, se puede concluir que la modificación realizada en el sistema de navegación, que le permite al vehículo descartar un waypoint si en el tiempo definido por la ecuación (5-4) el waypoint no ha sido alcanzado, le permite al vehículo continuar con la trayectoria de navegación y no quedarse navegando alrededor de una pequeña área.

#### 5.5.1.4 - Conclusiones

Al realizar un análisis global de los once grupos de simulación realizados, se puede concluir que la configuración que ofrece un menor tiempo de ejecución del algoritmo y que en ninguna de las simulaciones colisiono contra los obstáculos, corresponde al caso del ángulo de  $22^\circ$  y radio de 1m. Aunque, con esta configuración en algunos casos no se obtiene la mínima distancia recorrida, y en algunas trayectorias el recorrido realizado no es óptimo.

Al analizar la implementación en el vehículo Guanay II, del sistema de evasión de obstáculos en función de un ángulo fijo de  $22^\circ$  y un radio fijo de 1 m, se encuentra que el error circular probable del GPS (DG14) que se utiliza en el vehículo Guanay II es de 3m. En las simulaciones con radio mayor de 1m el sistema no funcionó correctamente, ocasionando que el vehículo colisione. Dada estas restricciones tecnológicas, se descarta la implementación del sistema de evasión de obstáculos con la configuración fija de ángulo  $22^\circ$ , radio 1m o casos similares.

## Capítulo 5

Por tanto, se puede concluir que, aunque existe una configuración que cumple los requisitos de evasión no es capaz de optimizar simultáneamente el tiempo de ejecución de trayectoria y la distancia recorrida. Con el propósito de conseguir esta optimización se propone diseñar e implementar un sistema de evasión de obstáculos, que considere el uso de múltiples ángulos y de múltiples radios para generar los waypoints de evasión, en función de la situación del entorno de navegación.



### 5.5.2 - Generación de waypoints de evasión por un sistema fuzzy

Se considera que una buena opción que permite combinar el uso de múltiples ángulos y radios es un sistema fuzzy. También, permite una mayor versatilidad en el uso de la información obtenida del sistema de detección de obstáculos e incluir en el diseño de la estrategia de evasión de obstáculos reactivo fuzzy los requisitos establecidos en el inicio del capítulo, resumidos en la Figura 5.12.

De las valoraciones de las simulaciones de los apartados anteriores, se propone diseñar una estrategia de evasión para un entorno de navegación abierto, como en el mar y otra estrategia para la navegación en entornos cerrados como canales y puertos.

Se ha definido un rango mecánico de operación del sonar de  $90^\circ$  y una distancia máxima de operación del sonar de 70 m para la navegación en mar. Para la navegación en puertos y canales se considera un rango mecánico de operación del sonar de  $30^\circ$  y una distancia máxima de operación del sonar de 40 m.

Para cada uno de estos dos de entorno se diseña dos controles difusos, uno para alta velocidad y otro para baja velocidad. Esta asignación de controles en función de la velocidad permite aumentar la maniobrabilidad del vehículo. La estructura general del control zonal de evasión que se propone se representa en la Figura 5.34.

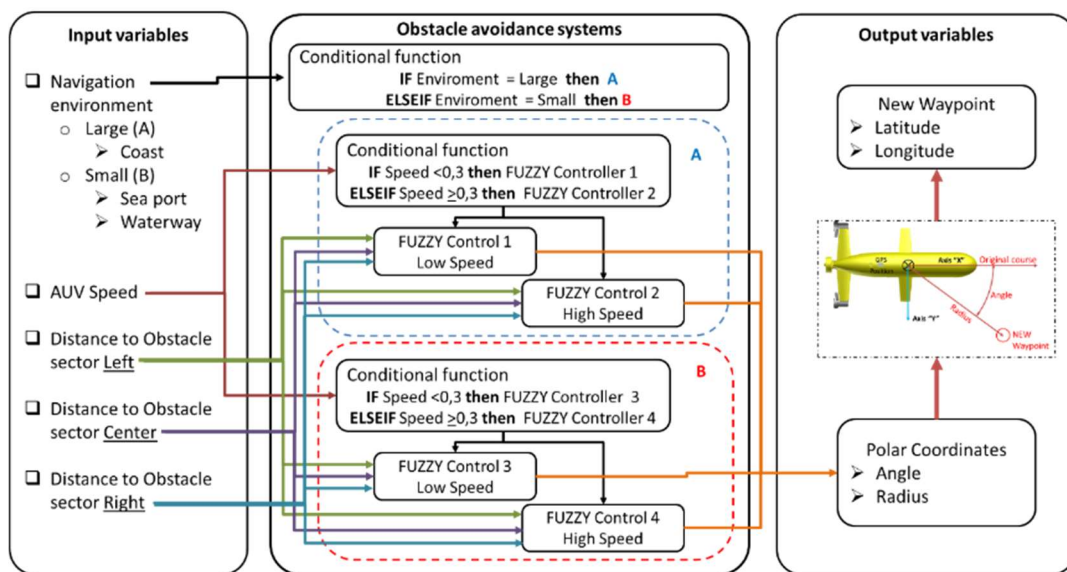


Figura 5.34. Diagrama de bloques general del sistema evasión de obstáculos estrategia 2

### 5.5.2.1 - Variables de entrada

Cada uno de los cuatro controladores difusos tiene tres variables de entrada que indican la mínima distancia del vehículo al obstáculo en cada uno de los tres sectores del área escaneada por el SONAR. Estas variables se denominan mínima distancia al obstáculo en el sector derecho (R), mínima distancia al obstáculo en el sector centro (C) y mínima distancia al obstáculo en el sector izquierdo (L).

Para cada una de estas variables de entrada se han definido tres funciones de pertenencia de tipo trapezoidal, denominadas respectivamente alto (H), medio (M) y bajo (L) riesgo de colisión. Los límites de las funciones de pertenencias han sido definidos en base a:

- El escenario de navegación
- La velocidad del vehículo
- El tiempo de ejecución del algoritmo

En la Figura 5.35 y Figura 5.36 se pueden observar las características de las funciones de pertenencia para el entorno de mar, definidas en un rango de 0 a 70 m. La Figura 5.35 es para el control de baja velocidad y la Figura 5.36 para el control de alta velocidad.

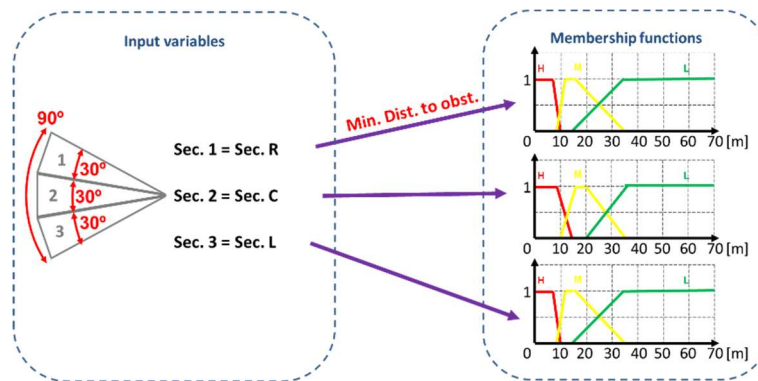


Figura 5.35. Variables de entrada y funciones de pertenencia para el controlador difuso 1 (Baja velocidad).

## Diseño de un sistema fuzzy para la evasión de obstáculos

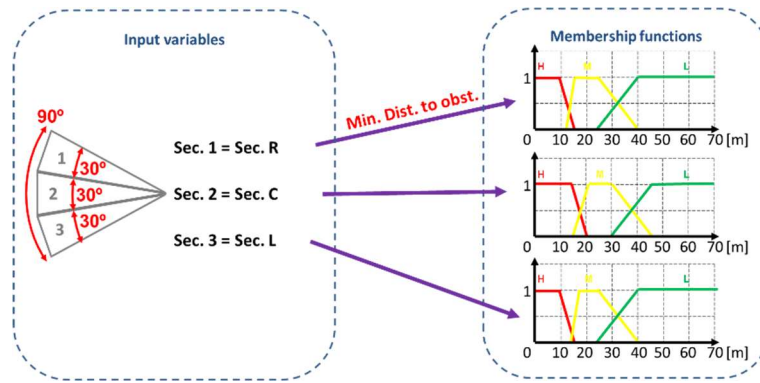


Figura 5.36. Variables de entrada y funciones de pertenencia para el controlador difuso 2 (alta velocidad)

En la Figura 5.37 y Figura 5.38 se pueden observar las características de las funciones de pertenencia para el entorno de canal y puerto, definidas en un rango de 0 a 40 m.

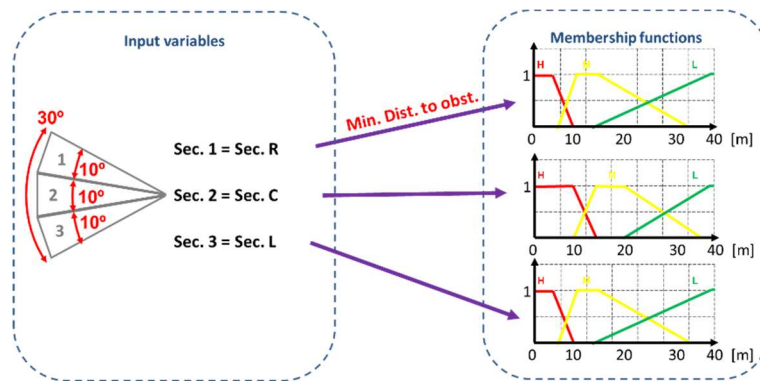


Figura 5.37. Variables de entrada y funciones de pertenencia para el controlador difuso 3 (Baja velocidad).

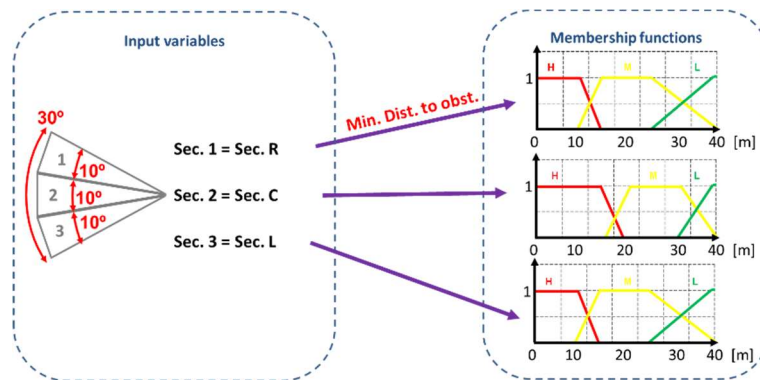


Figura 5.38. Variables de entrada y funciones de pertenencia para el controlador difuso 4 (Alta velocidad).

### 5.5.2.2 - Variables de salida

Cada uno de los controladores difusos tiene dos variables de salida, que corresponden a una coordenada polar (ángulo y radio). Posteriormente, se convierte en una coordenada geográfica.

A partir de las simulaciones anteriores y los resultados obtenidos en la primera estrategia, se han diseñado dos conjuntos de variables de salida, Un primer conjunto para los controles 1 y 3, y un segundo conjunto para los controles 2 y 4.

La primera variable de salida, que para todos los controles corresponde al ángulo se han implementado 6 funciones de pertenencia de tipo triangular. Para los controles 1 y 3 (baja velocidad) el rango de la variable se encuentra entre  $180^\circ$  y  $-140^\circ$  (ver Figura 5.39). Mientras que para los controles difusos 2 y 4 (alta velocidad), el rango de la variable se encuentra entre  $100^\circ$  y  $-80^\circ$  (ver Figura 5.40). La segunda variable de salida, que para todos los controles corresponde al radio, se han asignado 4 funciones de pertenencia de tipo triangular y trapezoidal en un rango de 5 m a 10 m.

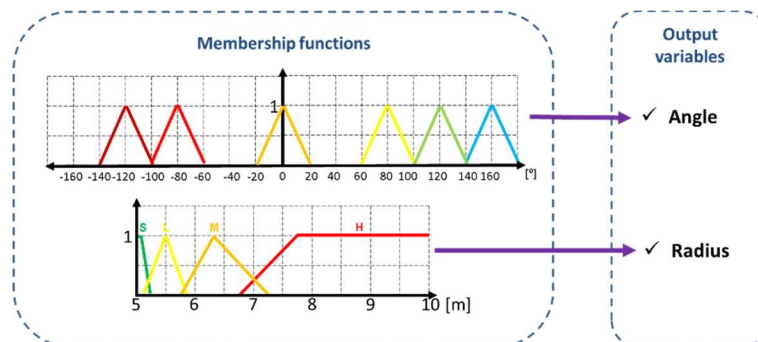


Figura 5.39. Variables de salida y funciones de pertenencia para los controladores difusos 1 y 3

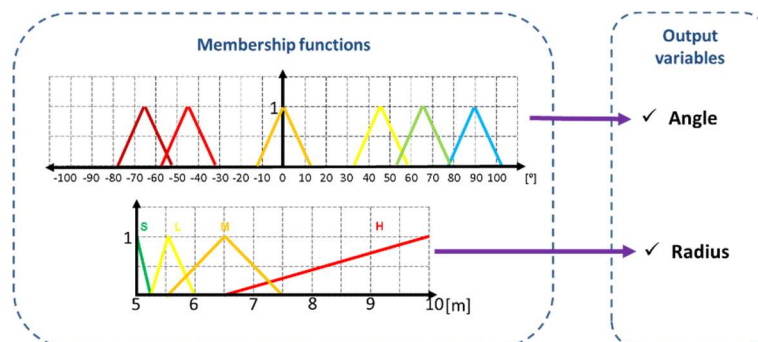


Figura 5.40. Variables de salida y funciones de pertenencia para los controladores difusos 2 y 4

### 5.5.2.3 - Base de reglas # 1

La base de reglas utilizada en esta estrategia, ha sido construida para garantizar la seguridad del vehículo, cumpliendo los requisitos inicialmente establecidos, en función del entorno de navegación, los escenarios de navegación y las características operacionales del vehículo.

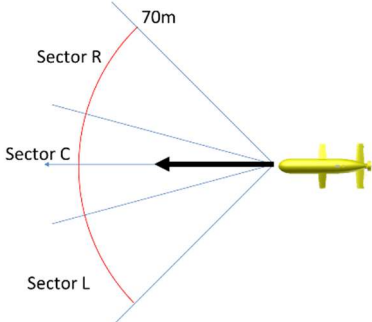
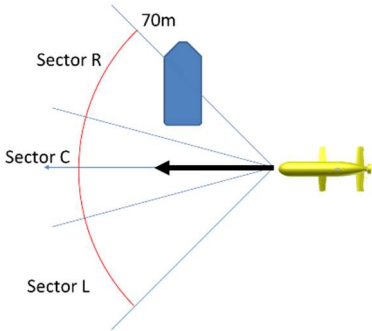
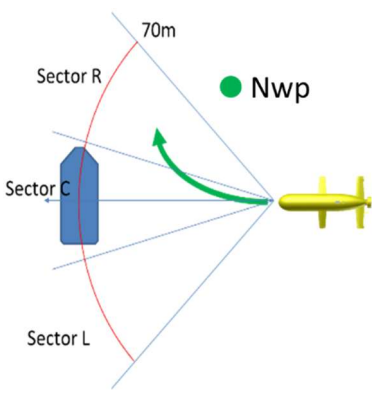
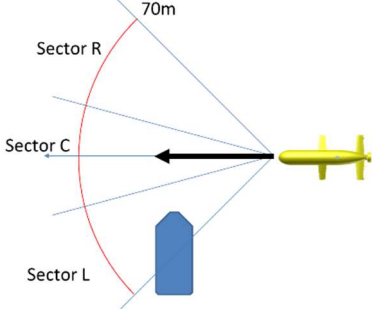
La base de reglas implementada para cada uno de los cuatro controladores difusos está compuesta por 27 reglas. En la Tabla 5-13 se definen los cuatro conjuntos de reglas, relacionando las variables de entrada, con las variables de salida para los cuatro controles difusos. Como particularidad, solo se consideran ángulos positivos en el rango de 0° a 90°, para los controles difusos 2 y 4. Para los controles difusos 1 y 3 se considera un rango de 0° a 160°. La ecuación condicional de inferencia utilizada es de tipo Mamdani [106] y corresponde a:

$$\text{SI } L = \dots \text{ AND } C = \dots \text{ AND } R = \dots \text{ Entonces } \mathbf{Radius} = \dots, \mathbf{Angle} = \dots \quad (5-5)$$

Tabla 5-13. Base de reglas para los controladores difusos

#	Input variable Sector			Output variable Control 1 y 3		Output variable Control 2 y 4	
	L	C	R	Radius	Angle	Radius	Angle
1	H	H	H	S	160°	S	90°
2	H	H	M	S	120°	S	66°
3	H	H	L	S	80°	S	45°
4	H	M	H	S	160°	S	90°
5	H	M	M	L	80°	L	45°
6	H	M	L	M	80°	M	45°
7	H	L	H	L	0°	L	0°
8	H	L	M	L	0°	L	0°
9	H	L	L	M	0°	M	0°
10	M	H	H	S	160°	S	90°
11	M	H	M	S	80°	S	45°
12	M	H	L	S	80°	S	45°
13	M	M	H	S	160°	S	90°
14	M	M	M	L	80°	L	45°
15	M	M	L	L	80°	L	45°
16	M	L	H	L	0°	L	0°
17	M	L	M	L	0°	L	0°
18	M	L	L	H	0°	H	0°
19	L	H	H	S	160°	S	90°
20	L	H	M	S	160°	S	90°
21	L	H	L	S	120°	S	66°
22	L	M	H	S	160°	S	90°
23	L	M	M	S	80°	S	45°
24	L	M	L	L	80°	L	45°
25	L	L	H	M	0°	M	0°
26	L	L	M	H	0°	H	0°
27	L	L	L	H	0°	H	0°

Tabla 5-14. Relación entre reglas y los escenarios de navegación Figura 5.12

Escenario	# Regla	Comportamiento del vehículo
	27	<p><b>Antecedente:</b> No hay obstáculo.</p> <p><b>Consecuencia:</b> Vehículo avanza, el sistema de evasión <b>NO</b> genera nuevos waypoints.</p>
	26 25	<p><b>Antecedente:</b> Obstáculo en el sector derecho (R).</p> <p><b>Regla COLREGS aplicable:</b> [ [98] - Regla 8.a] [ [98] - Regla 8.b] [ [98] - Regla 8.d]</p> <p><b>Consecuencia:</b> Vehículo avanza, el sistema de evasión <b>NO</b> genera nuevos waypoints.</p>
	24 21	<p><b>Antecedente:</b> Obstáculo en el sector central (C).</p> <p><b>Regla COLREGS aplicable:</b> [ [98] - Regla 8.a] [ [98] - Regla 8.b] [ [98] - Regla 8.d] [ [98] - Regla 14.c]</p> <p><b>Consecuencia:</b> El sistema de evasión genera un nuevo waypoint (Nwp) a Estribor. Para modifica el rumbo, llevando al vehículo hacia Estribor.</p>
	18 9	<p><b>Antecedente:</b> Obstáculo en el sector izquierdo (L).</p> <p><b>Regla COLREGS aplicable:</b> [ [98] - Regla 8.d]</p> <p><b>Consecuencia:</b> Vehículo avanza, el sistema de evasión <b>NO</b> modifica el rumbo.</p>

	<p>17 16 8 7</p>	<p><b>Antecedente:</b>                  Obstáculo en el sector derecho (R).                  Obstáculo en el sector izquierdo (L).  <b>Regla COLREGS aplicable:</b>                  [ [98] - Regla 8.c]                  [ [98] - Regla 8.d]                  [ [98] - Regla 9.a]  <b>Consecuencia:</b> Vehículo avanza, el sistema de evasión <b>NO</b> modifica el rumbo.</p>
	<p>14 12 11 5 4 3 2 1</p>	<p><b>Antecedente:</b>                  Obstáculo en el sector derecho (R).                  Obstáculo en el sector central (C).                  Obstáculo en el sector izquierdo (L).                   Riesgo de colisión: (L/C/R)                  M/M/M                  M/H/L                  M/H/M                  H/M/M                  H/M/H                  H/H/L                  H/H/M                  H/H/H   <b>Regla COLREGS aplicable:</b>                  [ [98] - Regla 7.a]                  [ [98] - Regla 8.c]                  [ [98] - Regla 8.d]                  [ [98] - Regla 8.e]                  [ [98] - Regla 9.a]                  [ [98] - Regla 14.c]   <b>Consecuencia:</b> El sistema de evasión genera un nuevo waypoint (Nwp) a Estribor. Para modificar el rumbo, llevando al vehículo hacia Estribor.</p>

<p>Sector R Sector C Sector L</p> <p>70m</p> <p>Nwp</p>	<p>15 6</p>	<p><b>Antecedente:</b> Obstáculo en el sector central (C). Obstáculo en el sector izquierdo (L).</p> <p><b>Regla COLREGS aplicable:</b> [ [98] - Regla 7.a] [ [98] - Regla 8.c] [ [98] - Regla 8.d] [ [98] - Regla 14.c]</p> <p><b>Consecuencia:</b> El sistema de evasión genera un nuevo waypoint (Nwp) a Estribor. Para modificar el rumbo, llevando al vehículo hacía Estribor.</p>
<p>Sector R Sector C Sector L</p> <p>70m</p> <p>Nwp</p> <p>Sector R Sector C Sector L</p> <p>70m</p> <p>Nwp</p>	<p>23 22 20 19</p>	<p><b>Antecedente:</b> Obstáculo en el sector derecho (R). Obstáculo en el sector central (C).</p> <p><b>Regla COLREGS aplicable:</b> [ [98] - Regla 7.a]</p> <p><b>Regla COLREGS que se no cumplen:</b> [ [98] - Regla 8.c] [ [98] - Regla 8.d]</p> <p><b>Consecuencia:</b> El sistema de evasión genera un nuevo waypoint (Nwp) a Estribor. Para modificar el rumbo, llevando al vehículo hacía Estribor. Esta acción genera un mediano riesgo de colisión.</p>
<p>Sector R Sector C Sector L</p> <p>70m</p> <p>Nwp</p> <p>Sector R Sector C Sector L</p> <p>70m</p> <p>Nwp</p>	<p>13 10</p>	<p><b>Antecedente:</b> Obstáculo en el sector derecho (R). Obstáculo en el sector central (C). Obstáculo en el sector izquierdo (L).</p> <p>Riesgo de colisión: (L/C/R) M/M/H M/H/H</p> <p><b>Regla COLREGS aplicable:</b> [ [98] - Regla 7.a]</p> <p><b>Regla COLREGS que se no cumplen:</b> [ [98] - Regla 8.c] [ [98] - Regla 8.d]</p> <p><b>Consecuencia:</b> El sistema de evasión genera un nuevo waypoint (Nwp) a Estribor. Para modificar el rumbo, llevando al vehículo hacía Estribor. Esta acción genera un mediano riesgo de colisión</p>



### 5.5.2.4 - Simulaciones y análisis de resultados con base de reglas # 1

Con el propósito de evaluar el desempeño de esta estrategia del sistema para la evasión de obstáculos y el comportamiento del vehículo en navegación, se han desarrollado múltiples simulaciones. Los parámetros de simulación utilizados se encuentran en la Tabla 5-15.

Tabla 5-15. Parámetros de simulación

Parámetros	Valor
Rango mecánico de operación del sonar	30°
Resolución mecánica de giro del sonar	0.9°
Número de puntos de medida del sonar	400
Distancia máxima de operación del sonar	40 m
Resolución de la imagen	1 m
Radio de waypoint	6 m
Velocidad del vehículo	Variable (0-1m/s)
Control de trayectoria	Pure-pursuit
Sistema de evasión de obstáculos	Reactivo-Fuzzy waypoint)

Para el desarrollo de estas simulaciones, se consideran los mismos entornos digitalizados utilizados anteriormente en el apartado 5.5.1.3 y la misma distribución de waypoints. Estos entornos corresponden al canal olímpico de Castelldefels en Barcelona, España. Las simulaciones se centran en un área de trabajo de 120 m de ancho y 280 m de largo, donde se ubica el embarcadero principal del canal. Las simulaciones presentadas en la Figura 5.41 y Figura 5.42 se realizan sin habilitar en el control de navegación la posibilidad de descartar un waypoint.

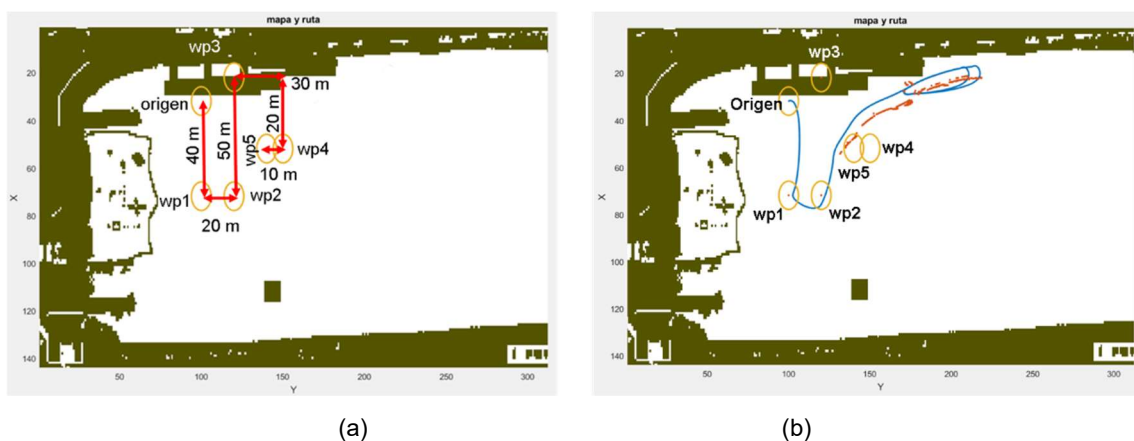


Figura 5.41. Resultados (a) Escenario de simulación y ubicación de los waypoints (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

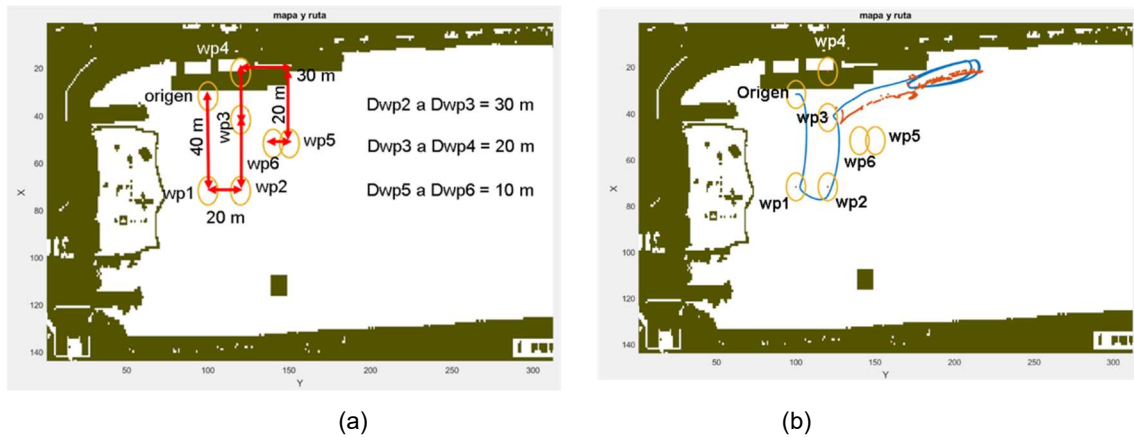


Figura 5.42. Resultados (a) Escenario de simulación y ubicación de los waypoints (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

Las simulaciones presentadas en la Figura 5.43 y Figura 5.44 se realizan habilitando en el control de navegación la posibilidad de descartar un waypoint.

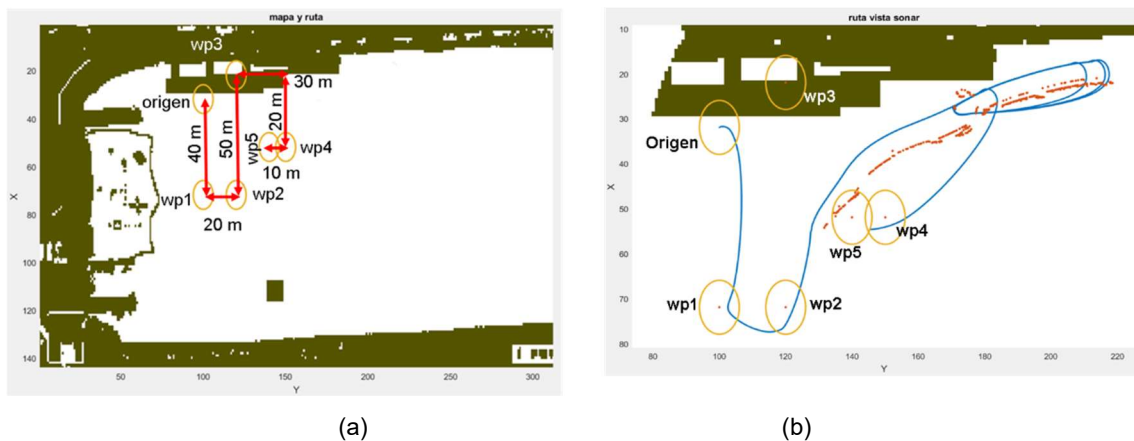


Figura 5.43. Resultado (a) Escenario de simulación y ubicación de los waypoints (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

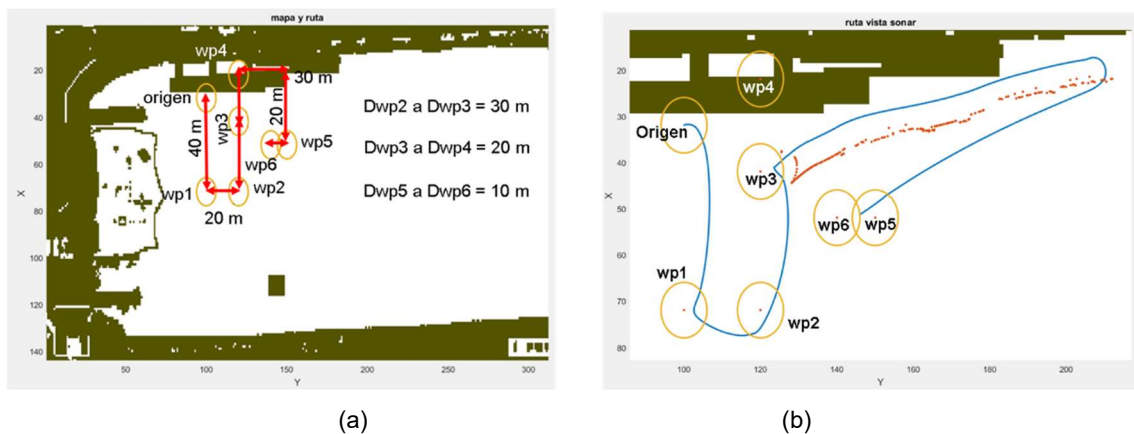


Figura 5.44. Resultado (a) Escenario de simulación y ubicación de los waypoints (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

Al analizar los resultados obtenidos en las anteriores simulaciones, encontramos que en ninguno de los casos simulados el vehículo ha colisionado, lo que permite concluir que el sistema de detección de obstáculos combinado con el sistema de evasión de obstáculos reactivo fuzzy funciona correctamente. La habilitación en el sistema de navegación, de la opción de descartar waypoint, permite al vehículo continuar con la trayectoria cuando uno o más de los waypoint no pueden ser alcanzados por el vehículo.

Se verifica que al hacer uso de múltiples ángulo y múltiples radios, en una sola estrategia se aumenta la maniobrabilidad del sistema de navegación del vehículo. Esto se puede observar al comparar los resultados de las simulaciones, obtenidos inicialmente y mostrados en la Figura 5.30, Figura 5.31, Figura 5.32 y Figura 5.33 para el caso de ángulo fijo de  $22^\circ$  y radio fijo 1m, con los resultados obtenidos anteriormente y mostrados en la Figura 5.41b, Figura 5.42b, Figura 5.43b y Figura 5.44b. Al comparar detalladamente la Figura 5.31b ( $22^\circ/1m$ ) y la Figura 5.42b se observa que una vez el vehículo a alcanzado el waypoint 3, el sistema de evasión genera nuevos waypoint. En el caso de ángulo fijo de  $22^\circ$  y radio fijo 1m el sistema de evasión necesita 8m para generar un cambio de rumbo significativo, mientras que con el sistema actual el cambio de rumbo se genera después de 1.6m. Esto es debido a la característica zonal del control fuzzy que en este caso esta aplicando un ángulo de  $45^\circ$  y radio de 7 metros.

Este mismo comportamiento zonal se observa en la Figura 5.33b ( $22^\circ/1m$ ) y Figura 5.44b. Este comportamiento permite concluir que el sistema actual permite al vehículo tener una mayor maniobrabilidad y reducir el riesgo de colisión. Aunque al examinar la base de reglas se puede ver que las reglas 11,10,13,19,20,22 y 23 no cumplen a cabalidad con la normativa COLREGS, permitiendo que el vehículo se pueda aproximar excesivamente a un obstáculo, sin mantener una distancia de seguridad. Esto es corregido en el siguiente apartado, incluyendo en la base de reglas valores negativos para la variable "angle".

### 5.5.2.5 - Base de reglas # 2

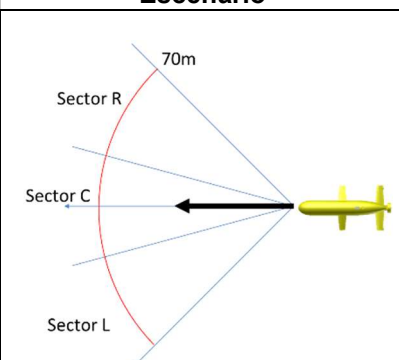
Con el propósito de incluir en el sistema de evasión de obstáculos reactivo fuzzy las maniobras de navegación descritos inicialmente en la Figura 5.12 y en la normativa COLREGS [98], se modifica la base de reglas mostrada en la Tabla 5-16. Se incluye el uso de valores negativos para las variables de salida "angle". Esto aumenta el rango salida para los cuatro controles difusos. Para los controles difusos 1 y 3 el nuevo rango

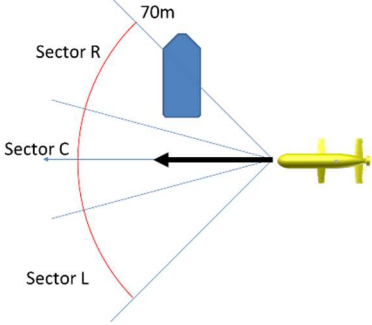
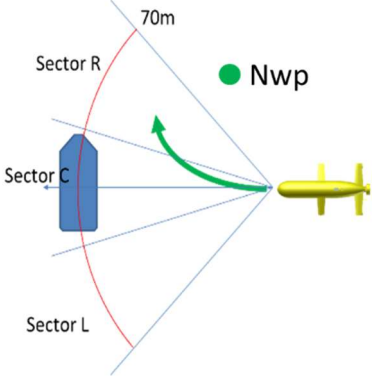
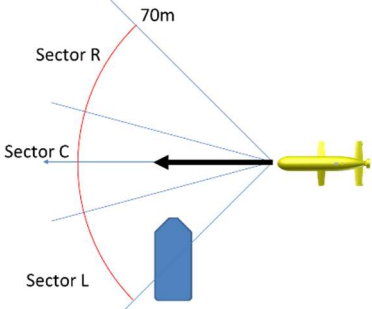
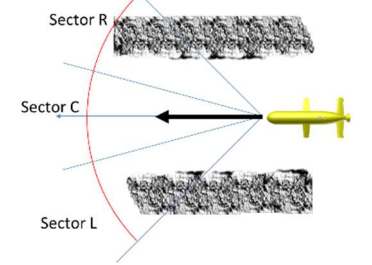
de la variable “angle” es de  $-120^\circ$  a  $160^\circ$  y para los controles difusos 2 y 4 el nuevo rango será de  $-66^\circ$  a  $90^\circ$ . La nueva base de reglas se puede observar en la Tabla 5-16.

Tabla 5-16. Base de reglas para los controladores difusos

#	Input variable Sector			Output variable Control 1 y 3		Output variable Control 2 y 4	
	L	C	R	Radius	Angle	Radius	Angle
1	H	H	H	S	$160^\circ$	S	$90^\circ$
2	H	H	M	S	$120^\circ$	S	$66^\circ$
3	H	H	L	S	$80^\circ$	S	$45^\circ$
4	H	M	H	S	$80^\circ$	S	$45^\circ$
5	H	M	M	L	$80^\circ$	L	$45^\circ$
6	H	M	L	M	$80^\circ$	M	$45^\circ$
7	H	L	H	L	$0^\circ$	L	$0^\circ$
8	H	L	M	L	$0^\circ$	L	$0^\circ$
9	H	L	L	M	$0^\circ$	M	$0^\circ$
10	M	H	H	S	$-80^\circ$	S	$-66^\circ$
11	M	H	M	S	$80^\circ$	S	$45^\circ$
12	M	H	L	S	$80^\circ$	S	$45^\circ$
13	M	M	H	L	$-120^\circ$	L	$-66^\circ$
14	M	M	M	S	$80^\circ$	L	$45^\circ$
15	M	M	L	L	$80^\circ$	L	$45^\circ$
16	M	L	H	L	$0^\circ$	L	$0^\circ$
17	M	L	M	L	$0^\circ$	L	$0^\circ$
18	M	L	L	H	$0^\circ$	H	$0^\circ$
19	L	H	H	S	$-80^\circ$	S	$-45^\circ$
20	L	H	M	S	$-80^\circ$	S	$-45^\circ$
21	L	H	L	S	$80^\circ$	S	$45^\circ$
22	L	M	H	M	$-80^\circ$	M	$-45^\circ$
23	L	M	M	L	$-80^\circ$	L	$-45^\circ$
24	L	M	L	L	$80^\circ$	L	$45^\circ$
25	L	L	H	M	$0^\circ$	M	$0^\circ$
26	L	L	M	H	$0^\circ$	H	$0^\circ$
27	L	L	L	H	$0^\circ$	H	$0^\circ$

Tabla 5-17. Relación entre reglas y los escenarios de navegación Figura 5.12

Escenario	# Regla	Comportamiento del vehículo
	27	<p><b>Antecedente:</b> No hay obstáculo.</p> <p><b>Consecuencia:</b> Vehículo avanza, el sistema de evasión <b>NO</b> modifica el rumbo.</p>

	<p>26 25</p>	<p><b>Antecedente:</b> Obstáculo en el sector derecho (R).</p> <p><b>Regla COLREGS aplicable:</b> [ [98] - Regla 8.a] [ [98] - Regla 8.b] [ [98] - Regla 8.d]</p> <p><b>Consecuencia:</b> Vehículo avanza, el sistema de evasión <b>NO</b> modifica el rumbo.</p>
	<p>24 21</p>	<p><b>Antecedente:</b> Obstáculo en el sector central (C).</p> <p><b>Regla COLREGS aplicable:</b> [ [98] - Regla 8.a] [ [98] - Regla 8.b] [ [98] - Regla 8.d] [ [98] - Regla 14.c]</p> <p><b>Consecuencia:</b> El sistema de evasión genera un nuevo waypoint (Nwp) a Estribor. Para modifica el rumbo, llevando al vehículo hacia Estribor.</p>
	<p>18 9</p>	<p><b>Antecedente:</b> Obstáculo en el sector izquierdo (L).</p> <p><b>Regla COLREGS aplicable:</b> [ [98] - Regla 8.d]</p> <p><b>Consecuencia:</b> Vehículo avanza, el sistema de evasión <b>NO</b> modifica el rumbo.</p>
	<p>17 16 8 7</p>	<p><b>Antecedente:</b> Obstáculo en el sector derecho (R). Obstáculo en el sector izquierdo (L).</p> <p><b>Regla COLREGS aplicable:</b> [ [98] - Regla 8.c] [ [98] - Regla 8.d] [ [98] - Regla 9.a]</p> <p><b>Consecuencia:</b> Vehículo avanza, el sistema de evasión <b>NO</b> modifica el rumbo.</p>

	<p>15 6</p>	<p><b>Antecedente:</b>                  Obstáculo en el sector central (C).                  Obstáculo en el sector izquierdo (L).  <b>Regla COLREGS aplicable:</b>                  [ [98] - Regla 7.a]                  [ [98] - Regla 8.c]                  [ [98] - Regla 8.d]                  [ [98] - Regla 14.c]  <b>Consecuencia:</b> El sistema de evasión genera un nuevo waypoint (Nwp) a Estribor. Para modifica el rumbo, llevando al vehículo hacia Estribor.</p>
	<p>14 12 11 5 4 3 2 1</p>	<p><b>Antecedente:</b>                  Obstáculo en el sector derecho (R).                  Obstáculo en el sector central (C).                  Obstáculo en el sector izquierdo (L).                  Riesgo de colisión: (L/C/R)                  M/M/M                  M/H/L                  M/H/M                  H/M/M                  H/M/H                  H/H/L                  H/H/M                  H/H/H  <b>Regla COLREGS aplicable:</b>                  [ [98] - Regla 7.a]                  [ [98] - Regla 8.c]                  [ [98] - Regla 8.d]                  [ [98] - Regla 8.e]                  [ [98] - Regla 9.a]                  [ [98] - Regla 14.c]  <b>Consecuencia:</b> El sistema de evasión genera un nuevo waypoint (Nwp) a Estribor. Para modifica el rumbo, llevando al vehículo hacia Estribor.</p>

	<p>23 22 20 19</p>	<p><b>Antecedente:</b> Obstáculo en el sector derecho (R). Obstáculo en el sector central (C).</p> <p><b>Regla COLREGS aplicable:</b> [ [98] - Regla 7.a] [ [98] - Regla 8.c] [ [98] - Regla 8.d]</p> <p><b>Consecuencia:</b> El sistema de evasión genera un nuevo waypoint (Nwp) a Babor. Para modifica el rumbo, llevando al vehículo hacia Babor.</p>
	<p>13 10</p>	<p><b>Antecedente:</b> Obstáculo en el sector derecho (R). Obstáculo en el sector central (C). Obstáculo en el sector izquierdo (L).</p> <p>Riesgo de colisión: (L/C/R) M/M/H M/H/H</p> <p><b>Regla COLREGS aplicable:</b> [ [98] - Regla 7.a] [ [98] - Regla 8.c] [ [98] - Regla 8.d] [ [98] - Regla 8.e]</p> <p><b>Consecuencia:</b> El sistema de evasión genera un nuevo waypoint (Nwp) a Babor. Para modifica el rumbo, llevando al vehículo hacia Babor.</p>

### 5.5.2.6 - Simulaciones y análisis de resultados con base de reglas # 2

Para analizar el desempeño del sistema de evasión de obstáculos reactivo fuzzy, con la base de reglas #2, se han repetido las simulaciones realizadas anteriormente en los apartados 5.5.1.1 y 5.5.1.2, que se muestran en la Figura 5.22 a Figura 5.28. Se ha manteniendo la misma distribución de waypoints en cada uno de los casos y los parámetros de simulación de la Tabla 5-15. Los resultados obtenidos en estas simulaciones se muestran en las siguientes figuras.

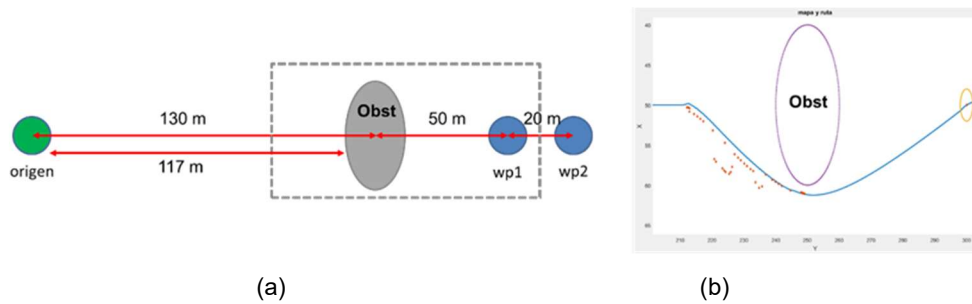


Figura 5.45. Resultado (a) Escenario de simulación “A” y ubicación de los waypoints, utilizado en primer grupo de simulaciones (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

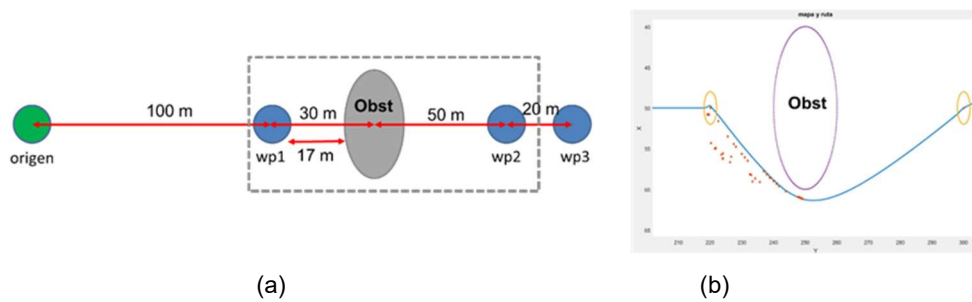


Figura 5.46. Resultado (a) Escenario de simulación “B” y ubicación de los waypoints, utilizado en primer grupo de simulaciones (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

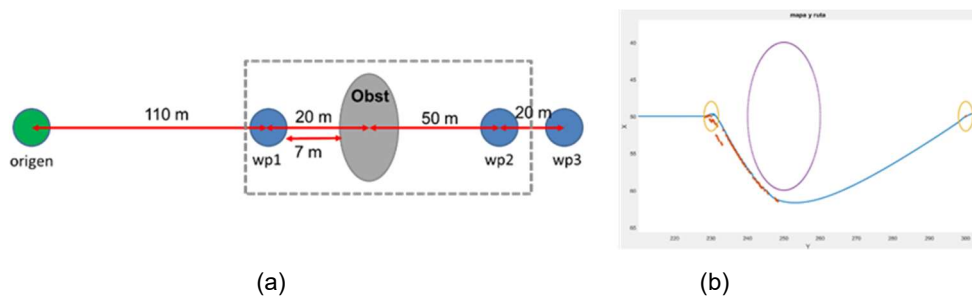


Figura 5.47. Resultado (a) Escenario de simulación “C” y ubicación de los waypoints, utilizado en primer grupo de simulaciones (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

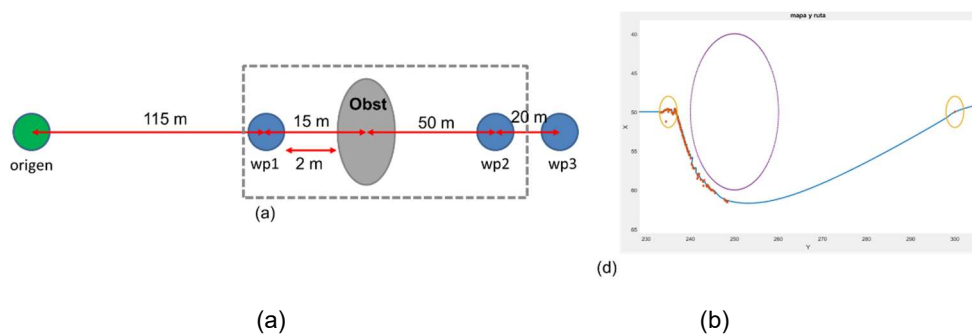


Figura 5.48. Resultado (a) Escenario de simulación “D” y ubicación de los waypoints, utilizado en primer grupo de simulaciones (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)



## Diseño de un sistema fuzzy para la evasión de obstáculos

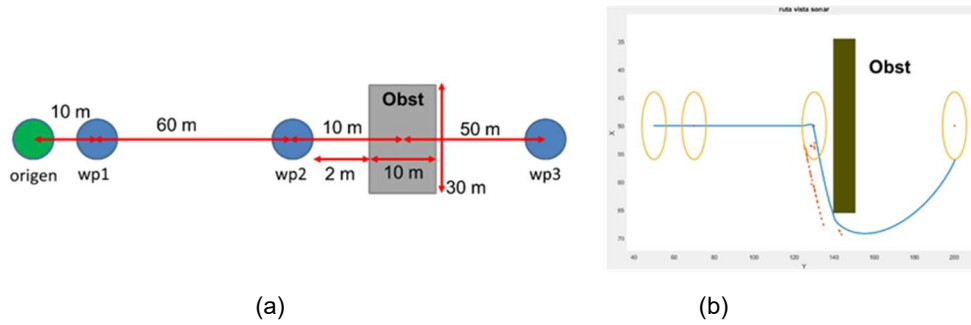


Figura 5.49. Resultado (a) Escenario de simulación “E” y ubicación de los waypoints, utilizado en primer grupo de simulaciones (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

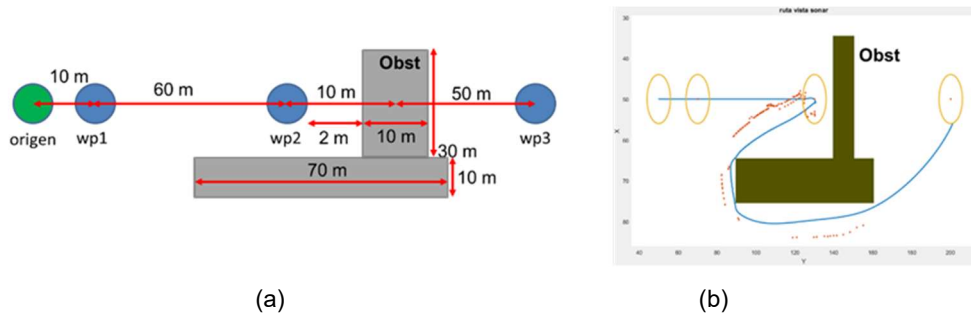


Figura 5.50. Resultado (a) Escenario de simulación “F” y ubicación de los waypoints, utilizado en primer grupo de simulaciones (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

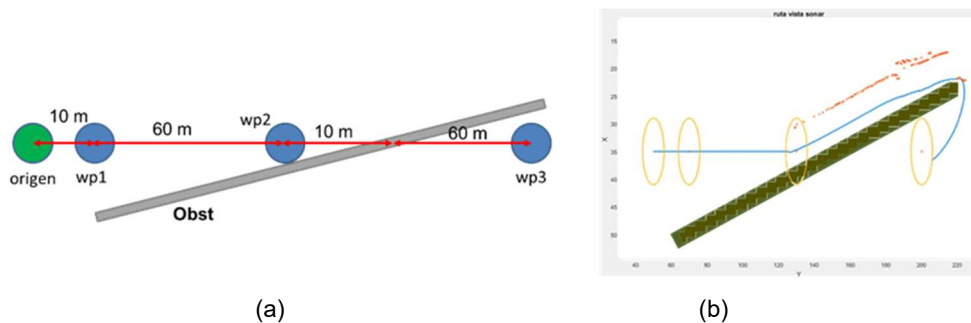


Figura 5.51. Resultado (a) Escenario de simulación “G” y ubicación de los waypoints, utilizado en primer grupo de simulaciones (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

En la Figura 5.51b, se observa que en esta simulación el vehículo no toma rumbo a estribor como en los casos anteriores. En este caso el sistema de detección establece que la distancia en los sectores del radar centro (C) y derecha (R) son menores que en el sector izquierdo (L), y que los valores de estas distancias ( $<10\text{m}$ ) ponen en alto riesgo de colisión (H) al vehículo si toma rumbo a estribor. La ventaja de la base de reglas # 2, que incluye valores negativos para la variable de salida “angle”, es que bajo este escenario el vehículo se dirige hacia babor, dirección en la cual la posibilidad de colisionar es menor.

## Capítulo 5

En la Tabla 5-18 se muestra el tiempo de ejecución del algoritmo, la distancia recorrida y la velocidad promedio del vehículo en cada una de las simulaciones. Se establece la comparación con los valores inicialmente obtenidos para las simulaciones mostradas en la Figura 5.22 a Figura 5.28 (apartados 5.5.1.1 y 5.5.1.2); para los casos 22°/1m, 90°/1m y 90°/10m.

Tabla 5-18. Comparación entre los resultados cuantitativos obtenidos en las simulaciones del sistema de evasión de obstáculos reactivo fuzzy con la base de reglas #2 y las simulaciones realizadas inicialmente (mejor valor / peor valor)

Escenario	Tiempo de ejecución [s]	Distancia recorrida [m]	Velocidad promedio [m/s]
	Actual (mejor / peor)	Actual (menor / mayor)	Actual (menor / mayor)
<b>A</b>	621.6 (608.6 / 628)	281.65 (281.66 / 284.68)	0.45 (0.36 / 0.47)
<b>B</b>	638.5 (620.9 / 644.5)	282.24 (282.22 / 282.28)	0.44 (0.3 / 0.47)
<b>C</b>	716.8 (652.4.5 / 706)	285.17 (283.96 / 285.31)	0.39 (0.25 / 0.46)
<b>D</b>	730.9 (651.6 / 750.5)	289.07 (286.09 / 289.8)	0.39 (0.38 / 0.47)
<b>E</b>	260 (249.4 / 303)	163.03 (162.85 / 164.33)	0.62 (0.54 / 0.72)
<b>F</b>	475 (483.6 / 905.9)	257.37 (256.9 / 332.43)	0.54 (0.36 / 0.53)
<b>G</b>	388.5 (633.8 / 1683)	199.68 (320.61 / 542.57)	0.51 (0.3 / 0.5)

Al analizar los resultados de la Tabla 5-18 encontramos que los valores obtenidos en la mayoría de casos permanecen entre el rango de valores inicialmente obtenidos, Sin embargo, en algún caso en particular el valor de tiempo de ejecución ha podido ser mayor que los inicialmente registrados (Escenario "C"). Por otra parte, en los escenarios F y G el tiempo de ejecución obtenido es menor que el inicialmente obtenido y en el caso del escenario G la distancia recorrida también es menor que la inicialmente registrada. Esto debido a la inclusión en la base de reglas de valores negativos para la variable "angle".

Al desarrollar un análisis cualitativo, de los resultados mostrados en la Figura 5.45 a Figura 5.51; se observa que la trayectoria realizada por el vehículo presenta una reducción en el comportamiento oscilante observado inicialmente en la Figura 5.22 a Figura 5.28 caso ángulo fijo 22° y radio 1m.

Al analizar en cada una de las figuras anteriores la distribución de los waypoints generados para evadir el obstáculo, se puede apreciar como el sistema de evasión ajusta en cada paso la ubicación del waypoint en base al riesgo de colisión en cada

instante de tiempo y aplicando la mejor acción acorde con el escenario. Para comprender mejor este proceso, en la Figura 5.52 se describe paso a paso el proceso de ubicación de los waypoint. En esta figura, se puede ver como en cada caso dependiendo de la distancia entre el vehículo y el obstáculo y del tamaño del obstáculo, el sistema ajusta la distancia entre el vehículo y el waypoint generado.

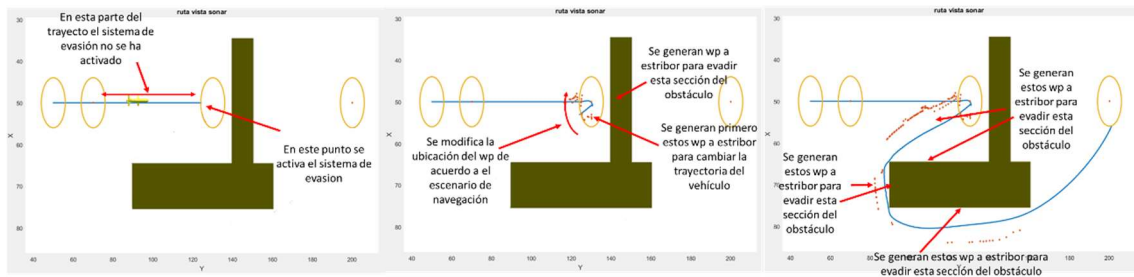


Figura 5.52. Análisis de la distribución de los waypoint generados para evadir el obstáculo

Las siguientes simulaciones corresponden a las realizadas en el entorno digitalizado del canal olímpico de Castelldefels en Barcelona, España. Inicialmente se realizan simulaciones sin habilitar en el control de navegación la posibilidad de descartar un waypoint. Los resultados de estas simulaciones y la configuración del escenario correspondiente son mostrados en la Figura 5.53 y Figura 5.54. En el escenario de la Figura 5.53, la distancia entre el waypoint 2 y el obstáculo es de 40 metros. Mientras que en el escenario de la Figura 5.54, la distancia entre el waypoint 3 y el obstáculo es de 10 metros.

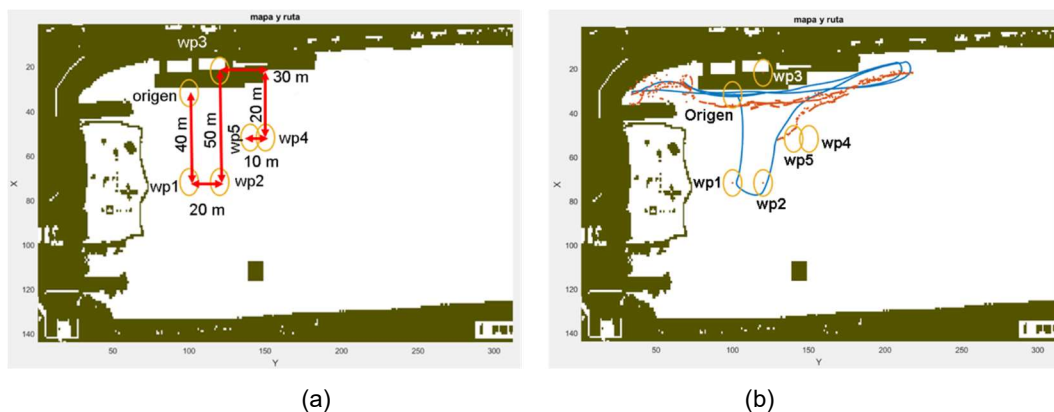


Figura 5.53. Resultado a) Escenario de simulación y ubicación de los waypoints (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

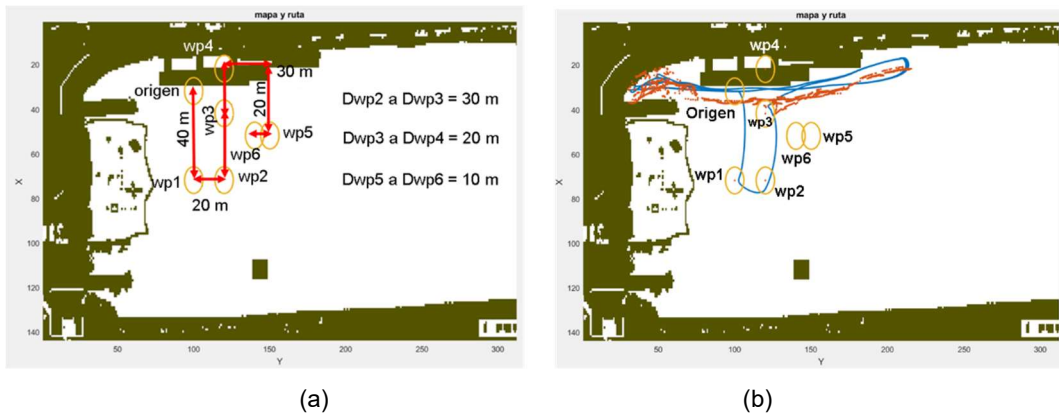


Figura 5.54. Resultado a) Escenario de simulación y ubicación de los waypoints (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

Finalmente, se realizan simulaciones habilitando en el control de navegación la posibilidad de descartar un waypoint. Los resultados de estas simulaciones y la configuración del escenario correspondiente son mostrados en la Figura 5.55 y Figura 5.56.

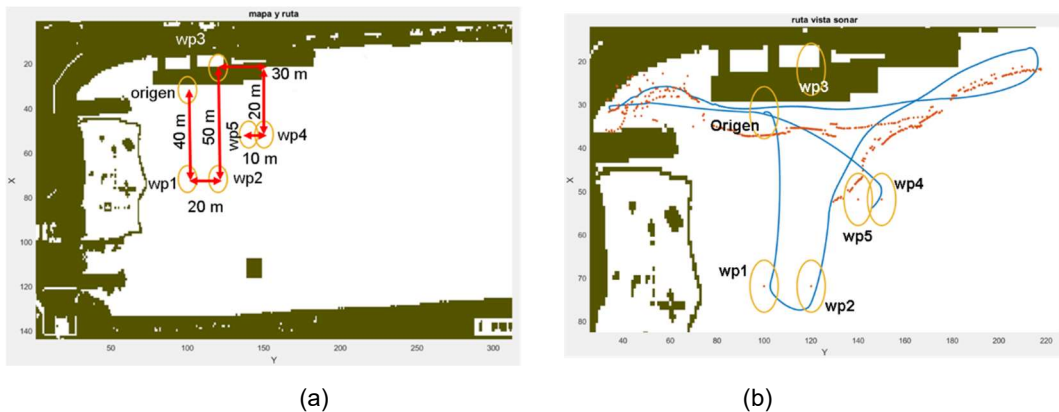


Figura 5.55. Resultado a) Escenario de simulación y ubicación de los waypoints (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

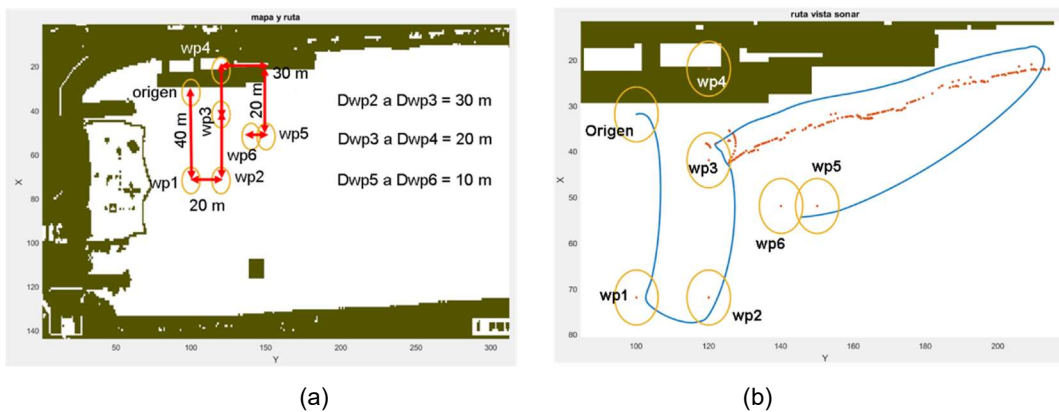


Figura 5.56. Resultado a) Escenario de simulación y ubicación de los waypoints (b) trayectoria de navegación obtenida. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

Al analizar los resultados obtenidos en las anteriores simulaciones, encontramos que en ninguno de los casos simulados el vehículo ha colisionado. Es de destacar que el área inspeccionada por el vehículo en la Figura 5.53, Figura 5.54 y Figura 5.55 es mucho mayor que el área inspeccionada inicialmente en la Figura 5.41, Figura 5.42 y Figura 5.43. Esto se debe a que la base de reglas # 2, incluye valores negativos para la variable de salida "angle". Esta configuración permite aumentar la posibilidad de encontrar una trayectoria con la cual, el vehículo pueda evadir el obstáculo y alcanzar el waypoint de destino. También permite que el vehículo pueda tomar rumbo a babor cuando existe un alto riesgo de colisión por proa y estribor, cumpliendo a cabalidad con la normativa COLREGS. A partir de estos resultados y las características descritas anteriormente del sistema de evasión con la base de reglas #2, se concluye que esta estrategia permite tener no solo una mayor maniobrabilidad en la navegación, sino que también permite cumplir con la normativa COLREGS, reduciendo el riesgo de colisión.

## **5.6 - Pruebas de campo del sistema de detección y evasión de obstáculos**

Los algoritmos desarrollados en el apartado 5.5.2.6 con la base de reglas #2, se han implementado en la unidad de control del vehículo Guanay II. Esta implementación ha sido realizada mediante la plataforma LabVIEW 2010, que corresponde al entorno de programación utilizado en el control de navegación del vehículo.

Las pruebas de campo se han desarrollado en el canal Olímpico de Castelldefels en Barcelona. Se han evaluado tres escenarios, inicialmente el vehículo se sitúa en el centro del canal. La primera prueba permite evaluar el comportamiento del sistema de evasión cuando la distancia entre el vehículo y el obstáculo es de 40 m y el waypoint de destino es inaccesible. La segunda prueba se realiza habilitando en el control de navegación, la posibilidad de descartar un waypoint. Finalmente, en la tercera prueba se evalúa el comportamiento del sistema de evasión cuando la distancia entre el vehículo y el obstáculo es de 10 m y el waypoint de destino es inaccesible.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de campo, acompañadas de las respectivas simulaciones.

### 5.6.1 - Prueba de campo # 1

La primera prueba de campo realizada, es de características similares a la presentada en la simulación de la Figura 5.53. En estas pruebas en el entorno de navegación se han definido dos waypoints, el primer waypoint ubica al vehículo en medio del canal, y el segundo waypoint ha sido ubicado en un punto inaccesible (ver Figura 5.57). El objetivo de esta prueba es determinar el comportamiento del sistema de evasión y observar la trayectoria de navegación del vehículo, entre el waypoint 1 y el waypoint 2. Esta prueba de campo se realiza sin habilitar en el control de navegación la posibilidad de descartar un waypoint. Los parámetros de configuración utilizados en esta prueba se muestran en la Tabla 5-19.

Tabla 5-19. Parámetros de configuración del sistema de detección y evasión de obstáculo

Parámetros	Valor
Rango mecánico de operación del sonar	30°
Resolución mecánica de giro del sonar	0.9°
Número de puntos de medida del sonar	400
Distancia máxima de operación del sonar	40 m
Radio de waypoint	6 m
Velocidad del vehículo	Variable (0-1m/s)
Control de trayectoria	Pure-pursuit
Sistema de evasión de obstáculos	Reactivo-Fuzzy waypoint)

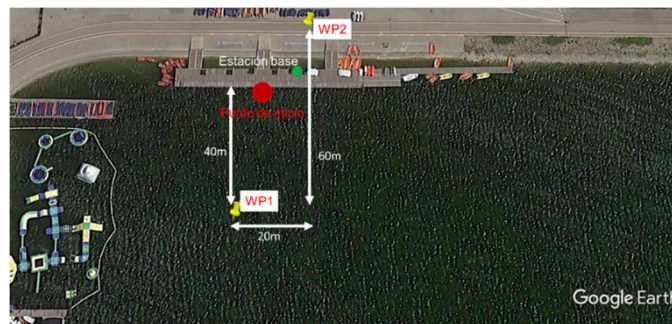


Figura 5.57. Escenario de simulación y ubicación de los waypoints

A partir de la ubicación de los waypoint en el escenario de las pruebas, se realizan simulaciones para estimar el comportamiento del vehículo en la prueba de campo. Se ha realizado la simulación con el modelo de funcionamiento ajustado a la realidad del sistema de detección de obstáculos (apartado 4.3), donde se tiene en cuenta la rotación del haz entre los sectores y solo se actualiza un sector a la vez. También se considera el tiempo de ejecución del sistema de detección de obstáculos, en cada punto de medición (Haz). Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 5.58.

## Diseño de un sistema fuzzy para la evasión de obstáculos

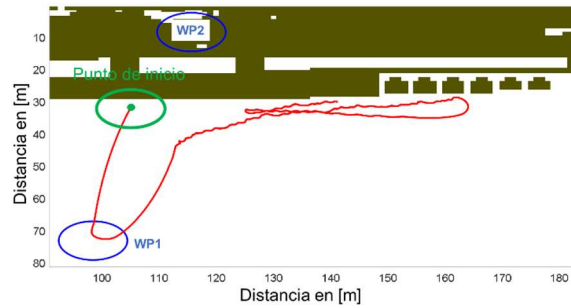


Figura 5.58. Simulación, trayectoria de navegación desarrollada por el vehículo utilizando el modelo ajustado a la realidad del sistema de detección de obstáculos (apartado 4.3).

En la Figura 5.59 se presenta la trayectoria de navegación del vehículo, obtenida en la prueba de campo. En la Figura 5.60 se realiza la comparación entre la trayectoria obtenida en simulación con el modelo ajustado a la realidad del sistema de detección de obstáculos (apartado 4.3) y la obtenida en la prueba de campo.

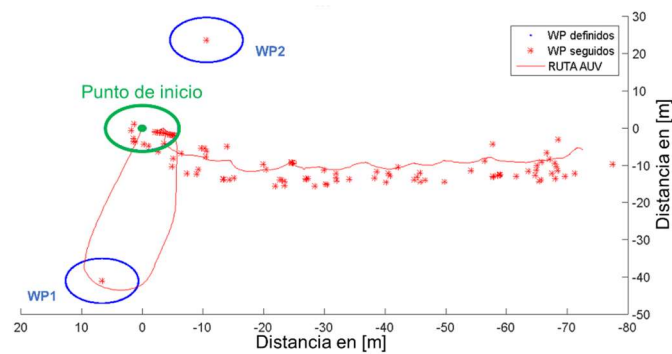


Figura 5.59. Trayectoria de navegación desarrollada por el vehículo. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

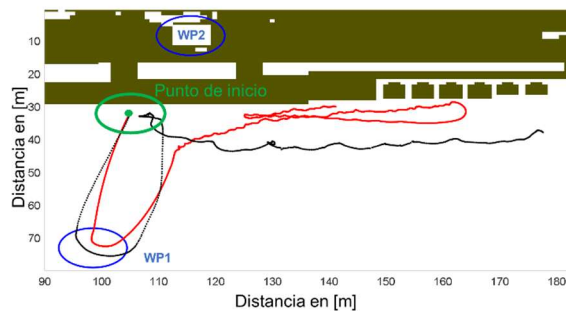


Figura 5.60. Comparación entre los resultados obtenidos en la prueba de campo (negro) y los resultados obtenidos en simulación (rojo)

Al analizar la Figura 5.60, encontramos inicialmente una similitud en el comportamiento del vehículo en la simulación y en la prueba de campo. Pero cuando se desarrolla la evasión se observa un comportamiento diferente. En ambos casos el vehículo navega

en paralelo al obstáculo, en la simulación el sistema de detección y evasión de obstáculos encuentra un punto en el cual no hay presencia de obstáculos en ninguno de los tres sectores, lo que le permite al vehículo girar 180° y dirigirse hacia el waypoint 2. Mientras que en la prueba de campo esta condición no se dio, por lo cual el vehículo continuó navegando paralelamente al obstáculo. Estas diferencias pueden venir originadas por las divergencias entre los entornos de navegación real y digitalizado. En el entorno digitalizado no se tiene en consideración que la plataforma que conforma el embarcadero del puerto es una superficie flotante, y las paredes del embarcadero no son verticales si no inclinadas. Esto genera múltiples reflexiones que se pueden interpretar como clutter por el sistema de evasión y modifica el comportamiento experimental respecto al simulado.

### 5.6.2 - pruebas de campo # 2

La segunda prueba de campo realizada, es de características similares a la presentada en la simulación la Figura 5.53. En estas pruebas en el entorno de navegación se han definido tres waypoints, el primer waypoint ubica al vehículo en medio del canal, el segundo waypoint ha sido ubicado en un punto inaccesible y el tercer waypoint será alcanzado por el vehículo cuando se ha descartado el segundo waypoint por el sistema de navegación (ver Figura 5.61).

El objetivo de esta prueba es determinar el comportamiento del sistema de evasión y observar la trayectoria de navegación del vehículo, entre el waypoint 1 y el waypoint 2. Esta prueba de campo se realiza habilitando en el control de navegación, la posibilidad de descartar un waypoint. Los parámetros de configuración utilizados en esta prueba se muestran en la Tabla 5-19.

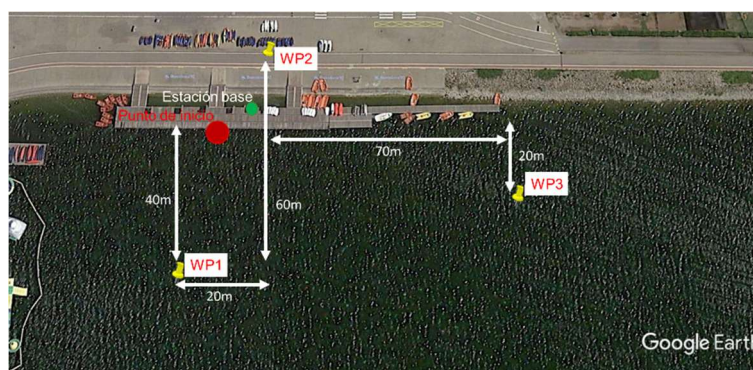


Figura 5.61. Escenario de simulación y ubicación de los waypoints



A partir de la ubicación de los waypoint en el escenario de las pruebas, se han realizado simulaciones para estimar el comportamiento del vehículo en la prueba de campo. Se ha realizado la simulación con el modelo ajustado a la realidad del sistema de detección de obstáculos, definido en el apartado 4.3. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 5.62.

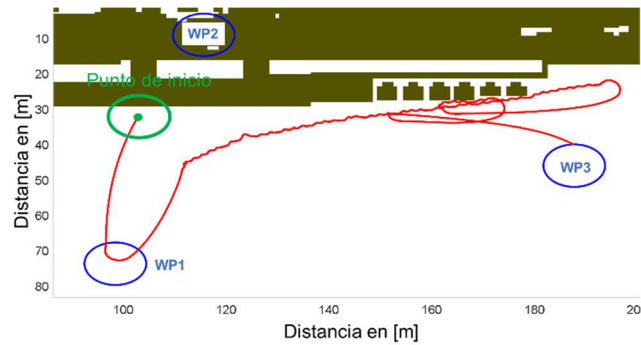


Figura 5.62. Simulación, trayectoria de navegación desarrollada por el vehículo utilizando el modelo ajustado a la realidad del sistema de detección de obstáculos (apartado 4.3).

En la Figura 5.63 se presenta la trayectoria de navegación del vehículo, obtenida en la prueba de campo. En la Figura 5.64 se realiza la comparación entre la trayectoria obtenida en simulación con el modelo real y la obtenida en la prueba de campo.

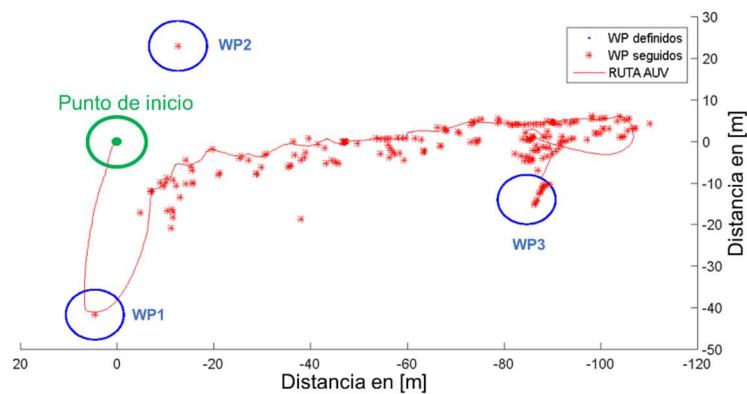


Figura 5.63. Trayectoria de navegación desarrollada por el vehículo. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

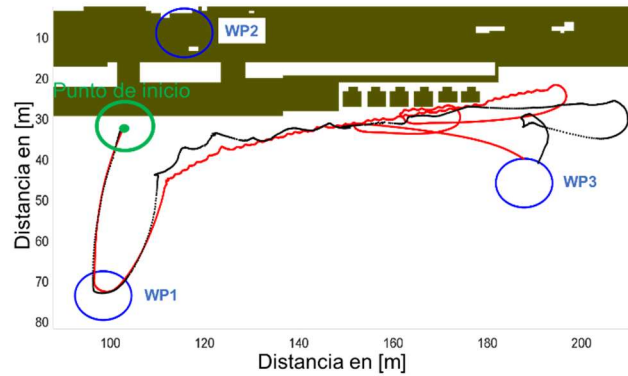


Figura 5.64. Comparación entre los resultados obtenidos en la prueba de campo (negro) y los resultados obtenidos en simulación (rojo)

Al analizar los resultados obtenidos en esta prueba de campo, se puede ver como el vehículo ha evadido el obstáculo, y como se mantiene navegando en paralelo al obstáculo, inspeccionando el área hasta que encuentra un punto en el cual el sistema de detección y evasión de obstáculos, no registra la presencia de obstáculo en ninguno de los tres sectores, lo que le permite al vehículo girar 180° y tomar rumbo al waypoint 2. Durante esta trayectoria se cumple la condición de tiempo y se descarta el waypoint 2. En este momento el vehículo se dirige al waypoint 3.

### 5.6.3 - pruebas de campo # 3

Finalmente, en la tercera prueba de campo realizada se pretende reproducir las simulaciones de la Figura 5.54. En este caso en el entorno de navegación se han definido tres waypoints, el primer waypoint ubica al vehículo en medio del canal, y el segundo waypoint ubica al vehículo en un punto cercano al obstáculo y el tercer waypoint ha sido ubicado en un punto inaccesible (ver Figura 5.65).

El objetivo de esta prueba es determinar el comportamiento del sistema de evasión y observar la trayectoria de navegación del vehículo, entre el waypoint 2 y el waypoint 3. Esta prueba de campo se realiza sin habilitar en el control de navegación la posibilidad de descartar un waypoint. Los parámetros de configuración utilizados en esta prueba se muestran en la Tabla 5-19.

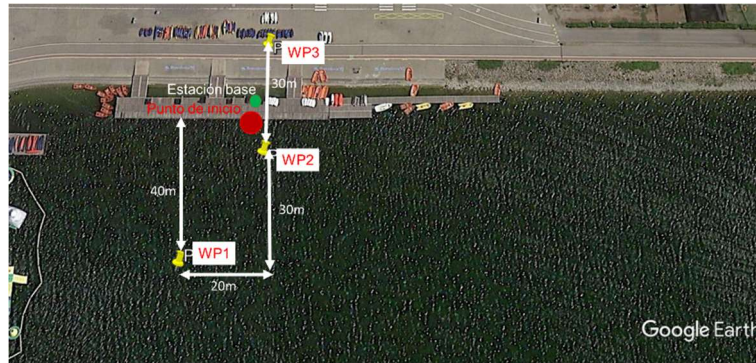


Figura 5.65. Escenario de simulación y ubicación de los waypoints

A partir de la ubicación de los waypoint en el escenario de las pruebas, se han realizado simulaciones para estimar el comportamiento del vehículo en la prueba de campo. Se ha realizado la simulación con el modelo ajustado a la realidad del sistema de detección de obstáculos, definido en el apartado 4.3. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 5.66.

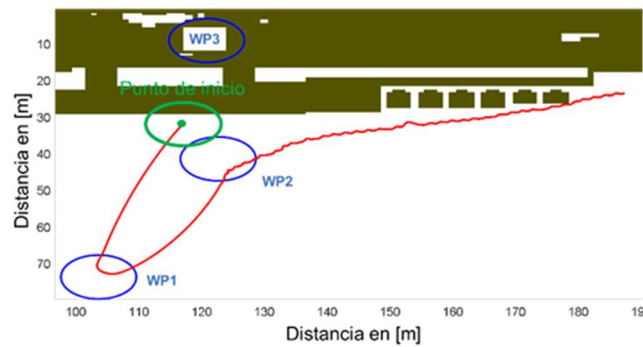


Figura 5.66. Simulación, trayectoria de navegación desarrollada por el vehículo utilizando el modelo ajustado a la realidad del sistema de detección de obstáculos (apartado 4.3).

En la Figura 5.67 se presenta la trayectoria de navegación del vehículo, obtenida en la prueba de campo. En la Figura 5.68 se realiza la comparación entre la trayectoria obtenida en simulación con el modelo real y la obtenida en la prueba de campo.

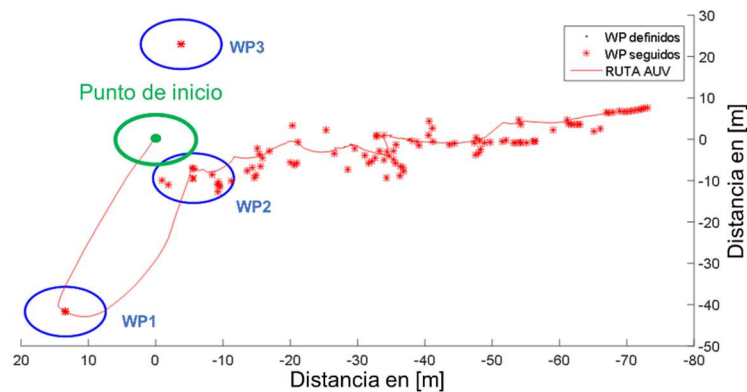


Figura 5.67. Trayectoria de navegación desarrollada por el vehículo. (Los puntos rojos corresponden a los waypoint generados)

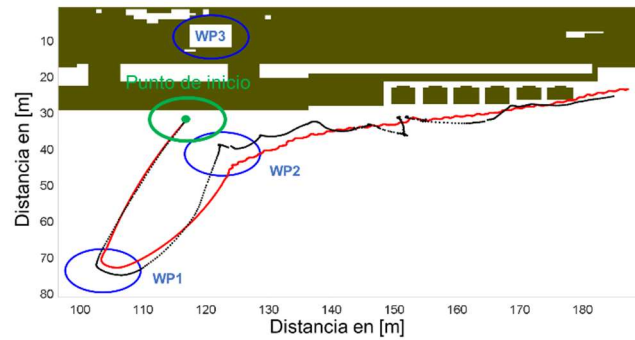


Figura 5.68. Comparación entre los resultados obtenidos en la prueba de campo (negro) y los resultados obtenidos en simulación (rojo)

Al analizar los resultados obtenidos y mostrados en la Figura 5.68, se observa como una vez alcanzado el waypoint 2, el sistema de evasión desvía al vehículo hacia estribor, evadiendo el obstáculo con un comportamiento similar al obtenido en la simulación.

Finalmente, al analizar todos los resultados obtenidos en las pruebas de campo y en las simulaciones, se observa que en general el comportamiento del vehículo en simulación y en las pruebas experimentales es similar. En ningún caso el vehículo ha colisionado contra el obstáculo. Existen algunas pequeñas diferencias entre las trayectorias del vehículo en simulación y en las pruebas experimentales, asociadas a la divergencia entre el entorno digitalizado y el real. A pesar de esto, se ha demostrado el correcto funcionamiento del sistema desarrollado.

## Capítulo 6.

# Sistema de inmersión para el vehículo Guanay II

Como se mencionó en el capítulo 2, el vehículo Guanay II fue inicialmente diseñado para navegar por la superficie y en puntos específicos realizar inmersiones verticales [10] [14]. Estas inmersiones son realizadas utilizando un sistema de inmersión por cambio en la flotabilidad. Debido a las características de este sistema el vehículo no puede navegar en inmersión como se detallará más adelante. Para navegar en inmersión existen, básicamente dos técnicas: utilizando superficies de control móviles o utilizar propulsores (fijos o vectoriales). Analizando las características físicas y operacionales del vehículo Guanay II se descarta el uso de superficies de control móviles por las razones siguientes:

- Baja efectividad a baja velocidad [107] [108], la máxima velocidad del vehículo Guanay II es de 1.2 m/s.
- Las modificaciones estructurales sobre el Guanay II necesarias para convertir las superficies de estabilización en superficies de control móviles, comparadas con las modificaciones necesarias para incorporar un sistema de propulsión vectorial son mucho más costosas y necesitan mucho más tiempo para su implementación.

Se ha diseñado e implementado un sistema de inmersión por propulsión vectorial basado en el control de la orientación sobre el plano vertical de los propulsores laterales del vehículo.

### 6.1 - Ajuste de la flotabilidad inicial

El ajuste de la flotabilidad inicial es el proceso de ajuste de diferentes componentes para asegurar que el vehículo permanezca en superficie. El AUV Guanay II dispone de diferentes componentes que permiten realizar el ajuste de la flotabilidad inicial (Ver

Figura 6.1). Teóricamente la fuerza de flotabilidad inicial del vehículo es  $1703 \text{ [kg m/s}^2\text{]}$  y el peso inicial es de  $1663 \text{ [kg m/s}^2\text{]}$ ; esta relación genera una flotabilidad positiva (ver apartado 7.3.1) con lo cual se garantiza que el vehículo permanezca en la superficie. La relación entre la flotabilidad y el peso inicial puede modificarse a través de espumas de flotabilidad o masas externas.

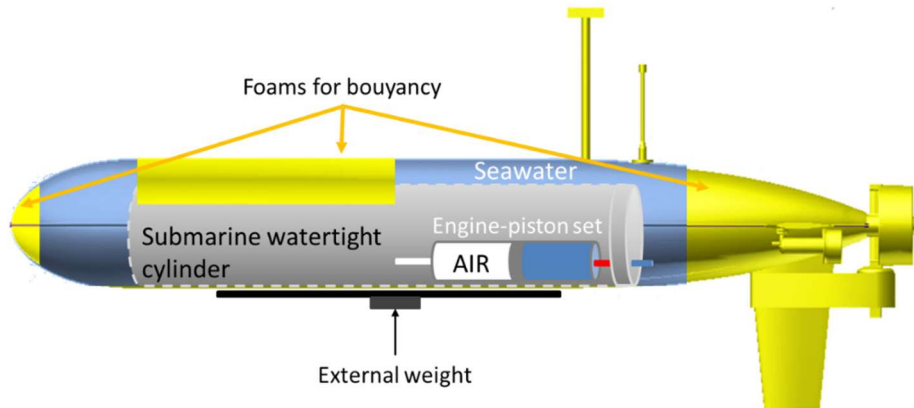


Figura 6.1. Distribución de componente para el ajuste de la flotabilidad del vehículo Guanay II

## 6.2 - Inmersión por cambio en la flotabilidad

El sistema de inmersión por cambio en la flotabilidad implementado en vehículo Guanay [12] [17] [18] [14], está construido en base a un pistón FESTO modelo *CRDNG-100-200-PPV-A*; con un recorrido del embolo de 15 cm (aproximado), controlado a través de un motor de 24 VDC (Ver Figura 6.2). Este pistón tiene un diámetro de 10 cm lo que proporciona un volumen de  $0.001178 \text{ m}^3$  ( $Volumen = altura * Pi * radio^2 = 0.15 * pi * 0.05^2$ ). El sistema de inmersión controla que el pistón este vacío o lleno a través de dos sensores magnéticos. En el proceso de inmersión, el pistón se llena del líquido sobre el cual se realiza la inmersión; normalmente este líquido corresponde a agua de mar, lo que genera una masa de  $1.20745 \text{ Kg}$  ( $masa = Volmuen * densidad = 0.001178 \text{ m}^3 * 1025 \text{ Kg/ m}^3$ ). El incremento en el peso del vehículo en función de la masa generada por el agua almacenada dentro del pistón, hace que la relación entre la fuerza de flotabilidad y peso cambie pasando a un estado de flotabilidad negativa con lo cual el vehículo entra en inmersión.

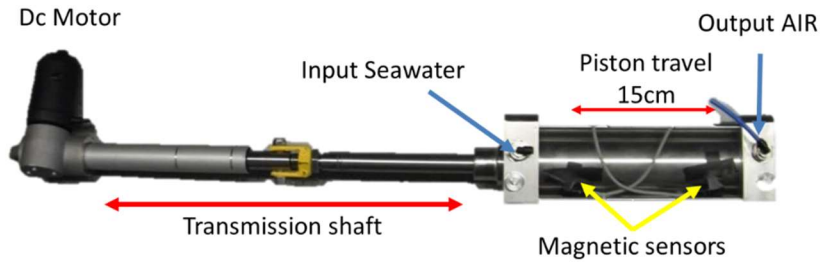


Figura 6.2. Sistema de inmersión por cambio en la flotabilidad para vehículo Guanay II

El pistón está ubicado en la zona de popa del vehículo (Ver Figura 6.3) y a medida que se llena modifica el ángulo de inclinación (pitch) del vehículo, de acuerdo con los resultados obtenidos por Gonzales [10] la inclinación máxima alcanzada por el vehículo es de 15°. Este comportamiento no permite utilizar este sistema para navegar en inmersión debido a la falta de control del pitch. Por esta razón se diseñó e implemento el sistema que se explica en el siguiente apartado.

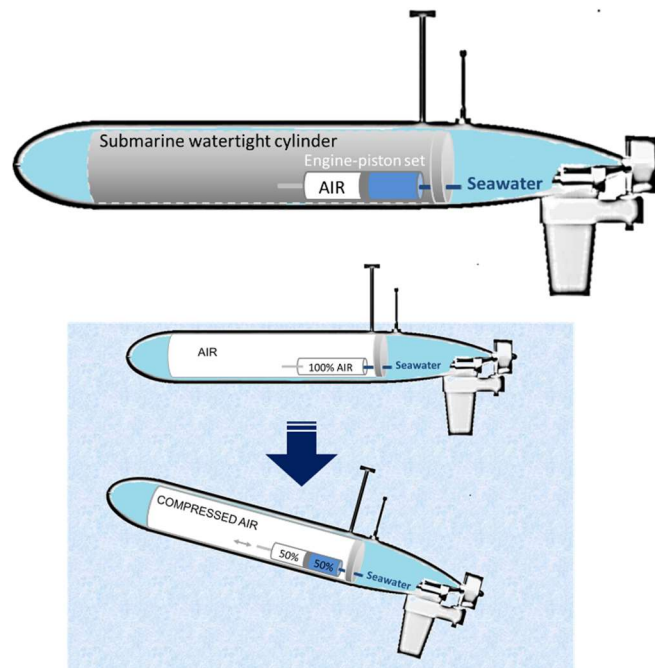


Figura 6.3. Comportamiento del sistema de inmersión por cambio en la flotabilidad para vehículo Guanay II

### 6.3 - Inmersión por propulsión vectorial

Como se mostró anteriormente, el sistema de inmersión por cambio en la flotabilidad del vehículo Guanay II genera un cambio no controlado del ángulo de inclinación del vehículo. Esto impide que el vehículo pueda ser usado para navegar en inmersión. Para habilitar la navegación en inmersión de este vehículo se ha desarrollado un sistema de

propulsión vectorial. El vehículo Guanay II (ver Figura 6.4) dispone de 3 propulsores fijos, dos ubicados en los extremos de las superficies de estabilización de popa y el propulsor principal ubicado en el centro en popa. El sistema de propulsión vectorial propuesto se basa en el control de la orientación de los dos propulsores laterales. Proporcionando un movimiento de giro sobre el plano vertical a cada uno de los propulsores laterales, se consigue el control de la inclinación del vehículo (ángulo de pitch).



Figura 6.4. Sistema de propulsión vehículo Guanay II

El sistema de propulsión vectorial se divide en 4 bloques; el primer bloque es el actuador que generara el cambio de dirección del propulsor, el segundo bloque es el sistema de transmisión de movimiento entre el actuador y el propulsor, el tercer bloque corresponde al sistema electrónico para el control del actuador y finalmente el algoritmo de control del sistema de inmersión por propulsión vectorial. A continuación, explicaremos cada uno de estos bloques.

### 6.3.1 - Actuador

Inicialmente se ha realizado un estudio de los diferentes actuadores basado en los siguientes requerimientos:

- Que genere un torque acorde (mayor) al peso de los propulsores. El peso de cada uno de los propulsores laterales en el aire es de 709 gr y en agua 340 gr.
- Sumergible hasta 20 metros
- Pueda ser acoplado en las superficies de estabilización de popa
- Rango de movimiento de +/- 90°
- Baja resolución de movimiento
- Rango de alimentación 0 – 24 VDC
- Rango de operación de 0m a -20m de profundidad
- Consumo de corriente lo menor posible



- Menor peso posible
- Menor tamaño posible
- Menor costo posible
- 4 pines de conexión

Se ha seleccionado trabajar con servomotores debido a sus características básicas de funcionamiento, ubicando un actuador en el intrado de cada una de las superficies de control. Como resultado del estudio realizado se han encontrado los siguientes actuadores:

### 6.3.1.1 - Servomotor DA 22-SUB-30-4128 - Volz-servos [109]

Tabla 6-1. Características del actuador volz-servos DA 22-SUB-30-4128 [109]

<b>Marca</b>	volz-servos
<b>Referencia</b>	DA 22-SUB-30-4128
<b>Profundidad Máxima</b>	100 m (300ft / 10 bar / 145 psi)
<b>Voltaje</b>	28 VDc
<b>Corriente</b>	0.3 A – 0.6 A
<b>Torque</b>	(180 – 300 Ncm) (18-30 Kg cm)
<b>Recorrido /Resolución</b>	90°-170°-330°/ 0.5°
<b>Dimensiones</b>	44.5 mm x 80.5 mm x 25.0 mm
<b>Material</b>	Metálico
<b>Peso</b>	372g
<b>Conector</b>	IE55-1206-BCR
<b>Tipo</b>	PWM / RS485
<b>Precio unitario</b>	A partir de € 2100

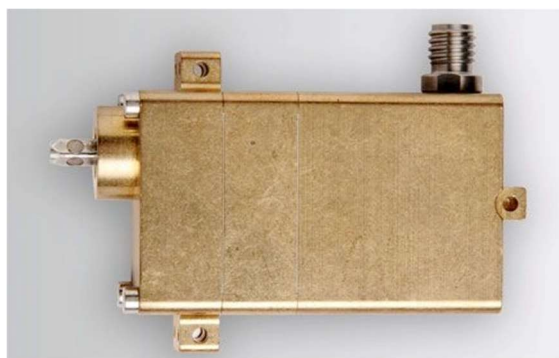


Figura 6.5. Actuador volz-servos DA 22-SUB-30-4128 [109]

### 6.3.1.2 - Servomotor SSPS105 - CK design Technology [110]

Tabla 6-2. Características del actuador SSPS-105 [110]

<b>Marca</b>	CK design Technology Tonegawa Seiko Servos
<b>Referencia</b>	SSPS-105
<b>Profundidad Máxima</b>	Sumergible- profundidad no especificada
<b>Voltaje</b>	12/24 VDC
<b>Corriente</b>	5 A – 9 A
<b>Torque</b>	(1000 oz-in) (72 Kg cm)
<b>Recorrido /Resolución</b>	+/- 45° +/- 90° +/- 180°/ 0.5°
<b>Dimensiones</b>	131.826 mm x 118.364 mm x 54.6 mm
<b>Material</b>	Metálico
<b>Peso</b>	780g
<b>Conector</b>	JR Type 3-wire
<b>Tipo</b>	Standard R/C PCM
<b>Precio unitario</b>	€ 514



Figura 6.6. Actuador SSPS-105 [110]

### 6.3.1.3 - Servomotor SW-1211SG - Savox USA [111]

Tabla 6-3. Características del actuador SAVSW1211SG [111]

<b>Marca</b>	Savox usa
<b>Referencia</b>	SAVSW1211SG
<b>Profundidad Máxima</b>	1m (ip67)
<b>Voltaje</b>	6 VDC
<b>Corriente</b>	0.3 A – 1 A
<b>Torque</b>	(208 oz-in) (15 Kg cm)
<b>Recorrido /Resolución</b>	+/-90° / 1°
<b>Dimensiones</b>	40.6 mm x 20.7 mm x 42 mm
<b>Material</b>	Metálico
<b>Peso</b>	71g
<b>Conector</b>	JR Type 3-wire
<b>Tipo</b>	PWM
<b>Precio unitario</b>	€ 57



Figura 6.7. Actuador SAVSW1211SG [111]

Analizando las características de los actuadores encontrados en el mercado y con base en los requerimientos iniciales del sistema, se ha seleccionado el servomotor SAVOX SW1211SG. Este servomotor tiene cuerpo y piñones metálicos (ver Figura 6.8), y certificación IP67. Por tanto, para poder ser utilizado a profundidades de 20 metros, se han debido realizar algunas modificaciones. Estas modificaciones han consistido en reducir el esfuerzo de compresión que sufre el servomotor y sus conexiones, sustituyendo el aire que hay dentro del servomotor por aceite, y recubriendo todas las juntas y cables con resina y cinta vulcanizante.



Figura 6.8. Partes del actuador SAVSW1211SG

El funcionamiento de estos servomotores, se ha verificado en una cámara hiperbárica hasta una profundidad de 20 metros por un periodo de 24 horas, con resultados satisfactorios.

### 6.3.2 - Diseño e implantación del soporte de transmisión mecánica de movimiento

Es necesario acoplar mediante un soporte o estructura el movimiento producido por el actuador (servomotor) al propulsor, de modo que se controle la orientación del flujo de propulsión generado sobre el plano vertical. A su vez, el soporte diseñado debe soportar la fuerza de propulsión de 2 kgf (19.6 N) generada por el propulsor y tener un perfil de

baja resistencia hidrodinámica. Para este propósito se ha diseñado en Autodesk Inventor la estructura que se muestra en la Figura 6.9 y Figura 6.10. Esta estructura dispone de dos paneles principales de 8 mm de grosor cada uno, para brindar mayor robustez y de este modo poder ser fabricada en PLA usando una impresora de prototipado rápido. El rango de movimiento circular que permite la estructura es de  $\pm 80^\circ$ , pero se restringe a  $\pm 25^\circ$  (Ver Figura 6.11 y Figura 6.12) debido a la conexión mecánica entre el propulso y el actuador. La relación de movimiento angular entre el servomotor (actuador) y el propulsor es de aproximadamente 1 a 1 es decir por cada grado que gira el servo motor el propulsor también se desplaza un grado. Cuando el propulsor este posicionado con un ángulo negativo el vehículo inicia una trayectoria de descenso (se sumerge). En caso contrario, cuando el ángulo sea positivo, el vehículo iniciará una trayectoria de ascenso (emergerá).

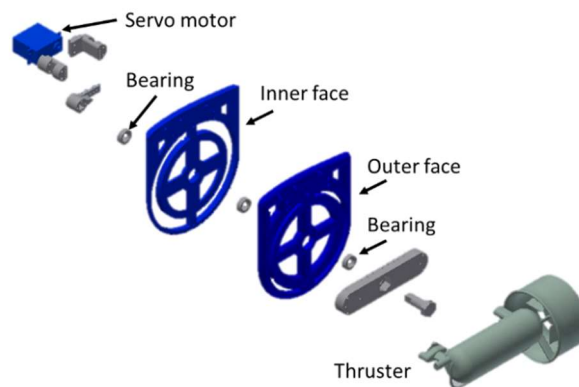


Figura 6.9. Despiece de la estructura de transmisión de movimiento (modelo 3D - Autodesk Inventor)

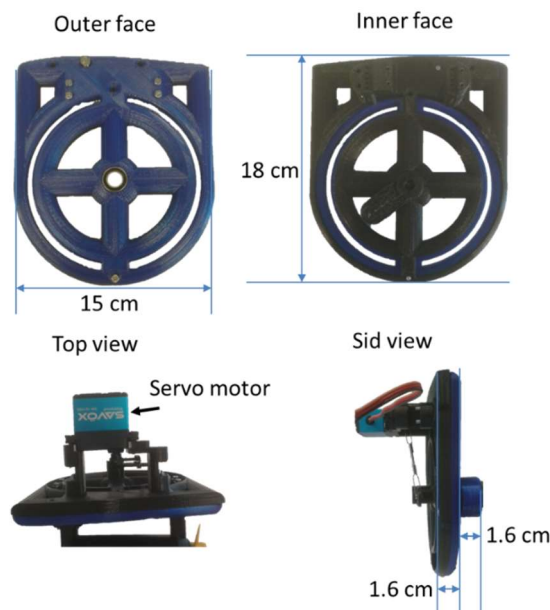


Figura 6.10. Partes y piezas de la estructura de transmisión de movimiento (modelo ensamblado)

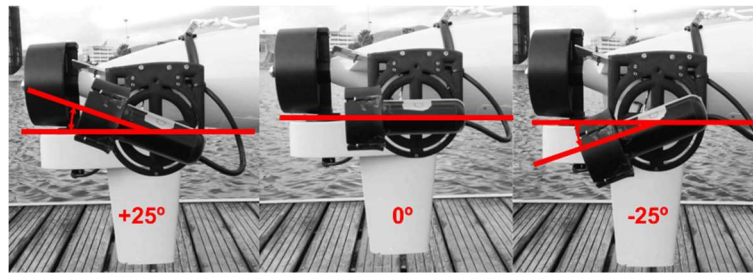


Figura 6.11. Fotografía de los propulsores laterales en diferentes posiciones de operación

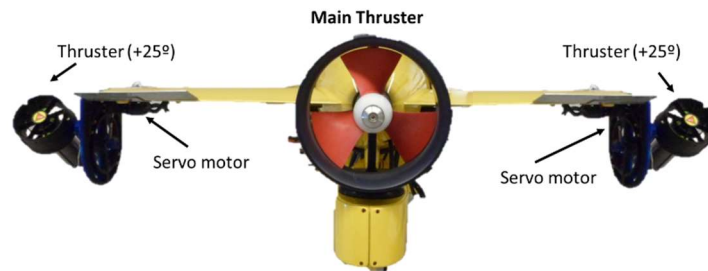


Figura 6.12. Fotografía de popa del AUV Guanay II. Sistema de propulsión fija (main thruster) y vectorial (lateral thrusters).

### 6.3.3 - Sistema electrónico para el control del actuador

En cada estabilizador de popa se ubicado un actuador. Se dispone de un conector subcon de 4 pines en la tapa del cilindro estanco para conectar los 2 actuadores. Cada servomotor (ver Figura 6.13) dispone de un conector de tipo JR de 3 hilos, dos de alimentación y uno para la señal del PWM que controla el movimiento del servomotor. De los 4 pines disponibles, se plantea utilizar dos como terminales de alimentación y un pin independiente para la señal de control PWM de cada actuador (ver Figura 6.14). El nivel de tensión de alimentación para este actuador, como se mostró en la Tabla 6-3 corresponde a 6 V y el control de la posición del eje motriz del servomotor es ajustada según una señal de PWM, con una amplitud de 5 voltios, frecuencia de 50 Hz y un ciclo útil positivo del 6% al 11%.

También se ha modificado el sistema electrónico del vehículo. Se ha añadido un conversor DC/DC de 24 V a 6 V para obtener los niveles de tensión de los actuadores. Las señales PWM (2 canales) para controlar el movimiento de los dos actuadores son generadas a través del circuito SSC32 (circuito control de servomotores), que recibe las instrucciones de la unidad de control a través de una conexión RS232. Esto permite controlar de modo independiente cada uno de los actuadores.



Figura 6.13. Pines de conexión actuador SAVOX SW1211SG

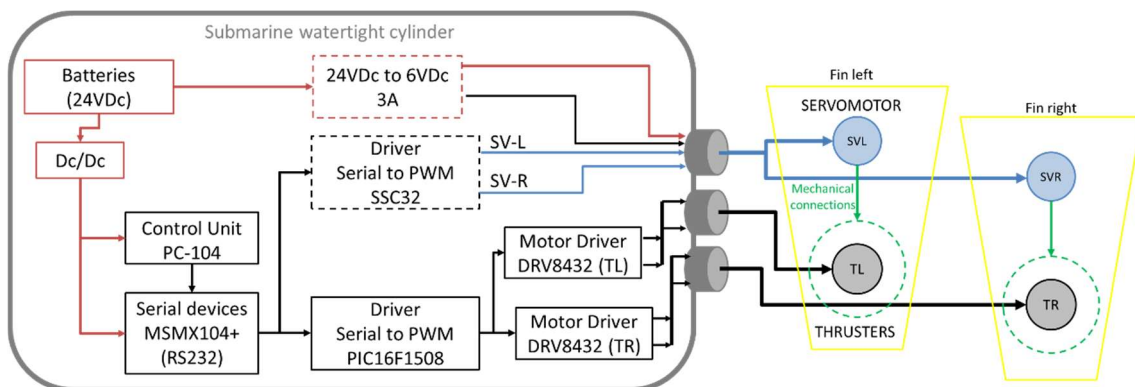


Figura 6.14. Diagrama de conexión general de los actuadores SAVOX SW1211SG

### 6.3.4 - Algoritmo de control del sistema de inmersión por propulsión vectorial

Se ha desarrollado un algoritmo para controlar la posición de cada actuador de modo independiente, esto permite una mayor versatilidad en los movimientos del vehículo. Aunque en este trabajo con el propósito de establecer el comportamiento del vehículo con el sistema de inmersión por propulsión vectorial sobre el plano vertical, se configura la posición de ambos actuadores en un mismo valor. Este algoritmo ha sido desarrollado en LabVIEW que es la plataforma en la cual se encuentra programado el vehículo Guanay II.

El control está dividido en 3 bloques (ver Figura 6.15), El primer bloque permite definir el valor de la posición (ángulo) de cada uno de los propulsores laterales. El segundo bloque convierte el ángulo de la posición en su correspondiente valor de posición mecánica en una escala de 12 bits y el tercer bloque envía la trama correspondiente a cada uno de los actuadores.

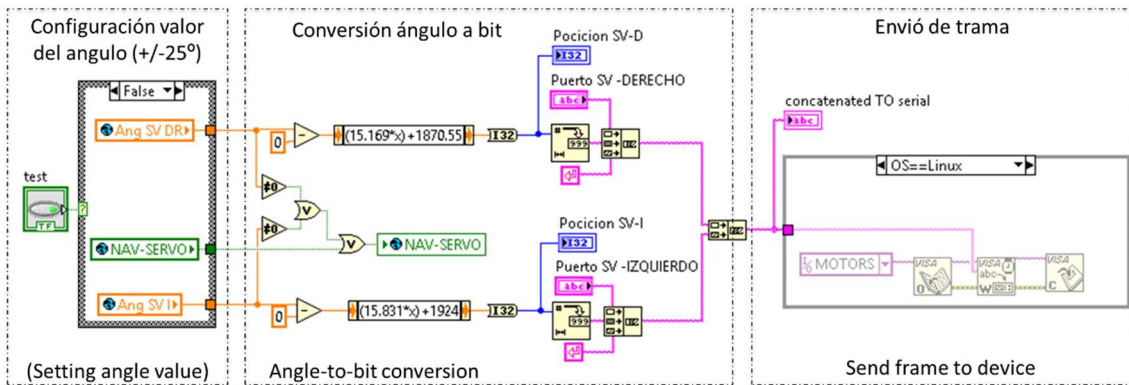


Figura 6.15. Algoritmo de control de los actuadores

El valor del ángulo correspondiente para cada actuador puede ser configurado a través de la interfaz de usuario del vehículo (ver Figura 6.16), o enviando el comando “SET:ANG-SERVO=“A”” al vehículo desde la estación base. Donde “A” representa el valor del ángulo entre  $-25^\circ$  y  $+25^\circ$ . El resultado de las pruebas de campo utilizando este control es mostrado en el siguiente apartado.



Figura 6.16. Interfaz de usuario para ajustar la posición del actuador, dentro del vehículo

### 6.3.5 - Pruebas de campo

Las pruebas de campo se han desarrollado en el canal olímpico de Castelldefels en Barcelona, (coordenadas GPS 41.2799979, 1.992890) (ver Figura 6.17). El canal olímpico está constituido por una masa de agua de baja salinidad, con unas dimensiones aproximadas de 120 m de ancho y 1200 m de largo, con una profundidad irregular que oscila entre los 3.5 m y 4 m.

El objetivo de estas pruebas es establecer el comportamiento del vehículo con el sistema de inmersión por propulsión vectorial sobre el plano vertical. El área de trabajo para la ejecución de las pruebas es de 5 m de ancho y 70 m de largo, donde se ubica el embarcadero principal del canal. Las pruebas consistieron en realizar trayectos

lineales de aproximadamente 18 metros de largo, utilizando diferentes configuraciones de ángulo de actuadores, porcentaje de propulsión y flotabilidad. Las variables de medición corresponden al ángulo de inclinación del vehículo y la profundidad con respecto al tiempo.

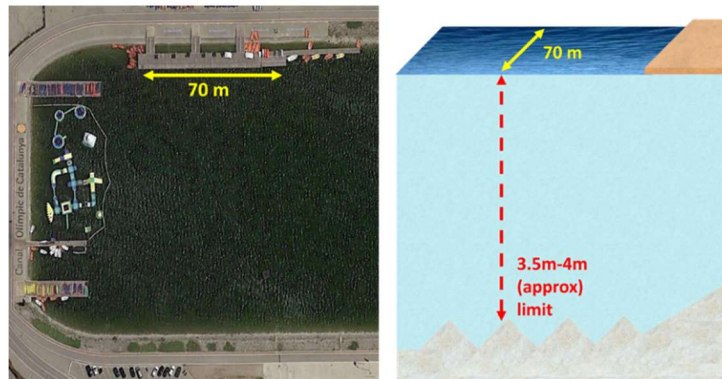


Figura 6.17. Canal olímpico de Castelldefels – Barcelona – España

La flotabilidad del vehículo es ajustada manualmente. Inicialmente se ajusta una flotabilidad positiva; en este caso debido a la baja densidad del agua del canal, se añadió un bloque de espuma de flotación con una masa de  $0.312\text{ kg}$  y un volumen de  $0.0024\text{ m}^3$ . Durante las pruebas se utilizan diferentes configuraciones de flotabilidad definidas entre muy positivas (++++) y ligeramente positivas (+). La flotabilidad se modifica mediante el añadido de masas externas en los puntos A, B, C y/o D (Figura 6.18) dentro de un rango no lineal de  $0.245\text{ kg}$  a  $1.4\text{ kg}$ . Las masas usadas tienen un valor de 650g, 452g, 300g y 245g.

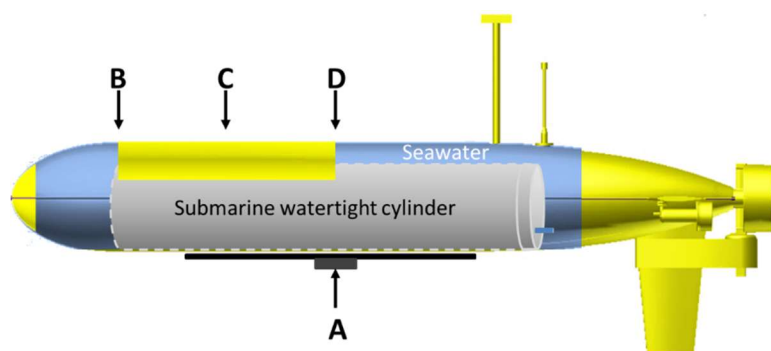


Figura 6.18. Puntos para anclaje de masas externas utilizados en las pruebas de campo

El ángulo que define la ubicación de los propulsores y el porcentaje de propulsión a utilizar en cada propulsor es establecido en un script a través de instrucciones preestablecidas. Estas instrucciones y sus características se exponen en la siguiente tabla:



Tabla 6-4. Instrucciones

Instrucción	Características
<b>SET:ANG-SERVO="A"</b>	Esta instrucción permite definir el ángulo de posicionamiento de actuador; A corresponde al valor del ángulo en grados: $A = 0^\circ, -25^\circ \text{ o } +25^\circ$
<b>MAN:"PC"_"PD"_"PI"_"NI"_"TP"</b>	Esta instrucción permite definir porcentaje de propulsión y el tiempo que dura la propulsión:  $PC = P. \text{ centro} = -20\% \text{ a } 100\%$ $PD = P. \text{ derecho} = -20\% \text{ a } 100\%$ $PI = P. \text{ izquierda} = -20\% \text{ a } 100\%$  Navegación en inmersión (NI): 1= SI / 0=NO  0: Si el vehículo navega en superficie y por error se hunde; se paran la propulsión.  1: Si en la prueba que se realiza el vehículo debe sumergirse.  Tiempo de propulsión (TP) en milis segundos

Para analizar el comportamiento del ángulo de inclinación del vehículo y del perfil de profundidad, los datos obtenidos (ángulo de inclinación y profundidad) son divididos en tres estados (transitorio, establecimiento y retardo):

- Transitorio: Estado en el cual el segmento de la señal analizado no mantiene el mismo valor ni el mismo comportamiento.
- Establecimiento: Estado en el cual el segmento de la señal analizado mantiene el mismo valor o la línea generada por interpolación de sus puntos. Puede ser interpretada como una línea recta.
- Retardo: Estado en el cual se observa en la señal un retraso en la respuesta ante un cambio en el ángulo del actuador.

Estos estados se cuantifican en el tiempo, es decir, se determina el tiempo que dura cada estado. En el caso de los estados de establecimiento y retardo, se establece un valor para la variable medida (ángulo o profundidad). Este valor puede ser un valor constante (ángulo o profundidad) si la variable se mantiene en un mismo valor durante el tiempo que dura el estado. O puede ser el valor de la pendiente de la línea recta que describe el movimiento de la variable medida.

### 6.3.5.1 - Prueba de campo 1

El primer test consta de tres etapas según las posiciones (ángulos) de los servomotores (actuadores), en la Tabla 6-5 (ver Figura 6.19) se muestra la configuración utilizada en cada etapa. La primera etapa se inicia desde un estado de reposo, donde se activan los propulsores laterales al 100% y el propulsor principal al 30%, con un ángulo del actuador de 0°, durante un periodo de 20s. En la segunda etapa los porcentajes de propulsión de los motores se mantienen, pero se cambia el ángulo del actuador pasando de 0° a -25°, durante 20s. Finalmente, en la tercera etapa se sigue manteniendo los porcentajes de propulsión, pero el ángulo del actuador cambia nuevamente a 0°. Este test es ejecutado para dos casos diferentes de flotabilidad.

Tabla 6-5. Parámetros de configuración para el test 1

Etapa	Tiempo [s]	Parámetro	Valor
1	20	Angulo del actuador	0°
		Potencia propulsores laterales	100%
		Potencia propulsor central	30%
		Flotabilidad caso 1	+ + + +
		Flotabilidad caso 2	+ + +
2	20	Angulo del actuador	-25°
		Flotabilidad caso 1	+ + + +
		Flotabilidad caso 2	+ + +
3	20	Angulo del actuador	0°
		Flotabilidad caso 1	+ + + +
		Flotabilidad caso 2	+ + +

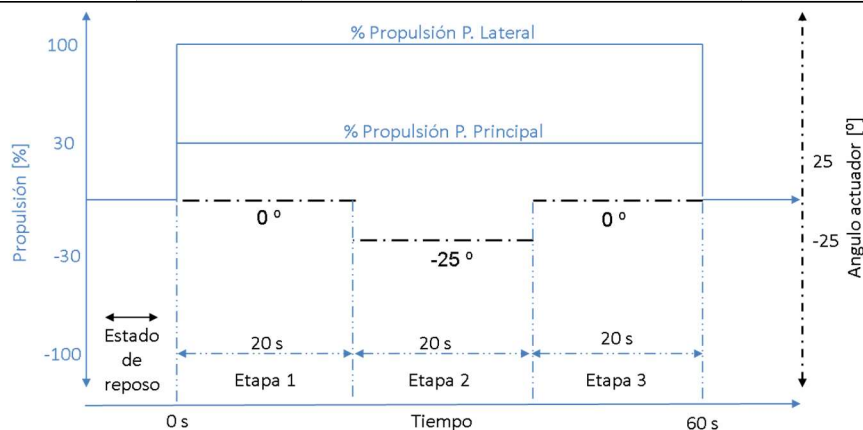


Figura 6.19. Configuración del test 1

La Figura 6.20 y Figura 6.21 muestran la evolución del ángulo de inclinación (pitch) del vehículo en el tiempo, para cada uno de los casos de flotabilidad. En ambas gráficas se observa un cambio en la inclinación del vehículo, generado por el cambio en el ángulo del actuador.

En la Tabla 6-6 se detalla la dinámica de esta variable (pitch) en cada una de las etapas. La primera columna corresponde a la etapa, la segunda columna al estado, en la tercera columna se muestran los parámetros de cuantificación (tiempo, ángulo o pendiente de la recta) y la cuarta columna al valor de cada parámetro.

En la Figura 6.21, que analiza el caso 2, que presenta menos flotabilidad positiva que el caso 1. Se constata que los ángulos de inclinación alcanzados por el vehículo en el transcurso de la etapa 2 son mayores que los alcanzados por el vehículo en el caso 1.

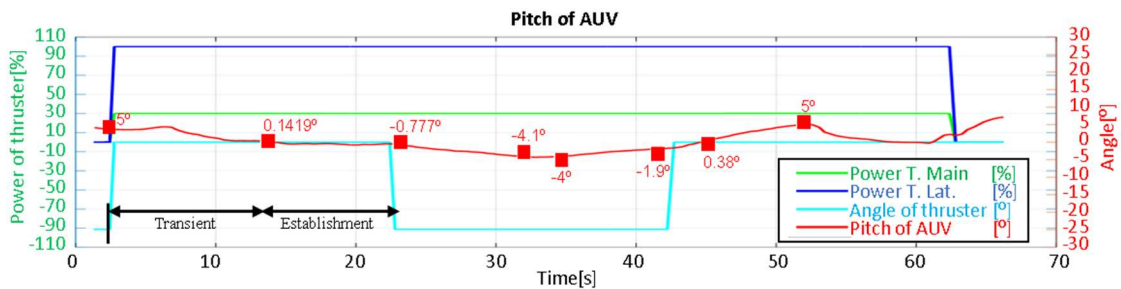


Figura 6.20. Resultado obtenido test 1, caso 1, ángulo de inclinación del AUV (Pitch).

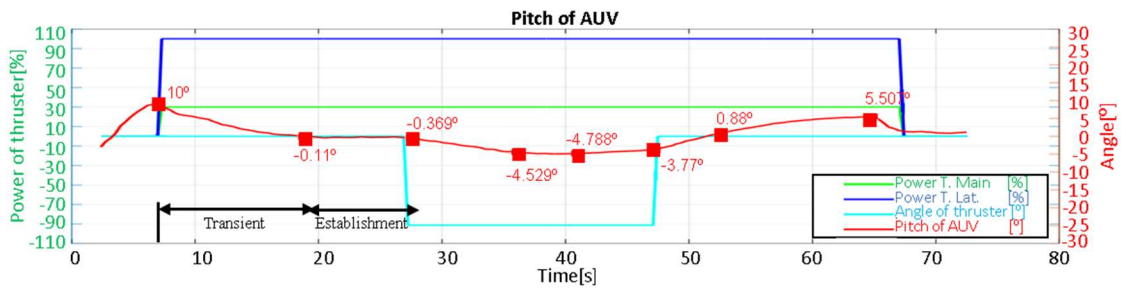


Figura 6.21. Resultado obtenido test 1, caso 2, ángulo inclinación del AUV (Pitch).

Tabla 6-6. Análisis de la respuesta temporal del sistema en el test 1

Etapas	Estado	Parámetro	Pitch	
			Caso 1	Caso 2
1	Transitorio	Tiempo	10.89s	11.9s
	Establecimiento	Ángulo	0°	0°
2	Establecimiento	Tiempo	8.88s	8.53s
		Pendiente	-0.38°	-0.49°
	Establecimiento	Ángulo	-4°	-4.65°
		Tiempo	2.6s	4.92s
3	Establecimiento	Tiempo	8.52s	6.6s
		Pendiente	0.3°	0.17°
	Establecimiento	Tiempo	9.92s	5.48s
		Pendiente	0.69°	0.85°
Transitorio	Tiempo	10.08s	2.34s	

La Figura 6.22 y Figura 6.23 muestran la evolución en profundidad del vehículo para cada uno de los casos de flotabilidad. En la Tabla 6-7 se detalla el comportamiento del vehículo en profundidad en cada una de las etapas. La primera columna corresponde a la etapa, la segunda columna al estado, en la tercera columna se muestran los parámetros de cuantificación (tiempo, profundidad o pendiente de la recta) y la cuarta columna al valor de cada parámetro.

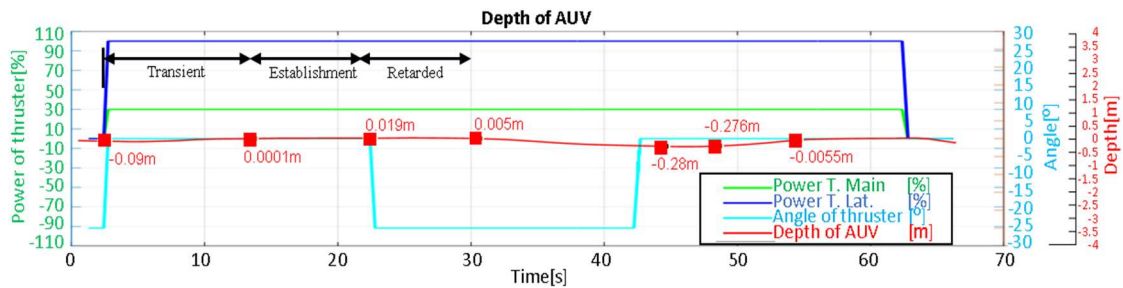


Figura 6.22. Resultado obtenido test 1, caso 1, comportamiento del AUV sobre el plano vertical.

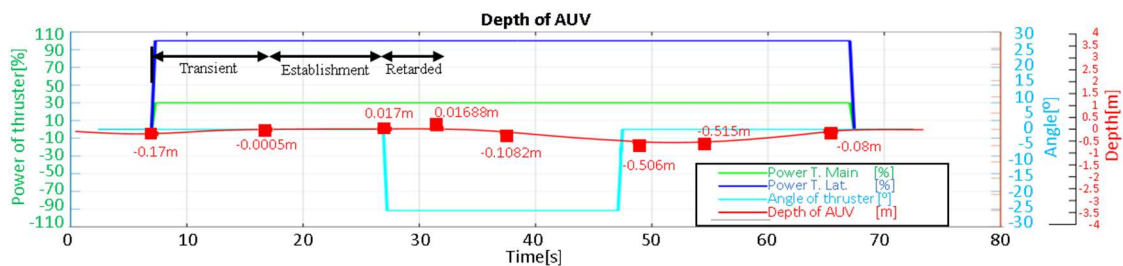


Figura 6.23. Resultado obtenido test 1, caso 2, comportamiento del AUV sobre el plano vertical.

Tabla 6-7. Análisis de la respuesta temporal del sistema en el test 1

Etapa	Estado	Parámetro	Profundidad	
			Caso 1	Caso 2
1	Transitorio	Tiempo	10.97s	9.8s
	Establecimiento	Profundidad	0m	0m
2	Retardo	Tiempo	7.98s	4.51
	Establecimiento	Tiempo	12s	9.49s
3	Establecimiento	Pendiente	-0.02°	-0.04°
	Transitorio	Profundidad	-0.3m	-0.5m
	Establecimiento	Tiempo	3.99s	5.6s
	Establecimiento	Tiempo	6s	10.9s
	Establecimiento	Pendiente	0.04°	0.04°
	Transitorio	Profundidad	0m	0m
		Tiempo	8s	1.58s

Al analizar la Tabla 6-6, Tabla 6-7 y las figuras anteriores, se puede observar que el cambio en el ángulo del actuador ( $0^\circ$  a  $-25^\circ$ ) genera un cambio instantáneo en el ángulo de inclinación del vehículo, pero no genera un cambio instantáneo en el nivel de profundidad (plano vertical). Se observa que el vehículo se empieza a sumergir después de un tiempo de 7.98s para el caso 1 y de 4.51s para el caso 2. Pasado ese tiempo, el vehículo alcanza la fuerza e inclinación necesaria para vencer la fuerza de flotabilidad. Esta situación se puede considerar como un retraso en el tiempo entre el momento en que se ejecuta la acción el actuador y el momento en el que el vehículo se sumerge.

Por otra parte, cuando el ángulo del actuador cambia de  $-25^\circ$  a  $0^\circ$  se observa que la inclinación del vehículo cambia instantáneamente, pero no se genera un cambio instantáneo en el nivel de profundidad. La trayectoria del vehículo, mantiene la misma pendiente durante unos segundos y posteriormente se establece manteniendo una misma profundidad (caso uno 0.3m, caso dos 0.5m) durante algunos segundos (caso uno 4s, caso dos 5.6s). Finalmente, el vehículo asciende hasta llegar a la superficie, esto debido a la flotabilidad positiva ajustada inicialmente en el vehículo.

### 6.3.5.2 - Prueba de campo 2

El segundo test está formado por 4 etapas, que dependen de las posiciones (ángulos) de los actuadores dadas en la Tabla 6-8 (ver Figura 6.24). En estas pruebas se utilizan tanto posiciones positivas como negativas de los actuadores y se realizan para tres ajustes diferentes de flotabilidad del vehículo. En la primera etapa se establecen los porcentajes de potencia de los propulsores laterales al 100% y del propulsor principal al 30%, estos porcentajes son mantenidos durante todas las etapas de la prueba.

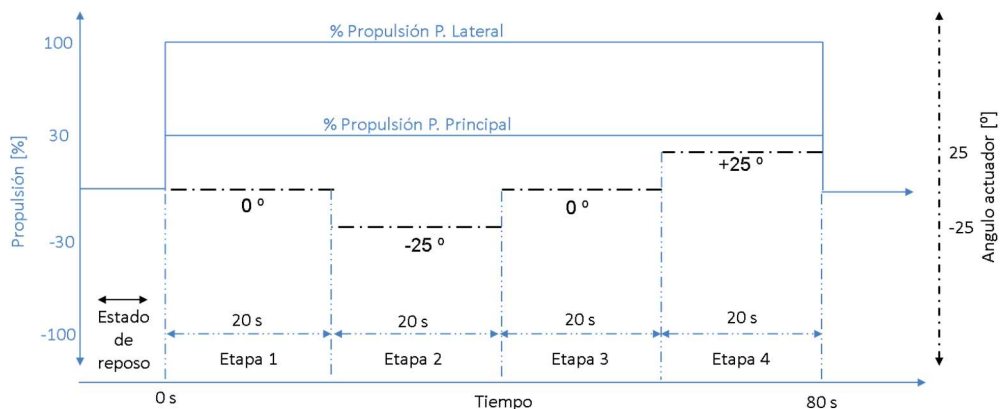


Figura 6.24. Configuración del test 2

Tabla 6-8. Parámetros de configuración para el test 2

Etapa	Tiempo[s]	Parámetro	Valor
1	20	Angulo del actuador	0°
		Potencia propulsores laterales	100%
		Potencia propulsor central	30%
		flotabilidad caso 2	+++
		flotabilidad caso 3	++
2	20	Angulo del actuador	-25°
		flotabilidad caso 2	+++
		flotabilidad caso 3	++
		flotabilidad caso 4	+
		Angulo del actuador	0°
3	20	flotabilidad caso 2	+++
		flotabilidad caso 3	++
		flotabilidad caso 4	+
		Angulo del actuador	+25°
		flotabilidad caso 2	+++
4	20	flotabilidad caso 3	++
		flotabilidad caso 4	+

La Figura 6.25, Figura 6.26 y Figura 6.27 muestran la evolución del ángulo de inclinación del vehículo en el tiempo para los 3 casos de ajustes de flotabilidad. En cada una de las tres graficas se observa un cambio instantáneo en la inclinación del vehículo, generado por el cambio en la posición de los actuadores. En la Tabla 6-9 se detalla la dinámica de esta variable en cada una de las etapas.

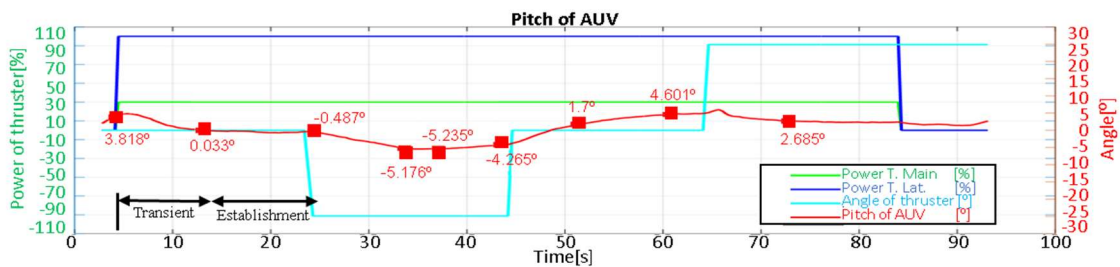


Figura 6.25. Resultado obtenido test 2, caso 2, inclinación del AUV (Pitch angle).

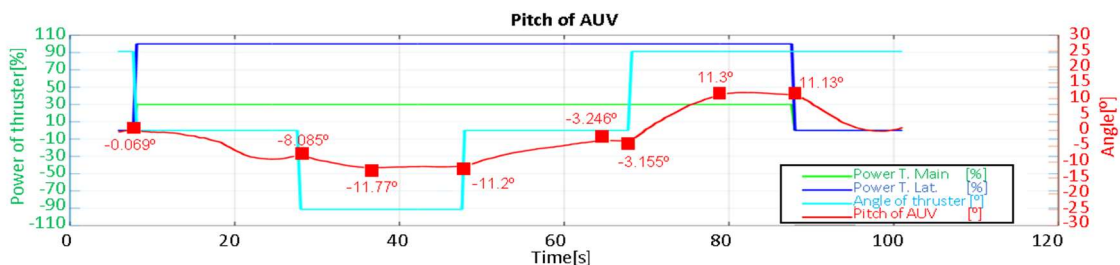


Figura 6.26. Resultado obtenido test 2, caso 3, inclinación del AUV (Pitch angle).

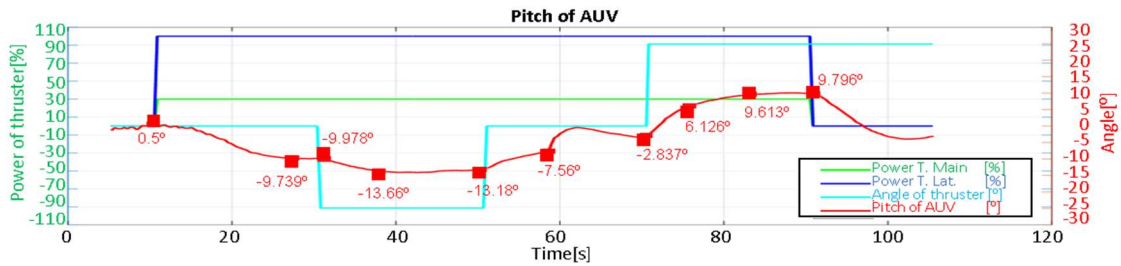


Figura 6.27. Resultado obtenido test 2, caso 4, inclinación del AUV (Pitch angle).

Tabla 6-9. Análisis de la respuesta temporal del sistema en el test 2

Etapa	Estado	Parámetro	Pitch		
			Caso 2	Caso 3	Caso 4
1	Transitorio	Tiempo	8.88s	20s	16.95s
	Establecimiento	Angulo	0°		-9.8°
2	Establecimiento	Tiempo	11.12s		3s
		Pendiente	9.24s	8.5s	6.7s
	Angulo	-0.5°	-0.43°	-0.55°	
	Tiempo	-5.2°	-11.3°	-13.4°	
	Establecimiento	3.5s	11.5s	13.33s	
	Establecimiento	Tiempo	7.21s		
3	Establecimiento	Pendiente	0.16°		
		Angulo	7s	16.9s	8.34s
	Transitorio	0.8°	0.47°	0.67°	
	Angulo		-3.1°	NA	
	Tiempo		3.1s	11.36s	
	Establecimiento	Tiempo	10.7s		
4	Transitorio	Pendiente	0.31°		
		Angulo	4.6°		
	Tiempo	3s			
	Transitorio	8s			
	Establecimiento	Tiempo		11.11s	5.37s
	Pendiente		1.3°	1.67°	
	Establecimiento	Tiempo		8.89s	7.5s
	Pendiente		11.2°	0.5°	
Establecimiento	Angulo	2.3°		9.7°	
Establecimiento	Tiempo	12s		7.14s	

La Figura 6.28, Figura 6.29 y Figura 6.30 muestran la evolución en profundidad del vehículo para los diferentes casos de flotabilidad. La Tabla 6-10 detalla la dinámica en profundidad en cada una de las etapas.

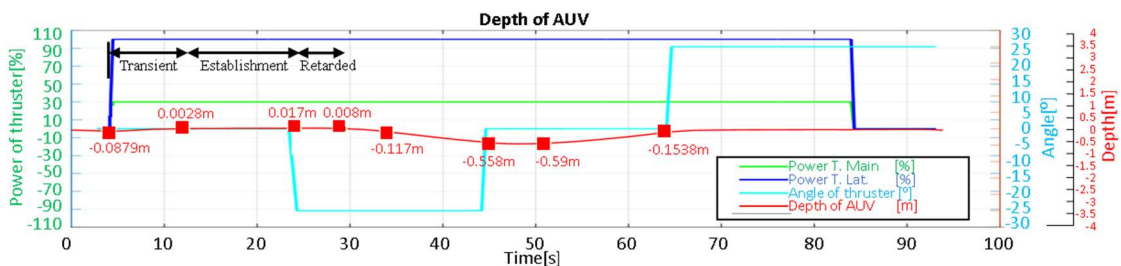


Figura 6.28. Resultado obtenido test 2, caso 2, comportamiento del AUV sobre el plano vertical.

## Capítulo 6

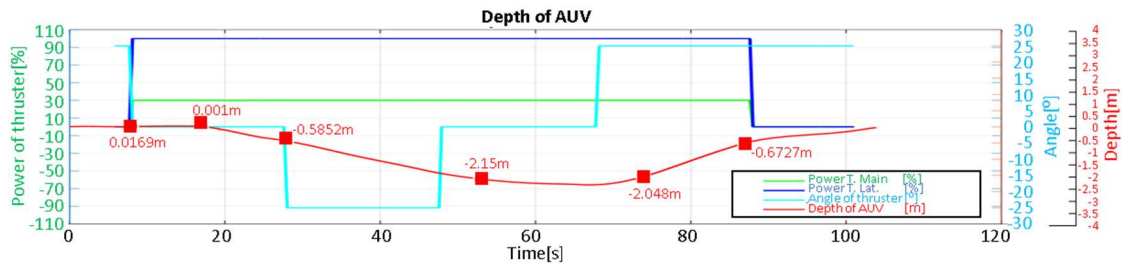


Figura 6.29. Resultado obtenido test 2, caso 3, comportamiento del AUV sobre el plano vertical.

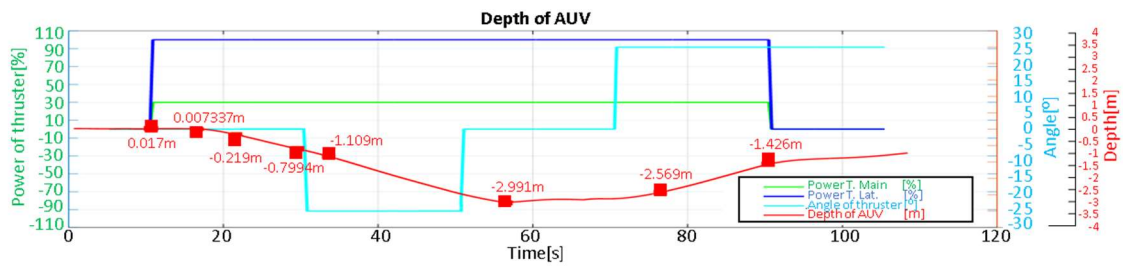


Figura 6.30. Resultado obtenido test 2, caso 4, comportamiento del AUV sobre el plano vertical.

Tabla 6-10. Análisis de la respuesta temporal del sistema en el test 2

Etapa	Estado	Parámetro	Profundidad		
			Caso 2	Caso 3	Caso 4
1	Transitorio	Tiempo	8s		
	Establecimiento	Profundidad	0m	0m	0m
		Tiempo	11.97s	8.99s	6s
2	Establecimiento	Tiempo		10.9s	14s
		Pendiente		-0.05°	-0.07°
	Establecimiento	Tiempo		20s	20s
3	Establecimiento	Pendiente		-0.06°	-0.08°
		Tiempo			
	Retardo	Profundidad	0m		
4	Transitorio	Tiempo	5s		
		Establecimiento	Tiempo	5s	
	3	Establecimiento	Tiempo	10.s	
Pendiente			-0.04°		
4		Establecimiento	Tiempo	1.93s	4.96s
	Pendiente		-0.04°	-0.06°	-0.08°
	Transitorio	Profundidad	-0.5m	-2.3m	-2.7m
4	Establecimiento	Tiempo	5s	15s	14s
		Establecimiento	Tiempo	13s	
	Pendiente	0.03°			
4	Transitorio	Tiempo	3s	2s	1s
		Establecimiento	Tiempo		18s
	Pendiente		0.1°	0.08°	
4	Establecimiento	Profundidad	0m		
		Tiempo	17s		

Analizando los resultados obtenidos mostrados en la Figura 6.26 y Figura 6.27, se observa que, durante la primera etapa, la inclinación del vehículo pasa a ser negativa, 160



aun cuando los actuadores están a  $0^\circ$ . Sin embargo, cuando el ángulo del actuador es positivo el sistema implementado permite que el vehículo emerja.

Por otra parte, al utilizar el ajuste de flotabilidad correspondiente al caso 4 (Figura 6.30), el vehículo alcanza una profundidad mayor que la alcanzada en los otros casos. Esta profundidad corresponde a 2.9m. En este caso también se observa que la dinámica del vehículo durante el proceso de ascensión es más lenta que la observada en los otros casos.

### 6.3.6 - Conclusiones de las pruebas de campo

A partir de las pruebas de campo realizadas se puede concluir que:

- En general se observa como era previsible, que a mayor flotabilidad positiva aparece un retardo en la dinámica del proceso de inmersión con respecto al instante en el que se realiza el cambio en el ángulo del propulsor.
- La diferencia existente entre los niveles de profundidad alcanzados, los niveles de inclinación del vehículo (pitch), las pendientes de las rectas que describen el movimiento del vehículo y los tiempos analizados en cada uno de los estados de transición, establecimiento y retardo, dependen de la flotabilidad utilizada en cada caso de estudio.
- La respuesta del ángulo de inclinación (pitch) del vehículo, es instantánea con respecto al instante de tiempo en el cual se realiza el redireccionamiento de los propulsores.
- El sistema de inmersión por propulsión vectorial, diseñado e implantado para el vehículo Guanay II funciona correctamente, se ha validado exitosamente que el sistema permite al vehículo, sumergirse, realizar una navegación en inmersión y emerger hasta la superficie.



## Capítulo 7.

# Propuesta del modelo hidrodinámico del Guanay II en el plano vertical

En la literatura relacionada se encuentran algunos autores como Fossen [112] [113] [114] [115], Wadoo [116], Pérez [117], Nikolai [118], Prestero [119] que han propuesto diversos modelos matemáticos para describir el comportamiento dinámico de vehículos marinos.

Para realizar el modelado de los vehículos, se ha dividido su movimiento en seis grados de libertad (Degrees Of Freedom "DOF") [ [115] pag 5], que corresponden a seis coordenadas independientes. Estas coordenadas son necesarias para determinar la posición y orientación de cualquier vehículo en inmersión. Las coordenadas (ver Figura 7.1) pueden ser referenciadas en base al marco de referencia del cuerpo (vehículo) {b} o al marco de referencia geográfico (inercial) {n}. Las tres primeras coordenadas, corresponden al movimiento de traslación a lo largo de los ejes X, Y y Z, mientras que las últimas tres coordenadas se utilizan para describir el movimiento de rotación (ver Tabla 7-1 y ver Figura 7.1). Entre los diferentes modelos matemáticos, se pueden encontrar algunos modelos de orden reducido, ajustados a los grados de libertad que se utilizan para aplicaciones específicas, como se puede ver en la Tabla 7-2.

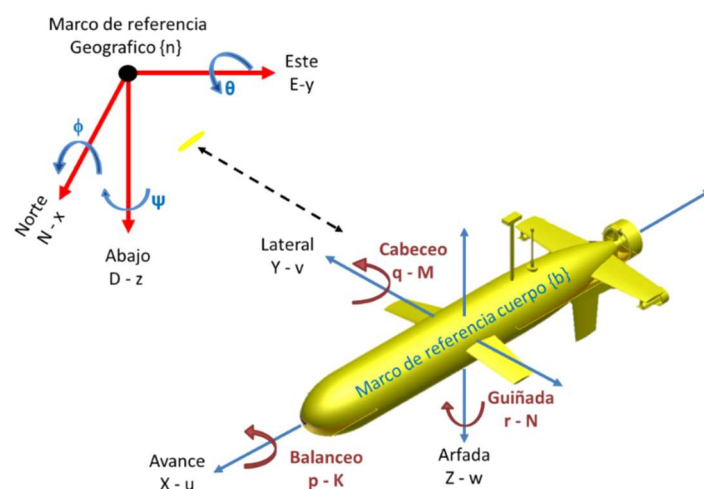


Figura 7.1. Representación de los 6 grados de libertad sobre el vehículo Guanay II

Tabla 7-1. Notación de los seis grados de libertad

Grados de libertad (GDL o Degrees Of Freedom "DOF")	Fuerzas y momentos (cuerpo) {b}	Velocidad lineal y angular (cuerpo) {b}	Posición y ángulos de Euler (NED) {n}	
1	Movimiento en dirección x (avance, surge)	X	u	x (N)
2	Movimiento en dirección y (lateral, sway)	Y	v	y (E)
3	Movimiento en dirección z (arfada, heave)	Z	w	z (D)
4	Rotación alrededor del eje x (balanceo, roll)	K	p	$\phi$
5	Rotación alrededor del eje y (cabeceo, pitch)	M	q	$\theta$
6	Rotación alrededor del eje z (guiñada, yaw)	N	r	$\psi$

Tabla 7-2. Aplicaciones de modelos de orden reducido.

Número de GDL	GDL	Características
1	Avance	Se pueden utilizar para diseñar controladores de: Velocidad hacia adelante
1	Guiñada	Se pueden utilizar para diseñar controladores de: Dirección (guiñada)
1	Balanceo	Sistemas de control del balanceo
3	Planos horizontales (avance, lateral y guiñada)	Para: - Buques, - Semi-sumergibles - Vehículos submarinos solo en plano horizontal - Sistemas de posicionamiento dinámico - Sistemas de control de trayectoria solo en plano horizontal
	Planos longitudinales (avance, arfada y cabeceo)	Para: - Control de velocidad de avance. - Control de la Inmersión. - Control del cabeceo.
	Planos laterales (lateral, balanceo y guiñada)	Para: - Control de giro - Control del rumbo
4	(avance, lateral, balanceo y guiñada)	Estos modelos se utilizan en las maniobras en las que es importante incluir el movimiento de balanceo: - Reducir el balanceo por control activo de las aletas o timones. - Estabilización de los tanques de lastre.
6	(avance, lateral, arfada, balanceo, cabeceo y guiñada)	Para: - Simulación y predicción de movimientos de vehículos - Sistemas de control avanzados para vehículos submarinos, con movimiento en los 6 GDL

El Guanay II, como se ha explicado anteriormente es un vehículo diseñado para navegar en superficie. J. González [14] ha propuesto un modelo hidrodinámico en tres grados de

libertad (surge, sway y yaw). Este modelo describe el movimiento del vehículo en la superficie, sobre el plano horizontal.

En el siguiente apartado se describe el modelo hidrodinámico general para vehículos sumergibles. Posteriormente se realiza la presentación del modelo hidrodinámico simplificado propuesto para el plano vertical, en tres grados de libertad (surge, heave, pitch) y en base a un sistema de inmersión por propulsión vectorial; mostrado en el capítulo 6.

## 7.1 - Modelo hidrodinámico general

Posiblemente, el modelo más ampliamente aceptado en la literatura es el propuesto por Fossen [114]. Esta metodología de modelado describe las leyes físicas del vehículo como un cuerpo rígido en un ambiente líquido. Sin embargo, la elección y cálculo de los coeficientes del modelo se debe particularizar para los datos geométricos e inerciales de cada vehículo, así como también a los sistemas de propulsión y de direccionamiento.

Para analizar el comportamiento del vehículo en relación con las fuerzas aplicadas sobre él, como la fuerza de flotabilidad, el peso, la fuerza de propulsión y la geometría de este, se divide el estudio del modelo dinámico en dos partes: el modelo cinemático, con el cual se puede analizar el movimiento del vehículo en condiciones de espacio y tiempo sin considerar las fuerzas que producen el movimiento. Y el modelo cinético, que permite analizar el movimiento a partir de las fuerzas que actúan sobre el vehículo.

### 7.1.1 - Cinemática

De acuerdo con Fossen [114], las ecuaciones de cinemática en forma vectorial y matricial para un vehículo en 6 grados de libertad se expresan de la siguiente manera:

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \quad (7-1)$$

$$\eta = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N \\ E \\ D \\ \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}, v = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (7-2)$$

Donde  $v$  corresponde a la velocidad en el marco de referencia del cuerpo  $\{b\}$  y  $i\eta$  corresponde a la posición generalizada en el marco de referencia inercial  $\{\eta\}$ , North-East-Down (NED). La ecuación (7-1) satisface la siguiente transformación entre los marcos de referencia de cuerpo  $\{b\}$  e inercial  $\{\eta\}$ , mediante la matriz:

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} R(\theta) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & T(\theta) \end{bmatrix} \quad (7-3)$$

Donde  $\theta$  corresponde al vector de los ángulos de rotación sobre cada uno de los ejes.

$$\theta = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \quad (7-4)$$

$R(\theta)$  es una matriz de rotación que describe la orientación entre dos sistemas de coordenadas. Euler estableció que dos marcos de referencia ortonormales independientes (con un origen común) pueden ser relacionados por una sucesión de no más de tres rotaciones alrededor de los ejes coordenados.

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta \\ s\psi c\theta & -c\psi c\phi + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\phi + s\psi c\phi s\theta \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (7-5)$$

$c \cdot := \cos(\cdot), s \cdot := \sin(\cdot)$

$R(\theta)$  es la matriz que relaciona el vector de posición del marco de referencia del cuerpo al marco de referencia inercial.  $T(\theta)$  es la matriz de rotación para el vector de velocidad del marco de referencia del cuerpo al marco de referencia inercial.

$$T(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & \frac{s\phi}{c\theta} & \frac{c\phi}{c\theta} \end{bmatrix} \quad (7-6)$$

$$c \cdot := \cos(\cdot), s \cdot := \sin(\cdot), t \cdot := \tan(\cdot), \theta \neq \pm \frac{\pi}{2}$$

Remplazando en la ecuación general (7-1) se obtiene la matriz de transformación para 6 grados de libertad (7-7).

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta & & & \\ s\psi c\theta & -c\psi c\phi + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\phi + s\psi c\phi s\theta & & 0_{3 \times 3} & \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi & & & \\ & & & 0_{3 \times 3} & & \\ & & & & 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ & & & & 0 & c\phi & -s\phi \\ & & & & 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (7-7)$$

### 7.1.2 - Modelo dinámico de vehículos submarinos

El modelo dinámico de vehículos submarinos, permite describir la relación entre los movimientos del vehículo y las fuerzas que se ejercen sobre él. Este modelo corresponde a la siguiente ecuación:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau + g_0 + W \quad (7-8)$$

Las matrices y vectores que conforman esta ecuación corresponden a:

- M: matriz de inercia y de masa añadida

$$M = M_{RB} + M_A \quad (7-9)$$

Donde  $M_{RB}$  corresponde matriz de masa de cuerpo rígido y  $M_A$  corresponde matriz de masa hidrodinámica debida a la aceleración  $\dot{v}$

- C: matriz de fuerzas centrífugas y Coriolis del cuerpo rígido y masa añadida

$$C = C_{RB}(v) + C_A(v) \quad (7-10)$$

Donde  $C_{RB}$  corresponde matriz coriolis de cuerpo rígido y centrípeta debida a la rotación de vehículo {b} sobre el marco geográfico {n}, y  $C_A$  corresponde matriz coriolis hidrodinámica

- D: matriz de fuerzas viscosas (Amortiguamiento)
- $g(\eta)$ : vector de fuerza hidrostáticas (fuerza de gravedad (peso) y flotabilidad)
- $\tau$ : vector de fuerza que ejercen los propulsores

$$\tau = Bu_p = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix} \quad (7-11)$$

Donde  $B$  es la matriz de control de propulsión y  $u_p$  es el vector de fuerza de propulsión.

- $g_0$ : vector de fuerza generado por el control de lastre
- $W$ : Vector de perturbaciones del ambiente (olas, viento y corrientes marinas)

Simplificando la ecuación (7-8), en base a las condiciones de una corriente constante y no rotacional en el marco de referencia inercial  $\{n\}$  se obtiene:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (7-12)$$

Expandiendo la ecuación (7-12) se obtiene:

$$M_{RB}\dot{v} + M_A\dot{v} + C_{RB}(v)v + C_A(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (7-13)$$

La ecuación (7-13) puede ser dividida en la ecuación de cinética de cuerpo rígido y fuerza hidrodinámica.

### 7.1.2.1 - Cinética – fuerzas cuerpo rígido

De acuerdo con Fossen [114], la ecuación general de cinética de cuerpo rígido es:

$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau_{RB} \quad (7-14)$$

Donde:

- $M_{RB}$  corresponde a la matriz de masa de cuerpo rígido:



$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_g & -my_g \\ 0 & m & 0 & -mz_g & 0 & mx_g \\ 0 & 0 & m & my_g & -mx_g & 0 \\ 0 & -mz_g & my_g & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_g & 0 & -mx_g & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_g & mx_g & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (7-15)$$

Donde  $m$  corresponde a la masa del vehículo,  $I$ . Corresponden a los términos de la matriz inercial con respecto al origen del marco de referencia del vehículo {b} y  $[x_g \ y_g \ z_g]$  corresponde a la ubicación del centro de gravedad con respecto al origen del marco de referencia del vehículo {b}.

- $C_{RB}$  corresponde matriz coriolis y centrípeta de cuerpo rígido debida a la rotación de vehículo {b} sobre el marco geográfico {n}

$$C_{RB}(v) = \quad (7-16)$$

$$\begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & m(y_g q + z_g r) & -m(x_g q - w) & -m(x_g r + v) \\ -m(y_g q + z_g r) & m(y_g p + w) & m(z_g p - v) & 0 & -I_{yz}q - I_{xz}p + I_z r & I_{yz}r + I_{xy}p - I_y q \\ m(x_g q - w) & -m(z_g r + x_g p) & m(z_g p + u) & I_{yz}q + I_{xz}p - I_z r & 0 & -I_{xz}r - I_{xy}q + I_x p \\ m(x_g r + v) & m(y_g r - u) & -m(x_g p + y_g q) & -I_{yz}r - I_{xy}p + I_y q & I_{xz}r + I_{xy}q - I_x p & 0 \end{bmatrix}$$

- $\tau_{RB}$  representa el vector de fuerzas externas y momentos expresados sobre el marco de referencia del vehículo {b}.

### 7.1.2.2 - Cinética – fuerza hidrodinámica

Las fuerzas hidrodinámicas son la fuerza de masa añadida y la fuerza de amortiguamiento y dependen inicialmente de las características físicas del fluido, la temperatura, la presión y la forma del cuerpo.

De acuerdo con Fossen [114], la ecuación de fuerzas hidrodinámicas corresponde a:

$$-M_A \dot{v} - C_A(v)v - D(v)v - g(\eta) + \tau = \tau_{RB} \quad (7-17)$$

Donde:

- $M_A$  corresponde matriz de masa hidrodinámica debida a la aceleración  $\dot{v}$ , es decir es la fuerza que se opone al movimiento del cuerpo ejercida por el fluido.

$$M_A = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (7-18)$$

- $C_A$  corresponde matriz de fuerza centrífuga y de Coriolis de la masa añadida.

$$C_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (7-19)$$

Donde:

$$\begin{aligned} a_1 &= X_{\dot{u}}u + X_{\dot{v}}v + X_{\dot{w}}w + X_{\dot{p}}p + X_{\dot{q}}q + X_{\dot{r}}r \\ a_2 &= Y_{\dot{u}}u + Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{w}}w + Y_{\dot{p}}p + Y_{\dot{q}}q + Y_{\dot{r}}r \\ a_3 &= Z_{\dot{u}}u + Z_{\dot{v}}v + Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{p}}p + Z_{\dot{q}}q + Z_{\dot{r}}r \\ b_1 &= K_{\dot{u}}u + K_{\dot{v}}v + K_{\dot{w}}w + K_{\dot{p}}p + K_{\dot{q}}q + K_{\dot{r}}r \\ b_2 &= M_{\dot{u}}u + M_{\dot{v}}v + M_{\dot{w}}w + M_{\dot{p}}p + M_{\dot{q}}q + M_{\dot{r}}r \\ b_3 &= N_{\dot{u}}u + N_{\dot{v}}v + N_{\dot{w}}w + N_{\dot{p}}p + N_{\dot{q}}q + N_{\dot{r}}r \end{aligned} \quad (7-20)$$

- $D(v)$  es la matriz de amortiguamiento y corresponde a las fuerzas resultantes de la fricción del cuerpo con el fluido debido a la viscosidad del líquido y puede ser expresado como la suma del amortiguamiento lineal y no lineal:

$$D(v) = D_l + D_n(v) \quad (7-21)$$

El amortiguamiento lineal se describe como:

$$D_l = - \begin{bmatrix} X_u & X_v & X_w & X_p & X_q & X_r \\ Y_u & Y_v & Y_w & Y_p & Y_q & Y_r \\ Z_u & Z_v & Z_w & Z_p & Z_q & Z_r \\ K_u & K_v & K_w & K_p & K_q & K_r \\ M_u & M_v & M_w & M_p & M_q & M_r \\ N_u & N_v & N_w & N_p & N_q & N_r \end{bmatrix} \quad (7-22)$$

El amortiguamiento no lineal se describe como:

$$D_n(v) = - \begin{bmatrix} X_{|u|u}|u| & X_{|v|v}|v| & X_{|w|w}|w| & X_{|p|p}|p| & X_{|q|q}|q| & X_{|r|r}|r| \\ Y_{|u|u}|u| & Y_{|v|v}|v| & Y_{|w|w}|w| & Y_{|p|p}|p| & Y_{|q|q}|q| & Y_{|r|r}|r| \\ Z_{|u|u}|u| & Z_{|v|v}|v| & Z_{|w|w}|w| & Z_{|p|p}|p| & Z_{|q|q}|q| & Z_{|r|r}|r| \\ K_{|u|u}|u| & K_{|v|v}|v| & K_{|w|w}|w| & K_{|p|p}|p| & K_{|q|q}|q| & K_{|r|r}|r| \\ M_{|u|u}|u| & M_{|v|v}|v| & M_{|w|w}|w| & M_{|p|p}|p| & M_{|q|q}|q| & M_{|r|r}|r| \\ N_{|u|u}|u| & N_{|v|v}|v| & N_{|w|w}|w| & N_{|p|p}|p| & N_{|q|q}|q| & N_{|r|r}|r| \end{bmatrix} \quad (7-23)$$

- $g(\eta)$  vector generalizado de la fuerza de restablecimiento. Corresponde a la gravedad y la fuerza de flotabilidad, y se expresa así:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B) \sin(\theta) \\ -(W - B) \cos(\theta) \sin(\phi) \\ -(W - B) \cos(\theta) \cos(\phi) \\ -(y_g W - y_b B) \cos(\theta) \cos(\phi) + (z_g W - z_b B) \cos(\theta) \sin(\phi) \\ (z_g W - z_b B) \sin(\theta) + (x_g W - x_b B) \cos(\theta) \cos(\phi) \\ -(x_g W - x_b B) \cos(\theta) \sin(\phi) - (y_g W - y_b B) \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (7-24)$$

Donde  $W$  corresponde al peso del cuerpo sumergido y  $B$  corresponde a la fuerza de flotabilidad. Teóricamente el peso del vehículo está definido como:

$$W = m * g \quad (7-25)$$

Donde  $m$  corresponde a la masa del vehículo y  $g$  a la gravedad. La fuerza de flotabilidad está definida como:

$$B = \rho * g * \nabla \quad (7-26)$$

Donde  $\nabla$  es el volumen de agua desalojada por el vehículo,  $g$  a la gravedad y  $\rho$  es la densidad del agua, la densidad promedio del agua de mar en la superficie es de  $1025 \text{ kg/m}^3$  (densidad de agua pura  $1000 \text{ kg/m}^3$ )

- $\tau$  corresponde a vector de fuerzas aplicadas ( $Bu_p$ ).

### 7.1.3 - Modelo dinámico de vehículos submarinos con simetría en el plano XZ

El modelo hidrodinámico descrito en la ecuación (7-8), puede ser simplificado en este caso en base a la simetría de babor y estribor con respecto al plano XZ, que presenta el vehículo por su forma tipo torpedo.

#### 7.1.3.1 - Matriz de inercia y de masa añadida

En base a la ecuación (7-9) se obtiene la matriz de inercia y de masa añadida que corresponde a:

$$M = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & -X_{\dot{v}} & -X_{\dot{w}} & -X_{\dot{p}} & mz_g - X_{\dot{q}} & -my_g - X_{\dot{r}} \\ -X_{\dot{v}} & m - Y_{\dot{v}} & -Y_{\dot{w}} & -mz_g - Y_{\dot{p}} & -Y_{\dot{q}} & mx_g - Y_{\dot{r}} \\ -X_{\dot{w}} & -Y_{\dot{w}} & m - Z_{\dot{w}} & my_g - Z_{\dot{p}} & -mx_g - Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ -X_{\dot{p}} & -mz_g - Y_{\dot{p}} & my_g - Z_{\dot{p}} & I_x - K_{\dot{p}} & -I_{xy} - K_{\dot{q}} & -I_{zx} - K_{\dot{r}} \\ mz_g - X_{\dot{q}} & -Y_{\dot{q}} & -mx_g - Z_{\dot{q}} & -I_{xy} - K_{\dot{q}} & I_y - M_{\dot{q}} & -I_{yz} - M_{\dot{r}} \\ -my_g - X_{\dot{r}} & mx_g - Y_{\dot{r}} & Z_{\dot{r}} & -I_{zx} - K_{\dot{r}} & -I_{yz} - M_{\dot{r}} & I_z - K_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (7-27)$$

Simplificando la matriz anterior, en base a la simetría del vehículo. Los coeficientes  $y_g, I_{xy}, I_{yz}$  son cero, la matriz  $M$  que se obtiene es:

$$M = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -X_{\dot{w}} & 0 & mz_g - X_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & 0 & -mz_g - Y_{\dot{p}} & 0 & mx_g - Y_{\dot{r}} \\ -X_{\dot{w}} & 0 & m - Z_{\dot{w}} & 0 & -mx_g - Z_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & -mz_g - Y_{\dot{p}} & 0 & I_x - K_{\dot{p}} & 0 & -I_{zx} - K_{\dot{r}} \\ mz_g - X_{\dot{q}} & 0 & -mx_g - Z_{\dot{q}} & 0 & I_y - M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & mx_g - Y_{\dot{r}} & 0 & -I_{zx} - K_{\dot{r}} & 0 & I_z - K_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (7-28)$$

#### 7.1.3.2 - Matriz Coriolis y centrípeta de cuerpo rígido

Simplificando la matriz (7-16), en base a la simetría del vehículo se obtiene:

$$C_{RB}(v) = \quad (7-29)$$

$$\begin{bmatrix} & & & m(z_g r) & -m(x_g q - w) & -m(x_g r + v) \\ & 0_{3 \times 3} & & -m(w) & m(z_g r + x_g p) & -m(u) \\ & & & -m(z_g p - v) & -m(z_g q + u) & m(x_g p) \\ -m(z_g r) & m(w) & m(z_g p - v) & 0 & -I_{xz} p + I_z r & -I_y q \\ m(x_g q - w) & -m(z_g r + x_g p) & m(z_g p + u) & I_{xz} p - I_z r & 0 & -I_{xz} r + I_x p \\ m(x_g r + v) & m(u) & -m(x_g p + y_g q) & I_y q & I_{xz} r - I_x p & 0 \end{bmatrix}$$

### 7.1.3.3 - Matriz fuerza centrífuga y de Coriolis de la masa añadida

Simplificando la matriz (7-19), con base en la simetría y de acuerdo con Fossen ([115] pag 121 ejercicio 6.2) se obtiene:

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} & & & 0 & -Z_{\dot{w}} w & Y_{\dot{v}} v \\ & 0_{3 \times 3} & & Z_{\dot{w}} w & 0 & -X_{\dot{u}} u \\ & & & -Y_{\dot{v}} v & X_{\dot{u}} u & 0 \\ 0 & -Z_{\dot{w}} w & Y_{\dot{v}} v & 0 & -N_{\dot{r}} r & M_{\dot{q}} q \\ Z_{\dot{w}} w & 0 & -X_{\dot{u}} u & N_{\dot{r}} r & 0 & -K_{\dot{p}} p \\ -Y_{\dot{v}} v & X_{\dot{u}} u & 0 & -M_{\dot{q}} q & K_{\dot{p}} p & 0 \end{bmatrix} \quad (7-30)$$

### 7.1.3.4 - Matriz de amortiguamiento

Simplificando la matriz (7-22) de amortiguamiento lineal, en base a la simetría del vehículo se obtiene:

$$D_l = - \begin{bmatrix} X_u & 0 & X_w & 0 & X_q & 0 \\ 0 & Y_v & 0 & Y_p & 0 & Y_r \\ Z_u & 0 & Z_w & 0 & Z_q & 0 \\ 0 & K_v & 0 & K_p & 0 & K_r \\ M_u & 0 & M_w & 0 & M_q & 0 \\ 0 & N_v & 0 & N_p & 0 & N_r \end{bmatrix} \quad (7-31)$$

Simplificando la matriz (7-23) de amortiguamiento no lineal, en base a la simetría del vehículo se obtiene:

$$D_n(v) = - \begin{bmatrix} X_{|u|u}|u| & 0 & X_{|w|w}|w| & 0 & X_{|q|q}|q| & 0 \\ 0 & Y_{|v|v}|v| & 0 & Y_{|p|p}|p| & 0 & Y_{|r|r}|r| \\ Z_{|u|u}|u| & 0 & Z_{|w|w}|w| & 0 & Z_{|q|q}|q| & 0 \\ 0 & K_{|v|v}|v| & 0 & K_{|p|p}|p| & 0 & K_{|r|r}|r| \\ M_{|u|u}|u| & 0 & M_{|w|w}|w| & 0 & M_{|q|q}|q| & 0 \\ 0 & N_{|v|v}|v| & 0 & N_{|p|p}|p| & 0 & N_{|r|r}|r| \end{bmatrix} \quad (7-32)$$

## 7.2 - Modelo hidrodinámico en el plano vertical (Longitudinal)

El objetivo de este apartado es proponer un modelo hidrodinámico para el vehículo Guanay II para caracterizar un movimiento de inmersión sobre el plano vertical.

En primer lugar, se escogerán las variables significativas de un modelo hidrodinámico de 6 dimensiones para describir el movimiento vertical, teniendo en cuenta las características físicas del vehículo. En el siguiente apartado se calcularán los valores de los coeficientes asociados a dichas variables.

Como se ha comentado en un apartado anterior, J. González propone en el trabajo [14] un modelo para el mismo vehículo cuando únicamente se desplaza en superficie, sobre un plano horizontal y este modelo se seguirá utilizando cuando el vehículo se desplace en estas condiciones. En este apartado se propondrá un modelo para describir el movimiento vertical considerando que los dos modelos estarán desacoplados. Esto se logra en base a la premisa de que no se utilizan simultáneamente los dos modelos. En la práctica esto significa que el vehículo no puede sumergirse mientras gira lateralmente, es decir, no hay movimiento del vehículo sobre el eje "Y" y el valor de los ángulos  $\psi$ ,  $\phi$  es pequeño ( $\approx 0$ ). Esta limitación de movimientos del vehículo no significa una restricción en la aplicación que se desarrolla.

Bajo esta consideración se puede proponer un modelo longitudinal donde se considera solamente 3 grados de libertad correspondientes a los estados (surge, heave, pitch) definidos en la Tabla 7-1.

### 7.2.1 - Cinemática

Simplificando la ecuación de cinemática general para 6 grados de libertad (ver ecuación (7-7)), se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta & 0 \\ -s\theta & c\theta c\phi & 0 \\ 0 & 0 & c\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \\ q \end{bmatrix} \quad (7-33)$$

$c \cdot := \cos(\cdot), s \cdot := \sin(\cdot)$

Si se considera que el movimiento vertical está desacoplado del movimiento horizontal, se puede asumir que los ángulos  $\psi$  y  $\phi$  son pequeños  $\approx 0$ , y por tanto simplificar la ecuación (7-33):

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta & s\theta & 0 \\ -s\theta & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \\ q \end{bmatrix} \quad (7-34)$$

## 7.2.2 - Modelo dinámico en el plano vertical para el vehículo Guanay II

El modelo hidrodinámico descrito en la ecuación (7-8), puede ser simplificado en este caso en base a la simetría en babor y estribor con respecto al plano  $XZ$ , que presenta el vehículo por su forma tipo torpedo. Por otra parte, aplicando la misma consideración de modelos desacoplados se puede simplificar y describir el modelo hidrodinámico (7-8) solo sobre las variables  $u, w, q, \theta$ . Sin considerar las variables laterales ( $v, p, r, \psi, \phi$ ).

### 7.2.2.1 - Matriz de inercia y de masa añadida

Aplicando las anteriores consideraciones a la matriz (7-28); que permiten simplificar el modelo hidrodinámico, la matriz de inercia y masa añadida simplificada es:

$$M = M_{RB} + M_A = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & -X_{\dot{w}} & m * z_g - X_{\dot{q}} \\ -X_{\dot{w}} & m - Z_{\dot{w}} & -m * x_g - Z_{\dot{q}} \\ m * z_g - X_{\dot{q}} & -m * x_g - Z_{\dot{q}} & I_y - M_{\dot{q}} \end{bmatrix} \quad (7-35)$$

### 7.2.2.2 - Matriz Coriolis y centrípeta de cuerpo rígido

La matriz Coriolis y centrípeta dada en la ecuación (7-29) relacionada con cuerpo rígido, puede ser simplificada en función de las variables  $u, w, q, \theta$ , y se puede escribir como:

$$C_{RB}(v)v = \quad (7-36)$$

$$\begin{bmatrix} (m(z_g r))p + (-m(x_g q - w))q + (-m(x_g r + v))r \\ (-m(z_g p - v))p + (-m(z_g q + u))q + (m(x_g p))r \\ (m(x_g q - w))u + (-m(z_g r + x_g p))v + (m(z_g q + u))w + (I_{xz}p - I_z r)p + (-I_{xz}r + I_x p)r \end{bmatrix}$$

Asumiendo que los estados  $v, p, r, \psi, \phi$  son pequeños ( $\approx 0$ ) se obtiene:

$$C_{RB}(v)v = \begin{bmatrix} (-m(x_g q - w))q \\ (-m(z_g q + u))q \\ [(m(x_g q - w))u + (m(z_g q + u))w] \end{bmatrix} \quad (7-37)$$

Considerando que  $qq \approx 0, wq \approx 0$  se obtiene:

$$C_{RB}(v)v = \begin{bmatrix} 0 \\ m * u * q \\ m * x_g * q * u \end{bmatrix} \quad (7-38)$$

$$C_{RB}(v)v = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -m * u \\ 0 & 0 & m * x_g * u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \\ q \end{bmatrix} \quad (7-39)$$

### 7.2.2.3 - Matriz fuerza centrífuga y de Coriolis de la masa añadida

La matriz Coriolis y centrípeta relacionada con hidrodinámica (ecuación (7-30)), puede ser simplificada en función de las variables  $u, w, q, \theta$  y se puede escribir como:

$$C_A(v)v = \begin{bmatrix} (-Z_{\dot{w}}w)q + (Y_{\dot{v}}v)r \\ (-Y_{\dot{v}}v)p + (X_{\dot{u}}u)q \\ (Z_{\dot{w}}w)u + (-X_{\dot{u}}u)w + (N_{\dot{r}}r)p + (-K_{\dot{p}}p)r \end{bmatrix} \quad (7-40)$$

Asumiendo que los estados  $v, p, r, \psi, \phi$  son pequeños ( $\approx 0$ ) se obtiene:

$$C_A(v)v = \begin{bmatrix} (-Z_{\dot{w}}w)q \\ (X_{\dot{u}}u)q \\ (Z_{\dot{w}}w)u + (-X_{\dot{u}}u)w \end{bmatrix} \quad (7-41)$$

$$C_A(v)v = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X_{\dot{u}} * u \\ 0 & (Z_{\dot{w}} - X_{\dot{u}})u & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \\ q \end{bmatrix} \quad (7-42)$$

### 7.2.2.4 - Matriz de fuerzas centrífugas y Coriolis del cuerpo rígido y masa añadida

La matriz Coriolis y centrípeta desacoplada para los estados de interés  $(u, w, q, \theta)$  es:



$$C = C_{RB}(v) + C_A(v) \quad (7-43)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -m * u \\ 0 & 0 & m * x_g * u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X_{\dot{u}}u \\ 0 & (Z_w - X_{\dot{u}})u & 0 \end{bmatrix} \quad (7-44)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (X_{\dot{u}} - m)u \\ 0 & (Z_w - X_{\dot{u}})u & m * x_g * u \end{bmatrix} \quad (7-45)$$

### 7.2.2.5 - Matriz de amortiguamiento

La matriz de amortiguamiento desacoplada y simplificando para los estados de interés  $(u, w, q, \theta)$  es:

$$D = D_l + D_n(v) \quad (7-46)$$

$$D = - \begin{bmatrix} X_u & X_w & X_q \\ Z_u & Z_w & Z_q \\ M_u & M_w & M_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{|u|u}|u| & X_{|w|w}|w| & X_{|q|q}|q| \\ Z_{|u|u}|u| & Z_{|w|w}|w| & Z_{|q|q}|q| \\ M_{|u|u}|u| & M_{|w|w}|w| & M_{|q|q}|q| \end{bmatrix} \quad (7-47)$$

$$D = - \begin{bmatrix} X_u + X_{|u|u}|u| & X_w + X_{|w|w}|w| & X_q + X_{|q|q}|q| \\ Z_u + Z_{|u|u}|u| & Z_w + Z_{|w|w}|w| & Z_q + Z_{|q|q}|q| \\ M_u + M_{|u|u}|u| & M_w + M_{|w|w}|w| & M_q + M_{|q|q}|q| \end{bmatrix} \quad (7-48)$$

### 7.2.2.6 - Vector generalizado de la fuerza de restablecimiento

El vector generalizado de la fuerza de restablecimiento desacoplada y simplificando para los estados de interés  $(u, w, q, \theta)$  es:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B) \sin(\theta) \\ -(W - B) \cos(\theta) \\ (z_g * W - z_b * B) \sin(\theta) + (x_g * W - x_b * B) \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (7-49)$$

### 7.2.2.7 - Ecuación de movimiento en el plano vertical para el vehículo Guanay II

En la ecuación (7-12), se presentó la ecuación que define el modelo dinámico simplificado de los vehículos sumergibles. En base a las condiciones de una corriente constante y no rotacional en el marco de referencia inercial {n}. En los anteriores apartados se han obtenido cada uno de los términos que componen la ecuación en base a un modelo simplificado, desacoplado. Reemplazando los términos en la ecuación (7-12) se obtiene:

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & -X_{\dot{w}} & m * z_g - X_{\dot{q}} \\ -X_{\dot{w}} & m - Z_{\dot{w}} & -m * x_g - Z_{\dot{q}} \\ m * z_g - X_{\dot{q}} & -m * x_g - Z_{\dot{q}} & I_y - M_{\dot{q}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \\ \dot{q} \end{bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (X_{\dot{u}} - m)u \\ 0 & (Z_{\dot{w}} - X_{\dot{u}})u & m * x_g * u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \\ q \end{bmatrix} \\
 & - \begin{bmatrix} X_u + X_{|u|u}|u| & X_w + X_{|w|w}|w| & X_q + X_{|q|q}|q| \\ Z_u + Z_{|u|u}|u| & Z_w + Z_{|w|w}|w| & Z_q + Z_{|q|q}|q| \\ M_u + M_{|u|u}|u| & M_w + M_{|w|w}|w| & M_q + M_{|q|q}|q| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \\ q \end{bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} (W - B) \sin(\theta) \\ -(W - B) \cos(\theta) \\ (z_g * W - z_b * B) \sin(\theta) + (x_g * W - x_b * B) \cos(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_3 \\ \tau_5 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{7-50}$$

Donde  $\tau_1$  es la fuerza en el plano X (avance),  $\tau_3$  es la fuerza en el plano vertical y  $\tau_5$  es el torque en el plano vertical.

El modelo obtenido y mostrado en la ecuación (7-50), comparte las ecuaciones y el modelo de descomposición básico con los modelos utilizados para el AUV MARES [120] y AUV NPS II [112]. Pero debido a los parámetros de simplificación que se basan en la simetría del vehículo, la ubicación del centro de gravedad, el origen del marco de referencia y el sistema de propulsión hacen del modelo obtenido un modelo específico para el vehículo Guanay II.

### 7.3 - Determinación de los valores de los coeficientes del modelo hidrodinámico en el plano vertical

#### 7.3.1 - Fuerza de flotabilidad ( $B$ ) y peso del vehículo ( $W$ ),

Como se ha explicado anteriormente en el capítulo 2, el vehículo autónomo submarino Guanay II está compuesto por: una estructura externa, un cilindro estanco, espumas de flotación y un punto de anclaje para adherir masa al vehículo para realizar su trimado (ver Figura 6.1). Como se puede observar en la Figura 6.1 hay ciertas zonas vacías que se llenan de agua, cuando el vehículo se sumerge.

González [14] en su trabajo realizó el cálculo de la fuerza de flotabilidad ( $B$ ) y del peso del vehículo ( $W$ ) para navegar en superficie del mar, solo para una densidad del agua teórica de  $1025 \text{ kg/m}^3$ .

En este caso de estudio, es necesario analizar el comportamiento de la relación existente entre fuerza de flotabilidad y el peso del vehículo, en función de la densidad del agua. Inicialmente la fuerza de flotabilidad ( $B$ ) debe ser ajustada, para que el vehículo no se sumerja y mantenga una posición inicial en la superficie. Esto se logra cuando la fuerza de flotabilidad ( $B$ ) es mayor que el peso del vehículo ( $W$ ), es decir, cuando el vehículo tiene una flotabilidad positiva. Si la flotabilidad es muy positiva el vehículo tendrá problemas para sumergirse con el sistema de inmersión por control de la flotabilidad o con el sistema de inmersión por propulsión vectorial. Para ajustar la flotabilidad inicial en el Guanay II, se pueden agregar espumas de flotación o adherir masa.

Como se mostró en la ecuación (7-25) el peso del vehículo ( $W$ ) está definido como:

$$W = m * g \quad (7-25)$$

Donde  $m$  corresponde a la masa del vehículo y  $g$  a la gravedad. González [14] en su trabajo estableció que la masa total del vehículo en el aire corresponde a  $92.6 \text{ kg}$ , este valor incluye la estructura externa, los tres propulsores y el módulo del cilindro estanco con la electrónica.

## Capítulo 7

Por otra parte, González [14] también calculó mediante el software SolidWorks, que el volumen de las espumas de flotación es de 17.01L ( $0.017 \text{ m}^3$ ) y en base a la densidad teórica ( $130 \text{ kg/m}^3$ ) de la espuma utilizada (H130), es posible calcular la masa total de las espumas de flotación que es:  $2.21 \text{ kg}$ .

Finalmente, González [14] estableció que el volumen del agua que lleva las zonas vacías dentro de la estructura vistas en la Figura 6.1 es de:  $0.0716 \text{ m}^3$ . Con base en la densidad del agua de mar teórica ( $1025 \text{ kg/m}^3$ ) se calcula que la masa de agua añadida al vehículo cuando se sumerge es de:  $73.39 \text{ kg}$ . Se establece una masa de  $1.35 \text{ kg}$  correspondiente a cables y conectores que están fuera del cilindro estanco. Al sumar cada una de estas masas parciales, se obtiene la masa total del vehículo:

$$\begin{aligned} m &= \text{masa de la estructura} + \text{masa de la espuma} + \text{masa del agua} \\ &\quad + \text{masa}_{\text{otros}} \\ m &= 92.6 \text{ kg} + (130 \text{ kg/m}^3 * 0.017 \text{ m}^3) + (1025 \text{ kg/m}^3 * 0.0716 \text{ m}^3) \\ &\quad + 1.35 \text{ kg} \\ m &= 92.6 \text{ kg} + 2.21 \text{ kg} + 73.39 \text{ kg} + 1.35 \text{ kg} \\ m &= 169.55 \text{ kg} \end{aligned} \tag{7-51}$$

Considerando la masa total ( $m$ ), se puede calcular el valor del peso total del vehículo:

$$W = mg = 169.55 [\text{kg}] 9.807 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] = 1662.8 \left[ \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2} \right]$$

De acuerdo con la ecuación (7-26), la fuerza de flotabilidad ( $B$ ) está definida como:

$$B = \rho * g * \nabla \tag{7-26}$$

Donde  $\nabla$  es el volumen de agua desalojada por el vehículo,  $g$  a la gravedad y  $\rho$  es la densidad del agua, la densidad promedio del agua de mar en la superficie es de  $1025 \text{ kg/m}^3$  (densidad de agua pura  $1000 \text{ kg/m}^3$ ). González [14] estableció por medio del software CAD NX que el volumen teórico total de la estructura del vehículo es  $0.07561 \text{ m}^3$ . Se considero un volumen generado por otros componentes como cables y conectores de  $0.0052 \text{ m}^3$ . El volumen total del vehículo es:

Propuesta del modelo hidrodinámico del Guanay II en el plano vertical

$$\begin{aligned} \nabla &= \text{volumen de la estructura de vehiculo} + \text{vol. espuma} + \text{vol. agua} \\ &+ \text{vol. otros} \\ \nabla &= 0.075615995m^3 + 0.017m^3 + 0.0716m^3 + 0.0052 m^3 \\ \nabla &= 0.1694m^3 \end{aligned} \tag{7-52}$$

Entonces la fuerza de flotabilidad es de:

$$B = 1025 [kg/m^3]9.807 \left[ \frac{m}{s^2} \right] 0.1694 [m^3] = 1703 \left[ \frac{kg m}{s^2} \right]$$

Bajo estas condiciones la relación peso versus fuerza de flotabilidad ( $B[1703] > W[1662.8]$ ) genera una flotabilidad positiva. Por lo tanto, el vehículo mantendrá un estado inicial de flotación en la superficie. La diferencia entre la fuerza de flotabilidad y el peso, equivale a  $4.1 kg ((1703 - 1662)/9.807)$ . Esta diferencia permite la instalación de nuevos sensores y otros dispositivos. En la Figura 7.2, se muestra la relación entre la fuerza de flotabilidad y el peso, para diferentes densidades.

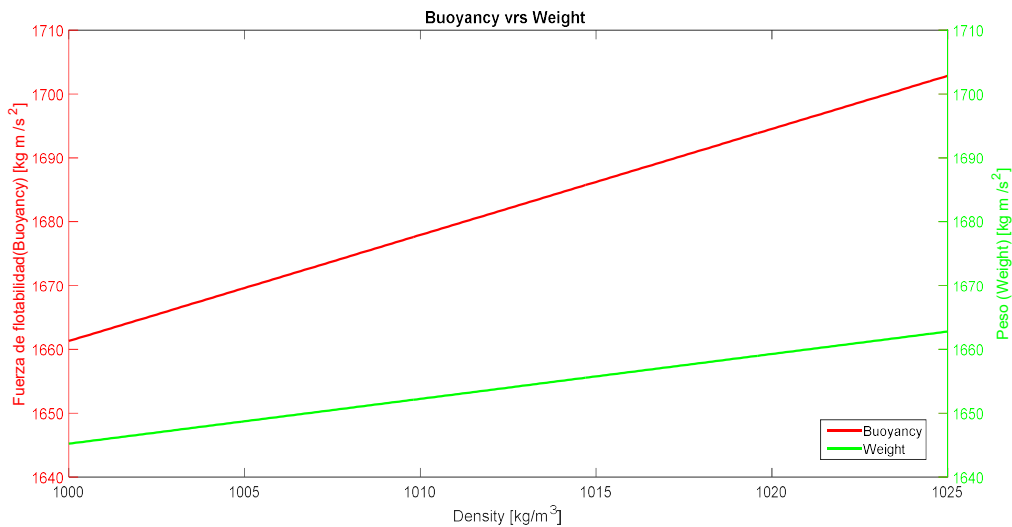


Figura 7.2. Relación entre la fuerza de flotabilidad y el peso; con respecto a la densidad de líquido

En la Figura 7.2 se observa que si el líquido donde se sumerge el vehículo es agua pura; con una densidad de  $1000 kg/m^3$ , se obtiene un cambio en la fuerza de flotabilidad. En este caso la diferencia entre peso y fuerza de flotabilidad equivale a:  $1.63 kg ((1661 - 1645)/9.807)$ . Esto indica una disminución en la carga útil que corresponde a sensores, y otros dispositivos.

### 7.3.2 - Calculo de los valores del vector de fuerza

El vehículo Guanay II dispone de 3 propulsores, que brindan propulsión vectorial en el plano  $XZ$ , mediante el sistema desarrollado y mostrado en el capítulo 6. Para caracterizar el efecto del sistema de propulsión vectorial, sobre la dinámica del vehículo se define el vector de fuerzas.

Siguiendo la propuesta de [115] se puede definir un vector de fuerzas para cada uno de los motores como (ecuación (7-11)):

$$\tau = Bu_p = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix}$$

Donde  $B$  es la matriz de control de propulsión y depende de la arquitectura del sistema de propulsión es decir del tipo, posición y orientación de los propulsores (Ver Figura 7.3).  $u_p$  corresponde al vector de propulsiones; con componentes en las dimensiones en las cuales se ejecuta la fuerza.

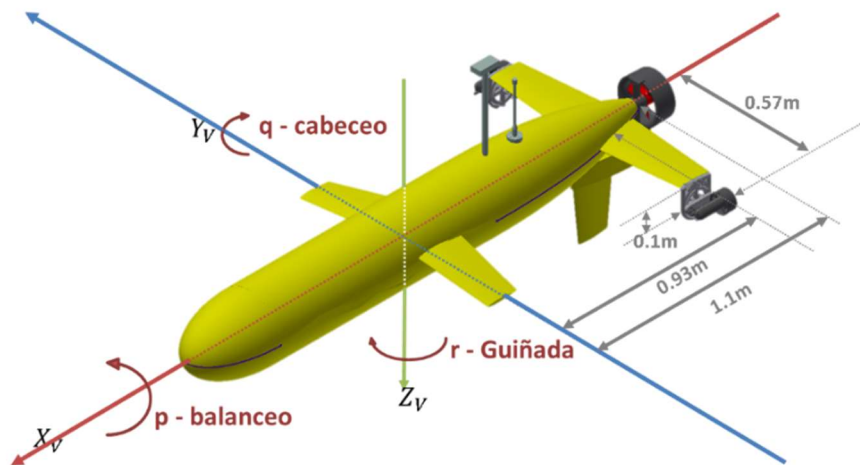


Figura 7.3. Ubicación de los propulsores del vehículo Guanay II

La matriz de control de propulsión es según [121]:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & P_{actz} & P_{acty} \\ P_{actz} & 0 & -P_{actx} \\ -P_{acty} & -P_{actx} & 0 \end{bmatrix} \quad (7-53)$$

- $P_{actx}$  ubicación del propulsor sobre el eje  $X$  en [m], con respecto al centro de gravedad del vehículo.
- $P_{acty}$  ubicación del propulsor sobre el eje  $Y$  en [m], con respecto al centro de gravedad del vehículo.
- $P_{actz}$  ubicación del propulsor sobre el eje  $Z$  en [m], con respecto al centro de gravedad del vehículo.

El otro término de la ecuación (7-11) es el vector de propulsión. El vector de propulsiones  $u_p$ , en las tres dimensiones, se define según [121] como:

$$u_p = \begin{bmatrix} u_{actX} \\ u_{actY} \\ u_{actZ} \end{bmatrix} \quad (7-54)$$

- $u_{actX}$ : fuerza propulsión sobre el eje  $X$  en [N]
- $u_{actY}$ : fuerza propulsión sobre el eje  $Y$  en [N]
- $u_{actZ}$ : fuerza propulsión sobre el eje  $Z$  en [N]

Por tanto, el vector de fuerzas total ( $\tau_{total}$ ) correspondiente a la propulsión generada por los 3 propulsores es:

$$\tau_{total} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = \tau_{main} + \tau_L + \tau_R = (B_{main}u_{main}) + (B_Lu_L) + (B_Ru_R) \quad (7-55)$$

Para el motor principal, que no está dotado de ningún movimiento la matriz de control de propulsión y el vector de propulsión son:

$$B_{main} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & P_{actz} & P_{acty} \\ P_{actz} & 0 & -P_{actx} \\ -P_{acty} & -P_{actx} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.1 \\ 0 & 1.1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$u_{main} = \begin{bmatrix} u_{actmain} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Para los propulsores laterales las matrices de control de propulsión son:

- La matriz de control de propulsión para el propulsor lateral izquierdo es:

$$B_L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & P_{actz} & P_{acty} \\ P_{actz} & 0 & -P_{actx} \\ -P_{acty} & -P_{actx} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.1 & -0.57 \\ 0.1 & 0 & 0.93 \\ 0.57 & 0.93 & 0 \end{bmatrix}$$

- La matriz de control de propulsión para el propulsor lateral derecho es:

$$B_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & P_{actz} & P_{acty} \\ P_{actz} & 0 & -P_{actx} \\ -P_{acty} & -P_{actx} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.1 & 0.57 \\ 0.1 & 0 & 0.93 \\ -0.57 & 0.93 & 0 \end{bmatrix}$$

Los propulsores laterales, como están dotados de movimiento, las fuerzas que realizan se deben de descomponer sobre los ejes X y Z. En la Figura 7.4 se representa esta descomposición.

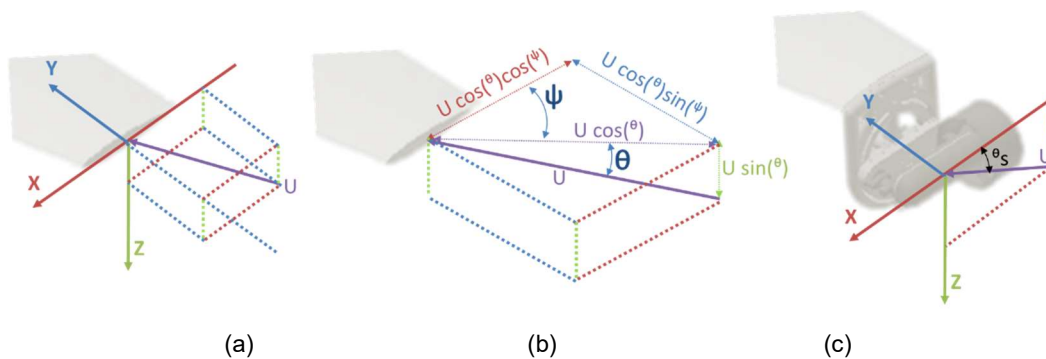


Figura 7.4. Vector de propulsión (a) Generalizado en 3D, (b) Descomposición vectorial del vector de propulsión, (c) Vector de propulsión de los motores laterales del vehículo Guanay-II



El vector  $U$  (Figura 7.4a) representa al vector general de fuerza de propulsión generado por un propulsor en 3 dimensiones. En la Figura 7.4b se presenta la descomposición del vector  $U$ , donde  $\theta$  corresponde al ángulo existente entre vector  $U$  y el plano  $XY$ .  $\psi$  corresponde al ángulo existente entre la proyección del vector  $U$  y eje  $X$ . En general el vector de propulsiones  $U$ , en las tres dimensiones, se puede escribir como:

$$U = \begin{bmatrix} u_{actX} \\ u_{actY} \\ u_{actZ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{act} \cos(\theta) \cos(\psi) \\ u_{act} \cos(\theta) \sin(\psi) \\ u_{act} \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (7-56)$$

En el caso del vehículo Guanay II, considerando el sistema mostrado en el capítulo 6. Se establece que los propulsores laterales, solo generan fuerza de propulsión sobre el plano  $XZ$ , y el vector de propulsión es orientado según el ángulo del actuador (servomotor)  $\theta_s$ . Con esta consideración, se establece que el ángulo  $\psi$  es cero y que el ángulo  $\theta$  es igual al ángulo del actuador  $\theta_s$ . Sustituyendo en la ecuación (7-56) se obtiene:

$$u_{pLateral} = \begin{bmatrix} u_{actX} \\ u_{actY} \\ u_{actZ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{act} \cos(\theta_s) \\ 0 \\ u_{act} \sin(\theta_s) \end{bmatrix} \quad (7-57)$$

A partir de las ecuaciones (7-11) (7-53) (7-55) y (7-57), se obtiene el vector de fuerza de propulsión para cada uno de los propulsores, que corresponden a:

- Vector de fuerzas  $\tau_{main}$  del propulsor principal es:

$$\tau_{main} = B_{main} u_{main} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.1 \\ 0 & 1.1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} u_{actmain} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{actmain} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

- Vector de fuerzas  $\tau_L$  del propulsor lateral izquierdo:

$$\tau_L = B_L u_L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.1 & -0.57 \\ 0.1 & 0 & 0.93 \\ 0.57 & 0.93 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{actL} \cos(\theta_s) \\ 0 \\ u_{actL} \sin(\theta_s) \end{bmatrix}$$

$$\tau_L = \begin{bmatrix} u_{actL} \cos(\theta_s) \\ 0 \\ u_{actL} \sin(\theta_s) \\ -0.57(u_{actL} \sin(\theta_s)) \\ 0.1(u_{actL} \cos(\theta_s)) + 0.93(u_{actL} \sin(\theta_s)) \\ 0.57(u_{actL} \cos(\theta_s)) \end{bmatrix}$$

- Vector de fuerzas  $\tau_R$  del propulsor lateral derecho:

$$\tau_R = B_R u_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.1 & 0.57 \\ 0.1 & 0 & 0.93 \\ -0.57 & 0.93 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{actR} \cos(\theta_s) \\ 0 \\ u_{actR} \sin(\theta_s) \end{bmatrix}$$

$$\tau_R = \begin{bmatrix} u_{actR} \cos(\theta_s) \\ 0 \\ u_{actR} \sin(\theta_s) \\ 0.57(u_{actR} \sin(\theta_s)) \\ 0.1(u_{actR} \cos(\theta_s)) + 0.93(u_{actR} \sin(\theta_s)) \\ -0.57(u_{actR} \cos(\theta_s)) \end{bmatrix}$$

Remplazando, en el vector de fuerzas  $\tau_{total}$  (7-55) se obtiene:

$$\begin{aligned} \tau_{total} &= \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{actmain} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{actL} \cos(\theta_s) \\ 0 \\ u_{actL} \sin(\theta_s) \\ -0.57(u_{actL} \sin(\theta_s)) \\ 0.1(u_{actL} \cos(\theta_s)) + 0.93(u_{actL} \sin(\theta_s)) \\ 0.57(u_{actL} \cos(\theta_s)) \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} u_{actR} \cos(\theta_s) \\ 0 \\ u_{actR} \sin(\theta_s) \\ 0.57(u_{actR} \sin(\theta_s)) \\ 0.1(u_{actR} \cos(\theta_s)) + 0.93(u_{actR} \sin(\theta_s)) \\ -0.57(u_{actR} \cos(\theta_s)) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} u_{actmain} + u_{actL} \cos(\theta_s) + u_{actR} \cos(\theta_s) \\ 0 \\ u_{actL} \sin(\theta_s) + u_{actR} \sin(\theta_s) \\ -0.57(u_{actL} \sin(\theta_s)) + 0.57(u_{actR} \sin(\theta_s)) \\ 0.1(u_{actL} \cos(\theta_s)) + 0.93(u_{actL} \sin(\theta_s)) + 0.1(u_{actR} \cos(\theta_s)) + 0.93(u_{actR} \sin(\theta_s)) \\ 0.57(u_{actL} \cos(\theta_s)) - 0.57(u_{actR} \cos(\theta_s)) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Simplificando el vector de fuerzas  $\tau_{total}$ , respecto a los 3 estados de interés ( $u, w, q$ ) se obtiene:

$$\tau_{total} = \tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_3 \\ \tau_5 \end{bmatrix}$$

$$\tau = \begin{bmatrix} u_{actmain} + u_{actR} \cos(\theta_s) + u_{actL} \cos(\theta_s) \\ u_{actR} \sin(\theta_s) + u_{actL} \sin(\theta_s) \\ 0.1(u_{actL} \cos(\theta_s)) + 0.93(u_{actL} \sin(\theta_s)) + 0.1(u_{actR} \cos(\theta_s)) + 0.93(u_{actR} \sin(\theta_s)) \end{bmatrix}$$

Donde la fuerza  $u_{act}$  está compuesta por [14]:

$$u_{act} = c_{act} * \lambda_{act} * |\lambda_{act}| \quad (7-58)$$

- $c_{act}$ : corresponde a una constante de proporcionalidad que depende de cada propulsor en función de la máxima fuerza de cada propulsor, [14] estableció los siguientes valores para este coeficiente para cada uno de los 3 propulsores:
  - $c_{act}$  propulsor principal = 0.0127
  - $c_{act}$  propulsor izquierdo = 0.0027
  - $c_{act}$  propulsor derecho = 0.0029
- $\lambda_{act}$ : corresponde a la velocidad angular normalizada (porcentual) para cada uno de los propulsores:

$$-100\% < \lambda_{act} < 100\%$$

Para cada uno de los 3 casos de  $u_{act}$  se obtiene:

$$u_{actmain} = 0.0127 * \lambda_{main} * |\lambda_{main}|; -100\% < \lambda_{main} < 100\%$$

$$u_{actL} = 0.0027 * \lambda_L * |\lambda_L|; -100\% < \lambda_L < 100\%$$

$$u_{actR} = 0.0029 * \lambda_R * |\lambda_R|; -100\% < \lambda_R < 100\%$$

### 7.3.3 - Estimación de los coeficientes de la ecuación cinemática de cuerpo rígido

En este apartado se realiza una estimación de los valores de los coeficientes que conforman la ecuación de cinemática de cuerpo rígido (7-50). De acuerdo con Prestero

[119] (pag 18, 26 y 29) existe una relación entre los coeficientes del modelo hidrodinámico en el plano horizontal y los del modelo hidrodinámico en el plano vertical, para un vehículo diseñado con los perfiles de Myring, debido a la simetría del vehículo. Estas relaciones se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 7-3. Relación entre los coeficientes del modelo hidrodinámico del plano horizontal y del plano vertical.

Coeficientes del modelo hidrodinámico en el plano horizontal	=	Coeficientes del modelo hidrodinámico en el plano vertical
$I_z$	=	$I_y$
$Y_{\dot{v}}$	=	$Z_{\dot{w}}$
$Y_{\dot{r}} = N_{\dot{v}}$	=	$-M_{\dot{w}}$
		$M_{\dot{w}} = Z_{\dot{q}}$
$N_{\dot{r}}$	=	$M_{\dot{q}}$
$Y_v$	=	$Z_w$
$Y_r = N_v$	=	$-M_w$
		$M_w = Z_q$
$N_r$	=	$M_q$
$Y_{ v v}$	=	$Z_{ w w}$
$N_{ v v}$	=	$-M_{ w w}$
$Y_{ r r}$	=	$-Z_{ q q}$
$N_{ r r}$	=	$M_{ q q}$

En la Tabla 7-4, columna 2 se presentan los coeficientes determinados por Gonzalez [14]. Estos coeficientes fueron calculados teóricamente y posteriormente fueron corregidos en base a los datos obtenidos en las pruebas de campo realizadas.

En el caso de la estimación de los coeficientes para el plano horizontal Gonzalez [14], las cuatro superficies de estabilización ubicadas sobre el plano horizontal no son contempladas. Debido a que por su forma y ubicación no influyen en el desplazamiento del vehículo sobre el plano horizontal. Estas superficies de estabilización fueron diseñadas y ubicadas dentro del vehículo para estabilizar el movimiento de cabeceo (pitch); cuando el vehículo navega horizontalmente.

En este estudio es necesario contemplar estas superficies de control, debido a que el sistema de propulsión vectorial (capítulo 6), genera un cambio en la inclinación o cabeceo del vehículo y estas superficies generan una fuerza de fricción y una oposición al movimiento sobre el plano vertical. Debido a esto, se realiza el ajuste de los coeficientes (Tabla 7-4, columna 2), con el propósito de añadir en el cálculo teórico las cuatro superficies de control.

Teóricamente se relaciona el cálculo de los coeficientes de la Tabla 7-3, con las siguientes ecuaciones (7-59) (7-60):

$$\begin{aligned}
 Y_{|v|v} = Z_{|w|w} &= -\left(\frac{1}{2}\rho c_{dc} \int 2 R(x) dx\right) - \left(\frac{1}{2}\rho c_{df}\right) \\
 M_{|w|w} = -N_{|v|v} &= -\left(\left(\frac{1}{2}\rho c_{dc} \int 2 x R(x) dx\right) + \left(\frac{1}{2}\rho X_{fin} c_{df}\right)\right) \\
 Y_{|r|r} = -Z_{|q|q} &= -\left(\frac{1}{2}\rho c_{dc} \int 2 x |x| R(x) dx\right) - \left(\frac{1}{2}\rho X_{fin} |X_{fin}| c_{df}\right) \\
 N_{|r|r} = M_{|q|q} &= -\left(\frac{1}{2}\rho c_{dc} \int 2 x^3 R(x) dx\right) - \left(\frac{1}{2}\rho X_{fin}^3 c_{df}\right)
 \end{aligned} \tag{7-59}$$

Estas ecuaciones corresponden a los coeficientes de la matriz de amortiguamiento no lineal  $D_n(v)$  (7-32) (7-48) (7-50). La primera parte (integral) de la ecuación, relaciona el radio del vehículo en función de la posición axial, y la segunda parte corresponde a las superficies de control (estabilización) utilizadas por el AUV en el plano de estudio. Donde  $X_{fin}$  corresponde a la ubicación de la superficie de control respecto al eje "X" y al centro de flotabilidad,  $\rho$  es la densidad del agua,  $S_{fin}$  es el área de la superficie de control y  $c_{df}$  es el coeficiente de arrastre de flujo transversal relacionado con la forma de la superficie de control, que para el caso del AUV Guanay II tiene un valor de 0.56.

Los coeficientes de la matriz de masa hidrodinámica  $M_A$  (7-18) (7-35) y de la matriz Coriolis y Centrípeta relacionada con hidrodinámica  $C_A(v)$  (7-19) (7-45) (7-50), se calculan teóricamente a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 Y_{\dot{v}} = Z_{\dot{w}} &= -\int m_a(x) dx \\
 Y_{\dot{r}} = -M_{\dot{w}} &= -\int x m_a(x) dx \\
 N_{\dot{r}} = M_{\dot{q}} &= -\int x^2 m_a(x) dx
 \end{aligned} \tag{7-60}$$

Donde  $m_a(x)$  representa la masa añadida por el cuerpo cilíndrico y por las superficies de estabilización.

Los otros coeficientes, que no se han contemplado en las ecuaciones (7-59) (7-60), son coeficientes que González [14] estimo; a partir de los resultados obtenidos en las pruebas de campo. En este caso, estos coeficientes se han ajustados

Capítulo 7

proporcionalmente, respecto a la variación de los coeficientes recalculado en las ecuaciones (7-59) (7-60). Los valores obtenidos se muestran en la columna 3 de la Tabla 7-4.

Tabla 7-4. Coeficientes para el modelo en plano vertical del AUV Guanay II.

Coeficiente	Valor	Valor recalculado	Unidad
$\theta_s$		+/-25	$^{\circ}$
$m$	169.5	169.5	$kg$
$W$		1662.8	$kg\ m/s^2$
$B$		1703	$kg\ m/s^2$
$x_g$	0	0	$m$
$y_g$	0	0	$m$
$z_g$	0.01	0.01	$m$
$x_b$	-1.21	-1.21	$m$
$y_b$	0	0	$m$
$z_b$	0	0	$m$
$I_y$	52.7	52.7	$kg\ m^2$
$I_z$	52.7	52.7	$kg\ m^2$
$X_{\dot{u}}$	-452.6809	-452.6809	$kg$
$X_{\dot{w}}$	0	0	
$X_{\dot{q}}$	0	0	
$Z_{\dot{w}}$	-415.9546	-489.3663	$kg$
$Z_{\dot{q}}$	518.5884	505.5003	$kg\ m$
$M_{\dot{q}}$	-231.9244	-215.1168	$kg\ m^2/rad$
$X_u$	-0.2992	-0.2992	$kg/s$
$X_w$	0	0	
$X_q$	0	0	
$Z_u$	0	0	
$Z_w$	-45.3418	-52.9426	$kg/s$
$Z_q$	-105.3055	-102.3500	$kg\ m/rad\ s$
$M_u$	0	0	
$M_w$	-105.3055	-108.3984	$kg\ m/s$
$M_q$	-56.9228	-52.7976	$kg\ m^2/rad\ s$
$X_{ u u}$	-152.6010	-152.6010	$kg/m$
$X_{ w w}$	0	0	
$X_{ q q}$	0	0	
$Z_{ u u}$	0	0	
$Z_{ w w}$	-399.4271	-469.9271	$kg/m$
$Z_{ q q}$	899.5579	876.8549	$kg\ m/rad^2$
$M_{ u u}$	0	0	
$M_{ w w}$	899.5579	902.1679	$kg$
$M_{ q q}$	-284.1011	-263.5122	$kg\ m^2/rad^2$

## 7.4 - Simulación del modelo hidrodinámico del Guanay II en el plano vertical

Utilizando los coeficientes de la columna 3 de la Tabla 7-4, se han realizado una serie de simulaciones, para verificar el comportamiento teórico del vehículo sobre el plano vertical. Posteriormente, se compararán los resultados obtenidos en simulación con los resultados obtenidos en pruebas experimentales, con el objetivo de validar el modelo hidrodinámico propuesto.

En todas las simulaciones se considera un punto de inicio desde un estado de reposo, con el vehículo ubicado en la posición  $x = 0 \text{ m}$ ,  $z = -0.15 \text{ m}$  y  $\theta_s = 0^\circ$ . También, se considera que en el momento de inicio de la prueba la propulsión toma los siguientes valores (ecuación (7-58)):

$$\lambda_{main} = 30\%$$

$$\lambda_R = \lambda_L = 100\%$$

### 7.4.1 - Simulación # 1: Trayectoria sobre el plano vertical (Flotabilidad muy positiva)

En la primera simulación, se configura en el vehículo una flotabilidad positiva ( $B \gg W$ ), y los propulsores se mantienen alineados con el eje  $X$  ( $\theta_s = 0$ )(ver Tabla 7-5). El resultado de esta simulación se muestra en la Figura 7.5.

Tabla 7-5. Parámetros de configuración de la simulación 1, navegación sobre plano vertical del AUV Guanay II.

Tiempo [s]	Parámetro	Valor
80	Angulo del actuador (servomotores $\theta_s$ )	$0^\circ$
	B	1703
	W	1663
	Flotabilidad( $B > W$ )	++++

Como se observar en la Figura 7.5, el vehículo inicia su recorrido a una profundidad de  $0.15 \text{ m}$ , y en aproximadamente  $5 \text{ s}$ , alcanza la superficie ( $z = 0 \text{ m}$ ). Y se mantiene en la superficie durante el tiempo ejecución de la simulación. Este comportamiento, de que el vehículo suba a la superficie y se mantenga en ella se debe exclusivamente a la flotabilidad positiva configurada en el vehículo.

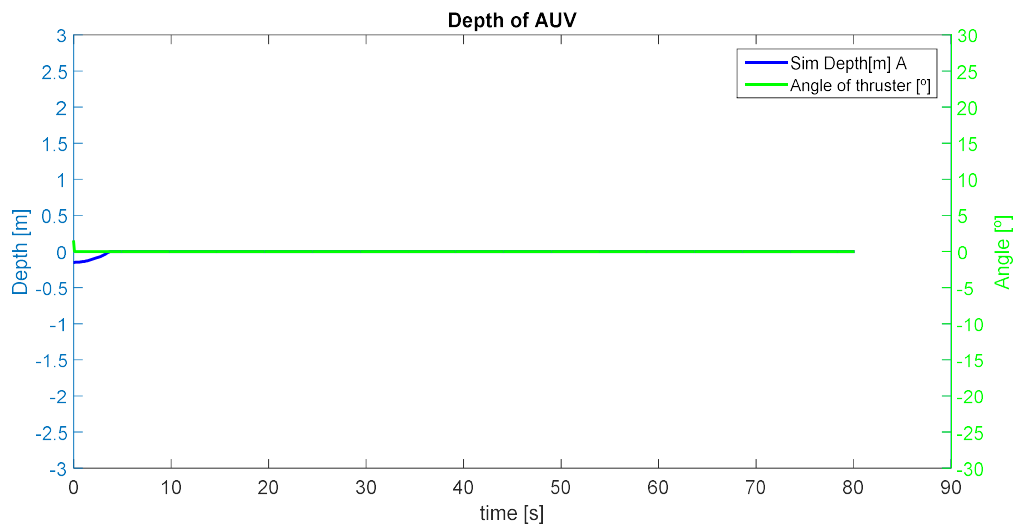


Figura 7.5. Simulación 1. Trayectoria sobre el plano vertical (Flotabilidad muy positiva).

### 7.4.2 - Simulación # 2: Trayectoria sobre el plano vertical. (Flotabilidad muy positiva, diferentes orientaciones de los propulsores laterales)

En la segunda simulación se mantiene el mismo porcentaje de flotabilidad positiva, y de propulsión. Esta simulación está dividida en 5 etapas según las posiciones de los propulsores laterales dadas en la Tabla 7-6 (ver Figura 7.6). La primera etapa se inicia desde un estado de reposo, con el actuador (servomotor  $\theta_s$ ) en un ángulo de  $0^\circ$ , se activa la propulsión en los porcentajes anteriormente mencionados, durante un periodo de 20s. En la segunda etapa se cambia el ángulo del servomotor pasando de  $0^\circ$  a  $-25^\circ$ , durante 20s. En la tercera etapa se cambia el ángulo del servomotor pasando de  $-25^\circ$  a  $0^\circ$ , durante 20s. En la cuarta etapa se cambia el ángulo del servomotor pasando de  $0^\circ$  a  $25^\circ$ , durante 20s. Finalmente, en la quinta etapa se cambia el ángulo del servomotor nuevamente a  $0^\circ$ .

Tabla 7-6. Parámetros de configuración de la simulación 2, navegación sobre plano vertical del AUV Guanay II.

Etapa	Tiempo [s]	Parámetro	Valor
1	20	B	1703
		W	1692
		Flotabilidad(B>W)	++++
		Angulo del actuador (servomotores $\theta_s$ )	$0^\circ$
2	20	Angulo del actuador (servomotores $\theta_s$ )	$-25^\circ$
3	20	Angulo del actuador (servomotores $\theta_s$ )	$0^\circ$
4	20	Angulo del actuador (servomotores $\theta_s$ )	$25^\circ$
5	20	Angulo del actuador (servomotores $\theta_s$ )	$0^\circ$



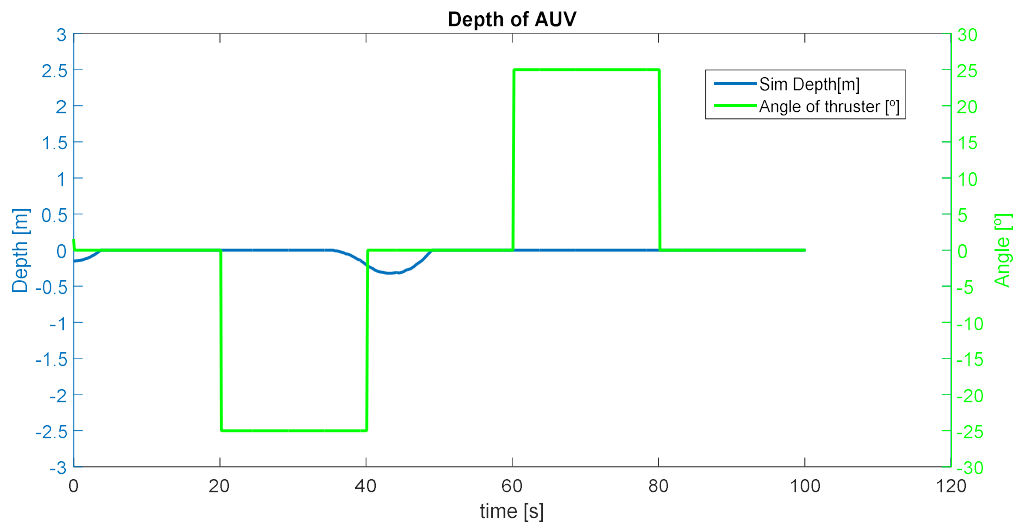


Figura 7.6. Simulación 2. Trayectoria sobre el plano vertical. (Flotabilidad muy positiva, diferentes orientaciones de los propulsores laterales)

Analizando el resultado anterior podemos ver que, con el nivel de flotabilidad positiva configurado, el vehículo no responde inmediatamente al cambio del ángulo del servomotor (0° a -25°), se observa que tiene un retraso entre el momento en el que se ejecuta la orden y en el momento en el que el vehículo se sumerge. Posteriormente, cuando se reconfigura la posición del ángulo del servomotor a 0°, el vehículo continúa sumergiéndose por un pequeño espacio de tiempo y finalmente emerge lentamente hasta la superficie, esto debido a la relación existente entre la flotabilidad y el peso.

### 7.4.3 - Simulación # 3: Trayectoria sobre el plano vertical. (Diferentes flotabilidades, diferentes orientaciones de los propulsores laterales)

En las siguientes simulaciones (Figura 7.7) se mantiene la configuración en la propulsión y la misma configuración de 5 etapas anteriormente utilizada. En este caso se modifica el porcentaje de flotabilidad, utilizando 6 casos distintos. De acuerdo a lo indicado en la Tabla 7-7.

Tabla 7-7. Parámetros de configuración de la simulación 3, navegación sobre plano vertical del AUV Guanay II.

Simulación	Parámetro	Valor	B	W
<b>Original</b>	Flotabilidad	++++	1703	1692
<b>A</b>	Flotabilidad	+++	1703	1697
<b>B</b>	Flotabilidad	++	1703	1699
<b>C</b>	Flotabilidad	+	1703	1702
<b>D</b>	Flotabilidad	-	1703	1716
<b>E</b>	Flotabilidad	--	1703	1719

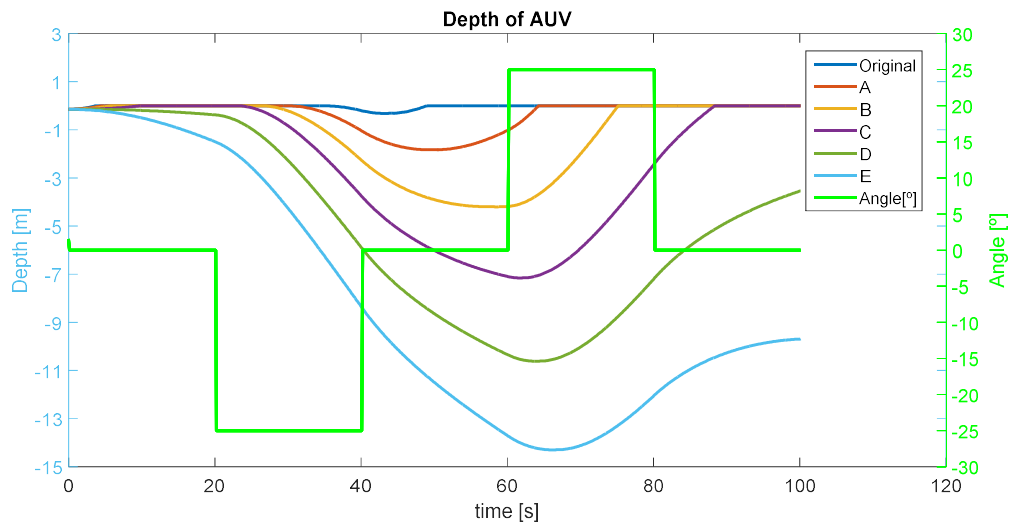


Figura 7.7. Simulación 3. Trayectoria sobre el plano vertical. (Diferentes flotabilidades, diferentes orientaciones de los propulsores laterales)

Al comparar las diferentes simulaciones que componen la Figura 7.7, podemos apreciar que a medida que se disminuye la flotabilidad el vehículo puede alcanzar una mayor profundidad. En los casos donde la flotabilidad es negativa, se constata que en la primera etapa el vehículo comienza a sumergirse antes de que el ángulo del servomotor cambie. Cuando se realiza el reposicionamiento de los propulsores en la segunda etapa, se observa que la pendiente de la trayectoria de inmersión descrita por el vehículo, tiende a una mayor inclinación cuando la flotabilidad es más pequeña.

En la tercera etapa, cuando el servomotor posiciona al propulsor en  $0^\circ$ , la inclinación de la trayectoria disminuye, en los casos donde la flotabilidad es muy positiva el vehículo sube, en los otros casos de flotabilidad positiva, el vehículo se establece ligeramente sobre un nivel de profundidad y en los casos de flotabilidad negativa el vehículo sigue sumergiéndose. Durante la cuarta etapa, el vehículo en todos los casos emerge, aunque en los casos de flotabilidad negativa el proceso es lento.

En la etapa final, el vehículo sigue emergiendo, en los casos de flotabilidad positiva el vehículo llega a la superficie. Pero en los casos de flotabilidad negativa, como podemos ver en la Figura 7.8, el vehículo inicialmente emerge y posteriormente se sumerge. Dado esto se concluye que la configuración más adecuada, es con una flotabilidad ligeramente positiva (caso C).

## Propuesta del modelo hidrodinámico del Guanay II en el plano vertical

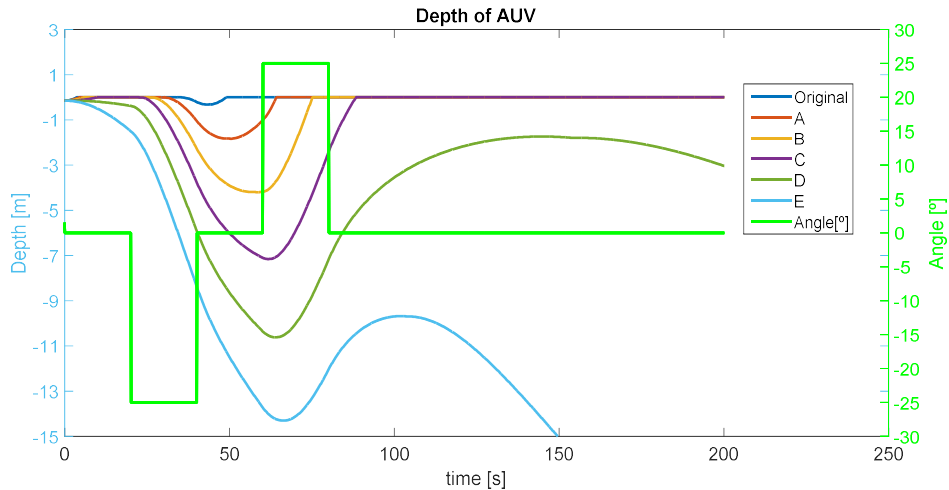


Figura 7.8. Simulación 3. Trayectoria sobre el plano vertical. (Diferentes flotabilidades, diferentes orientaciones de los propulsores laterales)

### 7.4.4 - Simulación # 4: Trayectoria sobre el plano vertical. (Diferentes flotabilidades, diferentes orientaciones de los propulsores laterales)

En las siguientes simulaciones, se analiza el comportamiento del vehículo para diferentes ángulos de posicionamiento de los propulsores laterales. La Figura 7.9 corresponde a la simulación utilizando un ángulo de  $15^\circ$ , en la Figura 7.10 se configura un ángulo de  $5^\circ$  y finalmente, en la Figura 7.11 se utiliza un ángulo de  $0^\circ$ .

En la Figura 7.9 se observa que para los dos primeros casos de flotabilidad positiva la respuesta del sistema es nula. Esto quiere decir que con esta configuración el sistema no alcanza la suficiente fuerza para entrar en inmersión.

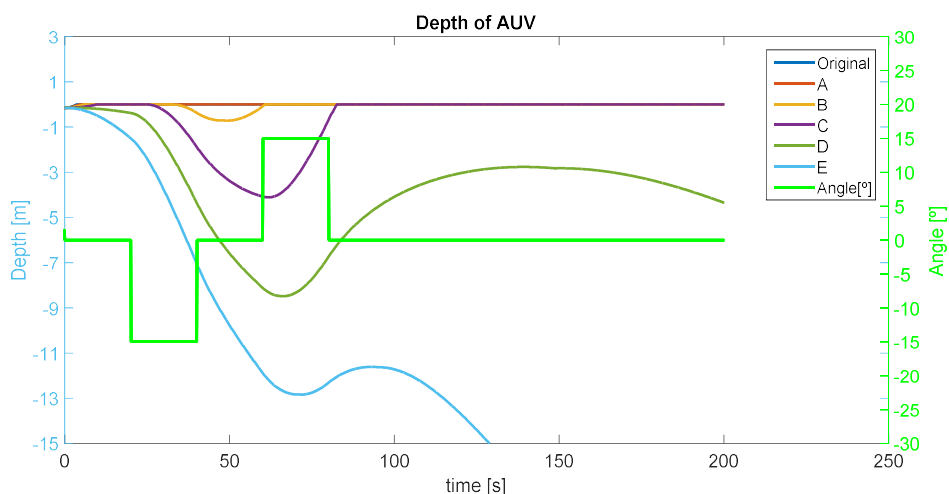


Figura 7.9. Simulación: Trayectoria sobre el plano vertical. (Diferentes flotabilidades, orientaciones de los propulsores laterales +/-  $15^\circ$ )

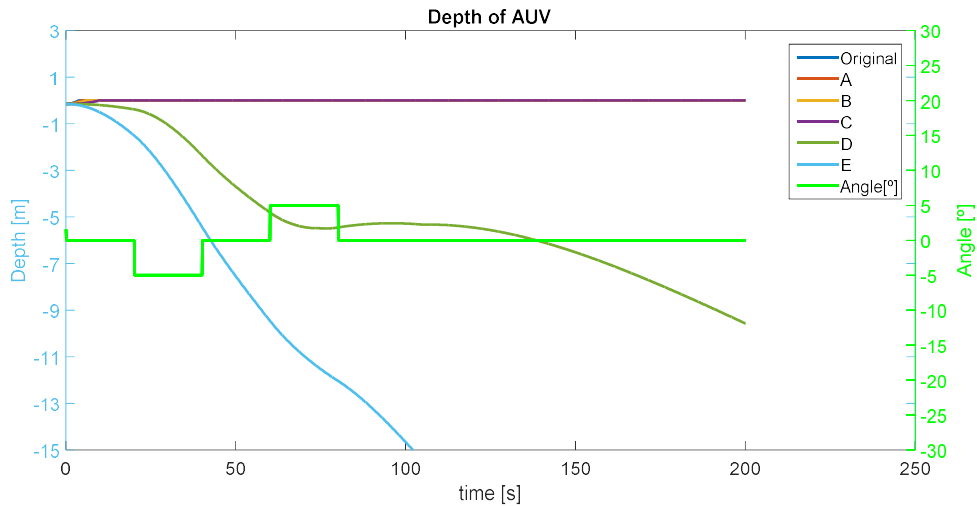


Figura 7.10. Simulación: Trayectoria sobre el plano vertical. (Diferentes flotabilidades, orientaciones de los propulsores laterales +/- 5°)

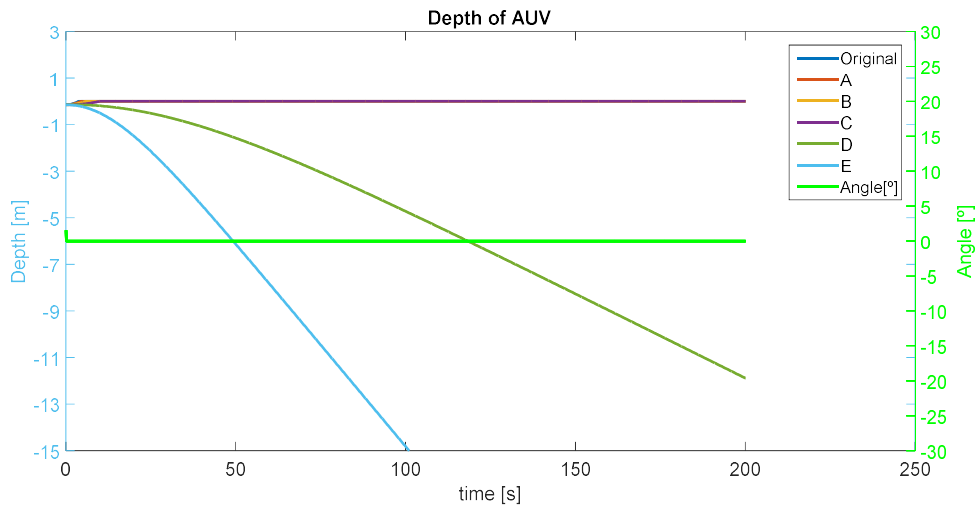


Figura 7.11. Simulación: Trayectoria sobre el plano vertical. (Diferentes flotabilidades, orientaciones de los propulsores laterales +/- 0°)

Comparando estas simulaciones con la anterior (Figura 7.8), podemos verificar el funcionamiento del sistema y establecer, que cuanto menor sea el ángulo utilizado menos profundidad alcanzará el vehículo y que para algunos casos de flotabilidad positiva el vehículo no se sumergirá. También es posible establecer que el uso de flotabilidades pequeñas puede permitir alcanzar mayores profundidades con ángulos pequeños. Como resultado general de estas simulaciones, se concluye que el uso de una flotabilidad ligeramente positiva optimizara el proceso de inmersión, permitiendo que el vehículo responda a pequeños cambios de ángulo del actuador (servomotor) y que el vehículo se mantenga en la superficie con un ángulo del actuador de 0°.

## 7.5 - Comparación entre los resultados obtenidos en pruebas de campo y simulación

En el capítulo 6 (Sistema de inmersión para el vehículo Guanay II – apartado 6.3.5 Pruebas de campo) se presentaron diferentes pruebas experimentales realizadas en el canal de Castelldefels que permitieron verificar el funcionamiento del sistema de propulsión vectorial. En este apartado se realizarán simulaciones, con los mismos parámetros de operación de las pruebas experimentales con el objetivo de validar el modelo hidrodinámico sobre el plano vertical propuesto en este capítulo. Se realiza la comparación y el análisis entre los resultados obtenidos en las pruebas: test 1 caso 1, test 2 caso 2, 3 y 4, del apartado 6.3.5 y las simulaciones utilizando los coeficientes expuestos en el apartado 7.3.3 (Tabla 7-4).

En la Figura 7.12 se realiza la comparación entre los resultados obtenidos en campo para el test 1 caso 1 y la simulación ajustada a los parámetros generales de este test, En la Figura 7.13 y Figura 7.14 se puede observar la comparación entre el test 2 caso 2 y 3 y sus respectivas simulaciones. En general la diferencia entre cada una de las simulaciones (test) corresponde al porcentaje de flotabilidad.

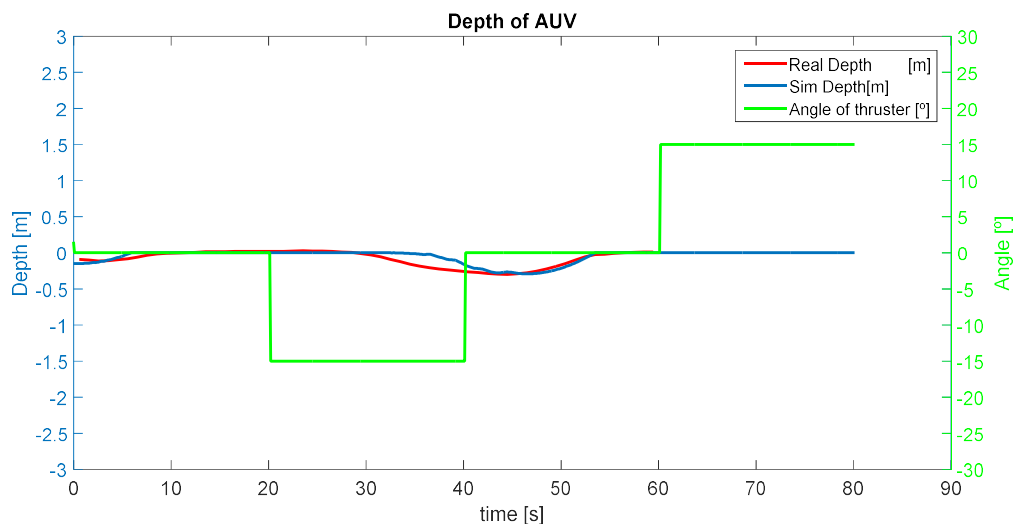


Figura 7.12. Comparación entre datos obtenidos en pruebas de campo y simulaciones para el test 1 caso 1

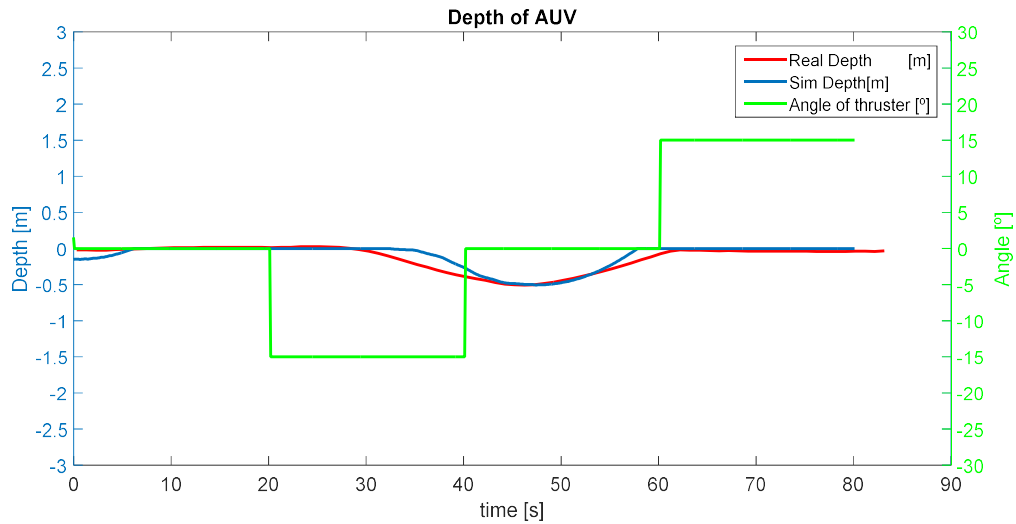


Figura 7.13. Comparación entre datos obtenidos en pruebas de campo y simulaciones para el test 2 caso 2

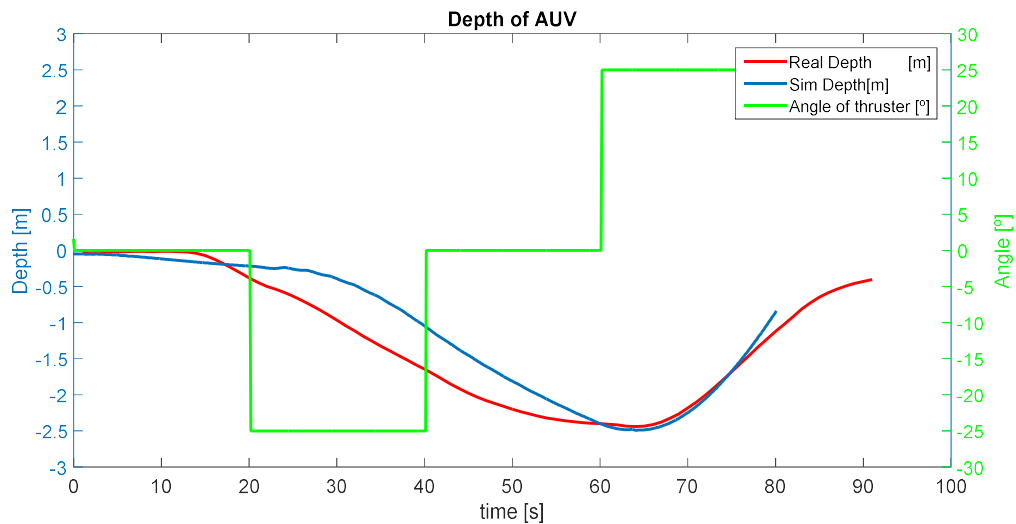


Figura 7.14. Comparación entre datos obtenidos en pruebas de campo y simulaciones para el test 2 caso 3

Al analizar los resultados expuestos en las figuras anteriores, podemos ver una similitud en el comportamiento general, es decir el AUV se sumerge y emerge tanto en los resultados obtenidos en campo como en las simulaciones. En todas las figuras se verifica que la profundidad de inmersión real coincide con la obtenida mediante el modelo propuesto. Pero se evidencia una diferencia entre las pendientes de las trayectorias de bajada y de subida. Las diferencias existentes se deben a los siguientes factores:

- Coeficientes utilizados (Tabla 7-4) dentro del modelo hidrodinámico teórico del cual se han obtenido estas simulaciones. Los coeficientes fueron ajustados

teóricamente en base a las expresiones matemáticas mostradas en el apartado 7.3.3. En el siguiente apartado se plantea el procedimiento para el cálculo y ajuste de estos coeficientes en base a los resultados obtenidos en las pruebas de campo.

- Proceso de ajuste inicial de la flotabilidad en las pruebas de campo. Como se ha descrito anteriormente, las pruebas se realizaron en el canal de Castelldefels, para los cálculos teóricos (modelo hidrodinámico y ecuaciones para obtener los coeficientes) (apartado 7.3.3) y simulaciones se ha asumido una densidad del agua de  $1025 \text{ kg/m}^3$ .
- Cambio de la ubicación del centro de gravedad, en el proceso de ajuste inicial de la flotabilidad en las pruebas de campo. Debido a la densidad del agua del canal, fue necesario añadir un bloque de espuma de flotación con una masa de  $0.312 \text{ kg}$  y un volumen de  $0.0024 \text{ m}^3$ , para ajustar la flotabilidad positiva inicial. Y para ajustar la flotabilidad para cada uno de los casos de estudio se utilizaron masas externas con valores entre  $0.245 \text{ kg}$  y  $1.4 \text{ kg}$ .
- Comparando los resultados obtenidos con las simulaciones se ha establecido que durante el proceso de ajuste inicial se ha modificado el centro de gravedad (CG) del vehículo al añadir los nuevos bloques de espuma y las masas externas. Esto provoca que el pitch inicial en superficie no sea cero y de acuerdo con la nueva posición del CG, el vehículo podrá entrar en inmersión antes de recibir la orden inmersión si el pitch es negativo, o por lo contrario el ángulo de posicionamiento de los propulsores laterales tendrá que ser mayor, si el pitch es positivo; para que el vehículo pueda entrar en inmersión.

Para el test 2 caso 4 se realizan diferentes comparaciones, la primera simulación en la Figura 7.15, se ha realizado con una flotabilidad positiva (ver Tabla 7-7 señales A y B) la cual permite alcanzar una profundidad aproximada de 3 metros similar a la alcanzada en la prueba de campo. La segunda comparación (Figura 7.16), se realiza utilizando una configuración de flotabilidad negativa, en este caso se puede observar que el comportamiento inicial de ambas señales es similar, en ambos casos el vehículo entra en inmersión en el mismo instante de tiempo, en esta simulación el vehículo alcanza una profundidad cercana a los 5 metros. Analizando estas simulaciones es posible

## Capítulo 7

establecer que las trayectorias de bajada y subida son similares, pero no iguales esto es debido a los factores anteriormente explicados.

Por otra parte, en ambas comparaciones se observa que no existe ninguna similitud entre las simulaciones y los resultados de campo obtenidos, en el segmento de tiempo comprendido entre 40s y 60s. La razón es que el canal tiene una profundidad máxima de 3.5m (Aprox), y el vehículo durante esta prueba alcanza el nivel de profundidad máxima, navegando paralelo al fondo, hasta recibir la orden de subir.

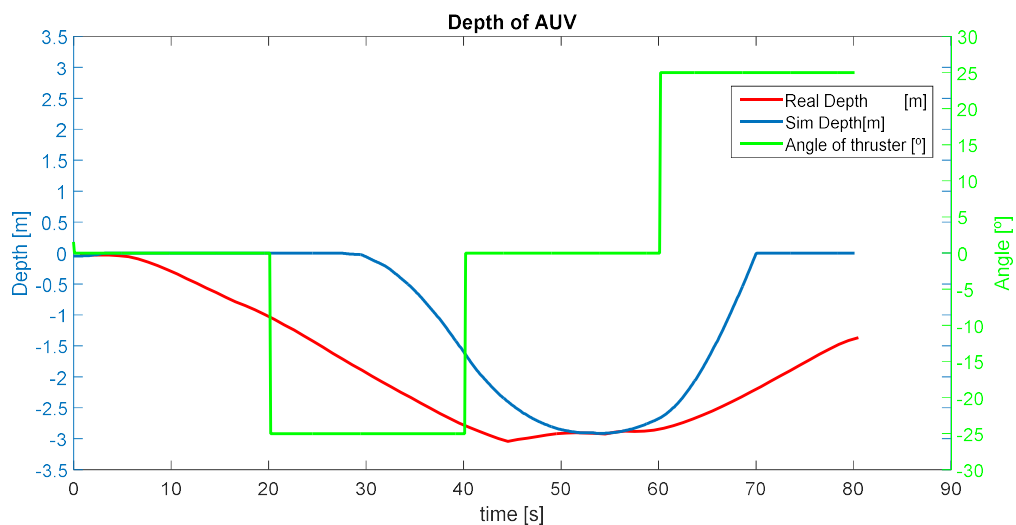


Figura 7.15. Comparación entre datos obtenidos en pruebas de campo y simulaciones para el test 2 caso 4

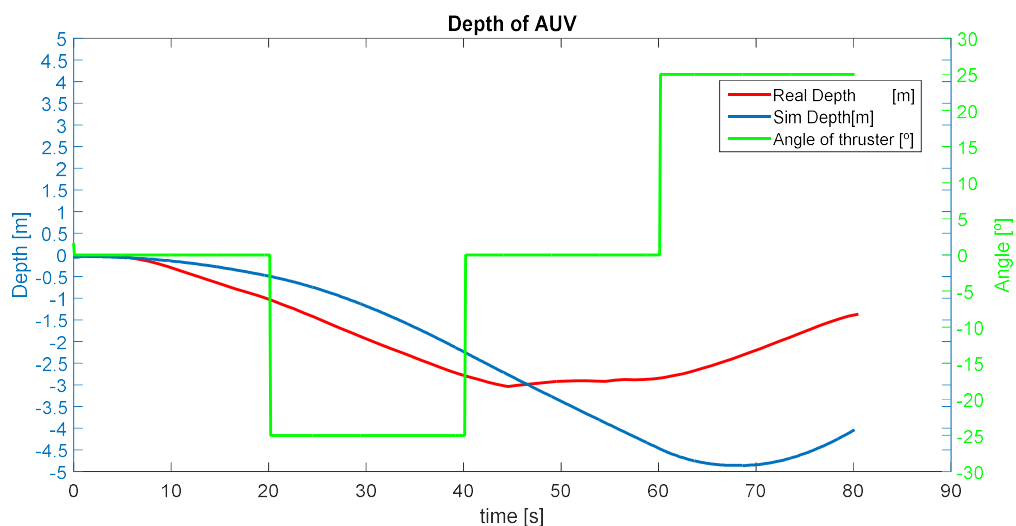


Figura 7.16. Comparación entre datos obtenidos en pruebas de campo y simulaciones para el test 2 caso 4



## 7.6 - Planteamiento del procedimiento para ajuste de los coeficientes del modelo hidrodinámico del Guanay II en el plano vertical

En este apartado, se presenta un procedimiento para realizar el cálculo de los coeficientes a partir de datos obtenidos en las pruebas de campo. Este procedimiento fue utilizado por González [14] en el ajuste del modelo en el plano horizontal del vehículo. Para esto se deben conocer las velocidades instantáneas del vehículo y su posición. El sistema inercial instalado en el vehículo, que permite sensor estos valores sobre el plano vertical, no dispone de una resolución adecuada para una buena aproximación. Sin embargo, se presenta a continuación el procedimiento a utilizar sobre el plano vertical para cuando el vehículo disponga de unos elementos de sensado de mayor resolución.

Como se mostró en el apartado 7.2. el modelo hidrodinámico general para el vehículo Guanay II es (7-50):

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & -X_{\dot{w}} & m * z_g - X_{\dot{q}} \\ -X_{\dot{w}} & m - Z_{\dot{w}} & -m * x_g - Z_{\dot{q}} \\ m * z_g - X_{\dot{q}} & -m * x_g - Z_{\dot{q}} & I_y - M_{\dot{q}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \\ \dot{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (X_{\dot{u}} - m)u \\ 0 & (Z_{\dot{w}} - X_{\dot{u}})u & m * x_g * u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \\ q \end{bmatrix} \\ & - \begin{bmatrix} X_u + X_{|u|u}|u| & X_w + X_{|w|w}|w| & X_q + X_{|q|q}|q| \\ Z_u + Z_{|u|u}|u| & Z_w + Z_{|w|w}|w| & Z_q + Z_{|q|q}|q| \\ M_u + M_{|u|u}|u| & M_w + M_{|w|w}|w| & M_q + M_{|q|q}|q| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ w \\ q \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} (W - B) \sin(\theta) \\ -(W - B) \cos(\theta) \\ (z_g * W - z_b * B) \sin(\theta) + (x_g * W - x_b * B) \cos(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_3 \\ \tau_5 \end{bmatrix} \\ \tau = & \begin{bmatrix} u_{actmain} + u_{actR} \cos(\theta_s) + u_{actL} \cos(\theta_s) \\ u_{actR} \sin(\theta_s) + u_{actL} \sin(\theta_s) \\ 0.1(u_{actL} \cos(\theta_s)) + 0.93(u_{actL} \sin(\theta_s)) + 0.1(u_{actR} \cos(\theta_s)) + 0.93(u_{actR} \sin(\theta_s)) \end{bmatrix} \\ & u_{actmain} = 0.0127 * \lambda_{main} * |\lambda_{main}| \\ & u_{actR} = 0.0029 * \lambda_R * |\lambda_R| \\ & u_{actL} = 0.0027 * \lambda_L * |\lambda_L| \end{aligned}$$

Al resolver el sistema matricial obtenemos las siguientes ecuaciones:

- Translación sobre el eje X

(7-61)

$$\begin{aligned} (m - X_{\dot{u}})\dot{u} + (-X_{\dot{w}})\dot{w} + (m * z_g - X_{\dot{q}})\dot{q} + (0)u + (0)w + (0)q - (X_u)u - (X_w)w - (X_q)q \\ - (X_{|u|u}|u|)u - (X_{|w|w}|w|)w - (X_{|q|q}|q|)q + ((W - B) \sin(\theta)) = \tau_1 \end{aligned}$$

## Capítulo 7

- Translación sobre el eje Z (7-62)

$$\begin{aligned}
 (-X_{\dot{w}})\dot{u} + (m - Z_{\dot{w}})\dot{w} + (-m * x_g - Z_{\dot{q}})\dot{q} + (0)u + (0)w + ((X_{\dot{u}} - m)u)q - (Z_u)u \\
 - (Z_w)w - (Z_q)q - (Z_{|u|u}|u|)u - (Z_{|w|w}|w|)w - (Z_{|q|q}|q|)q \\
 + (-(W - B) \cos(\theta)) = \tau_3
 \end{aligned}$$

- Rotación sobre el eje Z (7-63)

$$\begin{aligned}
 (m * z_g - X_{\dot{q}})\dot{u} + (-m * x_g - Z_{\dot{q}})\dot{w} + (I_y - M_{\dot{q}})\dot{q} + (0)u + ((Z_{\dot{w}} - X_{\dot{u}})u)w \\
 + (m * x_g * u)q - (M_u)u - (M_w)w - (M_q)q - (M_{|u|u}|u|)u - (M_{|w|w}|w|)w \\
 - (M_{|q|q}|q|)q + ((z_g * W - z_b * B) \sin(\theta) + (x_g * W - x_b * B) \cos(\theta)) = \tau_5
 \end{aligned}$$

A partir de diferentes sensores se pueden medir los valores de  $\dot{u}$ ,  $\dot{w}$ ,  $\dot{q}$ ,  $u$ ,  $w$ ,  $q$  y  $\theta$  en un rango de tiempo determinado ( $0 \leq n \leq t_{fin}$ ). Los valores de  $z_g$ ,  $x_g$ ,  $m$ ,  $W$ ,  $B$  y  $\tau$  son conocidos y se encuentran en la Tabla 7-4 del capítulo 6.2.3. Siguiendo la metodología expuesta por Gonzales [14], cada una de las ecuaciones anteriores se puede expresar en la forma  $PS = Q$ , donde  $P$  y  $Q$  son valores conocidos. Aplicando el método de mínimos cuadrados se puede calcular el valor de  $S$ , así:

$$S = (P^T P)^{-1} P^T Q \quad (7-64)$$

Resolviendo las ecuaciones anteriores obtenemos:

- Translación sobre el eje X (7-65)

$$\begin{aligned}
 (m - X_{\dot{u}})\dot{u} + (-X_{\dot{w}})\dot{w} + (m * z_g - X_{\dot{q}})\dot{q} - (X_u + X_{|u|u}|u|)u - (X_w + X_{|w|w}|w|)w \\
 - (X_q + X_{|q|q}|q|)q = \tau_1 - ((W - B) \sin(\theta))
 \end{aligned}$$

- Translación sobre el eje Z (7-66)

$$\begin{aligned}
 (-X_{\dot{w}})\dot{u} + (m - Z_{\dot{w}})\dot{w} + (-m * x_g - Z_{\dot{q}})\dot{q} + ((X_{\dot{u}} - m)u)q - (Z_u + Z_{|u|u}|u|)u \\
 - (Z_w + Z_{|w|w}|w|)w - (Z_q + Z_{|q|q}|q|)q = \tau_3 - (-(W - B) \cos(\theta))
 \end{aligned}$$

- Rotación sobre el eje Z

(7-67)

$$\begin{aligned} & (m * z_g - X_{\dot{q}})\dot{u} + (-m * x_g - Z_{\dot{q}})\dot{w} + (I_y - M_{\dot{q}})\dot{q} + ((Z_{\dot{w}} - X_{\dot{u}})u)w + (m * x_g * u)q \\ & - (M_u + M_{|u|u}|u|)u - (M_w + M_{|w|w}|w|)w - (M_q + M_{|q|q}|q|)q \\ & = \tau_5 - ((z_g * W - z_b * B) \sin(\theta) + (x_g * W - x_b * B) \cos(\theta)) \end{aligned}$$

Al convertir cada una de las ecuaciones anteriores a la forma  $PS = Q$  obtenemos los siguientes sistemas matriciales:

$$P S = Q \quad (7-68)$$

- Translación sobre el eje X

(7-69)

$$[\dot{u} \quad \dot{w} \quad \dot{q} \quad u \quad u|u| \quad w \quad w|w| \quad q \quad q|q|] \begin{bmatrix} (m - X_{\dot{u}}) \\ (-X_{\dot{w}}) \\ (m * z_g - X_{\dot{q}}) \\ -X_u \\ -X_{|u|u} \\ -X_w \\ -X_{|w|w} \\ -X_q \\ -X_{|q|q} \end{bmatrix} = [\tau_1 - ((W - B) \sin(\theta))]$$

En general tenemos:

(7-70)

$$\begin{bmatrix} \dot{u} & \dot{w} & \dot{q} & u & u|u| & w & w|w| & q & q|q| \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dot{u}_n & \dot{w}_n & \dot{q}_n & u_n & u|u|_n & w_n & w|w|_n & q_n & q|q|_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (m - X_{\dot{u}}) \\ (-X_{\dot{w}}) \\ (m * z_g - X_{\dot{q}}) \\ -X_u \\ -X_{|u|u} \\ -X_w \\ -X_{|w|w} \\ -X_q \\ -X_{|q|q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 - ((W - B) \sin(\theta)) \\ \vdots \\ \tau_1 - ((W - B) \sin(\theta))_n \end{bmatrix}$$

Donde  $n$  se relaciona con el tiempo de medición ( $0 \leq n \leq t_{fin}$ ).

- Translación sobre el eje Z

(7-71)

$$\begin{bmatrix} \dot{u} & \dot{w} & \dot{q} & u & u|u| & w & w|w| & uq & q & q|q| \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dot{u}_n & \dot{w}_n & \dot{q}_n & u_n & u|u|_n & w_n & w|w|_n & uq_n & q_n & q|q|_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -X_{\dot{w}} \\ m - Z_{\dot{w}} \\ (-m * x_g - Z_{\dot{q}}) \\ -Z_u \\ -Z_{|u|u} \\ -Z_w \\ -Z_{|w|w} \\ (X_{\dot{u}} - m) \\ -Z_q \\ -Z_{|q|q} \end{bmatrix} \\
 = \begin{bmatrix} \tau_3 - (-(W - B) \cos(\theta)) \\ \vdots \\ \tau_3 - (-(W - B) \cos(\theta))_n \end{bmatrix}$$

- Rotación sobre el eje Z

(7-72)

$$\begin{bmatrix} \dot{u} & \dot{w} & \dot{q} & uw & uq & u & u|u| & w & w|w| & q & q|q| \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dot{u}_n & \dot{w}_n & \dot{q}_n & uw_n & uq_n & u_n & u|u|_n & w_n & w|w|_n & q_n & q|q|_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m * z_g - X_{\dot{q}} \\ -m * x_g - Z_{\dot{q}} \\ I_y - M_{\dot{q}} \\ (Z_{\dot{w}} - X_{\dot{u}}) \\ m * x_g \\ -M_u \\ -M_{|u|u} \\ -M_w \\ -M_{|w|w} \\ -M_q \\ -M_{|q|q} \end{bmatrix} = \\
 \begin{bmatrix} \tau_5 - \left( (z_g * W - z_{b*} B) \sin(\theta) + (x_g * W - x_b * B) \cos(\theta) \right) \\ \vdots \\ \tau_5 - \left( (z_g * W - z_{b*} B) \sin(\theta) + (x_g * W - x_b * B) \cos(\theta) \right)_n \end{bmatrix}$$

## Capítulo 8.

# Propuesta de control de la profundidad y sistema de inmersión híbrido para el vehículo Guanay II

En este capítulo se realiza una propuesta de un control que permite mantener el nivel de profundidad del vehículo, en base al sistema de inmersión por propulsión vectorial desarrollado en el capítulo 6. También se propone el desarrollo de un sistema de inmersión híbrido para el vehículo Guanay II en base a combinar el sistema de inmersión por cambio de la flotabilidad y con el sistema de inmersión por propulsión vectorial.

### 8.1 - Control de la profundidad por histéresis

Para mantener un nivel de profundidad fijo y navegar horizontalmente, se ha diseñado e implementado como primera estrategia un control por histéresis [122], definiendo un punto de profundidad objetivo y una tolerancia o nivel de histéresis (ver Figura 8.1). Para cerrar el lazo de control se dispone de un sensor de presión con el que se puede estimar la profundidad a la cual se encuentra el vehículo (ver Figura 8.2). El tiempo que permanece el vehículo en inmersión está definido por el parámetro de tiempo de inmersión. Una vez alcanzado este tiempo, el sistema orienta los propulsores laterales con un ángulo de  $+25^\circ$  para que el vehículo emerja hasta la superficie. El proceso de navegación en inmersión depende de los siguientes parámetros: ángulo máximo de posicionamiento de los actuadores ( $\pm 25^\circ$ ), tiempo de inmersión, porcentaje de propulsión de los 3 propulsores, nivel de histéresis y profundidad objetivo.

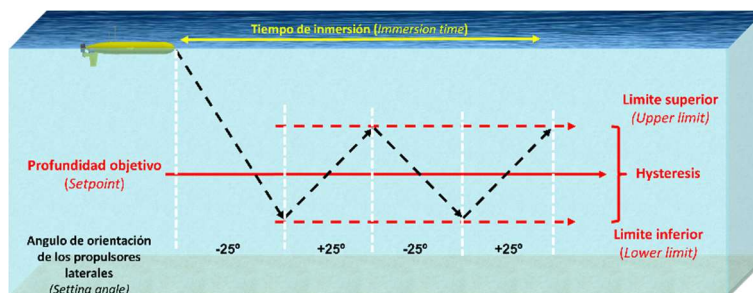


Figura 8.1. Navegación en inmersión control por histéresis

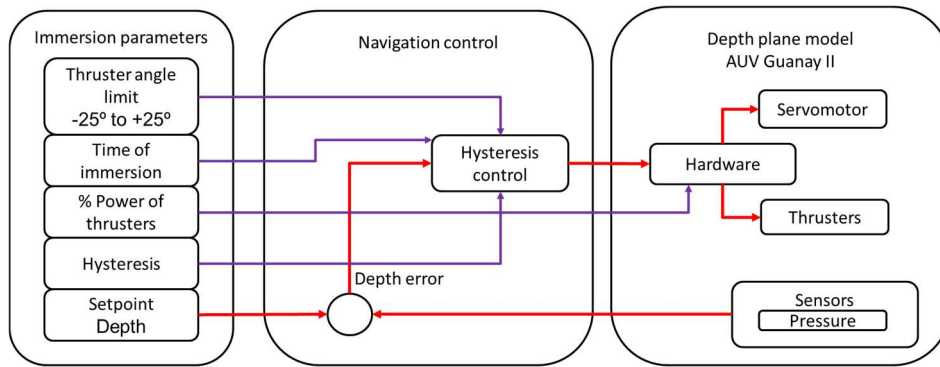


Figura 8.2. Diagrama de bloques general del sistema de navegación en inmersión en lazo cerrado con control del nivel de profundidad por histéresis

Con este tipo de control el vehículo actúa de la forma siguiente. El vehículo inicia el proceso de inmersión situando los propulsores laterales en un ángulo de  $-25^\circ$  (ver Figura 8.1) hasta alcanzar la profundidad correspondiente al límite inferior. En ese momento la posición de los propulsores cambia a  $+25^\circ$ , lo que hace que el vehículo ascienda (emerja) hasta alcanzar el límite superior. Una vez alcanzado este punto los propulsores vuelven a ser ubicados a  $-25^\circ$  para que el vehículo descienda (sumerja). Este proceso de ascender y descender se repite hasta completar el tiempo de inmersión.

Esta estrategia ha sido implementada dentro de la unidad de control del vehículo Guanay II. En la Figura 8.3 se muestra la interfaz de usuario del vehículo, lugar donde se configuran los parámetros del proceso de navegación en inmersión. También, en esta interfaz se puede observar una vez terminada la prueba, el perfil de profundidad y la secuencia de posiciones de los propulsores laterales. La rutina de navegación en inmersión se ejecuta desde la estación base mediante el comando “*RUN:NAV-VECT*”.

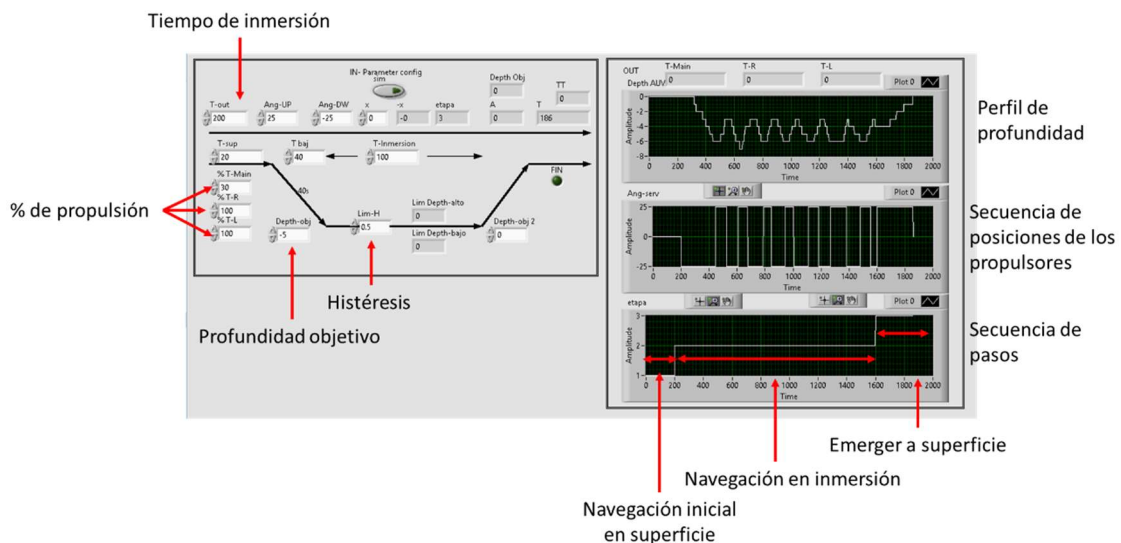


Figura 8.3. Interfaz de usuario del proceso de navegación en inmersión

## Propuesta de control de la profundidad objetivo y sistema de inmersión híbrido

Utilizando el modelo hidrodinámico en el plano vertical del vehículo Guanay II obtenido en el capítulo 7, se han desarrollado una serie de simulaciones para establecer el comportamiento del control de profundidad por histéresis.

La configuración del control por histéresis utilizado en estas simulaciones es:

- Profundidad objetivo (referencia o consigna) de 2m
- Histéresis (Tolerancia) de +/- 0.1m

Los parámetros de simulación del vehículo han sido ajustados para tener una flotabilidad positiva (Tabla 7-7) y los porcentajes de propulsión utilizados corresponden a: 100% para los propulsores laterales y 30% para el propulsor principal.

En la Figura 8.4 y Figura 8.5 se muestran los resultados de las simulaciones. Inicialmente, el vehículo navega en la superficie (20s), posteriormente, el ángulo del servomotor cambia, posicionando (orientando) al propulsor en un ángulo de  $-25^\circ$  lo cual permite al vehículo sumergirse. Cuando el vehículo alcanza el límite inferior (2.1m) el ángulo cambia a  $+25^\circ$  para que el vehículo emerja. Cuando el vehículo alcanza el límite superior (1.9m) el ángulo se reajusta a  $-25^\circ$  para que el vehículo se sumerja y se mantenga dentro del rango definido de trabajo, esta secuencia de pasos genera una trayectoria oscilante con respecto al eje vertical.

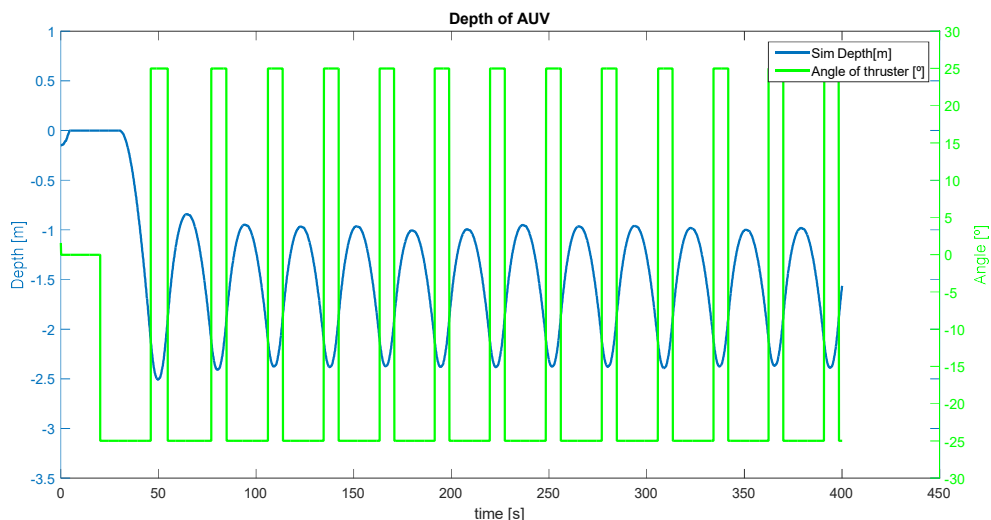


Figura 8.4. Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control por histéresis (ángulo de posicionamiento de los actuadores +/-  $25^\circ$ )

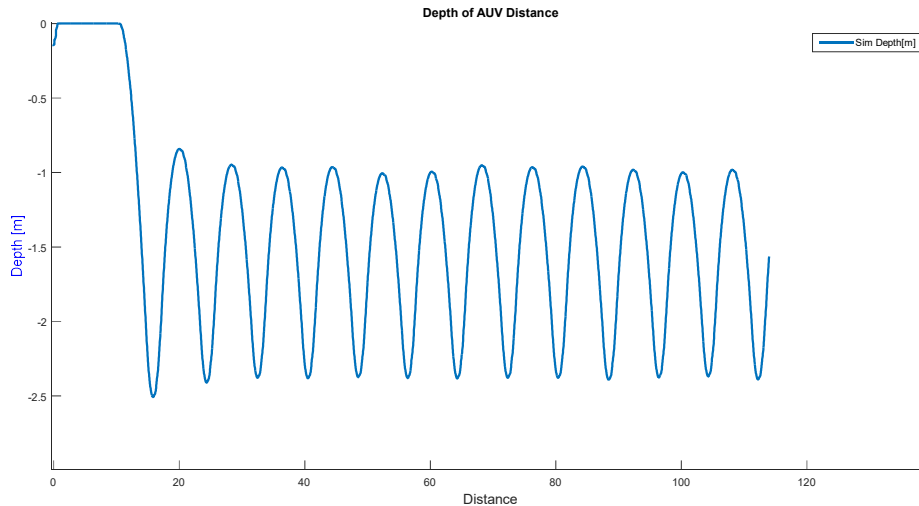


Figura 8.5. Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control por histéresis (ángulo de posicionamiento de los actuadores +/- 25°)

Como se observa en la Figura 8.4 y Figura 8.5, al analizar los periodos de posicionamiento de un mismo ángulo (-25° o 25°), se observa que no son iguales. Debido a la configuración de la flotabilidad positiva, la dinámica del vehículo hace que el proceso de inmersión sea lento, lo que hace que se tenga un nivel elevado de sobreimpulso en la respuesta, a pesar de utilizar el máximo ángulo de posicionamiento de los actuadores. Inicialmente el nivel de sobreimpulso en la parte inferior es de 500% (0.5m sobre un límite de 0.1m) y posteriormente se establece sobre 349% (0.349m sobre un límite de 0.1m). Mientras que en la parte superior el sobreimpulso es de 1100%(1.1m sobre 0.1m) y posteriormente se establece sobre 1000% (1m sobre 0.1m). Este sobreimpulso hacia la parte superior del límite se debe a la flotabilidad positiva utilizada.

En las siguientes simulaciones (Figura 8.6) se puede observar el comportamiento del vehículo para diferentes casos de flotabilidad (Tabla 7-7), manteniendo los mismos límites para el control por histéresis. Estos diferentes casos de flotabilidad, corresponden a las posibles configuraciones de flotabilidad inicial del vehículo. La configuración óptima para el desarrollo de pruebas de campo corresponde a una flotabilidad ligeramente positiva (Tabla 7-7 C). Se analiza el comportamiento del vehículo ante diferentes configuraciones de flotabilidad, debido a que la flotabilidad inicial del vehículo, para el desarrollo de pruebas experimentales es ajustada cualitativamente en el lugar de las pruebas y depende del entorno de navegación.



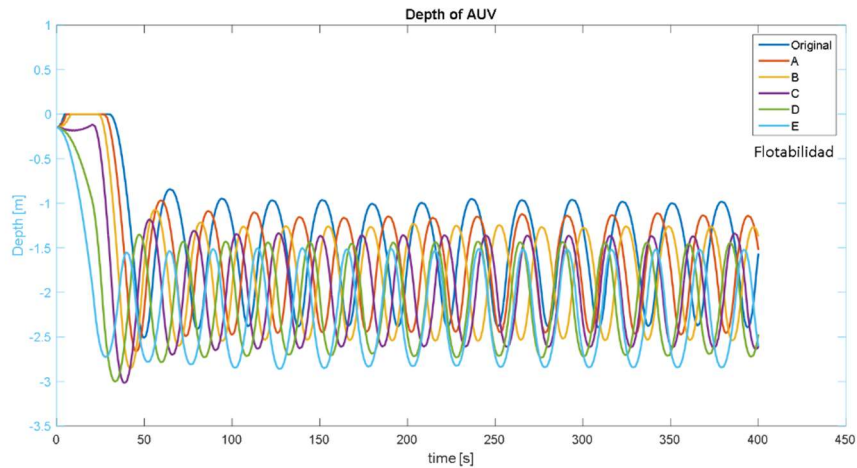


Figura 8.6. Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con control por histéresis para diferentes casos de flotabilidad. (ángulo de posicionamiento de los actuadores  $\pm 25^\circ$ )

La Figura 8.6, permite analizar el comportamiento del vehículo con el control por histéresis, para diferentes casos de flotabilidad. Para todos los casos se observa que el vehículo sobrepasa los límites del control de histéresis. En los casos donde la flotabilidad es positiva el vehículo requiere más tiempo para realizar la inmersión, y en los casos en los cuales la flotabilidad es negativa el vehículo requiere más tiempo para emerger.

Con el propósito de establecer el comportamiento del vehículo, para una acción de control más suave del sistema de propulsión vectorial, se ha simulado el caso mostrado en la Figura 8.4 para un ángulo máximo de posicionamiento de actuadores de  $\pm 5^\circ$  y con una flotabilidad ligeramente positiva (Tabla 7-7 C). Que corresponde al valor de flotabilidad óptimo para el desarrollo de pruebas de campo.

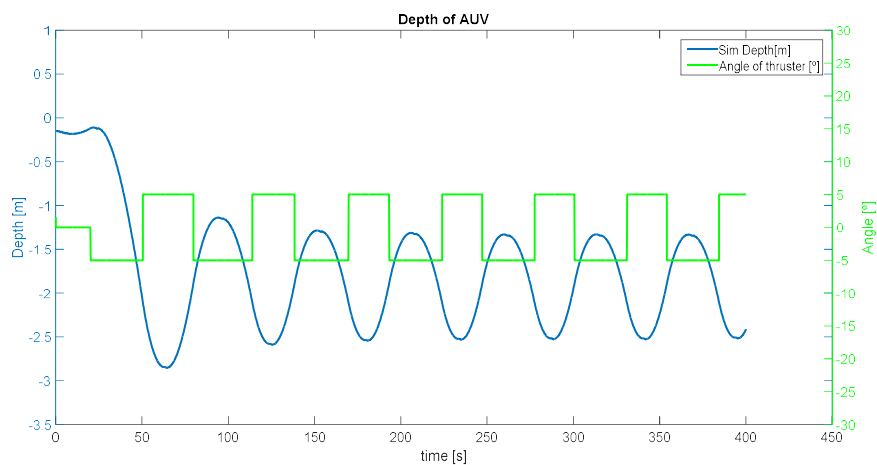


Figura 8.7. Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control por histéresis (ángulo de posicionamiento de los actuadores  $\pm 5^\circ$ )

Al analizar la Figura 8.7 se aprecia que, a pesar de utilizar una configuración de acción más suave, el vehículo continuo sobre pasando los límites del control de histéresis y que la variación en la amplitud del sobreimpulso es mínima.

Un análisis general de todas las simulaciones permite determinar que la dinámica del vehículo es muy lenta, es decir, que el proceso de cambiar de un estado de sumergirse a emerger y a inverso, no es instantáneo y una acción del control de histéresis más suave no compensa este efecto. Esto genera que el vehículo sobrepase los límites del control de histéresis hasta en un 1100% (1.1m sobre un límite de 0.1m). Para contrarrestar esta situación se propone analizar la respuesta del vehículo ante un control de tipo PID.

## 8.2 - Control de la profundidad por PID

Para contrarrestar la dinámica propia del vehículo, se propone analizar la respuesta del vehículo ante un control de lazo cerrado de tipo PID (proporcional, integral, derivativo) [122], con el propósito de mantener un nivel de profundidad. El parámetro de entrada, o de control, corresponde a la profundidad y el parámetro a controlar, o de salida, corresponde al ángulo (servomotor) de orientación de los propulsores laterales.

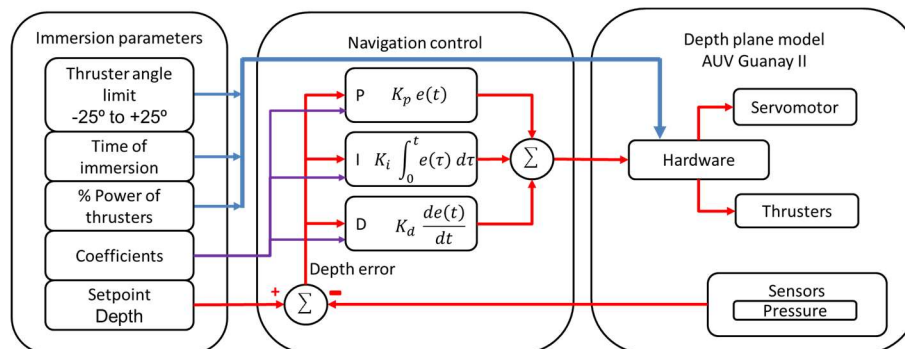


Figura 8.8. Diagrama de bloques general del sistema de navegación en inmersión en lazo cerrado con control PID del nivel de profundidad

El controlador PID, en general, está compuesto por tres partes [122]: proporcional, integral y derivativo. La parte proporcional depende del error actual (ecuación (8-1)) y busca que el error estacionario se aproxime a cero. La parte integral depende de los errores pasados (ecuación (8-2)) y busca eliminar el error en estado estacionario. Y la parte derivativa representa una predicción de los errores futuros (ecuación (8-3)) y busca mantener el error al mínimo.

$$K_p e(t) \tag{8-1}$$

$$K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \tag{8-2}$$

$$K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{8-3}$$

La forma general del controlador PID con respecto al tiempo es:

$$y(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} = \theta_s(t) \tag{8-4}$$

Donde:

- $K_p$ : es la constante proporcional y es la encargada de provocar las oscilaciones.
- $K_i$ : es la constante integral y se utiliza para corregir el “offset” de la señal
- $K_d$ : es la constante derivativa y sirve para minimizar las oscilaciones y la pendiente de la señal.
- $y(t) = \theta_s(t)$ : Corresponde a la variable de la planta que se controla y en este caso corresponde al ángulo del servomotor es decir el ángulo de orientación de los propulsores laterales en el rango +/-25° con un paso de 1°.
- $e(t)$ : en general corresponde al error entre la referencia de la profundidad (*setpoint*) y la profundidad actual del vehículo, que se obtendría a través de un sensor de presión.

El ajuste de las constantes del controlador PID ha sido establecido a través de la metodología de sintonía de oscilación Ziegler-Nichols [122] por ganancia crítica en lazo cerrado (ver Tabla 8-1). El propósito ha sido minimizar el error en profundidad, minimizar la amplitud de las oscilaciones (sobreimpulso) y minimizar el tiempo de estabilización.

Tabla 8-1. Coeficientes teóricos PID

Control	$K_p$	$t_i$	$t_d$	$K_i$	$K_d$
<b>P</b>	$0.5 K_u$				
<b>PD</b>	$0.8K_u$		$t_u/8$		$K_p t_d$
<b>PID</b>	$0.6K_u$	$t_u/2$	$t_u/8$	$K_p/t_i$	$K_p t_d$

## Capítulo 8

$K_u$  corresponde a la ganancia que permite al sistema en lazo cerrado que oscile constantemente con una misma amplitud constante.  $t_u$  es el tiempo del periodo de oscilación del sistema. A partir del método de sintonización de Ziegler-Nichols se establece una  $K_u=30$  y  $t_u=100$ s. Para una configuración de flotabilidad ligeramente positiva (Tabla 7-7-C), propulsión principal 100% y lateral 30% y una referencia de la profundidad de 2m. En la Figura 8.9 se muestra el comportamiento del sistema en lazo cerrado para la configuración de  $K_u=30$ , como se observa el sistema oscila inicialmente con gran amplitud y con el paso del tiempo estas oscilaciones se establecen alrededor de la referencia de la profundidad con una amplitud pequeña. Esto permite verificar que el nivel de profundidad del vehículo puede ser controlado a través de controles PID y que la respuesta del sistema será estable en el tiempo. En la Tabla 8-2 se pueden observar los valores calculados para las constantes PID.

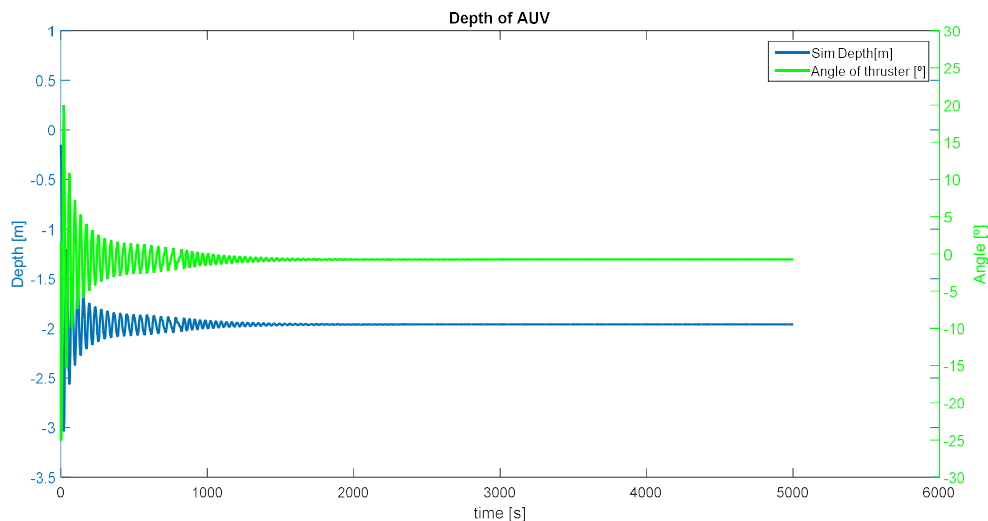


Figura 8.9. Respuesta del sistema en lazo cerrado con  $K_u=30$

Tabla 8-2. Valor calculado para los coeficientes del controlador PID

Control	$K_p$	$t_i$	$t_d$	$K_i$	$K_d$
<b>P</b>	15				
<b>PD</b>	24		12.5		300
<b>PID</b>	18	50	12.5	0.36	225

### 8.2.1 - Control de la profundidad por PD

Dado el comportamiento del sistema de lazo cerrado con el componente proporcional visto en la Figura 8.9. Inicialmente se considera analizar la respuesta del vehículo ante un control proporcional derivativo (PD), el cual debe minimizar las oscilaciones. En la Figura 8.10 y Figura 8.11 se presentan los resultados de simulación para una configuración del vehículo: flotabilidad ligeramente positiva (Tabla 7-7-C), propulsión principal 100% y lateral 30%. Se considera 2m como la referencia de la profundidad.

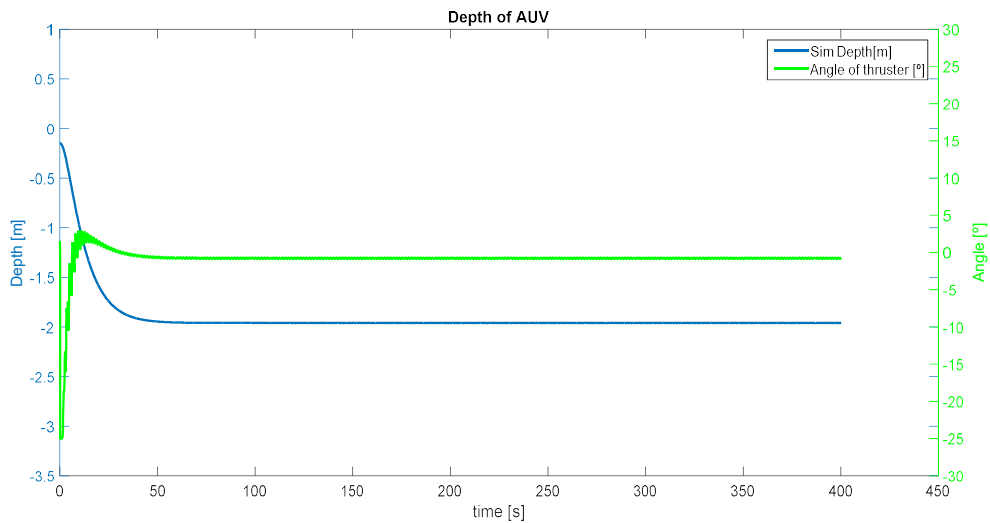


Figura 8.10. Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control PD en el dominio del tiempo

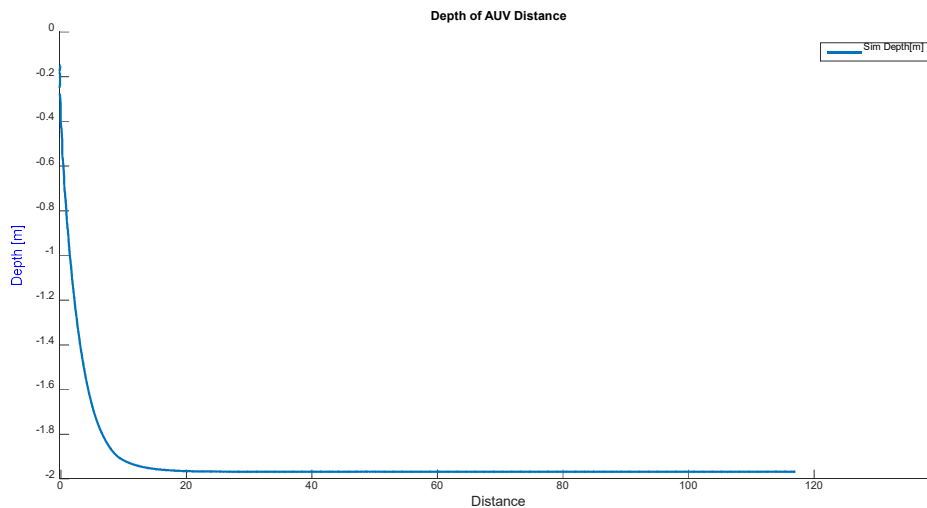


Figura 8.11. Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control PD con respecto a la distancia

## Capítulo 8

Analizando la Figura 8.10 y Figura 8.11, se observa que no hay sobreimpulso en la señal, no hay oscilaciones y el vehículo alcanza la referencia de la profundidad, en un tiempo que se puede considerar corto, debido a la lenta dinámica del vehículo. Esto permite establecer que para este caso el control PD cumple con los parámetros de diseño establecidos.

En la Figura 8.12 y Figura 8.13 se presentan los resultados de simulación para diferentes configuraciones de flotabilidad inicial del vehículo (Tabla 7-7). Se considera una referencia de la profundidad de 2m (Figura 8.12) y de 20m (Figura 8.13) respectivamente. En el caso de la Figura 8.13, se considera un periodo inicial de 20s de navegación en superficie antes de entrar en inmersión.

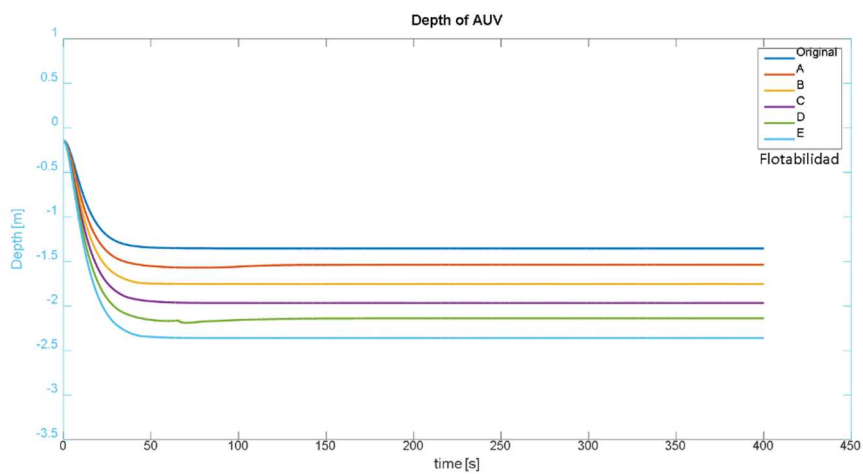


Figura 8.12. Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control PD en el dominio del tiempo para diferentes casos de flotabilidad (Tabla 7-7) y una referencia de la profundidad de 2m.

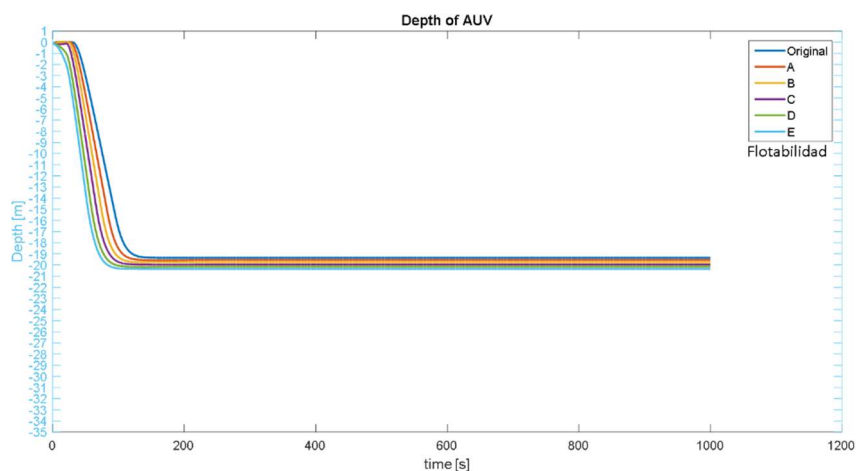


Figura 8.13. Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control PD en el dominio del tiempo para diferentes casos de flotabilidad (Tabla 7-7) y una referencia de la profundidad de 20m.

Analizando la Figura 8.12 y Figura 8.13, se observa que el controlador funciona en cada uno de los casos, pero la señal de salida presenta un error estacionario (*offset*) que depende de la flotabilidad. Para el caso de una referencia de la profundidad de 2m y una flotabilidad muy positiva el vehículo se establece a una profundidad de 1.3m, lo que corresponde a un error del 35%. Mientras que para una flotabilidad negativa el vehículo se establece a una profundidad de 2.3m que corresponde a un error del 15%.

En el caso de una referencia de la profundidad de 20m y una flotabilidad muy positiva el vehículo se establece a una profundidad de 19.35m (3.25% de error) y para una flotabilidad negativa el vehículo se establece a una profundidad de 20.36m (1.8% de error). Según estos resultados, el error estacionario (*offset*) es mayor para profundidades pequeñas que para profundidades grandes. Es decir, este control funciona mejor para una referencia de profundidad grande.

### 8.2.2 - Control de la profundidad por PID

Con el propósito de corregir el error de estado estacionario (*offset*) observado en el apartado anterior, se analiza la respuesta del vehículo ante un control proporcional integral derivativo (PID). Inicialmente se considera una flotabilidad ligeramente positiva (Tabla 7-7-C), propulsión principal 100% y lateral 30%, con una referencia de la profundidad de 2m (ver Figura 8.14 y Figura 8.15).

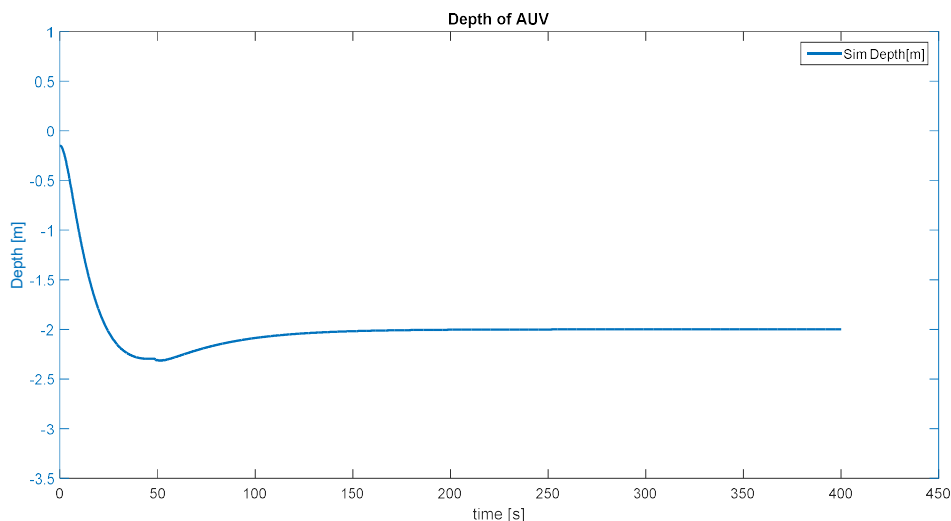


Figura 8.14. Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control PID en el dominio del tiempo, flotabilidad ligeramente positiva

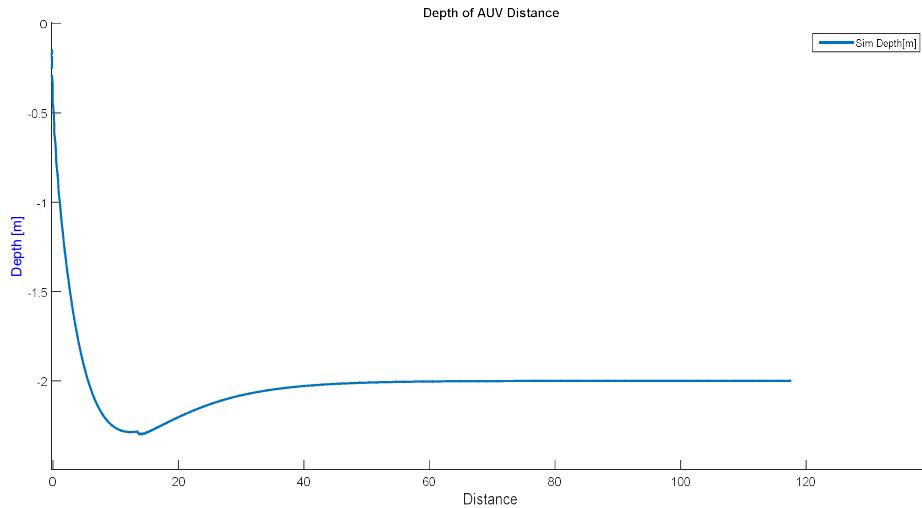


Figura 8.15. Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control PID en el dominio de la distancia, flotabilidad ligeramente positiva

Analizando las figuras anteriores, se observa que hay sobreimpulso en la señal de 15% (2.3m sobre un límite de 2m), hay oscilaciones y aun que el vehículo alcanza la referencia de la profundidad, el tiempo es mayor que en el caso del controlador PD. Esto permite establecer que para este caso el control PID cumple parcialmente con los parámetros de diseño establecidos.

En la siguiente simulación se considera una flotabilidad positiva (Tabla 7-7-O), propulsión principal 100% y lateral 30%, con una referencia de la profundidad de 2m (ver Figura 8.16 y Figura 8.17).

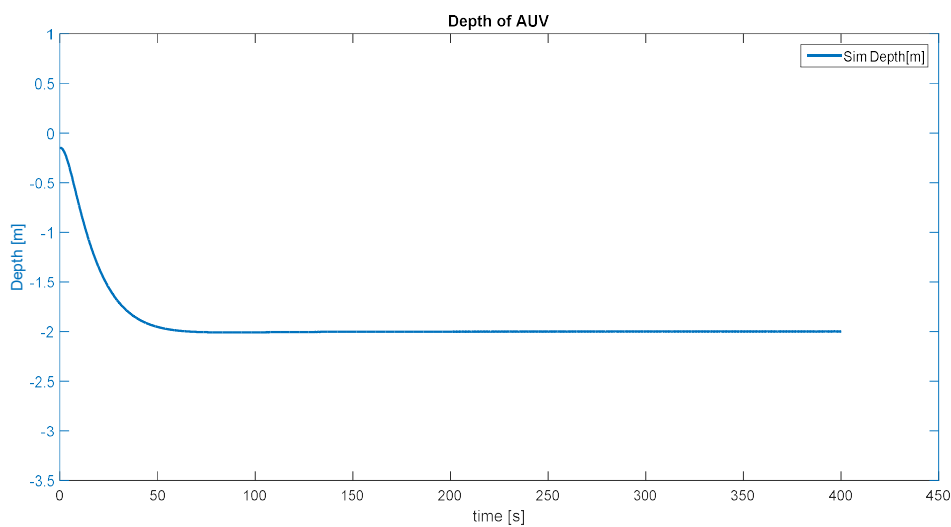


Figura 8.16. Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control PID en el dominio del tiempo, flotabilidad positiva



## Propuesta de control de la profundidad objetivo y sistema de inmersión híbrido

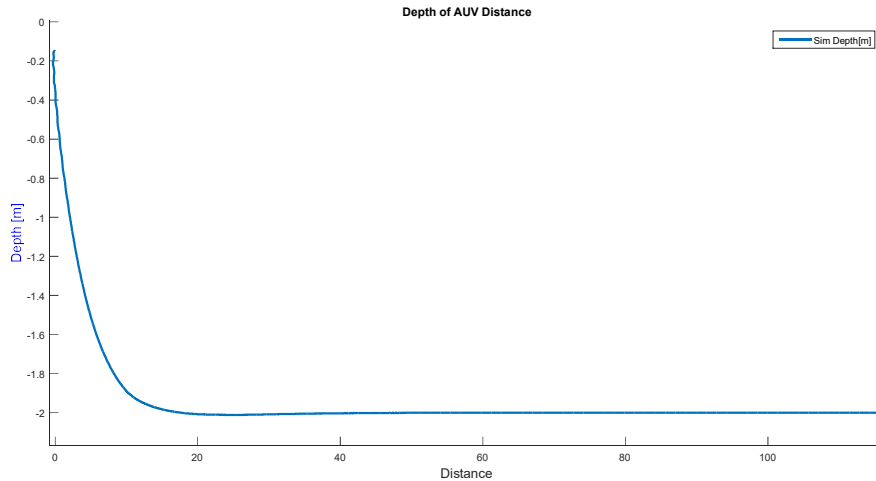


Figura 8.17. Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control PID en el dominio de la distancia, flotabilidad positiva

Analizando la Figura 8.16 y Figura 8.17, se observa que en este caso no hay sobreimpulso en la señal, no hay oscilaciones y el vehículo alcanza la referencia de la profundidad en un tiempo similar al de las simulaciones anteriores (Figura 8.10 y Figura 8.11). Esto permite establecer que en el caso del controlador PID la existencia de oscilaciones y sobreimpulso depende de la configuración de flotabilidad. En la Figura 8.18 y Figura 8.19 se presentan los resultados de simulación, para diferentes configuraciones de flotabilidad inicial (Tabla 7-7). Se considera una referencia de la profundidad de 2m y de 20m respectivamente. En el caso de la Figura 8.19, se considera un periodo inicial de 20s de navegación en superficie antes de entrar en inmersión.

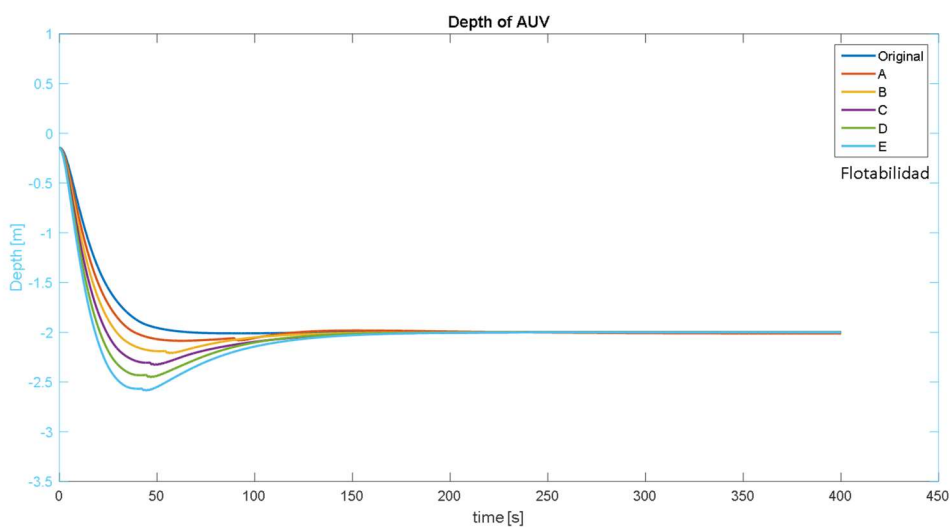


Figura 8.18. Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control PID en el dominio del tiempo para diferentes casos de flotabilidad (Tabla 7-7) y una referencia de la profundidad de 2m.

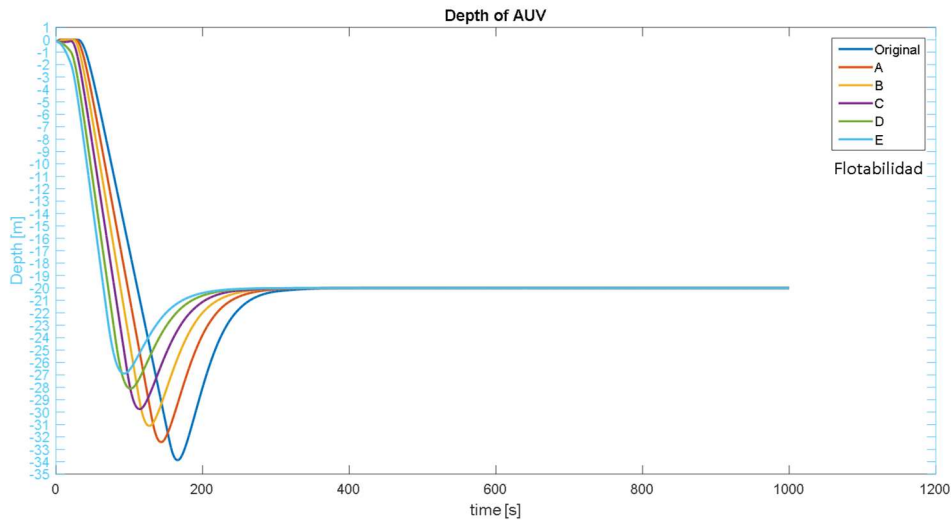


Figura 8.19. Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con el control PID en el dominio del tiempo para diferentes casos de flotabilidad (Tabla 7-7) y una referencia de la profundidad de 20m.

En la Figura 8.18 y Figura 8.19, se observa que el controlador PID permite ajustar el *offset* visto en las simulaciones donde se utiliza el control PD (ver Figura 8.12 y Figura 8.13), pero genera un sobreimpulso en la señal, hasta de 0.6m (30%) para una referencia de la profundidad de 2m y de hasta 13.8m (70%) para una referencia de la profundidad de 20m.

Al analizar todas las simulaciones, tanto las del controlador PD como las del PID, se puede establecer que ambos controladores se ven influenciados en su funcionamiento por la flotabilidad inicial del vehículo. La configuración de flotabilidad inicial óptima para el vehículo corresponde a una flotabilidad ligeramente positiva (Tabla 7-7-C).

Cuando se desarrollan pruebas de campo, la flotabilidad inicial del vehículo es ajustada manualmente y cualitativamente en el lugar de las pruebas, en busca de establecer una flotabilidad ligeramente positiva. En algunos casos puede existir un error en el ajuste de la flotabilidad, por esta razón el control de profundidad del vehículo debe estar en la capacidad de compensar este error en el ajuste de la flotabilidad y permitir al vehículo alcanzar la profundidad de referencia establecida.

El objetivo del control de profundidad es permitir al vehículo navegar en inmersión a una profundidad determinada, para realizar batimetrías. La resolución sobre el eje vertical (profundidad) de los sistemas comerciales utilizados para realizar batimetrías como: el GeoSwath plus (Multibeam echosounder) de KONGSBERG [69] [66] [67] y el Gemini

620pd (Multibeam Profiling Sonar) de Tritech [81], es de 10mm a 1.5mm. Para generar la imagen de la batimetría, se requiere conocer la posición del vehículo en 3D y el perfil de velocidad del sonido. Considerando que la imagen de la batimetría es generada a partir de la posición del vehículo, se establece que el sistema de generación de imagen puede compensar pequeños errores de establecimiento en la profundidad de navegación. Con lo cual es posible utilizar como control de profundidad el control PD, sin afectar la imagen de la batimetría.

Aunque el control PID, permite que el vehículo alcance la profundidad de referencia, se descarta el uso de este control debido a que genera un sobreimpulso del 30% al 70%, en función de la profundidad de referencia y tiene un tiempo de establecimiento mayor que el del control PD.

### **8.3 - Sistema de inmersión y navegación híbrido para el vehículo Guanay II**

El vehículo Guanay II dispone en este momento de dos sistemas independientes de inmersión, uno por cambio de la flotabilidad y otro por propulsión vectorial. En el capítulo 2 (revisión de AUVs) se mostró que algunos AUVs disponen de un sistema híbrido de inmersión y navegación. Con el objetivo de optimizar el proceso de navegación en inmersión del vehículo, se plantea el diseño e implementación de un sistema híbrido de inmersión para el vehículo Guanay II. La combinación de ambos sistemas permitirá alcanzar la referencia de la profundidad en un tiempo menor, y con un consumo energético menor. Dado que este sistema híbrido no necesita mantener los propulsores activos para mantenerse en inmersión.

Como se observó en el apartado 6.3, en el sistema de inmersión por propulsión vectorial; la utilización de flotabilidades ligeramente positivas permite al vehículo alcanzar una mayor profundidad en un menor tiempo. El sistema de inmersión por cambio en la flotabilidad del vehículo permite mediante el llenado del pistón, realizar un cambio de flotabilidad positiva a flotabilidad negativa, consiguiendo que el vehículo se sumerja verticalmente. Para realizar perfiles verticales no es recomendable el uso del sistema de inmersión por propulsión vectorial, dado que la acción de los propulsores genera un desplazamiento horizontal, además los propulsores generan perturbaciones en el medio, provocando errores en la toma de medidas.

Como se mostró en el apartado 6.2, el sistema de inmersión por cambio de flotabilidad del vehículo funciona en base al llenado y vaciado del pistón, sin tener control sobre los puntos intermedios. Un centímetro de recorrido del émbolo del pistón equivale aproximadamente a 80 gr de masa añadida (máximo recorrido 15 cm, aproximadamente 1.2 Kg). En el sistema de inmersión híbrido es necesario controlar el porcentaje de masa que se añade al vehículo cuando ingresa agua al pistón, para poder calcular y controlar el estado de la flotabilidad y la inclinación del vehículo.

Con el propósito de controlar el estado de la flotabilidad del vehículo se plantea incluir un sensor para medir la posición del émbolo del pistón y así controlar gradualmente la cantidad de masa añadida al vehículo. Para realizar esta tarea se ha seleccionado el sensor resistivo análogo de medición de recorrido (MLO-POT-2000-TLF) de la compañía FESTO (ver Figura 8.20). Este sensor es de recorrido lineal con un rango de medida de 2000mm y una resolución de 0.01mm. El sensor se ha conectado mecánicamente al eje de transmisión que une el motor DC con el eje del émbolo del pistón (ver Figura 8.21). La salida del sensor al ser una señal analógica es conectada al DAQ (DAS16jR/12).



Figura 8.20. Sensor FESTO MLO-POT-2000-TLF

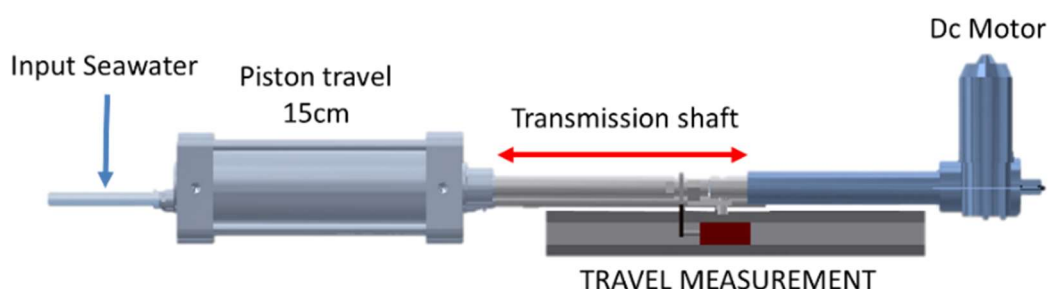


Figura 8.21. Sistema de inmersión por cambio en la flotabilidad modificado

## Propuesta de control de la profundidad objetivo y sistema de inmersión híbrido

El sistema puede ser controlado desde la estación base o desde un archivo script, donde se configura el porcentaje del pistón que se quiere llenar y el tiempo de duración en ese estado. Al caracterizar el sistema de inmersión por cambios en la flotabilidad con el nuevo sensor de posicionamiento del embolo, se observa un comportamiento no lineal entre el porcentaje del pistón (ver Tabla 8-3) que se desea llenar y el real (ver Figura 8.22). También se observa la existencia de un error elevado entre el valor deseado y el obtenido.

Tabla 8-3. Porcentaje de llenado de pistón vrs masa añadida

% pistón	Masa añadida [Kg]
0	0
5	0.06
10	0.12
20	0.24
30	0.36
40	0.48
50	0.6

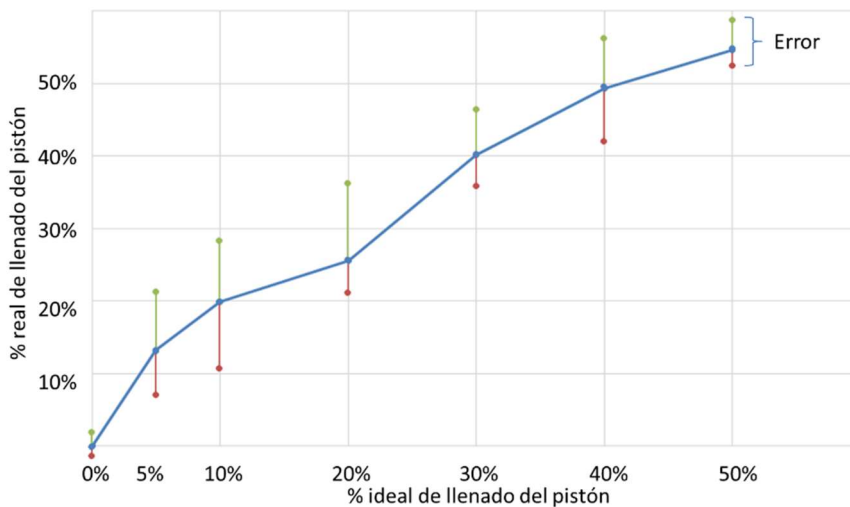


Figura 8.22. Comparación entre el porcentaje de ideal / real de llenado del pistón

En la siguiente figura se analiza el comportamiento del sistema con respecto al tiempo requerido para llenar o vaciar un porcentaje del pistón. Como se puede observar, el sistema requiere aproximadamente el doble de tiempo para sacar el agua del pistón que para llenarlo. También se observa que los tiempos de llenado y vaciado no tienen un comportamiento lineal.

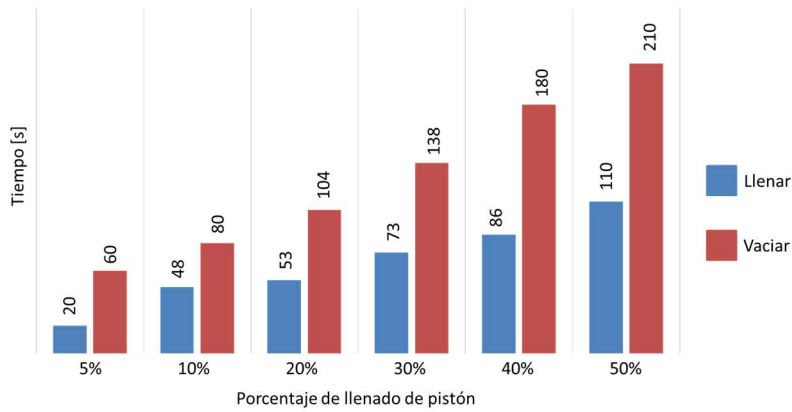


Figura 8.23. Comparación entre el tiempo de llenado y vaciado del pistón

El error existente en el posicionamiento del embolo entre la posición deseada y la posición finalmente obtenida se debe a la precisión en el movimiento mecánico del embolo del pistón y al sistema electrónico de adquisición y procesado.

En la Figura 8.24 y Figura 8.25 se muestra el diagrama de bloques y el diagrama electrónico general del sistema de inmersión híbrido. El sistema diseñado permite que los subsistemas se ejecuten simultáneamente o bien individualmente. Esto permitirá que el vehículo pueda realizar perfiles verticales y también navegar en inmersión cambiando su flotabilidad y actuando con el control vectorial de los motores. El control del sistema se realiza únicamente en función del tiempo de inmersión y profundidad, dado que no se dispone de un sistema de posicionamiento del vehículo en inmersión. La configuración de los parámetros de operación del sistema se realiza a través de un archivo script, en el cual se establece el tiempo de inmersión general, el porcentaje de llenado del pistón, la referencia de la profundidad, el rango de uso de los actuadores del sistema de inmersión por propulsión vectorial, la potencia de los propulsores.

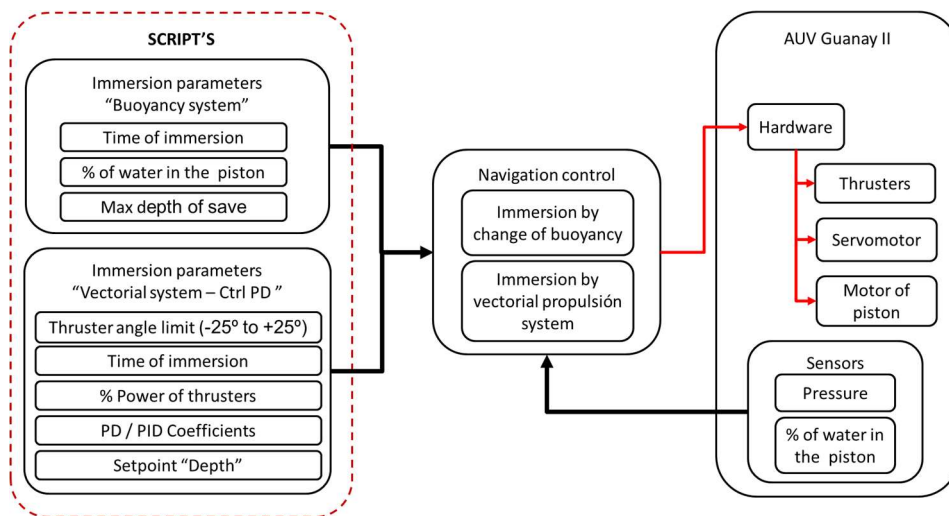


Figura 8.24. Diagrama de bloques general del sistema de inmersión híbrido



inmersión. Por esta razón se realiza una comparación entre dos simulaciones: en la primera el tiempo de llenado de pistón es cero (ver Figura 8.26) y en la segunda donde se considera el tiempo de llenado del pistón Figura 8.23 (Figura 8.27). En cada simulación se han considerado los diferentes porcentajes de llenado de pistón y masa de la Tabla 8-3. Para estas simulaciones se ha configurado una potencia de propulsión de 100% para los motores laterales, 30% para el motor principal y el ángulo de orientación de los propulsores laterales en 0° (Figura 8.26 “Angle”). Se ha configurado una flotabilidad inicial ligeramente positiva (Tabla 7-7-C).

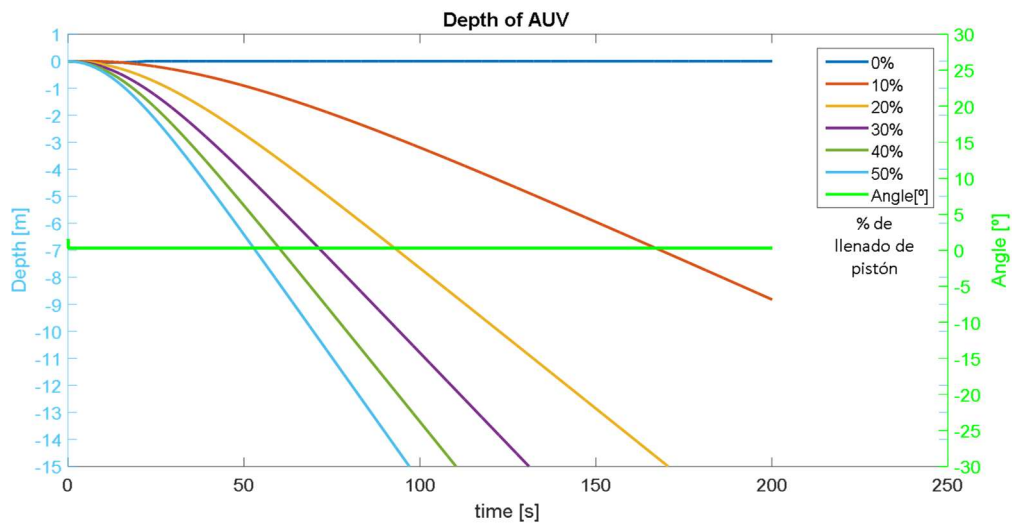


Figura 8.26. Trayectoria del vehículo ante cambios en la flotabilidad con tiempo de llenado del pistón cero

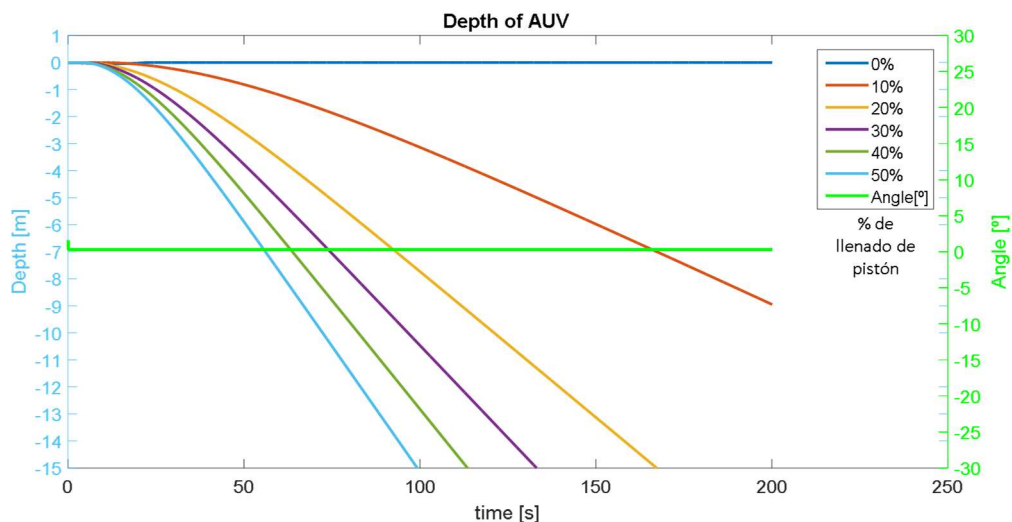


Figura 8.27. Trayectoria del vehículo ante cambios en la flotabilidad teniendo en cuenta el tiempo de llenado del pistón Figura 8.23



Analizando la Figura 8.26 y Figura 8.27 se puede establecer que, debido a la configuración inicial de la flotabilidad, el mínimo cambio en la masa del vehículo genera que el vehículo entre en inmersión. Se puede observar que la diferencia principal entre la Figura 8.26 y Figura 8.27, se concentra en los 20 primeros segundos. En el caso donde no se tiene en cuenta el tiempo del llenado del pistón (Figura 8.26), el vehículo se sumerge más rápido. En el caso donde se tiene en cuenta el tiempo requerido para llenar el pistón (Figura 8.27), el vehículo se sumerge lentamente. Se puede observar el comportamiento del vehículo ante las diferentes configuraciones de flotabilidad, donde se pasa de un estado de flotabilidad ligeramente positiva (0%) (el vehículo no se sumerge), a casos de flotabilidad negativa (50%) donde el tiempo para alcanzar altas profundidades es pequeño.

### **8.3.2 - Simulación 2: sistema de inmersión híbrido**

Este apartado evalúa el comportamiento del sistema de inmersión híbrido en simulación, considerando en el subsistema de inmersión por propulsión vectorial el uso del controlador PD (apartado 8.2.1) para controlar la profundidad del vehículo.

Para el desarrollo de estas simulaciones se considera una flotabilidad inicial ligeramente positiva (Tabla 7-7-C), propulsión principal 100% y lateral 30%, y el rango de orientación de los propulsores laterales entre  $\pm 25^\circ$ . También se considera en estas simulaciones el tiempo de llenado del pistón visto en la Figura 8.23 y los porcentajes establecidos en la Tabla 8-3.

Estas simulaciones se realizan para una referencia de la profundidad de 2m y 20m.

#### **8.3.2.1 - Simulación 1: referencia de la profundidad de 2m**

En la Figura 8.28, se muestran los resultados obtenidos en simulación, para una referencia de la profundidad de 2m.

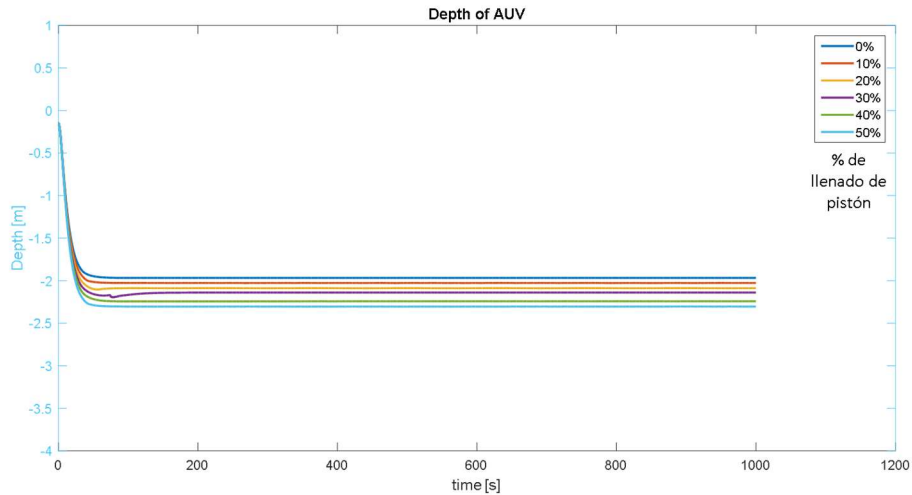


Figura 8.28. Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con control PD para diferentes porcentajes de llenado de pistón y una referencia de la profundidad de 2m.

Analizando la Figura 8.28, se observa que el tiempo de estabilización del vehículo es de 50s. Para la mayoría de los casos la señal no se establece sobre el nivel de la referencia de profundidad si no que mantiene un *offset* que depende del porcentaje de llenado del pistón. El caso crítico se produce cuando el pistón se llena al 50%, lo que genera un *offset* del 15% (2.3m sobre un límite de 2m). Como se estableció anteriormente, este *offset* no afecta la realización de la batimetría ni a la imagen resultante.

### 8.3.2.2 - Simulación 2: referencia de la profundidad de 20m

En la Figura 8.29, se muestran los resultados obtenidos en simulación, para una referencia de la profundidad de 20m.

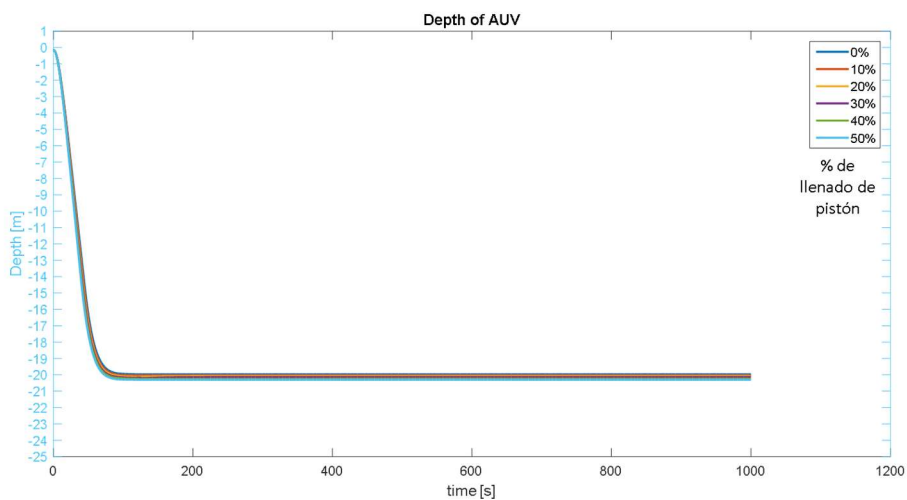


Figura 8.29. Simulación de la navegación en inmersión del vehículo con control PD para diferentes porcentajes de llenado de pistón y profundidad de referencia de 20m.

Analizando la Figura 8.29, se observa que en el caso del controlado PD el tiempo de estabilización es de 100s, siendo el comportamiento similar al visto en la Figura 8.28. También se observa un *offset* máximo del 1.5% (20.3m sobre un límite de 20m), cuando el pistón se llena al 50%. Este *offset* máximo, es menor que el de la situación 1 que era del 15%.

## 8.4 - Conclusiones

En este capítulo se ha realizado el planteamiento de un control que permita mantener un nivel de profundidad de navegación del vehículo para realizar batimetrías, actuando sobre el sistema de inmersión por propulsión vectorial desarrollado en el apartado 6.

Inicialmente, se estudia un control por histéresis con el propósito de mantener un nivel de navegación en inmersión del vehículo. Debido a las características de la dinámica lenta del vehículo Guanay II, y la capacidad de los actuadores, la variable controlada sobrepasa mucho los límites del ciclo de histéresis. Por tanto, se estudia la respuesta del vehículo a controladores del tipo PD y PID.

El control PD permite establecer la trayectoria del vehículo en régimen estacionario en un tiempo pequeño y con un comportamiento monótonamente creciente. Sin embargo, genera un *offset* en estado estacionario que depende del nivel de flotabilidad ajustado en el vehículo. El control PID permite ajustar el nivel de profundidad del vehículo a su referencia sin error estacionario, pero durante la navegación genera un sobreimpulso en la trayectoria del vehículo del 30% al 70%.

Considerando que las características operacionales de los sistemas comerciales utilizados para realizar batimetrías, permiten que sus sistemas de generación de imagen, puedan compensar el *offset* generado por el control PD, se descarta el uso del control PID.

Por otra parte, en este capítulo, se estudia la implementación de un sistema de inmersión y navegación en inmersión híbrido a partir de los sistemas de inmersión por cambio de flotabilidad e inmersión por propulsión vectorial. Se han realizado múltiples simulaciones, evaluando diferentes escenarios y utilizando el control PD desarrollado para el sistema de inmersión por propulsión vectorial. Los resultados obtenidos muestran una dinámica, respecto a la profundidad, monótonamente creciente con un

## Capítulo 8

tiempo de establecimiento del estacionario pequeño. Aunque con un error de régimen estacionario, que depende del porcentaje de llenado del pistón.

En los resultados obtenidos de las simulaciones, se observa que el tiempo de establecimiento del vehículo es corto, aunque permanece con un *offset* con respecto al nivel de profundidad de referencia, que depende del porcentaje de llenado de pistón. Se puede concluir a partir de los resultados obtenidos en este apartado, que el uso del sistema de inmersión híbrido para sumergir el vehículo Guanay II y realizar una navegación en inmersión es viable. Este sistema permite reducir el tiempo de establecimiento y reducir el consumo energético, debido a que con este sistema no es necesario mantener los propulsores activos para mantener el vehículo en inmersión.

## Capítulo 9.

### Conclusiones y trabajo futuro

Este capítulo contiene las conclusiones finales del trabajo realizado en esta tesis, orientada a la adaptación del vehículo Guanay II para que en un futuro pueda ser utilizado en la lucha contra la contaminación marina por hidrocarburos. Como se mencionó en la introducción de este trabajo, las tareas para controlar un vertido de hidrocarburos en el mar pasan, principalmente, por tres fases: detección del vertido, seguimiento del vertido y obtención de datos para la predicción de su desplazamiento. Para que el vehículo Guanay II pueda ser utilizado en estas tres fases, se plantea la necesidad de incorporar un sistema de detección y evasión de obstáculos y la adaptación del vehículo para poder navegar en inmersión manteniendo una profundidad preestablecida.

El vehículo Guanay II dispone de un sistema de control de trayectoria que se basa en seguir el camino previamente definido por waypoints o bien por funciones. Para ello, utiliza un control de seguimiento de trayectoria Pure Pursuit o Path Following.

El sistema para la detección y evasión de obstáculos ha sido diseñado para ejecutarse en paralelo con el sistema de control de trayectoria Pure Pursuit. En el momento que el sistema de detección y evasión de obstáculos establece la posibilidad de una colisión, se genera una trayectoria nueva hasta que se elimina el riesgo de colisión. Posteriormente, el vehículo continúa con el seguimiento de la trayectoria previamente definida.

El diseño del sistema para la detección y evasión de obstáculos se ha dividido en dos sub-problemas: la detección del obstáculo y la evasión del obstáculo detectado. Para realizar la detección de obstáculos se ha utilizado un sensor del tipo SONAR MK3. Se ha implementado un algoritmo en LabVIEW para realizar la configuración, el control y la adquisición de datos del SONAR y se han determinado los valores de los parámetros de operación del sonar más apropiados a las características operacionales del vehículo.

## Capítulo 9

Para resolver el problema de la detección de obstáculos han evaluado dos alternativas. La primera alternativa es construir una imagen a partir de los datos obtenidos del sensor, posteriormente aplicar una serie de filtros sobre esta imagen para eliminar el clutter y finalmente realizar la detección de los elementos presentes en la imagen por medio de un algoritmo de detección de bordes. La segunda alternativa, corresponde a subdividir el área de medición del SONAR en tres sectores iguales y establecer la mínima distancia entre el vehículo y un obstáculo a través de una ventana de detección por umbral para cada uno de los tres sectores. Ambas alternativas han sido implementadas y se han realizado diferentes pruebas en el laboratorio y en ambientes externos, como en el puerto de Vilanova i la Geltrú. Estas pruebas han permitido verificar el correcto funcionamiento de ambas estrategias. Debido al alto consumo computacional de la primera alternativa, esta ha sido descartada.

El segundo sub-problema corresponde a la evasión del obstáculo detectado. Después de analizar diferentes técnicas se ha considerado que la mejor opción es trabajar con un sistema de evasión de arquitectura reactiva implementándolo con lógica fuzzy. Esta técnica nos permite ajustar el sistema a las características operaciones del vehículo en función de zonas de funcionamiento y aplicar los puntos pertinentes de la normativa COLREGS realizando una interpretación lingüística.

Se han estudiado dos estrategias para generar el cambio de ruta del vehículo ante la presencia de un obstáculo.

La primera estrategia consiste en generar un rumbo y una velocidad que reemplaza como consignas del lazo interno de control, a los aportados por el control de seguimiento de trayectoria Pure Pursuit.

La segunda estrategia consiste en generar un nuevo waypoint, que reemplaza al waypoint de consigna del control de seguimiento de trayectoria Pure Pursuit.

Para cada una de las estrategias se diseña un sistema fuzzy, con 3 variables de entrada correspondientes a la distancia mínima entre el vehículo y el obstáculo detectado en cada uno de los 3 sectores del radar. La inferencia se fundamenta en una ecuación de tipo Mamdani, condicional del tipo “SI...ENTONCES ...”. La base de reglas está definida por 27 reglas basadas en las características operaciones del vehículo en función de zonas de funcionamiento y de una interpretación lingüística de los puntos pertinentes de la normativa COLREGS. El agregado se ha definido por valor máximo y el proceso de

defucificación por centroide. Finalmente, se han definido como variables de salida para la primera estrategia la velocidad y el rumbo del vehículo, y para la segunda estrategia la posición de un waypoint de evasión.

Los resultados obtenidos mediante simulaciones en el entorno Matlab muestran que la primera estrategia en algunos escenarios complejos no es capaz de evadir los obstáculos. Los resultados obtenidos con la segunda estrategia muestran una mayor maniobrabilidad del vehículo y permite superar diferentes tipos de obstáculos y escenarios complejos. También, dada la naturaleza de la variable de salida de esta segunda estrategia, es viable exportar estos algoritmos a vehículos comerciales donde habitualmente solo se tiene acceso a la capa de aplicación del sistema de control de misión. Por estos motivos, se ha seleccionado la segunda estrategia, de generación de waypoints, para ser incorporada en la unidad de control del vehículo.

Los resultados obtenidos en las pruebas experimentales realizadas en el canal olímpico de Castelldefels han sido satisfactorios, logrando la evasión de los obstáculos presentes en el entorno de navegación, con un comportamiento similar a los estimados en simulación.

Otra de las aportaciones de este trabajo para adaptar el vehículo Guanay II a la aplicación de detección y seguimiento de vertidos de hidrocarburos, es proporcionar la capacidad de navegar en inmersión.

Se analizaron diferentes técnicas existentes y dadas las características físicas y operaciones del vehículo, se decidió diseñar e implementar un sistema de propulsión vectorial, dotando de movimiento a los propulsores laterales. Este grado de libertad añadido en los actuadores permite controlar el ángulo de inclinación del vehículo en inmersión y de este modo poder mantener un nivel de profundidad.

El diseño e implementación del sistema de navegación en inmersión está dividido en dos sub-problemas. El primero corresponde en dotar de movimiento vertical a los propulsores laterales. Para ello se ha utilizado un servomotor SAVOX SW1211SG, que se ha integrado en la unidad de control del vehículo Guanay II, y se ha diseñado un soporte mecánico para los propulsores mediante Autodesk inventor y fabricado en PLA. Los resultados experimentales obtenidos han sido satisfactorios, permitiendo que el vehículo entre en inmersión, se mantenga en inmersión durante el tiempo definido y posteriormente vuelva a superficie.

El segundo sub-problema corresponde al desarrollo de un control para mantener el vehículo en un nivel de profundidad durante la navegación en inmersión. Previo al diseño del control se propone un modelo hidrodinámico del vehículo Guanay II en el plano vertical, desacoplado del modelo en el plano horizontal. Los coeficientes del modelo son seleccionados en base a la propuesta de Fossen [114] [115] que relaciona los coeficientes del modelo hidrodinámico en el plano horizontal y los del modelo hidrodinámico en el plano vertical. Los valores de los coeficientes se calculan mediante ecuaciones geométricas, considerando las simetrías del vehículo siguiendo el procedimiento descrito por Presterro [119]. También se propone para el cálculo de los coeficientes, un método basado en técnicas de mínimos cuadrados sobre datos experimentales, que se podrá aplicar cuando el vehículo disponga de un sistema de posicionamiento submarino de precisión. Las pruebas experimentales evidencian una similitud en las dinámicas del vehículo en el plano vertical con respecto a las estimadas por el modelo. A partir del modelo hidrodinámico propuesto se diseñan dos controles lineales del tipo proporcional derivativo (PD) y proporcional integral derivativo (PID). Aunque el control PD tiene un error estacionario (*offset*), dado que en las aplicaciones de batimetrías los sistemas de generación de imagen pueden compensar el *offset* de profundidad en la adquisición, se considera utilizar el control PD que proporciona dinámicas monótonamente crecientes.

Por tanto, se puede concluir que se ha realizado la adaptación del vehículo Guanay II conforme a los objetivos planteados inicialmente. Se ha diseñado e implementado un sistema para la detección y evasión de obstáculos de tipo reactivo fuzzy. También, se ha diseñado e implementado un sistema de navegación en inmersión por propulsión vectorial y se ha propuesto un modelo hidrodinámico del vehículo sobre el plano vertical que permite diseñar controles para mantener la profundidad de navegación.



## 9.1 - Trabajo futuro

En base al trabajo realizado, los resultados obtenidos y la operatividad del vehículo se sugieren las siguientes líneas de trabajo futuro para el sistema de detección y de evasión de obstáculos desarrollado:

- Modificar el sistema para operar con el control de trayectoria Path Following.
- Integrar el sistema actual con un sistema deliberativo del tipo RRT para conformar un sistema de evasión híbrido que permitirá optimizar la trayectoria de navegación que sigue el vehículo.

Respecto al sistema de navegación en inmersión por propulsión vectorial diseñado, se propone como líneas de trabajo futuro:

- Integrar un sistema de posicionamiento en inmersión. El sensor DVL del tipo Pathfinder de la casa Teledyne se ajusta a las dimensiones físicas y los niveles de alimentación suministrables por el vehículo.
- Utilizando el sistema de posicionamiento anterior, aplicar el método propuesto, basado en técnicas de mínimos cuadrados sobre datos experimentales, para el cálculo de los coeficientes del modelo hidrodinámico en el plano vertical.
- Estudio de los modelos hidrodinámicos para vehículos submarinos y definición de un nuevo modelo no desacoplado que incluya el plano horizontal y vertical con el propósito de generar un modelo general con mayor versatilidad.

Una vez finalizado este trabajo se ha observado la necesidad de modificar diversos sistemas del vehículo, con el objetivo de mejorar la operatividad y ampliar el rango de aplicación. Tales como:

- Actualizar el sistema de alimentación. Inicialmente el vehículo dispone de un sistema que solo permite establecer el porcentaje de carga de las baterías. Por esta razón se considera necesario disponer de un sistema que supervise el sistema de carga de las baterías, establezca el porcentaje de carga de la batería

en cada instante de tiempo y monitorice los niveles de consumo de todo el sistema electrónico que compone el vehículo. También, se considera necesario la inclusión de un sensor de gas para detectar fallas en las baterías durante el proceso de carga.

- Debido a los problemas detectados en el hardware y los conflictos existentes en el software que afectan directamente el rendimiento del sistema, se considera necesario actualizar la unidad de control del vehículo. Esto también permitiría ampliar el área de aplicaciones en las cuales puede ser usado.

En base a las prestaciones y a las características del vehículo se propone que se utilice una unidad NUC de Intel, concretamente la NUC5i7RYH. Esta unidad cumple con las características necesarias de tamaño y alimentación. Respecto a prestaciones hardware, dispone de un procesador 7i con una velocidad de 3.1GHz, puede soportar hasta 16Gb de memoria RAM y ser equipada con discos de estado sólido

## 9.2 - Publicaciones asociadas a la tesis

- **Design a vectorial propulsion system for Guanay II AUV**  
*Seleccionado entre los 20 finalistas del Student Poster Competition*  
Autores: C. Galarza, I. Masmitja, J.Prat, S. Gomàriz  
Nombre del congreso: Oceans'17 MTS/IEEE conference  
Formato: Póster + presentación oral  
Localidad y país: Aberdeen, Scotland  
Fecha: 19 - 22 Junio 2017
  
- **Obstacle detection algorithm of low computational cost for Guanay II AUV**  
Autores: Galarza, C., J., Prat, J., Gomariz, S.,  
Nombre del congreso: SEVENTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON MARINE TECHNOLOGY, Martech 2016  
Formato: comunicación oral  
URI: [http://www.upc.edu/cdsarti/martech/usb\\_2016/papers/47.pdf](http://www.upc.edu/cdsarti/martech/usb_2016/papers/47.pdf)  
ISBN: 978-84-617-4152-6  
Localidad y país: Barcelona - España  
Fecha: 26 - 27 Octubre 2016
  
- **Design obstacle detection system with the sonar MK3 by AUV Guanay II**  
Autores: C. Galarza, I. Masmitja, J.Prat, J., Del Rio,E. S. Gomariz  
Nombre del congreso: International Symposium on Understanding the World through Electrical and Electronic Measurement "21st IMEKO TC-4"  
Formato: Presentación oral  
Localidad y país: Budapest, Hungary  
Fecha: 7 - 9 Septiembre 2016
  
- **Design of obstacle detection and avoidance system for Guanay II AUV**  
Autores: C. Galarza, I. Masmitja, J.Prat, E. S. Gomariz  
Nombre del congreso: MED'16 The 24th Mediterranean Conference on Control and Automation  
Formato: Presentación oral  
Localidad y país: Athens, Greece  
Fecha: 21 - 24 Junio 2016

- **Obstacle detection and avoidance system for Guanay II AUV**  
Autores: C. Galarza, I. Masmitja, J.Prat, E. Trullols, S. Gomariz  
Nombre del congreso: 2016 IEEE Sensors Application Symposium  
Formato: Póster + presentación oral  
Localidad y país: Catania, Italy  
Fecha: 20 - 22 Abril 2016
  
- **Design obstacle detection system for AUV Guanay II**  
Autores: Galarza, C., Masmitja, I., González, J., Prat, J., Gomariz, S., Del Rio, J  
Nombre del congreso: SIXTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON MARINE TECHNOLOG  
Formato: comunicación oral  
Localidad y país: Cartagena - España  
Fecha: 15 - 17 Septiembre 2015
  
- **Vilanova sea trials of Guanay II AUV**  
Autores: Masmitja, I., González, J., Galarza, C., Gomariz, S., Prat, J., Del Rio,  
Nombre del congreso: SIXTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON MARINE TECHNOLOG  
Formato: comunicación oral  
Localidad y país: Cartagena - España  
Fecha: 15 - 17 Septiembre 2015
  
- **Fuzzy controller for the yaw and velocity control of the Guanay II AUV**  
Autores: J. González, S. Gomáriz, C. Batlle, C. Galarza  
Nombre del congreso: IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles  
Formato: comunicación oral  
Localidad y país: GIRONA - España  
Fecha: 28 - 30 Abril 2015
  
- **Obstacle detection system for the AUV Guanay II**  
*Seleccionado entre los finalistas del Student Poster Competition*  
Autores: C. Galarza, I. Masmitja, J. González, J.Prat, S. Gomariz  
Nombre del congreso: Sea Tech Week 9th Marine Science Conference  
Formato: poster + presentación oral  
Localidad y país: Brest, France  
Fecha: 13 - 17 Octubre 2014

➤ **Configuración de los parámetros del sistema de detección de obstáculos del guanay II**

Autores: Galarza, Cesar; Masmitja Rusiñol, Ivan; Gonzalez Agudelo, Julian; Prat Tacias, Jordi; Gomariz Castro, Spartacus

Formato: Artículo

Nombre de la revista: Instrumentation viewpoint

Fecha: 2014

Núm: 17, p. 19-20.

URI: <http://hdl.handle.net/2099/15844>

ISSN 1886-4864

➤ **Sonar image automatic processing for obstacle detection in AUV navigation system with Labview**

Autores: Galarza, Cesar; Mungo, Salvatore

Formato: Artículo

Nombre de la revista: Instrumentation viewpoint

Fecha: Agosto 2014,

Núm: 16, p. 42-43.

ISSN 1886-4864



## Referencias

- [1] C. F. Timothy Pennington J, «Seasonal fluctuations of temperature, salinity, nitrate, chlorophyll and primary production at station h3/m1 over 1989–1996 in monterey bay, california,» *Deep Sea Res Part II Topical Studies Oceanografic* , vol. 47, nº 5, p. 947–973, 2000.
- [2] V. Martinez-Alvarez , B. Gallego-Elvira , J. Maestre-Valero y M. Tanguy, «Simultaneous solution for water, heat and salt balances in a Mediterranean coastal lagoon (Mar Menor, Spain),» *Estuar Coast Shelf Sci*, vol. 91, nº 2, pp. 250-261, 2011.
- [3] P. Espinal-García, A. Giraldo, M. Londoño-Mesa y L. Mejía-Ladino, «Variabilidad en la abundancia de larvas de crustáceos y poliquetos en bahía Málaga, pacífico colombiano (enero-junio de 2010),» *Boletín de InveGiraldostigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR*, vol. 41, nº 2, pp. 355-373, 2012.
- [4] F. Wulff y R. Ulanowicz, «A comparative anatomy of the baltic sea and chesapeake bay ecosystems,» *Coast Estuar Studies* , vol. 32, p. 232–256, 1989.
- [5] J. Bellingham, Y. Zhang , J. Kerwin, J. Erikson, B. Hobson, B. Kieft , M. Godin y R. McEwen, «Efficient propulsion for the tethys long-range autonomous underwater vehicle,» *Autonomous underwater vehicles (AUV) IEEE/OES*, pp. 1-7, 2010.
- [6] J. Byron y R. Tyce, («) Designing a vertical / horizontal auv for deep ocean sampling,» de *Proceedings of MTS/IEEE conference and exhibition oceans 2007*, VancouverR, 2007.
- [7] A. Caffaz , A. Caiti, G. Casalino y A. Turetta, «The hybrid glider-auv fo`laga, field experience at the glint'08 experiment,» *IEEE robotics and automation magazine*, vol. 17, p. 31–44, 2010.
- [8] N. Dabholkar, E. Desa, S. Afzulpurkar, R. Madhan, A. Mascarenhas y G. Navelkar, «Development of an autonomous vertical profiler for oceanographic studies,» de *Proceedings of the international symposium on ocean electronics (SYMPOL-2007)*, Cochin, 2007.

## Referencias

- [9] D. Ribas, P. Ridao, N. Palomeras y M. Carreras, «The Girona 500, a multipurpose autonomous underwater vehicle,» de *SPAIN*, 1-5, 2011.
- [10] S. Gomariz, I. Masmitjà, J. González, G. Masmitjà y J. Prats, «GUANAY II: an autonomous vehicle for vertical/horizontal sampling,» *Journal of marine science and technology* ISSN: 0948-4280. DOI 10.1007/s00773-013-0253-y, 2014.
- [11] S. Gomariz, J. Prat, A. Arbos, O. Pallares y C. Violo, «Autonomous vehicle development for vertical submarine observation,» *Instrument Viewpoint*, vol. 8, pp. 39-40, 2009.
- [12] S. [a. Gomariz, «Design and construction of the GUANAY-II autonomous underwater vehicle,» de *Oceans IEEE/OES : Oceans of energy for sustainable future*, Santander: Institute of Electrical and Electronics Engineers, URI <http://hdl.handle.net/2117/12940> ISBN978-1-4577-0087-3, 2011.
- [13] S. Gomariz, J. Prat, P. Gaya y J. Sole, «An autonomous vehicle development for submarine observation,» *Journal of Maritime Research*, vol. 6, nº 2, pp. 23-36, 2009.
- [14] J. González Agudelo, «Thesis Contribution to the Model and Navigation Control of an Autonomous Underwater Vehicle,» Universidad Politècnica de Catalunya URL: <http://www.tdx.cat/handle/10803/311422>, 2015.
- [15] J. González, I. Masmitjà, C. M. Galarza, S. Gomàriz y C. Batlle, «Hydrodynamic model of the Guanay II AUV,» de *OCEANS MTS/IEEE Genova 2015*.
- [16] I. Masmitja, J. González, J. Prat y J. Del Rio, «Latest contributions to Guanay II,» de *5th International Workshop on Marine Technology MARTECH 2013*. ISSN/ISBN: 978-84-616-5764-3, Girona, 2013.
- [17] I. Masmitja, «Aportacions realitzades al vehicle Guanay II AUV,» Universitat Politècnica de Catalunya <http://hdl.handle.net/2099.1/19145>, 2013.
- [18] I. Masmitja, J. González, J. Prat y J. Del Rio, «Buoyancy model for Guanay II AUV,» de *OCEANS '14 MTS/IEEE*, Taipei. China, 2014.
- [19] MIROS, «Brochure Miros OSDTM, OIL SPILL DETECTION SYSTEM DB/099Rev.,» 2014. [En línea]. Available: [http://www.miros.no/download/osd/DB\\_099\\_v3\\_MirosOSD\\_Brochure.pdf](http://www.miros.no/download/osd/DB_099_v3_MirosOSD_Brochure.pdf). [Último acceso: 2014].
- [20] RUTTER, «Brochure SIGMA S6 ICE NAVIGATOR,» 2014. [En línea]. Available: <http://www.rutter.ca/wp->



- content/uploads/2012/01/Brochure\_Rutter\_Ice\_Navigator1.pdf. [Último acceso: 2014].
- [21] R. Eustice, «Towards Bathymetry-Optimized Doppler Re-navigation for AUVs,» de *OCEANS, MTS/IEEE*, 2005.
- [22] P. Pavlakis, «On the Monitoring of Illicit Vessel Discharges,» *European Commission – EUR 19906 EN.* , 2001.
- [23] R. IRIS, «NDP state of the art study- Deep water remote sensing and monitoring,» *International Research Institute of Stavanger*, pp. ISBN 978-82-490-0820-9, 2013.
- [24] W. Jianhua y Y. Cheng, «Remote sensing monitoring of Gulf of Mexico oil spill using ENVISAT ASAR images,» de *21st International Conference on Geoinformatics IEEE GEOINFORMATICS*, 2013.
- [25] J. Allen y B. Walsh, «ENHANCED OIL SPILL SURVEILLANCE, DETECTION AND MONITORING THROUGH THE APPLIED TECHNOLOGY OF UNMANNED AIR SYSTEMS,» *Oil Spill Conference Proceedings*, nº 1, pp. 113-120, 2008.
- [26] W. J. Lehr , «THE POTENTIAL USE OF SMALL UAS IN SPILL RESPONSE,» *International Oil Spill Conference Proceedings*, nº 1, pp. 431-433, 2008.
- [27] F. Muttin, «Umbilical deployment modeling for tethered UAV detecting oil pollution from ship,» *Applied Ocean Research*, vol. 33, nº 4, pp. 332-343, 2011.
- [28] A. Corporate, «Using drones to monitor changes in environment,» 11 NOVIEMBRE 2014. [En línea]. Available: <https://www.avinc.com/public-safety/applications/oilandgas>.
- [29] Aeronautics, «Pipeline Monitoring, Oil & Gas Security,» 11 NOVIEMBRE 2014. [En línea]. Available: <http://www.aeronautics-sys.com/?CategoryID=259&ArticleID=188>.
- [30] J. Wilkinson, T. Boyd y B. Hagen, «Detection and quantification of oil under sea ice: The view from below,» *Cold Regions Science and Technology*, 2014.
- [31] CSS-CONTROS, «HydroC™ Subsea Fluorometer for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH),» 2014. [En línea]. Available: <http://www.contros.eu/hydroc-pah-subsea-fluorometer.html>. [Último acceso: 2014-2017].

## Referencias

- [32] A. T. Tran y L. D. Cuong, «Simulation Of Some Oil Spill Scenarios In Con Co Island Area,» *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, vol. 14, nº 2, 2014.
- [33] S. Kraatz, «Oil spills and contingency planning in the Bay of Paranaguá in Brazil,» *Theses 2008. Postgraduate Studies. Master of Science in Coastal Geosciences and Engineering. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Germany*, 2008.
- [34] Beegle-Krause, «General NOAA Oil Modeling Environment (GNOME): A New Spill Trajectory Model,» de *Mira Digital Publishing, Inc. Vol. 2, pp. 865-871*, , Tampa, FL, , 2001.
- [35] W. B. Samuels, «Development of a Global Oil Spill Modeling System,» *Earth Science Research ISSN 1927-0542 E-ISSN 1927-0550*, vol. 2, nº 2, 2013.
- [36] Nickell, y C. Lee, «Modular Modification of a Buoyant AUV for Low-Speed Operation,» Virginia Tech Repositorio Dspace, 2014-2015. [En línea]. Available: <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/35029?show=full>.
- [37] R. Madhan, E. Desa, S. Prabhudesai y E. Desa, «Mechanical design and development aspects of a small AUV – Maya,» de *Extended Abstract for 7th IFAC Conference MCMC2006*,, Lisbon, 20-22 September 2006.
- [38] H. Yoshida, S. Ishibashi y T. Sawa, «An autonomous underwater vehicle with a canard rudder for underwater minerals exploration,» de *Mechatronics and Automation (ICMA), IEEE International Conference*, 2013.
- [39] M. Issac, St. John's , S. Adams, Moqin He y N. Bose, «Manoeuvring Trials with the MUN Explorer AUV: Data Analysis and Observations,» de *OCEANS 2007*, Sept. 29 2007-Oct.
- [40] B. Anderson y J. Crowell, «Workhorse AUV - A cost-sensible new Autonomous Underwater Vehicle for Surveys/Soundings,» de *Search & Rescue, and Research, OCEANS, 2005. Proceedings of MTS/IEEE*, 2005.
- [41] P. D. Deshpande, M. N. Sangekar, B. Kalyan, M. Chitre, S. Shahabudeen, V. Pallayil y K. T. Beng, «Design and Development of AUVs for cooperative missions Acoustic Research Laboratory, National University of Singapore,» 2014-2015. [En línea]. Available: [http://www.researchgate.net/publication/231179593\\_Design\\_and\\_Development\\_of\\_AUVs\\_for\\_cooperative\\_missions](http://www.researchgate.net/publication/231179593_Design_and_Development_of_AUVs_for_cooperative_missions).
- [42] Eng You Hong , Hong Geok Soon y M. Chitre, «Depth control of an autonomous underwater vehicle, STARFISH,» de *OCEANS 2010 IEEE* , Sydney, 2010.

- [43] A. Mallios, P. Ridao, M. Carreras y E. Hernandez, «Navigating and mapping with the SPARUS AUV in a natural and unstructured underwater environment,» de *OCEANS 2011*, 2011.
- [44] M. Radzak y M. Arshad, «AUV Controller Design and Analysis using Full-State Feedback,» de *ICS'05 Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Systems Article No. 56*, 2005.
- [45] M. Dunbabin, J. Roberts, K. Usher y G. Winstanley, «A Hybrid AUV Design for Shallow Water Reef Navigation,» de *Robotics and Automation ICRA 2005 IEEE International Conference*, 2005.
- [46] C. Osterloh, T. Pionteck y E. Maehle, «MONSUN II: A small and inexpensive AUV for underwater swarms, Robotics,» de *ROBOTIK 2012 7th German Conference* , German, 2012.
- [47] Z. H. Ruiwen Yi, Y. Lin, H. Gu, D. Ji, J. Liu y C. Wang, «Maneuverability design and analysis of an autonomous underwater vehicle for deep-sea hydrothermal plume survey,» de *Oceans*, San Diego, 2013.
- [48] S. Martin, L. Whitcomb, D. Yoerger y H. Singh, «A Mission Controller for High Level Control of Autonomous and Semi-Autonomous Underwater Vehicles,» de *OCEANS* , Boston, MA, 2006.
- [49] S. Dasset, R. Damus, F. Hover y J. Morash, «Closer to deep underwater science with ODYSSEY IV class hovering autonomous underwater vehicle (HAUV),» de *Oceans* , 2005 .
- [50] D. Thompson, D. Caress, C. Paull y D. Clague, «MBARI mapping AUV operations: In the Gulf of California,» de *Oceans*, 2012.
- [51] E. Cavallo y R. Michelini, «Conceptual Design of an AUV Equipped with a Three Degrees of Freedom Vectored Thruster,» de *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2004.
- [52] E. Cavallo y R. R.C. Michelini, «A robotic equipment for the guidance of a vectored thruster AUV,» de *35th International Symposium on Robotics ISR* , Paris, 23-26 March 2004,.
- [53] Y. Le Page y K. Holappa, «Simulation and control of an autonomous underwater vehicle equipped with a vectored thruster,» de *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition* , 2000.
- [54] S. Tangirala y J. Dzielski, «A Variable Buoyancy Control System for a Large AUV,» *Oceanic Engineering, IEEE Journal* , vol. 32, nº 4, 2007.

## Referencias

- [55] S. Woods, R. Bauer y M. Seto, «Automated Ballast Tank Control System for Autonomous Underwater Vehicles,» *Oceanic Engineering, IEEE Journal*, vol. 37, nº 4, 2012.
- [56] W.-d. Zhao, J.-a. Xu y M.-j. Zhang, «A variable buoyancy system for long cruising range AUV,» de *Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE)*, 2010.
- [57] Teledyne-Webb-Research-Slocum-G3-Glider, «Slocum G3 Glider Autonomous Underwater,» [En línea]. Available: [http://www.teledynemarine.com/Lists/Downloads/Teledyne%20Webb%20Research%20Brochure%20G3%202017\\_pages.pdf](http://www.teledynemarine.com/Lists/Downloads/Teledyne%20Webb%20Research%20Brochure%20G3%202017_pages.pdf). [Último acceso: 2014-2017].
- [58] Kongsberg, «SEAGLIDER C2,» [En línea]. Available: [https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/110C9C6E7FC07B41C125811C0042E462/\\$file/C2\\_KM\\_Seaglider\\_datasheet-03052017.pdf?OpenElement](https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/110C9C6E7FC07B41C125811C0042E462/$file/C2_KM_Seaglider_datasheet-03052017.pdf?OpenElement). [Último acceso: 2017].
- [59] I. Masmitja, J. González, G. Masmitjà y J. Del Rio, «Measuring system and power management of the Guanay II AUV,» de *19th IMEKO TC-4 Symposium Measurements of Electrical Quantities ISSN/ISBN: 978-84-616-5438-3*, Barcelona, 2013.
- [60] I. Masmitja y G. Masmitja, «Desenvolupament d'un sistema de control per a un vehicle autonom submari,» Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.
- [61] Greenpeace, «Impactos ambientales del petróleo,» 2012. [En línea]. Available: [http://www.greenpeace.org/mexico/global/mexico/report/2012/1/impactos\\_ambientales\\_petroleo.pdf](http://www.greenpeace.org/mexico/global/mexico/report/2012/1/impactos_ambientales_petroleo.pdf). [Último acceso: 2014-2017].
- [62] ITOPF, «oil tanker spill statistics 2016,» 2017. [En línea]. Available: [http://www.itopf.com/fileadmin/data/Documents/Company\\_Lit/Oil\\_Spill\\_Stats\\_2016\\_low\\_revised\\_Sep17.pdf](http://www.itopf.com/fileadmin/data/Documents/Company_Lit/Oil_Spill_Stats_2016_low_revised_Sep17.pdf). [Último acceso: 2017].
- [63] Turner-designs, «C3™ Submersible Fluorometer,» 2014-2017. [En línea]. Available: <http://www.turnerdesigns.com/t2/doc/brochures/S-0096.pdf>.
- [64] G. Yufit, «3D Forward Looking Sonar Technology for Surface Ships and AUV: Example of Design and Bathymetry Application,» de *Underwater Technology Symposium (UT), IEEE International*, 2013.
- [65] H. Koyama, «Bathymetry by new designed interferometry sonar mounted on AUV,» de *OCEANS '04. MTTs/IEEE TECHNO-OCEAN '04 (Volume:2)*, 2004.

- [66] Kongsberg-Maritime, «Multibeam echosounder, ROV / AUV,» [En línea]. Available: <https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0240.nsf/AllWeb/C11BE267F1908B8DC12574C1004C50E6?OpenDocument>. [Último acceso: 2014-2017].
- [67] Kongsberg-Maritime, «Swath Bathymetry II: GeoSwath Plus ROV/AUV,» 2009. [En línea]. Available: [https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/8B250ACAD3487AC4C125763300316984/\\$file/Swath-Bathymetry-GeoSwath-Plus-ROV-AUV-data-examples.pdf?OpenElement](https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/8B250ACAD3487AC4C125763300316984/$file/Swath-Bathymetry-GeoSwath-Plus-ROV-AUV-data-examples.pdf?OpenElement). [Último acceso: 2014-2017].
- [68] Kongsberg-Maritime, «Application Note KONGSBERG GEOACOUSTICS GeoSwath Plus on Hydroid Remus 100 AUV,» [En línea]. Available: [https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/D2FCFA9D82E121F2C1257705004AD3E9/\\$file/Application-Note-GeoSwath-Plus-Remus-100-Buzzards-Bay.pdf?OpenElement](https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/D2FCFA9D82E121F2C1257705004AD3E9/$file/Application-Note-GeoSwath-Plus-Remus-100-Buzzards-Bay.pdf?OpenElement). [Último acceso: 2017].
- [69] Kongsberg-Maritime, «GEOSWATH PLUS REMUS 100,» 2016. [En línea]. Available: [https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/3542420A4DFAF956C12575380039ED7E/\\$file/GeoAcoustics-GeoSwath-Plus-Remus-100-data-sheet.pdf?OpenElement](https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/3542420A4DFAF956C12575380039ED7E/$file/GeoAcoustics-GeoSwath-Plus-Remus-100-data-sheet.pdf?OpenElement). [Último acceso: 2016-2017].
- [70] R. Yeo, «Surveying the underside of an Arctic ice ridge using a man-portable AUV,» 2008. [En línea]. Available: <http://www.intoceansys.co.uk/articles-detail.php?iss=0000000003&acl=0000000008>. [Último acceso: 2014-2017].
- [71] TELEDYNE, «Gavia Offshore - Complete Survey Solution in a Low Logistics AUV,» 2011. [En línea]. Available: [http://auvac.org/uploads/platform\\_pdf/Gavia\\_AUV\\_Offshore\\_Data\\_Sheet\\_lo.pdf](http://auvac.org/uploads/platform_pdf/Gavia_AUV_Offshore_Data_Sheet_lo.pdf). [Último acceso: 2014-2017].
- [72] TELEDYNE-NEWS, «Teledyne Gavia Releases New Klein Side Scan/Bathymetry Module for the Gavia AUV,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.teledynemarine.com/press-releases/teledyne-gavia-releases-new-klein-side-scan-bathymetry-module-for-the-gavia-auv>. [Último acceso: 2017].
- [73] Kongsberg, «Application Note - GeoSwath Plus Compact - Shallow Water Bathymetry and Side Scan Surveys,» [En línea]. Available: [https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/299C321F8F909842C1257894002B399C/\\$file/Application-Note-GeoSwath-Plus-Compact-Surveys.pdf?OpenElement](https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/299C321F8F909842C1257894002B399C/$file/Application-Note-GeoSwath-Plus-Compact-Surveys.pdf?OpenElement).

## Referencias

- [74] Kongsberg, «GEOSWATH PLUS COMPACT,» 2014. [En línea]. Available: [https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/41E339D32CAE49C5C125788F0030B291/\\$file/GeoAcoustics-GeoSwath-Plus-Compact-data-sheet-ESPANOL.pdf?OpenElement](https://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0397.nsf/AllWeb/41E339D32CAE49C5C125788F0030B291/$file/GeoAcoustics-GeoSwath-Plus-Compact-data-sheet-ESPANOL.pdf?OpenElement). [Último acceso: 2014-2017].
- [75] Kongsberg, «GeoSwath Plus Compact GeoAcoustics Wide Swath Bathymetry Multihaz de aguas someras y Sonar de Barrido para operaciones en embarcaciones pequeñas,» [En línea]. Available: <http://www.hidrografiaparatodos.es/pdf/GS+Compact-GeoAcoustics-Esp.pdf>.
- [76] TELEDYNE, «MB-2250 MODULE,» [En línea]. Available: <http://www.teledynemarine.com/gavia-mb-2250-gapfill-module>.
- [77] Underwater-Robotics-Research-Centre-(CIRS)-of-the-University-of-Girona, «SPARUS II AUV,» [En línea]. Available: <http://cirs.udg.edu/auvs-technology/auvs/sparus-ii-auv/>. [Último acceso: 2017].
- [78] Underwater-Robotics-Research-Centre-(CIRS)-of-the-University-of-Girona, «Design of SPARUS II AUV,» 2014. [En línea]. Available: [http://cirs.udg.edu/wp-content/uploads/2014/05/SPARUS\\_II\\_design.pdf](http://cirs.udg.edu/wp-content/uploads/2014/05/SPARUS_II_design.pdf). [Último acceso: 2014-2017].
- [79] M. Carreras, C. Candela y D. Ribas, «Testing SPARUS II AUV, an open platform for industrial, scientific and academic applications,» de *SIXTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON MARINE TECHNOLOGY, Martech ISBN: 978-84-608-1708-6*, Cartagena, 2015.
- [80] Imagenex, «IMAGENEX MODEL 837B “Delta T” 300 m MULTIBEAM PROFILING SONAR,» 2006. [En línea]. Available: [https://imagenex.com/assets/images/downloads/837B\\_Delta\\_T\\_Profiling\\_300\\_m\\_Specs\\_rev6.pdf](https://imagenex.com/assets/images/downloads/837B_Delta_T_Profiling_300_m_Specs_rev6.pdf). [Último acceso: 2014-2017].
- [81] Trittech, «Gemini 620pd Multibeam Profiling Sonar,» [En línea]. Available: <http://www.tritech.co.uk/media/products/gemini-620pd-4000m.pdf?id=845c7c01>. [Último acceso: 2014-2017].
- [82] L. Laguarda, «Tesis. Desenvolupament d'eines software en Python per la generació automatitzada d'informes científics i tècnics d'instrumentació oceanogràfica,» Universidad Politècnica de Catalunya (UPC), 2013.
- [83] VMT, «velocity-mapping-tool,» 2014. [En línea]. Available: <https://code.google.com/p/velocity-mapping-tool/>. [Último acceso: 2014-2015].
- [84] A. Y y Shcherbina, «Mapping bathymetric and hydrographic features of Glover's Reef, Belize, with a REMUS autonomous underwater vehicle,» *American Society of Limnology and Oceanography, Inc*, vol. 53, nº 2, 2008.

- [85] S. systems, «INS IG-500A,» 2000. [En línea]. Available: <http://www.sbg-systems.com/products/ig-500-series-overview>. [Último acceso: 2014-2017].
- [86] D. Rudolph, «Doppler Velocity Log Theory and Preliminary Considerations for Design and Construction,» IEEE, 2012.
- [87] B. Jalving, «DVL Velocity Aiding in the HUGIN 1000 Integrated Inertial Navigation System,» de *NavLab publications, Proceedings from ADCPs in Action 2004*, Nice, France, 2004.
- [88] Teledy, «PATHFINDER DVL,» [En línea]. Available: [http://www.teledynemarine.com/Pathfinder\\_DVL](http://www.teledynemarine.com/Pathfinder_DVL).
- [89] Teledyne-RD-Instruments, «Pathfinder,» Teledyne-RD-Instruments, 2017.
- [90] A. Sami , Mostafa, Ayman y Brisha, «Analysis and Simulation of 3D Trajectory with Obstacle Avoidance of an Autonomous Underwater Vehicle for Optimum Performance,» *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 13, nº 3, pp. 90-97, 2013.
- [91] J. Yuh, «Design and Control of Autonomous Underwater Robots: A Survey,» *Autonomous Robots*, vol. 8, pp. 7-24, 2000.
- [92] D. Lane, Y. Petillot y I. T. Ruiz, «Underwater Vehicle Obstacle Avoidance and Path Planning Using a Multi-beam Forward Sonar,» *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 26, nº 2, pp. 240-251, 2001.
- [93] Trittech, «Micron Sonar Product Manual, Document: 0650-SOM-00003, Issue: 01,» Trittech.
- [94] L. R. Fodrea y A. J. Healey, «Obstacle Avoidance Control for the Remus Autonomous Underwater Vehicle,» *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 36, nº 4, pp. 103-108, 2003.
- [95] A. J. Healey, «Obstacle avoidance while bottom following for the remus autonomous underwater vehicle,» *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 37, nº 8, pp. 251-256, 2004.
- [96] Ø. Engelhardttsen, «3D AUV Collision Avoidance, Norwegian University of Science and Technology,» Department of Engineering Cybernetics, 2007.
- [97] Trittech, «Micron Sonar, Document: 0650-SOM-00004, Issue: 02.,» Trittech.
- [98] Lloyd's, «COLREGS - International Regulations for Preventing Collisions at Sea,» Lloyd's Register or International Maritime Organization, 2015.
- [99] R. SIEGWART y NOURBAKHS, Introduction to Autonomous Mobile Robots, London, England: The MIT Pres, 2004.

## Referencias

- [100] M. Seto, L. Paull y S. Saeedi, MARINE ROBOT AUTONOMY, SPRINGER ISBN 9781461456599, 9781461456582, 2013.
- [101] M. Hromatka, «A Fuzzy Logic Approach to Collision Avoidance in Smart UAVs,» College of Saint Benedict & Saint John's University, 2013.
- [102] J.Evans, P.Patrón, B.Smith y D. Lane., «Design and evaluation of a reactive and deliberative collision avoidance and escape architecture for autonomous robots,» *Autonomous Robots* , 2008.
- [103] T. CHIEW SEON, «A COLLISION AVOIDANCE SYSTEM FOR AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES,» University of Plymouth, Faculty of Science and Technology, URL: <http://hdl.handle.net/10026.1/2258>, 2006.
- [104] S. Liu, Y. Wei y Y. Gao, «3D path planning for AUV using fuzzy logic,» de *Computer Science and Information Processing (CSIP), 2012 International Conference on, 24-26 Aug. 2012, IEEE, DOI: 10.1109/CSIP.2012.6308925*, 2012.
- [105] Lloyd's, «COLREGS - International Regulations for Preventing Collisions at Sea,» Lloyd's Register or International Maritime Organization, 2005.
- [106] H. Ying, Fuzzy Control and Modeling: Analytical Foundations and Applications, Wiley-IEEE Press ISBN : 9780470544730, URL: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?bknumber=5263877>, 2000.
- [107] G. Antonelli, Underwater Robots, Springer Tracts in Advanced Robotics, eBook ISBN, 978-3-319-02877-4, 2014.
- [108] T. Fossen, T. Arne y T. Perez, A Survey of Control Allocation Methods for Underwater Vehicles, ISBN 978-953-7619-49-7,, 2008.
- [109] Volz-servos, «Technical Specification Sumergible DA22SUB,» 2014. [En línea]. Available: [http://www.volz-servos.com/DA22SUB/#popBox\\_stacks\\_in\\_3520\\_page42](http://www.volz-servos.com/DA22SUB/#popBox_stacks_in_3520_page42), [http://www.volz-servos.com/resources/Downloads/DataSheets/DA-22-SUB\\_Datasheet\\_uni.pdf](http://www.volz-servos.com/resources/Downloads/DataSheets/DA-22-SUB_Datasheet_uni.pdf). [Último acceso: 2014-2017].
- [110] C. D. Technology, «HEAVY DUTY PROFESSIONAL SERIES TONE SERVO SSPS-105,» [En línea]. Available: [http://www.ckdesigntech.com/pdf/10\\_tone105%20%206-25-13.pdf](http://www.ckdesigntech.com/pdf/10_tone105%20%206-25-13.pdf). [Último acceso: 2014-2017].
- [111] S. USA, «WATERPROOF High Voltage Digital Servo Código: SW1211SG,» 2013. [En línea]. Available:



- [http://www.savoxusa.com/product\\_p/savsw1211sg.htm](http://www.savoxusa.com/product_p/savsw1211sg.htm). [Último acceso: 2014-2017].
- [112] T. Fossen y A. Ross, «Nonlinear modelling, identification and control of UUVs,» de *Advances in Unmanned Marine Vehicles*, e-ISBN: 9781849190534, 2006.
- [113] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, England: John Wiley & Sons Ltd, 1994.
- [114] T. I. Fossen, *Marine Control Systems Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Marine Cybernetics, Trondheim, Norway, 2002.
- [115] T. I. Fossen, *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, First Edition. John Wiley & Sons Ltd. ISBN: 978-1-119-99149-6, 2011.
- [116] S. Wadoo y P. Kachroo, *Autonomous Underwater Vehicles: Modeling, control design, and simulation*, LLC, USA: Taylor & Francis Group, 2011.
- [117] T. Perez, *Ship Motion Control: Course Keeping and Roll Stabilization Using Rudder and Fins*, London: Springer, 2005.
- [118] N. Kornev, *Lectures on ship manoeuvrability.*, Universitat Rostock: Faculty of Mechanical Engineering and Marine Technology, 2013.
- [119] T. Presterio, *Verification of a six degree of freedom simulation model for the remus autonomous underwater vehicle*, California: . Master's thesis, University of California at Davis, 2001.
- [120] B. Ferreira, Matos y Cruz, «Fault Tolerant Depth Control of the MARES AUV,» de *Challenges and Paradigms in Applied Robust Control*, Andrzej Bartoszewicz, ISBN 978-953-307-338-5, 2011.
- [121] E. Vega, O. Chocron, , J. V. Ferreira y M. Benbouz, «Evaluation of AUV fixed and vectorial propulsion systems with dynamic simulation and non-linear control,» de *IEEE IECON 41st Annu. Conf. Ind. Electron. Soc.* <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7392221>, 2015.
- [122] K. OGATA, *INGENIERIA DE CONTROL MODERNA 5ª ED*, PRENTICE-HALL; ISBN: 9788483226605, 2010.
- [123] M. Fingas y C. Brown, «Review of new developments for oil spill remote sensing. Proc. 4th Int,» de *Airborne Remote Sensing Conference. ERIM*, 1999.

## Referencias

- [124] I. Masmitja, J. González, J. Prat y J. Del Rio, «. Power system of the Guanay II AUV,» de *ACTA IMEKO. e-Journal of the International Measurement Confederation (IMEKO)*..
- [125] S. Gomariz, I. Masmitjà, J. González, G. Masmitjà, J. Prats, C. Batlle y D. Sarria, «Mathematical model of the Guanay II AUV,» de *OCEANS'13 MTS/IEEE Bergen : The Northern dimension and Challenges. ISSN/ISBN: 978-1-4799-0000-8*, Bergen Noruega , 2013.
- [126] J. Wu, J. Liu y Huixi Xu, «A variable buoyancy system and a recovery system developed for a deep-sea AUV Qianlong I,» de *OCEANS, TAIPEI*, 2014.
- [127] K. ASTROM y C. KALLSTROM, «Identification of ship steering dynamics,» *Automatica*, vol. 12, pp. 9-22, 1976.
- [128] P. Ridao, A. Tiano, A. El-Fakdi, M. Carreras y A. Zirilli., «On the identification of non-linear models of unmanned underwater vehicles,» *Control Engineering Practice-Guidance and control of underwater vehicles.*, 2004.
- [129] K. D. Do y J. Pan, *Control of Ships and Underwater Vehicles Design for Underactuated and Nonlinear Marine Systems*, London: Springer Verlag London Limited ISBN 978-1-84882-729-5, 2009.
- [130] A. Aguiar y J. Hespanha, «Trajectory-tracking and path-following of underactuated autonomous vehicles with parametric modeling uncertainty,» *Automatic Control IEEE Transactions* , vol. 52, nº 8, pp. 1362-1379, 2007.
- [131] F. Valenciaga, P. Puleston, O. Calvo y G. Acosta, «Trajectory tracking of the cormoran auv based on a pi-mimo approach,» de *OCEANS, Europe*, 2007.
- [132] M. Breivik y T. Fossen, «Principles of guidance-based path following in 2d and 3d. In Decision and Control,» de *2005 and 2005 European Control Conference CDC-ECC '05. 44th IEEE Conference* , 2005.
- [133] G. Antonelli, S. Chiaverini, N. Sarkar y M. West. , «Adaptive control of an autonomous underwater vehicle: experimental results on odin. Control Systems Technology,» *IEEE Transactions* , vol. 9, nº 5, pp. 756-765, 2001.
- [134] P. Maurya, E. Desa, A. Pascoal, G. Navelkar, R. Madhan, A. Mascarenhas, S. Prabhudesai, S. Afzulpurkar, A. Gouveai, S. Naroji y L. Sebastiao, «Control of the maya auv in the vertical and horizontal planes: Theory and practical results,» de *7th IFAC Conference MCMC2006 (Maneuvering and Control of Marine Craft)*, 2006.

- [135] A. Pascoal y C. Silvestre, «Depth control for the infante auv using gain-scheduled reduced order output feedback,» *Science Direct*, pp. 883-895, 2007.
- [136] W. J. Rugh y J. S. Shamma, «Research on gain scheduling,» *Automatica*, vol. 36, nº 10, pp. 1401 - 1425, 2000.
- [137] K.-H. Tu y J. Shamma, «Nonlinear gain-scheduled control design using setvalued methods,» de *American Control Conference*, 1998.
- [138] M. Chilali y P. Gahinet, «H inf design with pole placement constraints: an lmi approach,» *Automatic Control, IEEE Transactions*, vol. 41, nº 3, pp. 358-367, 1996.
- [139] S. Smith, G. Rae y D. Anderson, «Applications of fuzzy logic to the control of an autonomous underwater vehicle. In Fuzzy Systems,» *Second IEEE International Conference*, vol. 2, pp. 1099-1106, 1993.
- [140] T. Takagi y M. Sugeno., «Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control,» *IEEE Transactions on SMC*, vol. 15, nº 1, pp. 116-132, 1985.
- [141] X. Shi, J. Zhou, X. Bian y J. Li, «Fuzzy sliding-mode controller for the motion of autonomous underwater vehicle,» de *IEEE International Conference, Mechatronics and Automation, ICMA* , 2008.
- [142] F. Song y S. Smith, «Design of sliding mode fuzzy controllers for an autonomous underwater vehicle without system model,» de *OCEANS MTS/IEEE Conference and Exhibition*, 2000.
- [143] T. Kim y J. Yuh, «A novel neuro-fuzzy controller for autonomous underwater vehicles,» de *Robotics and Automation ICRA. IEEE International Conference* , 2001.
- [144] P. Encarnacao y A. Pascoal., «3d path following for autonomous underwater vehicle,» de *In Decision and Control, The 39th IEEE Conference on, volume 3, pages 2977 - 2982*, 2000.
- [145] L. Lapierre, D. Soetanto y A. Pascoal., «Nonlinear path following with applications to the control of autonomous underwater vehicles,» de *Decision and Control ,42nd IEEE Conference on, volume 2, pages 1256 - 1261 Vol.2, dec.*, 2003.
- [146] K. Do y J. Pan., «Robust and adaptive path following for underactuated autonomous underwater vehicles,» de *American Control Conference, volume 3, pages 1994 - 1999 vol.3, june.,* 2003.

## Referencias

- [147] M. Breivik y T. Fossen, «A unified concept for controlling a marine surface vessel through the entire speed envelope,» de *Intelligent Control, IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation*, pages 1518 - 1523, june, 2005.
- [148] P. Encarnacao y A. Pascoal., «Combined trajectory tracking and path following: an application to the coordinated control of autonomous marine craft,» de *Decision and Control, 40th IEEE Conference on*, volume 1, pages 964 - 969 vol.1, 2001.
- [149] T. Dong, X. Liao, R. Zhang, Z. Sun y Y. Song, «Path tracking and obstacles avoidance of uavs - fuzzy logic approach,» de *Fuzzy Systems, FUZZ '05. The 14th IEEE International Conference on*, pages 43 -48, may , 2005.
- [150] M. A, «Obstacle Detection by a Forward Looking Sonar Integrated in an Autonomous Underwater Vehicle,» de *10.1109/OCEANS.2000.881281*, 2000.
- [151] S. Karabchevsky, «AUV real-time acoustic vertical plane obstacle detection and avoidance,» de *Autonomous Underwater Vehicles (AUV), IEEE/OES*, 2012.
- [152] Z. Yan, «Mapping and Obstacle Avoidance Using Multi-Range Sonar for BSA-AUV:Methodology and Lake Trial,» de *OCEANS*, 2011.
- [153] K. Teo, «Obstacle detection, avoidance and anti collision for MEREDITH AUV,» de *OCEANS, MTS/IEEE Biloxi - Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges*, 2009.
- [154] A.Pascoal y C. Silvestre., «Depth control for the infante auv using gain-scheduled reduced order output feedback,» *Science Direct*, pp. 883-895, 2007.
- [155] C. Galarza, I. Masmijtja, J. González, J. Prat, S. Gomariz y J. Del Rio, «Design obstacle detection system for AUV Guanay II,» de *Sixth International Workshop on Marine Technology MARTECH*, Cartagena, 2015.
- [156] I. Masmijtja, J. González y S. Gomariz, «Buoyancy model for Guanay II AUV,» de *OCEANS MTS/IEEE. "IEEE Xplore"* <http://hdl.handle.net/2117/24443>, Taipei, 2014.
- [157] Unesco, «Tenth report of the joint panel on oceanographic tables and standards,» Unesco technical papers in marine science 36, Sidney, BC. Canada , 1980.
- [158] FESTO, «Sistemas de medición de recorrido,» 2014. [En línea]. Available: 10 [https://www.festo.com/cat/es\\_es/data/doc\\_es/PDF/ES/MLO-MME\\_ES.PDF](https://www.festo.com/cat/es_es/data/doc_es/PDF/ES/MLO-MME_ES.PDF). [Último acceso: 2014-2017].

- [159] Trittech, «software notes for controlling and operating RS 232 Sonar,» Trittech, 2010.
- [160] A. Ghatak , Pratihar y Kumar. , «Online Measurement of Obstacles' Distances Using Forward Looking Sonar Sensor Mounted on an Experimental AUV,» *IEEE*, 2006.
- [161] A. Héetet, I. Quidu y Y. Dupas., «Obstacle Detection and Avoidance for AUV: problem analysis and first results (Redermor),» de *CMM'06*, Brest, France, 2006.