

Universidad Politécnica de Cartagena

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Naval y Oceánica

Trabajo Fin de Grado

Cálculo y adaptación de un Vehículo Autónomo Submarino para el incremento de su capacidad operacional en visión artificial

Titulación: Grado en Arquitectura Naval e Ingeniería de Sistemas Marinos

Autor: Álvaro Díaz Sabater

Directores: Javier Gilabert Cervera

José Enrique Gutiérrez Romero

Contenido

1	Introducción.....	10
2	Objetivos.....	10
3	Historia de los AUVs.....	10
3.1	Aplicaciones de los AUVs	13
3.2	Estudio y recopilación de información sobre diferentes vehículos con módulos de visión artificial integrados.	14
3.2.1	PLUTO Plus	15
3.2.2	REMUS 6000	17
3.2.3	Bluefin-9.....	19
3.2.4	SAAB AUV 62-MR.....	21
3.2.5	Thesesus	23
4	Metodología.....	26
4.1	Conceptos de óptica acuática.....	26
4.1.1	Absorción de la luz.....	27
4.1.2	Temperatura de Color.....	28
4.1.3	Coeficiente de extinción de la luz	31
4.2	Introducción al CFD	32
4.2.1	Historia de la CFD.....	32
4.2.2	Campos de aplicación de la CFD	34
4.2.3	Ventajas e inconvenientes de la CFD.....	35
4.2.4	Aproximación a la realidad	35
4.2.5	Clasificación de las herramientas CFD	36
4.2.6	Algunos modelos físico-matemáticos empleados en CFD's.....	37
4.2.7	Modelos de turbulencia	43
4.2.8	Modelización de la capa límite.....	49
4.2.9	El problema de la superficie libre	50
4.2.10	Técnicas básicas de CFD.....	51
4.2.11	Mallado de problemas: discretizando el dominio espacial.....	53
4.2.12	Características básicas de los programas CFD.....	56
4.2.13	Introducción del software a utilizar.....	59

5- Cálculo y diseño del módulo de visión artificial óptimo para un vehículo IVER2-Ecomapper.....	61
5.1 Descripción del vehículo IVER2-Ecomapper.....	61
5.1.1 Misiones probables.....	61
5.1.2 Requisitos de diseño.....	62
5.1.3 Características de diseño	63
5.1.4 Componentes funcionales	64
5.1.5 Software	67
5.1.6 Pruebas del sistema	70
5.2 Módulos a insertar en el vehículo	71
5.2.1 Visión frontal.....	71
5.2.2 Visión Estereoscópica	76
5.2.3 Visión Anillo.....	77
5.3 Materiales a emplear en el diseño.....	78
5.3.1 POM.....	78
5.3.2 EN-AW 5083.....	79
5.3.3 CFRP.....	79
5.3.4 Acero Inoxidable S325.....	80
5.3.5 Metacrilato	80
5.4 Selección de focos	81
5.5 Balance de pesos	82
5.6 Estudio eléctrico de los consumidores.....	83
5.6.1 Situaciones de consumo eléctrico	84
5.6.2 Análisis de los consumidores	84
6 Procedimiento de cálculo de la resistencia al avance mediante CFD.....	93
6.1 Primera aproximación.....	93
6.2 Creación del volumen de control	95
6.3 Introducción de la geometría	96
6.4 Modelos de turbulencia seleccionados	97
6.5 Parámetros de la pared.....	98
6.6 Discretización del tiempo	98
6.7 Simulaciones a realizar	100

6.8 Resultados	100
7 Conclusiones.....	112
8 Bibliografía.....	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características Pluto Plus.	16
Tabla 2. Características Remus 6000.	19
Tabla 3. Características BlueFin.....	21
Tabla 4. Características SAAB AUV 62-MR.....	22
Tabla 5. Características Theseus.....	24
Tabla 6. Características Cámara GoPro Hero 4.....	72
Tabla 7. Características Laser WL 58.	73
Tabla 8. Características Focos.	75
Tabla 9. Distribución de pesos a lo largo del vehículo.....	82
Tabla 10. Característica de pesos del morro inicial.....	82
Tabla 11. Distribución de pesos módulo de visión artificial.	83
Tabla 12. Características Misión 1.	85
Tabla 13 Características Misión 2	86
Tabla 14. Características Misión 3.	87
Tabla 15. Características Misión 4.	88
Tabla 16 Características Misión 5	90
Tabla 17. Cálculo de la resistencia de fricción del AUV Inicial Con Apéndices.....	94
Tabla 18. Coeficientes Volumen de Control.	95
Tabla 19. Coeficientes a introducir en la simulación AUV Neptuno Sin Apéndices.....	99
Tabla 20. Resultados CFD.....	107

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje AUV con y sin visión.....	15
Figura 2. Vehículo Pluto Plus.....	16
Figura 3. Vehículo Remus 6000.....	19
Figura 4. Fotos tomadas por el Remus 6000.....	19
Figura 5. Vehículo BlueFin.....	21
Figura 6. Vehículo SAAB AUV 62-MR.....	23
Figura 7. Vehículo Theseus.....	24
Figura 8. Regla del cuadrado inverso.....	27
Figura 9. Radiación del cuerpo negro 4000 K.....	29
Figura 10. Radiación del cuerpo negro 5000 K.....	29
Figura 11. Radiación del cuerpo negro 6000 K.....	29
Figura 12. Radiación del cuerpo negro 7000 K.....	29
Figura 13. Radiación del cuerpo negro 10000 K.....	30
Figura 14. Radiación del cuerpo negro 20000 K.....	30
Figura 15. Problema a resolver.....	36
Figura 16. Velocidad a lo largo de un periodo.....	42
Figura 17. Mallado Estructurado.....	54
Figura 18. Mallado No Estructurado.....	55
Figura 19. Mallado Multibloque.....	56
Figura 20. Progreso de cálculo de un programa CFD.....	58
Figura 21. Diseño Inicial IVER2-EcoMapper.....	61
Figura 22. Combinación de imágenes superpuestas en VectorMap.....	69
Figura 23. Ejemplo de colocación de Waypoints.....	69
Figura 24. Misión de barrido con Waypoints.....	70
Figura 25. Cámara Go Pro Hero 4.....	72
Figura 26. Modelización Cámara Go Pro Hero 4.....	73
Figura 27. Laser WL 58.....	74
Figura 28. Modelización Laser WL 58.....	74
Figura 29. Foco AC-LED-001A.....	75
Figura 30. Modelización Foco.....	75

Figura 31. Disposición de la estructura frontal del cabezal de visión.	76
Figura 32. Disposición módulo de visión frontal.	76
Figura 33. Plano estructura Módulo Estereoscópico.	77
Figura 34. Plano disposición Módulo Estereoscópico.	77
Figura 35. Plano disposición del Módulo Anillo.	78
Figura 36. Diseño final Neptuno renderizado.	81
Figura 37. Misión 1 VectorMap.	85
Figura 38. Misión 2 VectorMap.	86
Figura 39. Misión 3 VectorMap.	87
Figura 40. Misión 4 VectorMap.	88
Figura 41 Misión 5	90
Figura 42. Comparación de la resistencia de Froude y Hughes.	94
Figura 43. Volumen de control AUV Inicial sin Apéndices.	95
Figura 44. Geometría AUV Inicial sin Apéndices.	96
Figura 45. Geometría AUV Inicial con Apéndices.	96
Figura 46. Geometría AUV Neptuno sin Apéndices.	96
Figura 47. Geometría AUV Neptuno con Apéndices.	97
Figura 50. Modelo Inicial sin apéndices 1 Kn.	100
Figura 51. Modelo Inicial sin apéndices 2 Kn.	101
Figura 52. Modelo Inicial sin apéndices 2,5 Kn.	101
Figura 53. Modelo Inicial con apéndices 1 Kn.	102
Figura 54. Modelo Inicial con apéndices 2 Kn.	103
Figura 55. Modelo Inicial con apéndices 2,5 Kn.	103
Figura 56. Modelo Neptuno sin apéndices 1 Kn.	104
Figura 57. Modelo Neptuno sin apéndices 2 Kn.	104
Figura 58. Modelo Neptuno sin apéndices 2,5 Kn.	105
Figura 59. Modelo Neptuno con apéndices 1 Kn.	105
Figura 60. Modelo Neptuno con apéndices 2 Kn.	106
Figura 61. Modelo Neptuno con apéndices 2,5 Kn.	106
Figura 62. Resistencia AUV Inicial sin apéndices.	108
Figura 63. Resistencia AUV Inicial con apéndices.	109
Figura 64. Resistencia AUV Neptuno sin apéndices.	109

Figura 65. Resistencia AUV Neptuno con apéndices..... 110

Capítulo 1

Introducción, Objetivos y Antecedentes Históricos



1 Introducción

Un vehículo autónomo submarino (AUV) es un dispositivo robótico equipado con un sistema de propulsión, controlado y pilotado por un ordenador de a bordo, y maniobrable en tres dimensiones. Este nivel de control, bajo la mayoría de condiciones ambientales, permite que el vehículo pueda seguir trayectorias pre programadas precisas. Pueden estar equipados con sensores a bordo de él, proporcionándoles la capacidad de obtener series espaciales y temporales de mediciones de diferentes parámetros oceánicos referenciándolos tanto espacial como temporalmente.

El AUV puede ser programado para navegar a una presión o profundidad constante o variar su profundidad mientras se mueve a través del agua. Dispone de una alta capacidad de toma de datos con muestreos de alta frecuencia, lo que les permite ser altamente productivos, también se aprecia en su relación esfuerzo realizado por unidad de muestra obtenida.

Una de las grandes ventajas de los AUVs es la autonomía que les permite trabajar en continuo del orden de entre 8 y 50 horas, pudiendo navegar con una velocidad de entre 0,5 y 2,5 m/s.

2 Objetivos

En el presente proyecto se propone el estudio y diseño de un módulo de visión artificial para el vehículo IVER2-Ecomapper con el fin de aumentar su capacidad operacional. Los objetivos de este módulo de visión artificial serán los de dar al vehículo la capacidad de una visión de 360° alrededor del vehículo, visión estereoscópica del fondo marino, así como visión en el sentido del avance del AUV. Se han establecido estos objetivos de acuerdo a las misiones en las que se pretende que vaya a actuar el vehículo como pueden ser mapeo del lecho marino, reconocimiento de áreas geográficas e inspección de buques.

3 Historia de los AUVs

El origen de AUV muy probablemente está vinculado al Torpedo "Fish" de Whitehead en 1866. El primer torpedo de Whitehead logró una velocidad de más de 3,0 m / s, y corrió durante 700 m. El vehículo fue impulsado por aire comprimido y llevaba una carga explosiva. Ignorando el hecho de que llevara este tipo de carga, podría ser considerado como el primer AUV.

La necesidad de obtener datos oceanográficos a lo largo de trayectorias precisas bajo el hielo motivaron a Stan Murphy, Bob Francois, y más tarde Terry Ewart del Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad de Washington a comenzar el desarrollo de lo que pudo haber sido el primer AUV, tal y como lo entendemos hoy en día, a finales de

1950. Su trabajo condujo al desarrollo y operación de Self Propelled Underwater Research Vehicles (SPURV). SPURV I, comenzó a funcionar en los años 60 y ayudó a la investigación durante mediados de los 70. SPURV I tenía un desplazamiento de 480 kg, y podía funcionar a 2,2 m/s durante 5,5 horas a profundidades de 3 km. El vehículo era controlado desde la superficie acústicamente y de forma autónoma podría funcionar a una presión constante, emerger o sumergirse entre dos profundidades. Los investigadores utilizaron el vehículo para realizar mediciones de conductividad y temperatura a lo largo de las líneas isobáricas. El vehículo fue utilizado más tarde en los años 70 para apoyar las observaciones de difusión vertical y horizontal utilizando un trazador de tinta a una profundidad de 1 kilómetro. El vehículo era capaz de rastrear la tinta 66 horas después de que éste se hubiera liberado. SPURV II era más eficaz que SPURV I, y se utilizó para estudiar la dispersión de las estelas de los submarinos durante los años 70 y 80. Este vehículo desarrolló más de 400 misiones.

Posteriormente el Massachusetts Institute of Technology (MIT) diseñó varios submarinos autónomos en la década de los 70. La antigua Unión Soviética, por su parte, también desarrolló varios modelos (SKAT, L1, L2, etc.) en la misma época.

El Naval Ocean System Center, ahora SPAWAR, comenzó el desarrollo del Unmanned Search Advanced System (AUSS) en 1973 en respuesta al hundimiento del USS Thresher, el USS Scorpion, y la pérdida de la bomba H de Palomares. El vehículo estuvo operativo en 1983. El AUSS desplazaba 907 kg, utilizaba 20 kw/hora de energía en las baterías de zinc plata, y fue probado a 6 km. Tenía un sistema de comunicación acústica que transmitía imágenes de vídeo a través del agua.

En 1976 fue diseñado el Epaulard, el primer AUV capaz de realizar fotografía submarina profunda y estudios batimétricos.

En los años 80, la llegada de avances tecnológicos afecta beneficiosamente a los desarrolladores de AUVs. Ordenadores y memorias pequeños y energéticamente eficientes ofrecían el potencial para implementar sistemas complejos de navegación y algoritmos de control en vehículos autónomos. El avance en ingeniería del software permitió desarrollar sistemas capaces de implementar visión. Esta década fue el punto de inflexión en los AUV. En 1980 se celebró la primera edición del International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST6).

WHOI's Autonomous Benthic Explorer (ABE) también se desarrolló durante la década de los 90 y completó su primera misión científica en 1994. ABE desplazaba 680 kg y podía funcionar durante un máximo de 34 horas a una profundidad de 5 km, y por lo general viaja aproximadamente a 0,75 m/s. Lleva seis propulsores, por lo que es un

vehículo muy maniobrable en las tres dimensiones. Estas capacidades hacen de ABE una excelente plataforma para realizar muestreo del fondo en terreno áspero. ABE ha completado más de 80 inmersiones en apoyo de la ciencia.

International Submarines Engineering, Ltd's Theseus fue desarrollado a principios de los 90 para los EE.UU. y establecimientos de defensa canadienses. Theseus desplazaba 8.600 kg, y podría funcionar a 2 m/s durante 100 horas a una profundidad de 1 kilómetro. El vehículo colocó con éxito 190 kilómetros de cable de fibra óptica bajo el hielo en el año 1996; su longitud total misión fue de 365 km y se completó en 50 horas.

El vehículo REMUS de WHOI fue desarrollado a finales de los 90 para apoyar los objetivos científicos en el observatorio LEO-15 en Tuckerton, Nueva Jersey, con fondos de la NSF y NOAA. En la actualidad es propiedad de Kongsberg. Remus completó su primera misión científica en 1967. El vehículo desplaza 36 kg y puede funcionar durante un máximo de 20 horas a 1,5 m/s, y hasta una profundidad de 100 m. Actualmente hay más de 50 vehículos de Remus en 20 configuraciones diferentes que están siendo operados independientemente por numerosas universidades, laboratorios de la Marina estadounidense, de defensa británicos, y varias ramas de la Marina de Estados Unidos. No es posible determinar cuántas misiones se han realizado por Remus. La misión REMUS más larga duró 17 horas. El vehículo viajó 60 kilómetros en 1,75 m/s, a una profundidad máxima de 20 m de la costa de Nueva Jersey en el observatorio LEO-15.

Autosub del Southampton Oceanographic Center fue desarrollado a principios de los años 90 para proporcionar a los científicos la capacidad de vigilar los océanos desde nuevas perspectivas. Autosub completó su primera misión científica en 1998. El vehículo desplaza 1.700 kg, y puede viajar máximo hasta 6 días a 1,6 m/s, a profundidades de hasta 1,6 kilómetros. Autosub ha completado 271 misiones, totalizando 750 horas y que cubre 3.596 kilómetros. Su inmersión más profunda fue 1 km y su misión más larga duró 50 horas.

El cambio de siglo marcó el comienzo de la primera empresa comercial para ofrecer servicios de estudios AUV en aguas profundas (hasta 3 km). C & C Technologies de Lafayette, Louisiana ofrece Hugin 3000 UV a la carta. El vehículo fue fabricado por Kongsberg Simrad de Noruega y desplaza 1.400 kg, puede operar a 2,05 m/s durante 40 horas utilizando una pila de combustible de aluminio/oxígeno. C & C Technologies ha completado más de 17.702 kilómetros de cartografía geofísica, algunos a 3 km, ya que el vehículo se ofreció por primera vez en el año 2000.

En el nuevo siglo, es cuando aparecen los primeros modelos comerciales. Los AUVs tienen el potencial de revolucionar nuestro acceso a los océanos, abordando problemas críticos a los que se enfrenta la comunidad científica dedicada al campo marino, tales como búsqueda y cartografía de los lechos marinos, evaluación del cambio climático o vigilancia del hábitat marino entre otras. Hasta hace relativamente poco, los AUVs habían sido empleados en tareas limitadas por la tecnología disponible. Con el desarrollo de mayores capacidades de procesamiento y baterías de mayor capacidad actualmente son empleados en un número cada vez mayor de tareas, con roles y misiones constantemente en evolución.

3.1 Aplicaciones de los AUVs

Se pueden distinguir diferentes tipos de tareas o aplicaciones asignadas a los AUVs:

Comercial

Existen múltiples aplicaciones comerciales para los AUVs, son empleados habitualmente en empresas petrolíferas, para realizar detallados estudios y mapas del lecho marino, antes de la construcción de infraestructuras y tuberías submarinas, algunos ejemplos son Remus 6000, SeaBED, C-Surveyor II, etc. También tienen aplicación en la colocación y revisión de cables como pueden ser Echo Ranger, ALISTAR, Hugin 100, etc. Otras aplicaciones son la revisión y reparación de infraestructuras submarinas entre los que destacan RAUVER, Nessie IV, SAUVIM, etc. Los AUVs permiten realizar estudios detallados en zonas en las que las batimetrías son poco efectivas y/o muy costosas de realizar.

Militar

Entre las misiones típicas para un AUV en el ámbito militar se pueden destacar, explorar un área concreta para localizar minas submarinas (SeaOtter MKII, Talisman L, OKPO 300, Minesniper, etc.), patrullar una zona, como por ejemplo una playa, en busca de objetos no identificados (SeaWolf, Bluefin-9, Hovering AUV, etc.). También son empleados en guerra antisubmarina, ayudando en la detección de submarinos (SOG Seaglider, Gavia Defence, Bluefin-21, etc.). Son capaces de desactivar artefactos explosivos (Bluefin-9 Sealion, Bluefin-12D, Hovering AUV, etc.).

Investigación

Los científicos emplean los AUVs para realizar estudios de playas (Caribou, Morpheus, Aqua2, etc.), estudios geofísicos (LMRS, Nereus, Explorer, etc.), investigaciones hidroacústicas (Caribou, NPS Remus 100, Muscle), estudios de la ciencia marina (Subsea Glider, Gavia scientific, SQX-500, etc.), estudios de campos minerales (Benthic Rover, Hugin 300, Echo Ranger, etc.) o estudios oceanográficos (Lucille,

Henry Bigelow, Odyssey IV, etc.). También pueden realizar vigilancia y evaluación del medio ambiente (Spray Glider, Autosub3, Infante, etc.). También realizan trazados de mapas de costas (SeaWolf, MBARI Seafloor mapping AUV, Iver2, etc.), zonas de agua dulce (SeaWolf, GeoSwath Plus Remus 100, Endurance, etc.), y fondos marinos (Remus 6000, Bluefin-12S, Caribou, etc.).

Académico / Recreacional

Existen varias competiciones que permiten poner a prueba AUVs construidos por estudiantes o con fines recreacionales, tales como ROBOSUB (en Estados Unidos) o SAUC-E (en Europa), en los que deben realizar pruebas en entornos generalmente cerrados o acotados.

3.2 Estudio y recopilación de información sobre diferentes vehículos con módulos de visión artificial integrados.

El rol principal de un sistema de visión artificial cuando se encuentra en un AUV, es el de procesar y extraer la información de imágenes para su posterior empleo en la navegación del submarino. Sin embargo, en entornos marinos tales como océanos, las condiciones dinámicas de la luz o las turbulencias marinas pueden afectar enormemente a las imágenes capturadas, de tal forma que estas anomalías deben ser tenidas en cuenta a la hora de procesar dichas imágenes.

Cabe destacar que el uso de la visión artificial no se restringe al procesamiento de imágenes obtenidas solamente por sensores ópticos sino también las provenientes de sensores acústicos.

Para labores de detección de largo alcance resulta más conveniente el empleo de sensores acústicos, pero en entornos que requieren de gran precisión en corta distancia, se torna imprescindible el uso de sensores ópticos. Otras aplicaciones de la visión artificial en AUVs son evitar obstáculos, reconocimiento de objetos, mantenimiento e inspección de estructuras, o seguimiento de objetos.

La instalación de elementos de visión en vehículos AUV es relativamente nueva, por ello hay muy poca información sobre ellos. En el siguiente gráfico se puede observar la proporción entre diferentes vehículos y dentro de ellos cuales poseen visión óptica en un estudio de treinta vehículos diferentes:

Porcentaje AUV Con y Sin Vision

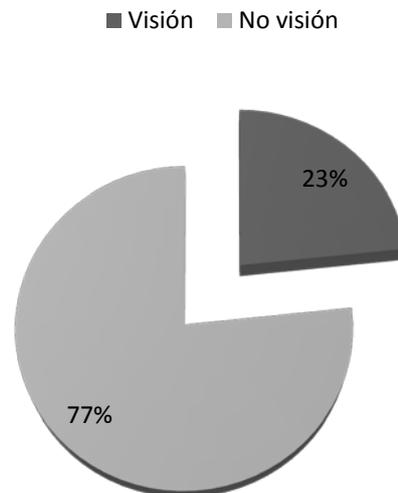


Figura 1. Porcentaje AUV con y sin visión.

Ahora se procederá a estudiar los vehículos más destacados que portan visión artificial por medio de sensores ópticos.

3.2.1 PLUTO Plus

El Pluto Plus es un vehículo submarino no tripulado (ROV) diseñado para su uso en la identificación de minas bajo el agua y su destrucción. El vehículo funciona con una batería, tiene una velocidad máxima de 6 nudos y una autonomía de 2 a 6 horas. Este vehículo porta un domo de metacrilato en su parte frontal en la que alberga una cámara frontal.

Las ventajas principales de este vehículo son:

- El más compacto y ligero de su categoría
- Máxima distancia operativa de su clase
- Excelente maniobrabilidad y facilidad de posicionamiento
- Máxima autonomía de su clase
- Plena rotación en los tres ejes de los sensores, de la videocámara y de la iluminación.
- Identificación de alta frecuencia de objetivos en condiciones de visibilidad cero

Campo de aplicación:

- Se utiliza en el ámbito de defensa como vehículo de inspección y operaciones de detección y eliminación de minas.

La Tabla 1 muestra las especificaciones técnicas de este vehículo y la Figura 2 un ejemplo del Pluto plus

Características	Especificaciones
Desplazamiento	315 kg
Velocidad	6 kn
Sensores	3 sonar 1 videocámara
Autonomía	2- 6 horas
Profundidad de operación	300 m
Sistema de propulsivo	2 motores horizontales 2 motores verticales 1 motor transversal
Capacidad de carga útil	100 kg
Sistema construcción	Modular

Tabla 1. Características Pluto Plus.



Figura 2. Vehículo Pluto Plus.

3.2.2 REMUS 6000

El REMUS 6000 fue diseñado bajo un programa de cooperación entre la Oficina Naval Oceanográfica, la Oficina de Investigación Naval y el Instituto Oceanográfico Woods Hole (WHOI), en apoyo de las operaciones autónomas en aguas profundas. El AUV REMUS 6000 cuenta con el mismo software probado y los subsistemas electrónicos que se encuentran en el REMUS 100 lo que le aportan gran fiabilidad.

Entre sus ventajas se encuentran:

- Gran variedad de profundidad de operación. El REMUS 6000 ha sido diseñado para permitir las operaciones a profundidades de agua tan grandes como 6000 metros. El diseño versátil permite también la duración de las misiones largas en zonas someras litorales.
- Diseños Personalizados. El REMUS 6000 se puede configurar para incluir una amplia gama de sensores especificados por el cliente. El conjunto de sensores puede ser reconfigurable y permite que el REMUS 6000 pueda configurarse para satisfacer requisitos específicos, y realizar diversas misiones.
- Facilidad de funcionamiento. El REMUS 6000 incorpora la misma interfaz de programas de vehículos (VIP) de la gama completa Remus. El VIP altamente refinado hace que el mantenimiento de vehículos, su comprobación, la planificación de la misión, y el análisis de datos sea rápido y fácil. Además de los indicadores, Quick Look, los controles de calidad, y una capacidad de exportación de datos sofisticada se suman a la naturaleza amigable para el usuario.
- Sistema de lanzamiento y recuperación (LARS). El sistema de lanzamiento y recuperación del REMUS 6000 está diseñado para funcionar en la popa de un barco y se puede configurar para operaciones de a bordo en unas pocas horas. El LARS es un sistema de conexión roll on/ roll off que puede ser fácilmente instalado en buques convencionales. El lanzamiento y recuperación también puede funcionar en el lateral de un barco.
- Tecnología probada. El REMUS 6000 se basa en la misma tecnología que ha llevado al REMUS 100 a la vanguardia de las operaciones autónomas.

Entre los campos de aplicación se encuentran:

Investigación marina:

- Pesquera y mapeo de hábitats.
- Bajo el hielo.
- Arqueología marina-
- Fondos marinos.

Comerciales:

- Respuesta de emergencia.
- Calidad del mar.
- Evaluación de los ecosistemas.
- Minería en alta mar.
- Localización de activos.

Defensa:

- Contramedidas de minería orgánica.
- Estudios hidrográficos.
- Búsqueda.
- Vigilancia y reconocimiento.

En la Tabla 2 se recogen las especificaciones del Remus 6000 y en la Figura 3 una imagen del mismo.

Características	Especificaciones
Dimensiones	Eslora: 3.84 m Diámetro: 71 cm Peso: 862 kg
Velocidad	Hasta 5 Kn
Sistemas de Navegación	Inercial; LBL; GPS; USBL
Sistemas de Comunicación	Modem acústico, Iridium Satélite, WiFi 2.4 GHz
Sensores	Doppler Acústico y Medidor de corriente; Sonar de barrido lateral de doble frecuencia; Fluorímetro; CTD; Sonar frontal; video cámara; cámara electrónica; perfilador de sub-fondo
Autonomía	22 horas
Profundidad de operación	6000 m
Sistema de Energía	11 kW.hr Lion recargable
Sistema de propulsivo	Motor transmisión directa DC “Brushless” Hélice abierta de 2 palas
Aplicaciones	Medidas contra minas; Estudios Hidrográficos; Seguridad en Puertos; Operaciones Pesqueras; Cartografía de fondos; Estudios Científicos

Características	Especificaciones
Capacidad de carga útil	-
Sistema construcción	Modular

Tabla 2. Características Remus 6000.



Figura 3. Vehículo Remus 6000.

Con respecto al sistema de visión artificial mediante sensores ópticos, el vehículo posee una cámara digital con luz estroboscópica que capta fotografías digitales cuando el vehículo se encuentra a 10 metros del fondo marino. Marca en las fotografías con la posición y el tiempo, y los almacena en un disco duro a bordo, descargable en la superficie. Esta cámara se posiciona en la parte delantera del vehículo en su posición más baja cuya muestra de fotografía obtenida se aprecia en la siguiente Figura 4.

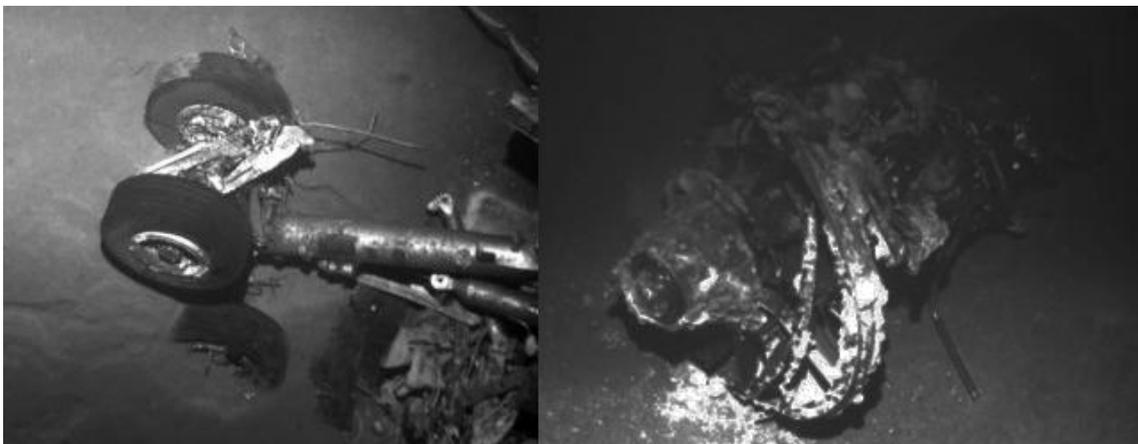


Figura 4. Fotos tomadas por el Remus 6000.

3.2.3 Bluefin-9

El Bluefin-9 es un vehículo ligero, autónomo bajo el agua con un tiempo de respuesta de misión de menos de 15 minutos. Entre sus ventajas se encuentran:

- Compacto. El peso del Bluefin-9 hace que sea fácilmente desplegable por dos personas en un bote inflable y requiere un equipo auxiliar mínimo.

- Navegación precisa. El software de navegación del Bluefin-9 combina información de los IMU y múltiples sensores incluyendo GPS, un DVL, un sensor de CT, una brújula y una cámara para proporcionar una navegación de alta precisión con un error de menos del 0,3% de la distancia recorrida, dando de alta datos de calidad sin un gran coste.
- Facilidad de uso. Un paquete de software intuitivo permite la rápida y fácil planificación y supervisión de las misiones y el rápido procesamiento después de la misión y su visualización, y es capaz de exportar los datos a un software de terceros.
- Procesamiento rápido. El fácil acceso a los subsistemas reduce el tiempo en la cubierta para el mantenimiento y acelera el ritmo operativo. Además, el Bluefin-9 es fácil de mantener en el campo debido a sus subsistemas intercambiables modulares.

Campos de aplicación

- Estudio de costas.
- Protección Ambiental y Monitoreo.
- Las contramedidas de minas (MCM).
- Seguridad de puertos.
- Artefactos sin Explotar (MUSE).
- Rápida Evaluación Ambiental (REA).
- Inteligencia, Vigilancia y Reconocimiento (ISR).

En la Tabla 3 recoge las características del Bluefin-9 y la Figura 5 muestra una imagen.

Características	Especificaciones
Dimensiones	Eslora: 1.75 m Diámetro: 24 cm Peso: 60.5 kg
Velocidad	Hasta 5 Kn
Sistemas de Navegación	CEP 50 IMU, DVL, CT sensor, compass and GPS
Sistemas de Comunicación	Comunicación Acústica, Módems de radio-frecuencia.
Sensores	Sonar de barrido lateral 900-1800 MHz; Backscatter óptico; sensor de turbulencia; CTD; video cámara
Autonomía	12 horas a 3 Kn

Características	Especificaciones
Profundidad de operación	200 m
Sistema de Energía	1.5 kW.hr Lion recargable
Sistema de propulsivo	Propulsores con tobera tipo cardan.

Tabla 3. Características BlueFin



Figura 5. Vehículo BlueFin.

3.2.4 SAAB AUV 62-MR

SAAB AUV62-MR ofrece un nivel de flexibilidad que es superior a las alternativas convencionales, tales como buques con un sensor montado en el casco. Es un sistema autónomo totalmente equipado para fines militares, el AUV62-MR es la opción moderna para contramedidas de minas. El vehículo ofrece una solución segura bajo el agua ya que es capaz de adaptarse a las cambiantes amenazas durante las operaciones navales debido que no comporta peligro al no introducir personas en el campo minado.

Ventajas

- Operaciones encubiertas. El reconocimiento efectivo y la vigilancia de las zonas bajo el agua son cruciales para el éxito de una invasión militar por mar. Equipado con los elementos de vanguardia en la recopilación de información como el posicionamiento de alta precisión, el AUV62-MR puede realizar vigilancia y reconocimiento de la zona bajo el agua inmediatamente después del despliegue. Su capacidad para funcionar de forma autónoma desde un submarino, combinado con su inherente capacidad de resistencia a largo plazo, permite a la AUV62-MR realizar toda la misión de manera eficaz.
- Capacidad multiplataforma. El AUV62-MR puede ser lanzado desde múltiples plataformas, debido a su flexibilidad y componentes adaptables. Por lo general, se recupera de la misma manera, ya sea por barco, submarino u orilla. El vehículo fue intencionalmente diseñado para parecerse a un Torpedo de Alto Peso (HWT), con las mismas interfaces mecánicas y eléctricas, lo que significa que no hay necesidad de modificación o integración si se utiliza en un submarino. Por tanto, el AUV62-MR se puede iniciar directamente desde un tubo HWT, permitiendo un rápido despliegue. Para la recuperación desde un

buque de superficie, un dispositivo de acoplamiento recupera el vehículo del agua y vuelve de nuevo a la rampa de lanzamiento.

Campo de aplicación:

- Se utiliza en el ámbito de defensa como vehículo de inspección y operaciones de detección y eliminación de minas.

En la Tabla 4 se recogen las características del SAAB AUV 62-MR y en la Figura 6 una fotografía del mismo.

Características	Especificaciones
Dimensiones	Eslora: 7 m Diámetro: 0.53 m Peso: 1000 kg
Velocidad	3 - 10.3 Kn
Sistemas de Navegación	Navegador Inercial (INS); USBL; LBL; DVL
Sistemas de Comunicación	WLAN, Radio, WLAN, UHF/VHF, Sat Link; submarina; Hydro, Acústica; Link
Sensores	Sonar para evitar obstáculos; Sonar de barrido lateral; Perfilador de sub-fondo; video cámara; CTD
Autonomía	-
Profundidad de operación	500
Sistema de Energía	-
Sistema de propulsivo	-
Aplicaciones	Medidas contra minas, Cartografía de fondos, Control Medioambiental

Tabla 4. Características SAAB AUV 62-MR.



Figura 6. Vehículo SAAB AUV 62-MR.

3.2.5 Thesseus

El desarrollo del vehículo Thesseus se inició en 1994. Desarrollado como parte del programa de Estados Unidos y Canadá, Spinnaker, Thesseus fue un gran AUV desarrollado para poner cable de fibra óptica en el fondo marino del Ártico. El vehículo fue construido entre 1993 y 1994. En 1995, se puso a prueba en aguas del sur y luego bajo el hielo de Alerta, Nunavut. Con su batería instalada, tiene una autonomía de más de 800 kilómetros. La precisión de navegación del vehículo en promedio fue de 0,4% de la distancia recorrida. El vehículo tiene una profundidad de operación de 2.000 metros. Thesseus fue el primer AUV para sentar cable de fibra óptica en el fondo del mar.

En la Tabla 5 se recogen las características del Thesseus y en la Figura 7 una imagen.

Características	Especificaciones
Dimensiones	Eslora: 10,8 m Diámetro: 1.3 m Peso: 8845 kg
Velocidad	4 Kn
Sistemas de Navegación	Navegador Inercial (INS); USBL; LBL; GPS (opcional)
Sistemas de Comunicación	Acústica de bajo nivel y radio-frecuencia
Sensores	Cámara eléctrica fija, video cámara; dos magnetómetros, sonar doppler, control para evitar obstáculos
Autonomía	1 semana (880 millas)
Profundidad de operación	1000
Sistema de Energía	600 kW.hr Lion

Características	Especificaciones
Sistema de propulsivo	Motor DC “Brushless” de 6 hp, reductora y una hélice

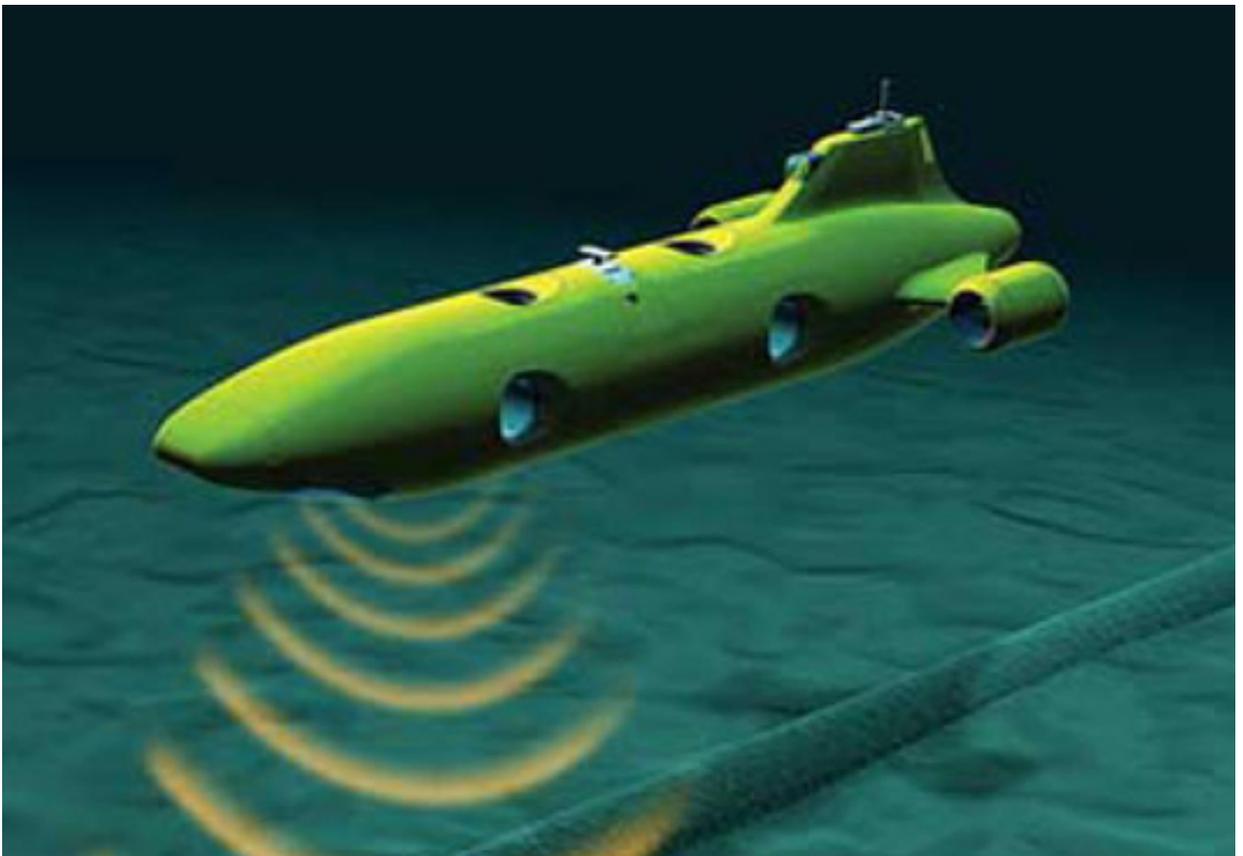
Tabla 5. Características Theseus.



Figura 7. Vehículo Theseus.

Capítulo 2

Metodología



4 Metodología

En este apartado se detallan los conceptos y procedimientos previos para el estudio y la realización del diseño del módulo de visión artificial a instalar en el vehículo. Cabe destacar el estudio de la óptica acuática y el estudio de la dinámica de fluidos computacional (CFD).

4.1 Conceptos de óptica acuática.

En primer lugar, se definen algunas unidades ópticas para explicar el diseño realizado.

Un lumen es la medida de poder de luz visible. Se define como el flujo luminoso de $1/683$ Watt de luz a 55 nm. De cualquier manera, un lumen no mide intensidad. Es generalmente usado para medir la cantidad de luz producida. Por ejemplo, un tubo fluorescente de 36 watts emite un total de 3250 lúmenes, pero este es el total de luz irradiado en todas las direcciones.

Un lux es la medida de iluminación. Un lux se define como la intensidad de flujo luminoso golpeando a una superficie a 1 lumen/metro cuadrado. La intensidad de la luz depende de la cantidad total de flujo luminoso y el área sobre el cual es esparcida. La intensidad es sólo qué cantidad de luz alcanza a la superficie.

Los fotones pueden contarse usando un contador de quantum y son reportados como Einsteins. Un Einstein es un mol de fotones. Para medir la intensidad de la luz, se mide el número de Einsteins que golpean un área en un tiempo determinado. La radiación fotosintética disponible (PAR) mide toda la luz visible (400 - 700 nm) medianamente uniforme y es reportada en Einsteins por metro cuadrado por segundo ($E.m^2.s^{-1}$).

Es importante entender la diferencia entre la salida de luz de una fuente de luz y la intensidad de la luz alcanzando a un objeto. Un amplio número de factores afectan a la cantidad de luz irradiada por una fuente que alcanza al sujeto. El factor más importante que afecta a la intensidad de la luz es la distancia entre la fuente de luz y el sujeto. Los rayos de luz a partir del punto de la fuente de luz son divergentes y así la luz se esparce sobre un área grande mientras el sujeto se mueve de la fuente de luz. La pérdida de intensidad debido a la distancia puede ser determinada y es conocida como la regla del cuadrado inverso. La regla del cuadrado inverso afirma que la intensidad de la luz será inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de la fuente de luz. La figura 8 muestra la regla del cuadrado inverso en práctica.

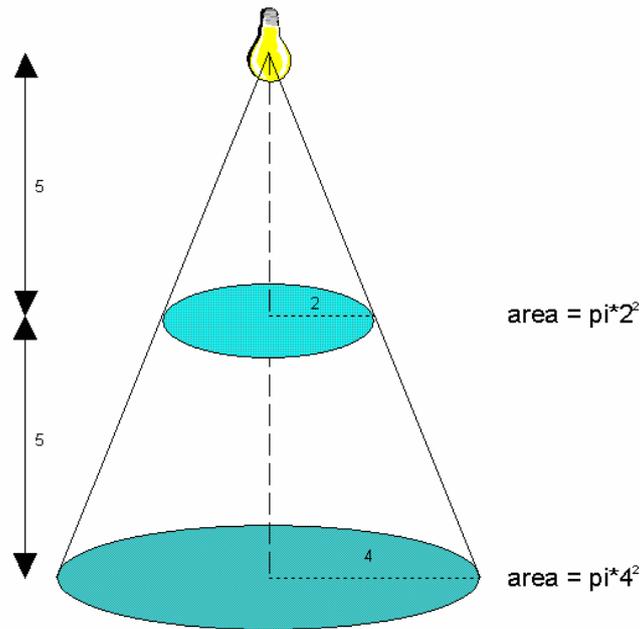


Figura 8. Regla del cuadrado inverso.

A 5 unidades de la fuente de luz, la luz se esparce sobre un área de $\pi \cdot 2^2$. A 10 unidades de la fuente de luz, la misma luz es ahora esparcida sobre un área de $\pi \cdot 4^2$. La intensidad de la luz en cualquier punto del círculo inferior será un de un cuarto de cualquier punto del círculo superior. La regla del cuadrado inverso se cumple para cualquier fuente de luz que se aproxima a un punto y se mantendrá siempre que la distancia de la fuente de luz sea más de 5 veces el diámetro más grande de la fuente de luz.

4.1.1 Absorción de la luz

El agua absorbe la luz e incluso en agua clara, alrededor del 60 % de la radiación total, entrando al agua es absorbida en el primer metro, y alrededor del 80% es absorbido en los primeros 10 metros (Gross, 1977). Adicionalmente, del 3 al 5 % de la luz que toca el agua es reflejada fuera de la superficie dependiendo del ángulo en que la luz incide en el agua (Tait, 1972). Al mediodía, el ángulo de incidencia es pequeño y hay una pequeña reflexión, pero hacia el atardecer el ángulo es mucho mayor y mucha de la luz es reflejada. El agua turbia absorbe y refleja más luz resultando en una atenuación aún mayor.

El agua absorbe diferentes longitudes de onda a varios porcentajes. La luz roja es absorbida por el agua muy rápido e incluso a una profundidad de 3 metros hay una pérdida significativa de la longitud de onda roja. La luz azul, sin embargo, es absorbida mucho más despacio y mucha de la luz golpeando la superficie del agua penetra 40 metros o más. De modo similar la radiación ultravioleta ha demostrado penetrar 20 metros o más.

La absorción diferencial de las longitudes de onda afecta significativamente al color de la luz alcanzando a todos excepto a profundidades cortas. El agua del océano lejana a las costas es normalmente muy clara y tiene algunas partículas de color o sustancias disueltas. Esta agua parece ser azul como el resultado de la dispersión de los rayos de luz.

Las siguientes dos propiedades, temperatura del color y el índice de la interpretación del color son métodos de describir la luz, particularmente fuentes de luz artificiales más que características físicas reales de la luz.

4.1.2 Temperatura de Color

La temperatura del color se basa en la radiación de un cuerpo negro teórico más que en un elemento. Como el cuerpo es calentado (teóricamente) el color de la luz irradiada cambia del rojo (más longitud de onda, menos energía) en un extremo del espectro, al azul (menor longitud de onda, más energía) en el otro extremo (ley de Wien). El brillo de un elemento es proporcional a su temperatura. La temperatura de color de la luz producida por el cuerpo negro es en realidad la temperatura del cuerpo en grados Kelvin que describe el espectro de la luz y las cantidades relativas de diferentes longitudes de onda. Las Figuras 9-14 muestran los espectros negros de la radiación del cuerpo a diversas temperaturas (Dallas Warren):

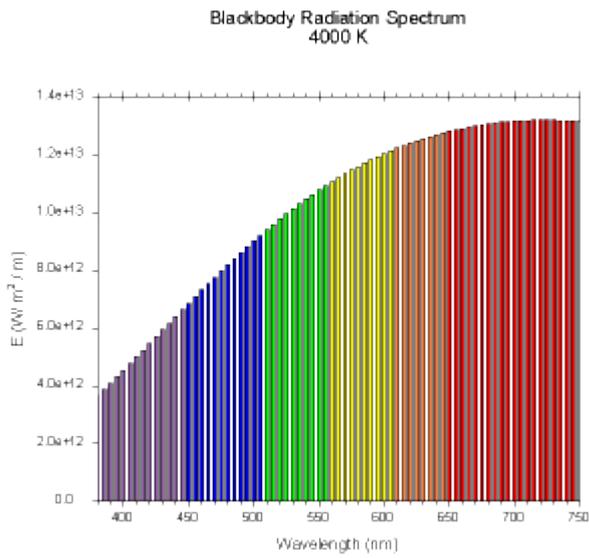


Figura 9. Radiación del cuerpo negro 4000 K.

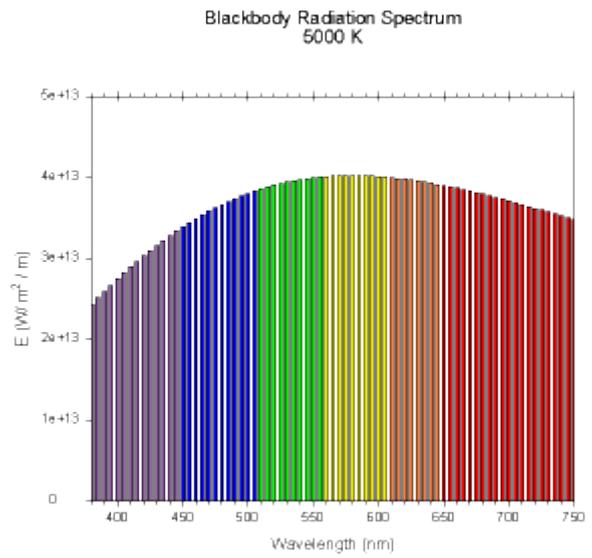


Figura 10. Radiación del cuerpo negro 5000 K.

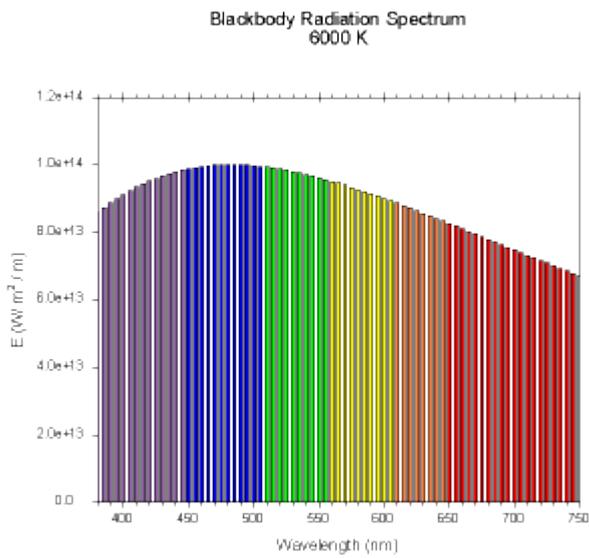


Figura 11. Radiación del cuerpo negro 6000 K.

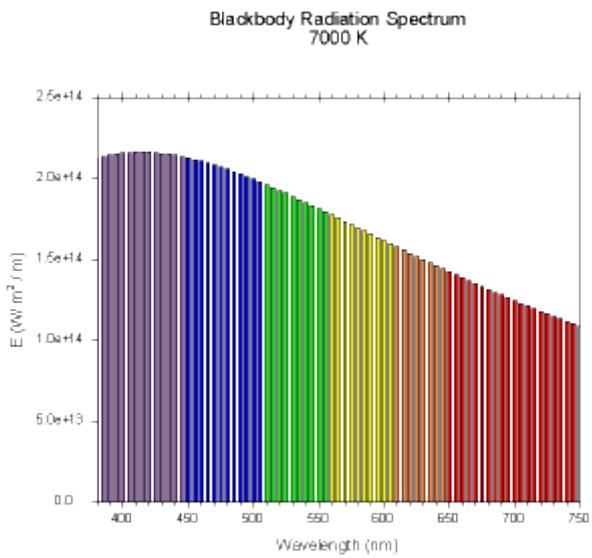


Figura 12. Radiación del cuerpo negro 7000 K.

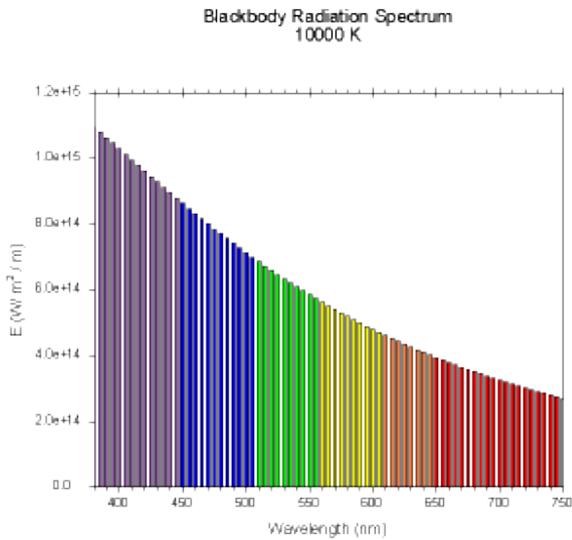


Figura 13. Radiación del cuerpo negro 10000 K.

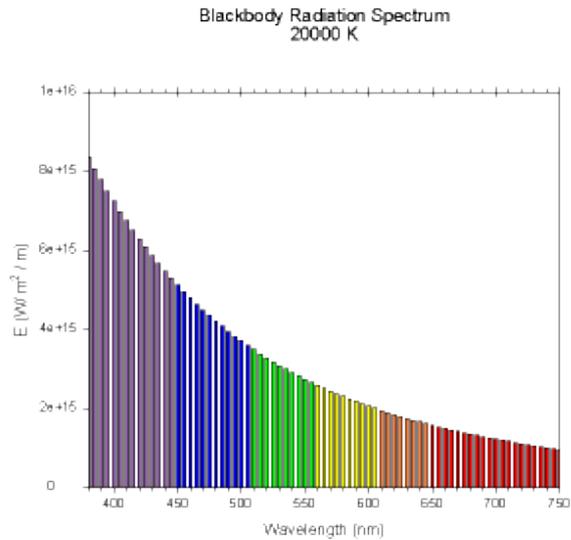


Figura 14. Radiación del cuerpo negro 20000 K.

El Sol por sí mismo produce luz con una temperatura de color alrededor de 5800°K , sin embargo, como la luz del sol es reflejada y refractada por la atmósfera de la tierra, la temperatura de color del Sol variará en función de las condiciones atmosféricas. A mediodía, en un día despejado, la luz directa del Sol es alrededor de 5500°K , pero incluyendo la luz del cielo, es de alrededor de 6500°K . Por esta razón “la luz de día” es usualmente definida como 6500°K . Al mediodía en un día claro con sombra (no hay luz directa del Sol) podría ser mayor a 2000°K .

Las lámparas incandescentes estándar siguen muy de cerca la teoría de los cuerpos negros y es principalmente por el hecho de que la luz incandescente se produce calentando un filamento. Una lámpara incandescente tiene una temperatura de color de alrededor de 2300°K . Las lámparas fluorescentes y de descarga de gas (ej. haluros metálicos) no siguen la teoría del cuerpo negro y la temperatura de color clasificada es solamente una aproximación del color de la luz producida. Esto es en su mayor parte porque estas lámparas producen un espectro interrumpido con picos en algunas longitudes de onda mientras que otras longitudes de onda no irradian en absoluto. Cuando los fabricantes de lámparas publican información de la temperatura de color para sus productos en realidad están proporcionando un valor de “temperatura de color aparente”.

Los LEDs en cambio funcionan bajo el principio que enunció en su día Albert Einstein según el cual algunos materiales al ser sometidos a corriente, generan luz. Los diodos emisores de luz (LED) son semiconductores, cuando los electrones pasan a través de

este tipo de semiconductor, se convierten en luz. Si se compara con las bombillas incandescentes, las luces LED son más eficientes en convertir la energía en luz. Y es por ello por lo que, si las tocamos irradian menos calor que el resto de bombillas. Para obtener directamente luz de diferentes colores, los diodos LED se fabrican con una gran variedad de combinaciones de materiales semiconductores como son, por ejemplo: arseniuro de galio (GaAs), arseniuro de galio y aluminio (GaAlAs).

Un diodo LED emisor de luz roja, por ejemplo, emplea un chip compuesto por arseniuro de galio y aluminio (GaAlAs), mientras que para emitir luz azul utiliza un chip de nitruro de galio (GaN).

4.1.3 Coeficiente de extinción de la luz

La transparencia del agua de mar mide su amplitud para ser atravesada por la luz. La intensidad luminosa a una profundidad determinada depende de la intensidad en la superficie y de la transparencia del agua. Generalmente, en lugar de la transparencia se hace uso de la cualidad contraria, es decir, de la capacidad del agua para oponerse al paso de la luz, que se mide mediante el llamado coeficiente de extinción k . Si la intensidad de una radiación es I_0 , la intensidad I a una profundidad z (m) viene dada por:

$$I = I_0 e^{-kz}. \quad (1)$$

El coeficiente de extinción k depende de la longitud de onda, de la radiación considerada, por lo que el espectro de luz varía con la profundidad. Así, el agua de mar es casi opaca para las radiaciones ultravioletas e infrarrojas. El 50% aproximadamente de la radiación solar corresponde a radiaciones de onda larga que se extinguen casi por completo en un trayecto inferior a 1m y su energía se consume en calentar las aguas superficiales. El resto, en forma de luz, atraviesa el agua hasta mayores profundidades.

La extinción de la luz en el agua es consecuencia de la absorción y dispersión, ambas dependientes de la longitud de onda. La dispersión sobre las moléculas del agua es despreciable, pero es considerable sobre las partículas en suspensión ya sean de arcilla, cuarzo o materias orgánicas. En aguas claras, sin apenas partículas en suspensión, la luz azul tiene una penetración máxima. En aguas turbias con gran dispersión, es la luz amarilla o la verde la que puede llegar más lejos.

La intensidad de la luz en el agua a diferentes profundidades, puede medirse bien directamente o conociendo la intensidad en la superficie y el coeficiente de extinción, lo que permite aplicar la formulación de Lambert-Beers anterior. La determinación del valor de k puede hacerse con facilidad, conectando a través de un galvanómetro dos células foto eléctricas de selenio de iguales características (método de Atkins) una en la

superficie y la otra a una profundidad conocida z . Cuando ambas células reciben la misma iluminación no pasará corriente por el galvanómetro. La luz recibida por la célula superficial puede reducirse de un 50 a un 25% mediante la aplicación de filtros neutros.

El coeficiente de extinción tiene en cuenta distancias verticales y mide la reducción de la intensidad de la luz de arriba abajo. Por tanto, puede depender de la oblicuidad de los rayos, de forma que, si éstos son muy oblicuos, el coeficiente de extinción observado en vertical es menor que el correspondiente en la dirección del rayo. En realidad, la refracción de la luz solar en la superficie del agua reduce la oblicuidad de los rayos aproximándolos a la vertical.

4.2 Introducción al CFD

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de sustancias. Se trata de una herramienta que ayuda a resolver las ecuaciones que describen los movimientos del fluido, las cuales, en su mayoría no se pueden resolver analíticamente.

Así pues, su objetivo es la búsqueda de una solución aproximada de las ecuaciones que gobiernan los movimientos de los fluidos, discretizando el dominio de cálculo y resolviendo allí las ecuaciones. Dichas soluciones se obtienen mediante métodos iterativos que resuelven las ecuaciones mediante aproximaciones numéricas hasta que se alcanza una convergencia en la solución, siendo necesario realizar esta tarea, con la ayuda de un ordenador.

En este capítulo se procede a explicar que es la CFD, su evolución histórica, los campos de aplicación y las ventajas e inconvenientes de esta herramienta. También se desarrolla una introducción a la turbulencia, tratando diversas metodologías de modelización de la misma, así como las técnicas de cálculo empleadas en CFD para su resolución.

4.2.1 Historia de la CFD

El desarrollo de las herramientas CFD empezó a mediados de los años 50 con el desarrollo de los ordenadores. El método de las diferencias finitas constituye las herramientas matemáticas básicas para la resolución de las ecuaciones planteadas con estos métodos. Desde un principio los Métodos en Diferencias Finitas MDF dominaron el cálculo numérico ya que los métodos FEM resultaban más caros computacionalmente y más difíciles de formular. Actualmente, esto ya ha cambiado apareciendo nuevos métodos que han dejado en desuso a los métodos MDF; entre estos métodos aparecen

los métodos SPH (Smoothed Particles Hydrodynamics) que actualmente constituye uno de los caballos de batalla de la técnica actual. Así pues, otros métodos que también han ganado popularidad son los Métodos de Volúmenes Finitos (MVF) que permiten la integración de las ecuaciones de masa y momentum para cada celda individual y aproximar su valor en el nodo central.

El problema de la resistencia, entendida como el efecto que una corriente fluida ejercía sobre un cuerpo inmerso en su seno fue uno de los dos pilares en donde se sustentó el inicio y evolución de la mecánica de fluidos en los siglos XVII y XVIII. El interés que despertó este problema recae, aunque no exclusivamente, por su evidente utilidad práctica, ya que barcos, molinos y otras máquinas se encontraban sometidos a estas fuerzas y cumplían sus funciones por la existencia de las mismas. Los primeros enfoques para explicar la resistencia, cerca del último tercio del siglo XVII, siguieron unas pautas muy diferentes y fue a mediados del siglo XVIII cuando se llegó a las ecuaciones básicas del movimiento, aunque la falta de capacidad de cálculo matemático y de los conocimientos adecuados de la viscosidad imposibilitó el avance en esa dirección.

Entre finales del siglo XVII y principios del siglo XVIII se constituyó la “teoría del impacto”; teoría basada en dos hipótesis: la primera que suponía que el fluido estaba formado por un conjunto de partículas individualizadas e independientes; la segunda que asimilaba la resistencia a la suma de los efectos mecánicos de todos los choques.

Esta teoría no daba explicación a las fuerzas en las popas y así Euler a mediados del siglo XVIII dijo que el fluido contorneaba el cuerpo introduciendo el modelo currentilíneo con lo cual se aproximó a las concepciones actuales. Por esa misma época Jean le Rond d’Alambert expone su idea sobre el tratamiento de la estructura del movimiento de una corriente fluida alrededor de un cuerpo. El fluido, al que supone animado con un movimiento uniforme aguas arriba, al acercarse al cuerpo empieza a desviarse formando unas líneas de corriente que lo contornearán para luego volver aguas abajo a la condición de uniforme. El cambio es continuo y gradual, y demuestra que la estructura del campo fluido, esto es, la forma geométrica de las líneas de corriente es independiente de la velocidad, y sólo depende de la forma del cuerpo.

Como consecuencia la velocidad en un punto concreto será proporcional a la existente aguas arriba, hecho que permite adimensionalizar el movimiento. Por otro lado, el efecto del fluido sobre el cuerpo será el producido por la presión y no el choque.

Para obtener el campo fluido parte de dos premisas: la continuidad y la dinámica. Así hasta la llegada de los ordenadores su resolución quedó paralizada debido a su dificultad.

4.2.2 Campos de aplicación de la CFD

Este tipo de herramientas tienen aplicación en casi todos los campos de la técnica actual desde la medicina a la ingeniería. Así mismo ocurre en la hidrodinámica, aquí aparece en los siguientes campos:

- **Resistencia y propulsión:**
Las aplicaciones CFD se centran fundamentalmente en ese campo. Aquí sobre todo, se suelen utilizar cálculos potenciales donde se desprecian los efectos de la viscosidad y formación de olas en superficie libre. Esto proporciona unos cálculos simples, rápidos y más o menos acertados.
- **Maniobrabilidad**
Este aspecto, cada día gana más en importancia con las nuevas regulaciones de la IMO tras accidentes marítimos de buques tanques. Así pues, el análisis mediante herramientas CFD de los flujos alrededor de apéndices del buque permiten calcular los distintos momentos producidos y así, evaluar la maniobrabilidad del buque.
Aquí los códigos CFD, constituyen una parte poco madura en este campo, aunque cada día más existen códigos comerciales que permiten el cálculo de los movimientos del buque frente a un determinado estado de mar. Sin embargo, este problema presenta una gran dificultad ya que es necesario disponer una malla de diferente tamaño según la altura de ola y diferentes características del mar, así como un dominio computacional grande que permita representar los estados del mar así como fenómenos de difracción de oleaje, embarque de agua en cubierta... Otra aplicación dentro de este campo es el "Offshore", campo con gran visión de futuro; aquí el estudio de las cargas de oleaje y viento sobre las estructuras resulta de suma importancia para un buen diseño.
- **Diseño de propulsores**
En campo de los CFD las técnicas utilizadas son viscosas ya que permiten un mejor cálculo del rendimiento del propulsor para una mejor aproximación a los resultados de experimentos reales. Aquí se emplean técnicas BEM ("Boundary Element Methods") u otras como superficies sustentadoras.

Para finalizar se puede hablar de otras aplicaciones como lo son:

- Flujos de aire.
- Flujos en el interior de tuberías y conductos.

4.2.3 Ventajas e inconvenientes de la CFD

Las ventajas del análisis con técnicas CFD puede ser resumido en:

- Reducción sustancial en tiempo y costes en los nuevos diseños.
- Posibilidad de analizar sistemas y condiciones muy difíciles de simular experimentalmente.
- Capacidad de estudiar sistemas bajo condiciones peligrosas o más allá de sus condiciones límites de funcionamiento, por ejemplo, accidentes con sustancias tóxicas.
- Nivel de detalle prácticamente ilimitado. Los métodos experimentales son tanto más caros cuanto mayor es el número de puntos de medida, mientras que los programas CFD pueden generar gran cantidad de información sin coste añadido y con posibilidad de hacer estudios paramétricos.
- Valor añadido del producto. Existe la capacidad de generación de gráficos que permiten una mejor comprensión del resultado y así estimular la compra del producto.

Sin embargo, no todo pueden ser ventajas en este tipo de herramientas, uno de los principales inconvenientes de las técnicas CFD, es el gran conocimiento de las ecuaciones que modelan ciertos fenómenos físicos, necesitando personal con grandes conocimientos en la materia.

- No siempre es posible llegar a resultados lo suficientemente precisos, dando lugar a grandes errores en cuestiones básicas.
- Simplificación del fenómeno a estudiar para que el hardware y el software puedan abordarlo. El resultado será tanto más preciso cuanto más adecuadas hayan sido las hipótesis y simplificaciones realizadas.
- La existencia de insuficientes e incompletos modelos para simular el efecto de la turbulencia, fenómenos multifásicos o la combustión, entre otros.
- Por último y no menos importante, la tendencia humana a creerse todo lo procedente del ordenador, sobre todo cuando se presentan resultados de forma atractiva.

4.2.4 Aproximación a la realidad

Se trata de las distintas aproximaciones que se realizan y se llevan a cabo en ingeniería para la resolución numérica de las ecuaciones de gobierno que modelan un determinado fenómeno. Conocidas las ecuaciones de gobierno del fenómeno físico a estudiar será necesario introducir simplificaciones al problema que ayuden a obtener un resultado lo más preciso posible pero con un coste y dificultad tan reducido como sea posible. Así pues, como de antemano no se conoce la solución analítica de las ecuaciones resulta muy difícil conocer cuáles de las hipótesis realizadas son correctas y cuales descartables. También será necesario disponer de las ecuaciones de los fenómenos

físicos de los modelos, de manera que el ordenador sea capaz de resolverlas, ya que muchas de ellas son ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, muchas con términos no lineales, que dificultarán su resolución. Otro aspecto a discretizar será la geometría de estudio, cuya simplificación ayudará a la resolución del fenómeno. Aunque el campo fluido sea continuo, las ecuaciones no pueden ser resueltas en tantos puntos de fluido como se requiere, así que será, necesario discretizar el dominio en determinados puntos, donde serán resueltas las ecuaciones, a este paso se le llama discretización espacial.

Por otro lado, cuando el fenómeno está regido por ecuaciones que dependen del tiempo, tampoco es posible el estudio del fenómeno de forma continua, así que será necesaria una discretización temporal. Por último, de las ecuaciones de gobierno se eliminarán aquellos términos que no sean necesarios o despreciables, con los que se tendrá un nivel más de aproximación, al que llamaremos aproximación dinámica.

Con todo ello, ya se puede resolver las ecuaciones que modelan determinados fenómenos físicos, empleando distintas técnicas matemáticas.

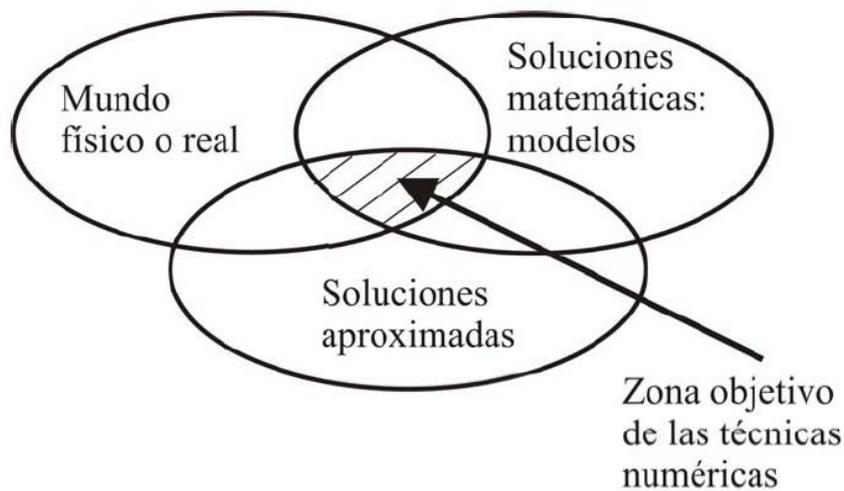


Figura 15. Problema a resolver.

4.2.5 Clasificación de las herramientas CFD

Dentro del ámbito naval, las herramientas CFD, pueden ser clasificadas dentro de dos grandes grupos: aquellas que consideran flujo potencial; es decir, las que no tienen en cuenta la viscosidad del fluido, además dentro de éstas, tendremos con y sin superficie libre. En el otro gran grupo tendremos las herramientas que consideran flujo viscoso, que como su nombre indica, son aquellas que, consideran la viscosidad del fluido, dividiéndose a su vez con y sin superficie libre.

4.2.6 Algunos modelos físico-matemáticos empleados en CFD's

Las ecuaciones de conservación de masa y momentum resultan más complejas de lo que parecen. Existen términos no lineales, acoplados y difíciles de resolver. La experiencia ha demostrado que las ecuaciones de Navier-Stokes describen con exactitud el movimiento del fluido, sin embargo, sólo han sido capaces de resolverse unos pocos casos en geometrías simples y cuya aplicación a la industria resulta limitada.

4.2.6.1 Modelos de flujo potencial

Describen el comportamiento de fluidos irrotacionales en flujos ideales. La teoría básica para el cálculo en este caso, consiste en partir de la definición de potencial de velocidades, constituyendo una simplificación adicional para el cálculo de flujos estacionarios. Así, dentro de estos modelos podemos encontrar diferentes métodos desarrollados por distintos autores, como Michell en 1898 que ya obtuvo fórmulas para el cálculo de coeficientes por formación de olas, Haverlock en 1932 que también dio soluciones para el cálculo de la resistencia por formación de olas o el método de Hess & Smith para el cálculo del potencial de velocidades.

Todos estos métodos plantean el siguiente problema:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad \text{Ecuación de Laplace.} \quad (2)$$

Para resolver este problema se aplican condiciones de contorno en la superficie libre del fluido, así como en la superficie del buque:

Condiciones de contorno:

$$\nabla^2 \phi = 0, \quad (3)$$

$$\phi = Ux + \phi_p, \quad (4)$$

$$\nabla^2 \phi_p = 0. \quad (5)$$

Y en la superficie del buque:

$$V_n = \left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_s = 0 \quad \left. \frac{\partial \phi_p}{\partial n} \right|_s = -U \left. \frac{\partial x}{\partial n} \right|_s. \quad (6)$$

Condición de contorno cinemática:

$$\left(U + \frac{\partial \phi_p}{\partial x} \right) \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial \phi_p}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial \phi_p}{\partial z} (-1) = 0. \quad (7)$$

Condición de contorno dinámica:

$$p + \frac{\rho}{2} \left[\left(U + \frac{\partial \phi_p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_p}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi_p}{\partial z} \right)^2 \right] + \rho g h = P_{atm} + \frac{1}{2} \rho U^2. \quad (8)$$

4.2.6.2 Modelos para flujo ideal

Cuando el número de Reynolds es suficientemente elevado, lo que ocurre en muchas de las aplicaciones prácticas de la Mecánica de Fluidos, despreciar los efectos viscosos y de conducción de las ecuaciones resulta una aproximación bastante cómoda pues elimina los términos difusivos de segundo orden en las ecuaciones diferenciales y hace que las ecuaciones de gobierno pasen a ser de primer orden, con todo lo que lleva asociado en cuanto a simplificación de cálculos.

Con las hipótesis de despreciar los efectos viscosos y la transferencia de calor por conducción, es decir, si se considera al fluido como ideal, se obtienen las ecuaciones de Euler. Los modelos Las ecuaciones de Euler adoptan las expresiones siguientes:

Continuidad:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \vec{u}. \quad (9)$$

Momentum:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \rho \vec{f}_e. \quad (10)$$

4.2.6.3 Modelos para flujos ideales, estacionarios y rotacionales

Es un tipo de modelo muy similar a los del fluido ideal. Consiste en reducir el número de variables que intervienen en los cálculos introduciendo la vorticidad en las ecuaciones de cantidad de movimiento y de la energía. No se consideran aquí ni las pérdidas por viscosidad en la capa límite ni los efectos de la turbulencia.

4.2.6.4 Solución directa de las ecuaciones de Navier -Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes constituyen una modelización correcta del flujo de un fluido Newtoniano, incluyendo todos los efectos viscosos y térmicos. Adecuadamente resueltas incluyen los efectos de la turbulencia y de la capa límite, pero esta resolución directa requiere de una discretización espacial y temporal tan fina que está claramente fuera del alcance de cualquier aplicación industrial. Así pues, el avance en la computación permite su resolución en grandes supercomputadoras. La resolución

numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes sí que es posible si se utilizan modelos adecuados para simular el efecto de la turbulencia y de la capa límite en discretizaciones no tan detalladas.

4.2.6.5 Modelos parabólicos de las ecuaciones de Navier-Stokes

Este tipo de modelos ha sido desarrollado para el cálculo de flujos supersónicos e hipersónicos, donde la captura de las ondas de choque, gradientes de presión, esfuerzos viscosos superficiales y transferencia de calor son los objetivos más importantes para el diseño.

Las ecuaciones de gobierno parabólicas se obtienen a partir de las de Navier-Stokes considerando las siguientes hipótesis:

- Flujo estacionario.
- Los gradientes de esfuerzos viscosos son despreciables en la dirección de las líneas de corriente.
- Los gradientes de presión en la dirección de las líneas de corriente se aproximan por su valor en zonas de capa límite cercanas. La aplicación de estas técnicas queda restringida al campo aeronáutico.

4.2.6.6 Modelos de flujo incompresible

Un flujo se denomina incompresible cuando la densidad del fluido en cada instante permanece independiente de las variaciones de presión. Cuando el flujo es además isoterma, las ecuaciones de gobierno se simplifican notablemente y la solución para las distintas variables se hace independiente de la temperatura.

El sistema de ecuaciones requerido queda reducido a la ecuación de continuidad y la de cantidad de movimiento, que expresadas adimensionalmente y con la única presencia de la gravedad como fuerza volumétrica, adoptan las siguientes formas:

Continuidad

$$\nabla \vec{u} = 0. \quad (11)$$

Cantidad de movimiento

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = \frac{-\nabla p}{\rho} + \frac{1}{Re} \nabla^2 \vec{u} + \frac{1}{Fr} \vec{g}. \quad (12)$$

De esta forma, las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento son independientes de la ecuación de la energía, que no es necesario resolver para obtener los campos de velocidades y presión. Pese a la ventaja que esto parece implicar, en la práctica, las dos ecuaciones a resolver se vuelven “rígidas” por la ausencia de derivada temporal en la ecuación de continuidad, y su solución resulta más dificultosa.

4.2.6.7 Modelos para la resolución de las turbulencias.

El número de Reynolds de un flujo da una medida de la importancia relativa de las fuerzas de inercia, asociadas con los efectos convectivos, y las fuerzas viscosas. Ya sabemos que para valores inferiores al Reynolds crítico el flujo es intrínsecamente estable y las capas de fluido adyacentes se deslizan unas sobre otras de forma ordenada llamando a este régimen laminar.

Si el flujo tiene un valor del número de Reynolds por encima del crítico, se manifiestan en éste unas perturbaciones que dan lugar a un cambio radical en el comportamiento del flujo. El movimiento se vuelve intrínsecamente no estacionario, incluso con condiciones de contorno constantes. Este régimen lo denominamos flujo turbulento.

La turbulencia se define como el estado de movimiento de un fluido en el que las distintas variables relevantes (presión, velocidad, etc.) fluctúan de una forma desordenada. Se trata de un estado no estacionario desde el punto de vista macroscópico en el que las distintas variables adoptan valores dependientes tanto de la posición como del tiempo y estos valores varían de una forma aleatoria y desordenada.

La descripción del movimiento de las partículas fluidas debido al efecto de la turbulencia resulta altamente compleja y constituye un problema aún sin solución desde el punto de vista de los métodos numéricos. Así pues, la simulación de las turbulencias constituye una de los principales obstáculos de los CFD.

Simulación directa de las ecuaciones (“Direct Simulation”, DS)

Este método consiste, en realidad, en no utilizar ningún modelo para la turbulencia, sino realizar discretizaciones temporales y espaciales que sean capaces de simular el flujo en un determinado problema. La resolución directa de las ecuaciones de Navier-Stokes resulta hoy en día abordable sólo para un número muy limitado de problemas simples de interés académico. La primera solución de este tipo se realizó en 1981 en la Universidad de Stanford.

Simulación de grandes vórtices “Large Eddy Simulation”, LES

Este tipo de técnicas numéricas reducen la complejidad de las ecuaciones de gobierno considerando sólo parte de los efectos turbulentos del flujo. Se estudia el intercambio energético entre las denominadas “fluctuaciones de gran escala” y se simula el efecto de las pequeñas escalas de la turbulencia. Se trata de un tipo de modelo intermedio entre la simulación directa y el promediado temporal de las ecuaciones de Navier-Stokes, que extiende el promedio temporal a la captura de ciertos efectos turbulentos básicos de

forma numérica. Aunque sin llegar al extremo de la simulación directa, sólo es posible para problemas simplificados y requiere unas capacidades de cálculo muy elevadas.

Modelos URANS ("Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes)

Son modelos matemáticos muy similares a los métodos RANS, sin embargo, en este caso trabajan en régimen transitorio en lugar de permanente como lo hacen los métodos RANS. Así la solución del problema depende del tiempo. Este tipo de métodos está sufriendo gran desarrollo en la actualidad.

Modelos que promedian las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS)

Los modelos de promedio de las ecuaciones de Navier-Stokes (Reynolds Averaged Navier-Stokes) han sido muy estudiados y resultan bastante útiles en la mayoría de los problemas prácticos resueltos mediante técnicas numéricas. El procedimiento de promediar las leyes que describen el movimiento de una partícula se introduce en las ecuaciones con el fin de obtener los comportamientos promedio y turbulento (aleatorio) de las distintas variables. El punto de partida es muy sencillo. Se trata de obtener una descomposición de las variables en su valor medio y su valor fluctuante. Así existen tres formas más pertinentes en la promediado de Reynolds, las cuales son: promediado del tiempo, promediado espacial y el promedio del ensamble.

Así, el promediado temporal es adecuado para turbulencias estacionarias; es decir, flujos cuya media no varía con el tiempo. La promediado del tiempo puede ser definida como.

$$F_T(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(x, t) dt. \quad (13)$$

La promediación espacial, resulta adecuada, para flujos con turbulencias homogéneas; es decir, flujos uniformes en todas las direcciones.

$$F_V(x) = \lim_{V \rightarrow \infty} \frac{1}{V} \iiint f(x, t) dt. \quad (14)$$

El promedio del ensamble es la técnica más general de promediado. En un ejemplo idealizado en términos de medidas, para N experimentos iguales, donde $f(x, t) = f_n(x, t)$ resulta que la media es F_E , donde:

$$F_E(x, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f_n(x, t). \quad (15)$$

Cuando la turbulencia es homogénea y estacionaria, se asumen que estos tres promedios resultan iguales. Esta asunción es conocida como hipótesis ergódica. Por ejemplo, para la velocidad, la descomposición sería:

$$\vec{u} = \overline{\vec{u}} + \vec{u}' \quad (16)$$

Donde la componente media de la velocidad se obtiene haciendo la integral de la velocidad instantánea:

$$\overline{\vec{u}} = \frac{1}{T} \int_0^T \vec{u}(t) dt. \quad (17)$$

Suponiéndose que el periodo de integración T es lo suficientemente grande en comparación con la escala temporal de la turbulencia, pero lo suficientemente pequeño como para captar cualquier fenómeno no estacionario distinto a la turbulencia. La utilización de este tipo de métodos es bastante adecuada, pues la mayoría de los fenómenos no estacionarios en Mecánica de Fluidos tiene lugar a frecuencias con rangos muy alejados del rango de frecuencias de la turbulencia.

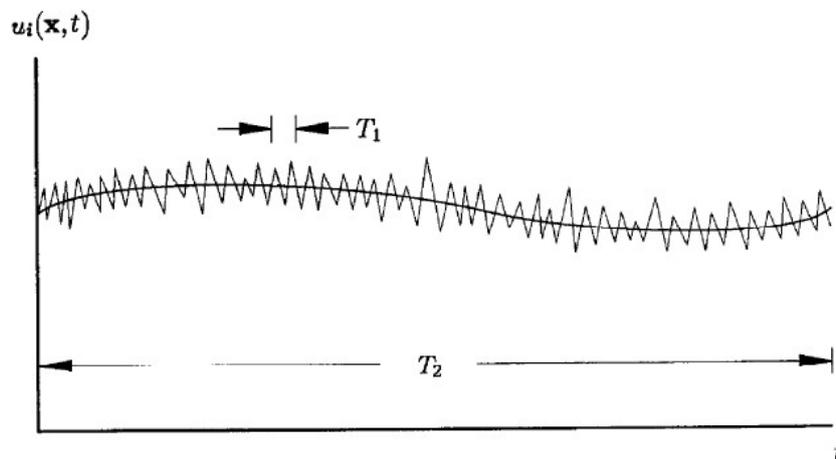


Figura 16. Velocidad a lo largo de un periodo.

El proceso de promediado temporal de las ecuaciones diferenciales, da lugar a unos términos, denominados tensiones de Reynolds (“Reynolds stresses”), que involucran medias de los productos de la fluctuaciones de las componentes de la velocidad, cuya relación con las componentes medias del flujo es desconocida. Para obtener dicha relación es necesario introducir un modelo adicional, denominado modelo de turbulencia o de cierre. Las distintas posibilidades prácticas en cuanto a modelos de turbulencia son analizadas a continuación. Así pues, las ecuaciones de Navier-Stokes se promedian sobre las escalas de las fluctuaciones de turbulencia (RANS). Estos métodos dan lugar a un campo de flujo promediado y simulado que es más uniforme que el flujo real, y, por tanto, reduce drásticamente el número de puntos de la discretización espacial y temporal necesario para obtener las variables buscadas.

Un modelo de turbulencia es un procedimiento numérico que permite relacionar los valores medios de las fluctuaciones de las variables con los valores promedio, de forma que se puedan resolver las ecuaciones de gobierno. Un modelo de turbulencia será útil, dentro de un programa CFD de propósito general, si es lo suficientemente aproximado, sencillo y económico. Entre los modelos más comunes podemos encontrar algunos de los explicados en los siguientes párrafos.

4.2.7 Modelos de turbulencia

4.2.7.1 Modelos algebraicos

Los modelos algebraicos de turbulencia o modelos de cero ecuaciones, son aquellos que no necesitan ecuaciones adicionales, y son calculados directamente desde las variables del fluido. Utilizan las hipótesis de aproximación de Boussinesq para obtener las tensiones de Reynolds. En ellos la viscosidad turbulenta y la longitud de mezcla dependen en particular del fluido y deberán ser especificados por adelantado. Como consecuencia, este tipo de modelos de ecuación no son muy apropiados ya que no tendrán en cuenta efectos como convecciones, difusiones de la energía turbulenta. Este tipo de modelos resultan demasiado simples para su utilización en simulaciones en general, por ello es necesario tener un especial cuidado de utilizarlo en geometrías complicadas o procesos complejos, ya que los resultados no serían válidos.

Modelos de longitud de mezcla de Prandtl

Prandtl en 1925 enunció las hipótesis y bases para el desarrollo de este método. Formuló un modelo de turbulencia según el cual las partículas fluidas coalescían y se unían en grupos que se movían como una sola unidad. Visualizó que el flujo cortante adquiriría un perfil lineal, y los grupos de moléculas retenían su momentum en la dirección x para una distancia en la dirección y, a la que denominó longitud de mezcla (" l_{mix} "). Así postuló que:

$$\tau_{xy} = \frac{1}{2} \rho u_{mix} l_{mix} \frac{dU}{dy}. \quad (18)$$

Dónde la velocidad de mezcla u_{mix} adquiriría la siguiente expresión:

$$u_{mix} = constante * l_{mix} \left| \frac{dU}{dy} \right|. \quad (19)$$

Se podría decir que l_{mix} no es una propiedad física del fluido y agrupando términos resulta que:

$$\tau_{xy} = \mu_T \frac{dU}{dy}. \quad (20)$$

Dónde el término μ_T lo denominamos viscosidad turbulenta.

$$\mu_T = \rho l_{mix}^2 \left| \frac{dU}{dy} \right|. \quad (21)$$

Entre otros modelos algebraicos podemos encontrar:

1. Modelo de Cebeci-Smith.
2. Modelo de Baldwin-Lomax.
3. Modelo de Johnson-King.
4. Modelos dependientes de la rugosidad.
5. Modelos de longitud de mezcla.

4.2.7.2 MODELOS DE ECUACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTA

Dentro de este punto se incluyen tanto los modelos de una ecuación de cierre y de dos ecuaciones. Ambos modelos retienen las aproximaciones de Boussinesq para la viscosidad turbulenta, pero difieren en un importante aspecto, mientras que los modelos de una ecuación resultan incompletos ya que relacionan la longitud de escala turbulenta con alguna dimensión típica del flujo. Por el contrario, los modelos de dos ecuaciones provienen de una ecuación más para la longitud de escala turbulenta, lo que equivale a decir que presentan un modelo completo.

La ecuación de energía cinética turbulenta.

Esta ecuación fue desarrollada para incorporar los efectos no locales e históricos del flujo sobre la viscosidad turbulenta a los distintos modelos. Así Prandtl eligió la energía cinética de las fluctuaciones turbulentas como base de la velocidad de escala.

Así pues:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i^2} = \frac{1}{2} (\overline{u_i^2} + \overline{v_i^2} + \overline{w_i^2}). \quad (22)$$

Así la viscosidad turbulenta, en términos de "k" queda como:

$$\mu_T = Constante * \rho^{\frac{1}{2}} l_{mix}. \quad (23)$$

Por otro lado, cuando estudiamos la ecuación de tensiones de Reynolds:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial k}{\partial x_j} - \frac{1}{2} \overline{\rho u_i' v_i' w_i'} - \overline{p' u_j'} \right]. \quad (24)$$

Vemos que aparecen una serie de términos que representan procesos que ocurren en los flujos turbulentos. Estos los podemos clasificar en: términos de producción "k", los cuales representan la proporción de energía cinética que es transferida del flujo principal

a la turbulencia; términos de disipación " ϵ ", que representan la proporción de energía cinética que es convertida en energía interna térmica.

Así, dentro de los modelos de una y dos ecuaciones se pueden encontrar una gran variedad de modelos adecuados cada uno para un determinado tipo de flujo turbulento.

Modelos de una ecuación de cierre:

1. Modelo de una ecuación de Prandtl.
2. Modelo de Baldwin-Barth.
3. Modelo de Spalart-Allmaras.

Modelos de dos ecuaciones de cierre:

1. Modelos de k-epsilon.
2. Modelos de k-omega.

Modelos de dos ecuaciones de cierre con restricciones y límites.

4.2.7.3 MODELOS DE UNA ECUACIÓN DE CIERRE

Los modelos de una ecuación de energía cinética contemplan la mejora de los modelos algebraicos de resolución mediante el uso de una "viscosidad turbulenta" que no depende puramente de las condiciones locales del fluido pero toma parte por ejemplo en la historia del flujo. Estos modelos son relativamente sencillos y fueron concebidos originalmente para aplicaciones aeroespaciales relacionadas con modelos de flujos de pared *maybounded* (limitados) y capas límites sometidas a unas condiciones de presiones adversas.

En estos modelos la velocidad V es identificada con $K^{1/2}$, donde K es la energía cinética por unidad de masa del fluido. Para completar la ecuación de energía cinética turbulenta Prandtl postuló que la disipación turbulenta " ϵ " asumía la siguiente ecuación:

$$\epsilon = C_D \frac{k^3}{l} \quad (25)$$

Donde C_D es un coeficiente de cierre del modelo y donde la única parte no especificada era la longitud de mezcla. Sin embargo, la experiencia en los modelos de longitud de mezcla dio la suficiente seguridad como para afirmar que $l \propto l_{mix}$, solamente si la ratio de producción o disipación se mantenía constante. Así el primer modelo de una ecuación turbulenta quedaba como:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho * C_D \frac{k^3}{l} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]. \quad (26)$$

Más recientemente Baldwin y Barth y por otro lado Spalart and Allmaras han desarrollado métodos más sofisticados, así, por ejemplo, el modelo de Baldwin-Barth incluye siete coeficientes de cierre, dos funciones empíricas de amortiguamiento y alguna otra función que describe la longitud de escala turbulenta. Originalmente resultaban efectivos con bajo número de Reynolds; en los cuales se requería una buena resolución de la región viscosa afectada por la capa límite. Estos modelos están implementados usando funciones de contorno en donde la resolución de la malla no es suficientemente buena, lo que les hace ideales para obtener simulaciones en donde la malla no es suficientemente fina y en donde el cálculo turbulento no es demasiado crítico. Son relativamente modernos y no se sabe con certeza si son aplicables a cualquier tipo de fluido complejo en ingeniería; así por ejemplo: no se puede predecir la caída de los flujos turbulentos, isotrópicos y homogéneos. Además estos modelos son criticados por la imposibilidad de adaptarlos rápidamente a los cambios de escala "T" ya que en configuraciones geométricas complejas resulta difícil describir "T", porque es dependiente de cantidades no locales como del espesor de capa límite, desplazamiento del espesor... e introduce una incertidumbre algo similar al modelo de ecuación algebraica.

4.2.7.4 MODELOS DE DOS ECUACIONES DE CIERRE

Este tipo de modelos de turbulencia han sido los más estudiados durante las décadas de los 80 y 90 de siglo XX, gran parte de los estudios realizados durante estos años han sido con este tipo de modelos, los cuales permiten una mayor precisión en flujos complicados, pero que conllevan un gasto computacional elevado, aunque actualmente esto ya no resulta un inconveniente por el desarrollo informático. Este tipo de modelos provienen no sólo de una ecuación para el cálculo de "k" sino que también nos ofrecen ecuación otra para el cálculo de la longitud de escala turbulenta "l". Como consecuencia tenemos modelos que permiten predecir los flujos turbulentos con más precisión. Como punto de partida de estos métodos, tenemos la hipótesis de Boussinesq junto con la ecuación de energía cinética vista anteriormente. Kolmogorov en los años 40, definió entonces la segunda variable, a la que se llamó rango específico de disipación " ω ". Esta cantidad tiene dimensiones de t^{-1} , así de esta manera los valores de la viscosidad turbulenta, longitud de escala turbulenta y disipación turbulenta pueden ser determinadas como:

$$\mu_T \sim \frac{\rho k}{\omega} \quad (27)$$

$$l \sim \frac{k}{\omega} \quad (28)$$

$$\epsilon \sim k\omega. \quad (29)$$

Cabe destacar que este tipo de modelos de turbulencia no son una herramienta universal para la obtención de las características turbulentas del fluido, dando resultados más o

menos aceptables dependiendo de dónde se utilicen. A continuación, se explicará en un modelo de dos ecuaciones que resulta ampliamente utilizado en diversas simulaciones, este modelo es el $k - \epsilon$. Como modelo de cierre o estrategia numérica para resolver de forma aproximada las ecuaciones de Navier-Stokes, se desarrollan dos ecuaciones de transporte adicionales, una para la energía cinética turbulenta (k) y otra para la tasa de disipación de energía cinética turbulenta (ϵ). Estas variables se definen según las expresiones donde:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i^2} = \frac{1}{2} (\overline{u_i^2} + \overline{v_i^2} + \overline{w_i^2}), \quad (30)$$

$$\epsilon = 2\nu \overline{e'_{ij} e'_{ij}}. \quad (31)$$

Es la parte $\overline{e'_{ij}}$ fluctuante del tensor de velocidad de deformación.

Las ecuaciones de transporte para k y ϵ se basan en el conocimiento de los procesos que producen los cambios en esas variables y son:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla(\rho k \bar{u}) = 2\mu_T E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon + \nabla \left[\frac{\mu_T}{\sigma_k} \text{grad} k \right], \quad (32)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \nabla(\rho \epsilon \bar{u}) = C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_T E_{ij} E_{ij} - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \rho \epsilon + \nabla \left[\frac{\mu_T}{\sigma_k} \text{grad} \epsilon \right]. \quad (33)$$

Dónde E_{ij} es el tensor de componentes medias de la velocidad de deformación. El significado físico de las anteriores expresiones se puede resumir en el siguiente balance:

$$\left[\text{Velocidad de cambio de } \frac{k}{\epsilon} \right] + \left[\text{Transporte de } \frac{k}{\epsilon} \text{ por convección} \right] = \left[\text{Producción de } \frac{k}{\epsilon} \right] - \left[\text{Destrucción de } \frac{k}{\epsilon} \right] + \left[\text{Transporte de } \frac{k}{\epsilon} \text{ por difusión} \right]. \quad (34)$$

Aparecen varios conceptos cinemáticos relacionados con las “escalas” o longitudes típicas asociadas a los distintos movimientos del flujo (flujo principal medio y flujo oscilante o turbulento, relacionado con los vórtices). Así en este modelo de turbulencia la longitud de escala turbulenta se expresa mediante la siguiente relación como:

$$l = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\epsilon}. \quad (35)$$

Este método utiliza la velocidad de disipación ϵ de los remolinos pequeños para definir la escala de longitud l de los remolinos grandes porque, para altos números de Reynolds, la velocidad de extracción de energía del flujo de los remolinos grandes es igual a la velocidad de transferencia de energía a los remolinos pequeños. Si esto no fuese así, la energía en algunas escalas de la turbulencia podría aumentar o disminuir sin límite, cosa que no ocurre en la práctica con lo que se justifica el uso de la velocidad de disipación ϵ dentro de la definición de la escala de longitud l . Aplicando la misma

aproximación del modelo de la longitud de mezcla se puede obtener la viscosidad turbulenta como:

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} . \quad (36)$$

Este tipo de modelos presentan ventajas como:

- Sólo se necesita fijar las condiciones iniciales y de contorno.
- Resultados satisfactorios para una gran cantidad de flujos.
- Es el modelo turbulento más ampliamente utilizado en la mayoría de flujos en aplicaciones industriales.
- Se dispone de leyes de pared desarrolladas como condiciones de contorno para este tipo de modelos.

Aunque también presenta algunas desventajas:

- Implementación más compleja que los modelos algebraicos debido a la introducción de dos ecuaciones diferenciales adicionales.
- Pobres resultados en casos como: flujos no confinados, flujos con grandes gradientes longitudinales, flujos turbulentos completamente desarrollados en conductos no circulares.

Una variación del método k- ϵ , denominada k- ω , fue publicada por Wilcox en 1993. Se trata de un método RANS en el cual se elimina una variable dividiendo entre ella todas la demás del problema, simplificando la resolución del problema particular. Este método tiene el inconveniente de presentar singularidades, cuando la variable por la que se divide es cero. Por ello este modelo de turbulencia resulta más acertado en el campo aeronáutico que en el naval. Además de todos estos modelos existen otros que podemos encontrar dentro de la variedad de códigos existentes en el mercado actual de los CFD.

- Modelos v2-f.
 - Modelos de tensiones de Reynolds (RSM).
 - Modelos de simulación de grandes vórtices ("Large Eddy Simulation" (LES)).
1. Modelo de Smagorinsky.
 2. Submalla dinám.ica.
 3. Modelo RNG-LES.
 4. Modelo de adaptación a la viscosidad turbulenta cercana a la pared (WALE)
 - a. Modelos de simulación directa...

4.2.8 Modelización de la capa límite

La capa límite es la zona del campo fluido próxima a un contorno sólido en la que se manifiestan especialmente los efectos viscosos. Debido a la viscosidad y a la condición de no deslizamiento, cerca de cualquier contorno sólido aparece un gradiente de velocidades en la dirección normal a dicho contorno. Este gradiente de velocidades condiciona el intercambio energético entre las distintas partículas de fluido con velocidades diferentes, originando vorticidad y turbulencia. El problema básico para la modelización numérica del intercambio energético en la capa límite consiste en la definición correcta de las velocidades de las partículas en una zona muy próxima a la frontera. Esto implica una densidad de mallado muy elevada, necesaria para capturar los distintos fenómenos que se producen dentro de la capa límite. Esto implica un gran gasto computacional, que en muchas ocasiones no resulta posible, debido a las limitaciones de las máquinas. Estas dificultades se han sobrellevado usando aproximaciones, que podrían englobarse en cuatro grupos: modelos de distribución de las pérdidas, modelos de capa de cortadura, modelos de capa límite y leyes de pared. Así pues para llevar a cabo todas estas aproximaciones, la región próxima a la capa límite es caracterizada con nuevas variables adimensionales que definen las condiciones en la pared. Así, estas nuevas variables adimensionales son definidas en términos de la velocidad de fricción en la pared, la cual a su vez depende, del esfuerzo cortante en la misma.

Si se llama "y" a la distancia normal a la pared, y "U" la velocidad promediada en el tiempo, resulta que adimensionalizadas tenemos:

$$U^+ = \frac{U}{u_t} \quad (37)$$

$$y^+ = y\rho \frac{u_t}{\mu}. \quad (38)$$

Con esto, logramos que si el flujo cercano a la pared, depende de las condiciones en la pared, podemos obtener de U^+ e y^+ funciones universales, dentro de unos límites de y^+ que nos permitan obtener algunas de las características de la capa límite; de hecho, en la práctica se comprueba las relaciones entre estas dos magnitudes.

Las funciones estándar de la ley de la pared son válidas para paredes lisas, pero pueden ser modificadas de acuerdo a la rugosidad de la pared mediante el ajuste de las constantes de la "Ley de la pared". Si la rugosidad de la pared está siendo modelada, la distancia a la pared en ésta es no dimensionalizada con una equivalente altura de rugosidad. Así algunos códigos incluyen una ley específica de la "Ley de la Pared" para modelar de acuerdo a este efecto (*Rough Wall Field*). Estas funciones universales pueden ser usadas para relacionar las variables fluidas en una primera malla de puntos computacional, desplazando alguna distancia "y" desde la pared, el esfuerzo cortante de la pared es obtenido directamente sin resolver la estructura situada en medio. Las funciones estándar de la "Ley de la pared" son una gran fuente de falsas ideas en la

computación de flujos turbulentos, incluso para usuarios con experiencia El propósito es obtener una capa viscosa extremadamente delgada cerca de la superficie.

Se observa a continuación restricciones que existen cuando utilizamos la ley de la pared:

- El flujo calculado debe ser consecuente con las asunciones hechas para llegar a las ecuaciones de pared. Fuera del rango de aplicación de estas funciones; estas funciones pueden ser inadecuadas.
- Señalar el valor de y^+ dentro de los primeros puntos de la malla para validar las funciones de pared.
- Las funciones de la ley de la pared no liberan al usuario de la necesidad de una adecuada resolución de una porción turbulenta de la capa límite.
- Para generar una malla con una distribución de y^+ pre-especificada resulta difícil, ya que de y^+ depende la solución.
- Así, algunas de las condiciones necesarias a tener en cuenta el modelado de la capa límite turbulenta.
- Chequear el límite inferior de y^+ , el cual se sitúa entre $y^+ = 20 - 30$.
- Chequear el límite superior de y^+ . Notemos que si el número de Reynolds es moderado y la capa límite sólo se extiende en y^+ entre 300 y 500, no hay oportunidad de resolver con exactitud la capa límite; si el primer punto de integración está emplazado con un valor de y^+ más pequeño de 100.
- Chequear la resolución de la capa límite. Si los efectos de la capa límite son importantes, es recomendable chequear la resolución de la capa límite después de la simulación.
- Chequear que las funciones de pared han sido usadas correctamente de acuerdo con la rugosidad de la misma.

4.2.9 El problema de la superficie libre

El problema de la superficie libre, es uno de los principales obstáculos en la computación con CFD en hidrodinámica marina. Este problema puede estudiarse desde diversos puntos de vista: flujo potencial o flujo viscoso. El problema de la superficie libre puede ser considerado como un caso particular de un problema más general, la predicción de la interfase entre dos fluidos inmiscibles: un líquido que fluye (por lo general agua) y aire. El cálculo de la interfase entre dos fluidos inmiscibles resulta difícil porque no son conocidos a priori ni la forma ni la posición de la interfase. Básicamente, existen dos enfoques para el cálculo de superficies libres: uno con *flujo potencial* y otro con *flujo viscoso* y dentro de éste último grupo encontramos los métodos de seguimiento de la interfaz y los de captura de la interfaz. El primero calcula el movimiento de las partículas de flujo basado en el enfoque de la función de Lagrange, donde el dominio numérico se adapta a la forma y posición de la superficie libre. Aquí aparecen diferentes técnicas numéricas, como por ejemplo los métodos SPH (Smooth

Particle Hydrodynamics) y los métodos PFEM (Particle Finite Element Methods). En los métodos de seguimiento de la superficie libre, ésta se considera como un límite del dominio de cálculo donde las condiciones de contorno cinemáticas y dinámicas son aplicadas. El principal problema de este enfoque son los grandes esfuerzos computacionales que son requeridos debido a la necesidad de actualizar el dominio de análisis de cada paso de tiempo y la dificultad en la imposición de continuidad de la masa de una manera precisa. Los métodos de captura de la interfaz consideran a ambos fluidos como un único fluido con propiedades variables. La interfaz es considerada como una región de cambio repentino en las propiedades del fluido. Este enfoque requiere un modelado preciso del salto en las propiedades de los dos fluidos teniendo en cuenta que la superficie libre se puede mover, doblar y volver a conectar de manera arbitraria, siendo necesario además que la imposición de las condiciones de contorno en la interfaz sea simplificada.

En este grupo podemos encontrar técnicas como: métodos de marcadores y celdas (Marked and cell); métodos VOF (Volumen Of Fluid) donde los fluidos son considerados como uno y la posición de cada fase del fluido se describe mediante la asignación de una fracción del volumen total con un número entre 0 y 1; métodos “*level set*”, aquí se define una función de posición de la superficie libre desde el nivel de referencia para cada una de las celdas, pudiendo tomar valores positivos o negativos. Podemos encontrar técnicas híbridas que tratan de sobrellevar los aspectos negativos de cada una de las anteriores y mejorar en los positivos, así encontramos la técnica ODDLS (Overlapping Domain Decomposition Level Set) donde se introduce el concepto de solapamiento de dominios, que permite mejorar la precisión en la captura de la superficie libre ahorrando coste computacional.

4.2.10 Técnicas básicas de CFD

4.2.10.1 BEM ("*Boundary Element Methods*"): Método de los elementos de contorno

Estas técnicas son empleadas básicamente en el cálculo de flujos potenciales. Así pues, en aplicaciones prácticas en hidrodinámica los métodos BEM reciben el nombre de métodos de los paneles. Este método divide la superficie del buque en pequeños paneles, así cada uno de estos paneles cumple la ecuación de la Laplace del potencial de velocidades $\nabla^2\phi = 0$.

4.2.10.2 FDM ("*Finite Difference Methods*"): Método de las diferencias finitas

En este caso, el dominio fluido es discretizado en todos sus puntos. Así, las derivadas parciales son aproximadas mediante diferencias finitas, para posteriormente resolver un sistema de ecuaciones resultante. El error cometido por este tipo de métodos puede llegar a ser importante. Así, cada vez, son menos utilizados, siendo sustituidos por métodos como los que se presentan en los siguientes puntos.

4.2.10.3 FEM ("Finite Element Methods"): Método de los elementos finitos

El método de los elementos finitos predomina fundamentalmente en los cálculos estructurales. En hidrodinámica el rol no es menos importante así que, presentemos muy escuetamente este método. El MEF es un procedimiento de aproximación de problemas continuos en donde se divide el sistema en un número finito de partes (elementos), cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros, siendo la resolución del sistema completo, mediante el ensamblaje de los elementos, similar a un problema discreto.

Para analizar el comportamiento de una estructura continua mediante el MEF se procede de la siguiente manera:

1. El continuo se divide, mediante líneas o superficies imaginarias, en un número de elementos.
2. Se supone que los elementos están conectados entre sí mediante un número discreto de puntos, llamados nodos, situados en sus contornos. Los desplazamientos de estos nodos serán las incógnitas del problema, como ocurre en el análisis de estructuras.
3. Se elige un conjunto de funciones que definan de manera única el campo de fluido, dentro de cada "elemento finito", en función de las condiciones de contorno.
4. A partir de aquí el problema se resuelve como un sistema discreto. Es decir, se ensamblan las matrices de cada elemento, se imponen las condiciones de contorno y se resuelve el sistema de ecuaciones de equilibrio del campo fluido, con lo que se determinan los vectores velocidad, tensiones... Sin embargo, en hidrodinámica muchas de las asunciones tomadas para el cálculo elemental, así como las funciones elementales no pueden ser usadas para el cálculo del error en las integrales de la misma manera que en el método de Galerkin, con lo que método pierde elegancia.

4.2.10.4 FVM ("Finite Volume Methods"): Método de los volúmenes finitos

Este método al igual que los métodos anteriores, es utilizado para la discretización tanto temporal como espacial del problema en cuestión. Sin embargo, éstos integran las ecuaciones de conservación de masa y de momentum sobre toda la celda antes de aproximar el valor en el nodo central. Así, se permite que el error cometido en la cara de salida se cancele con el error de la cara vecina, permitiendo la conservación de masa y momentum. Por ello muchos de los códigos comerciales emplean este método para la resolución de las ecuaciones.

4.2.10.5 Métodos espectrales

Los métodos espectrales utilizan el mismo enfoque general que el de diferencias finitas y métodos de elementos finitos sustituyendo las incógnitas de la ecuación que rige por series truncadas. La diferencia es que, cuando los dos métodos utilizan aproximaciones locales, la aproximación método espectral es válida en todo el dominio. La aproximación es, ya sea por medio de series de Fourier truncada o por una serie de polinomios de Chebyshev. La discrepancia entre la solución exacta y la aproximación se aborda con un concepto similar al de residuos ponderados de los elementos finitos.

4.2.11 Mallado de problemas: discretizando el dominio espacial

Los programas CFD que emplean métodos FEM o FVM suelen estar formados por tres módulos: un preprocesador, un módulo de análisis o solución y un postprocesador. El preprocesador es el encargado de llevar a cabo el mallado del problema. Así, los mallados se pueden clasificar atendiendo a dos criterios: la forma de definir las fronteras del dominio y la conectividad entre los distintos puntos del mallado. En cuanto a la forma de definir las fronteras, están los mallados conformes (no interpolan en la definición de la frontera) y los no conformes (que no definen la frontera real sino una aproximación numérica de la misma). Atendiendo al criterio de estructura de los datos del mallado, existen dos métodos de generación de mallados que darían lugar a los dos tipos de mallados básicos: los estructurados y los no estructurados. En los mallados estructurados, los puntos se colocan siguiendo una red de familias de líneas coordenadas que permiten visualizar la relación entre unos y otros de forma directa. Este hecho simplifica mucho los algoritmos respecto a lo que sería un mallado no estructurado.

En cualquiera de los casos (estructurado o no estructurado), el mallado debería cumplir una serie de requisitos genéricos:

- Ajuste a las fronteras de la región a estudiar de forma que las condiciones de contorno queden representadas con la mayor exactitud posible.
- El mallado debe distribuirse localmente de la forma más regular posible, con variaciones suaves de su densidad. La densidad de un mallado se define como el número de puntos por unidad de superficie o volumen. Es fundamental elegir la densidad de malla adecuada para resolver un problema.
 - Si es demasiado basta, no se consigue una solución correcta.
 - Si es demasiado fina, el coste del análisis es desproporcionado a los resultados.
- La mayor densidad del mallado se debe localizar donde se espere que las variaciones espaciales de la solución sean mayores.
- El mallado debería ajustarse dinámicamente a las variaciones de las variables en la solución del flujo.

Las dificultades que se pueden presentar en la generación de la malla usualmente son las siguientes:

1. Excesiva distorsión de elementos. En el MEF se usan elementos básicos (uni, bi y tridimensionales) de formas sencillas (rectas, triángulos, rectángulos, cubos, etc.) que hay que transformar en otras formas de configuración más arbitraria.
2. Mezcla incorrecta de tipos de elementos. La mayoría de los programas de elementos finitos dan libertad completa al usuario en la elección de elementos en la malla, pero no todos los elementos son compatibles entre sí.
3. Conexiones incorrectas entre elementos. Para que haya convergencia en el MEF debe haber continuidad. En el interior de los elementos la continuidad está asegurada, pero en la frontera entre elementos es el usuario el que debe conseguirla mediante una elección correcta de la malla.

Es fundamental elegir la densidad de malla adecuada para resolver un problema.

- Si es demasiado basta, no se consigue una solución correcta.
- Si es demasiado fina, el coste del análisis es desproporcionado a los resultados.
- El usuario debe conocer la respuesta del elemento y las aproximaciones utilizadas en su formulación.
- Los elementos lineales requieren mallas más finas que los cuadráticos, y éstos más que los cúbicos.

Mallado Estructurado

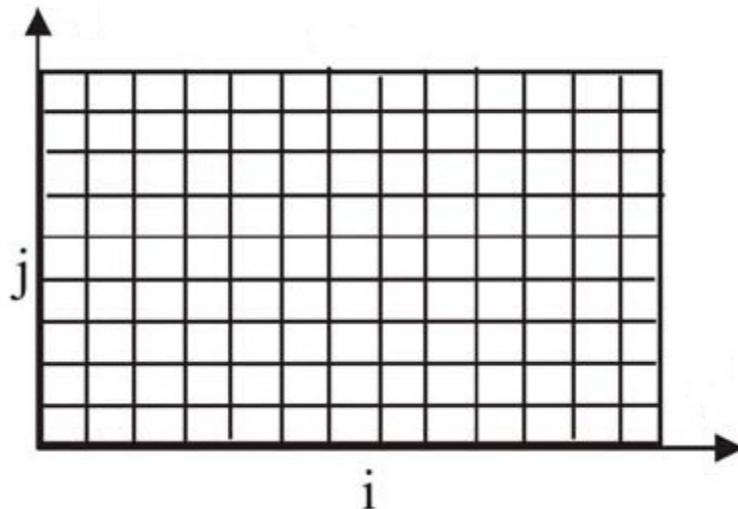


Figura 17. Mallado Estructurado.

Ventajas:

- El mallado estructurado, conduce a resoluciones más simples.
- Se requiere de menos memoria para el almacenamiento de las variables.
- Los métodos implícitos utilizan la estructura del mallado: ADI, métodos de relajación lineal, relajación en el plano.
- La suavización y ortogonalidad pueden ser controlados fácilmente.

Desventajas:

- El manejo de geometrías complicadas no es flexible.
- La adaptabilidad solo es posible añadiendo o moviendo líneas de mallado (2D) superficies de mallado (3D), lo cual no lo hace flexible.
- El movimiento de contornos es difícil de manejar.

Mallado no Estructurado

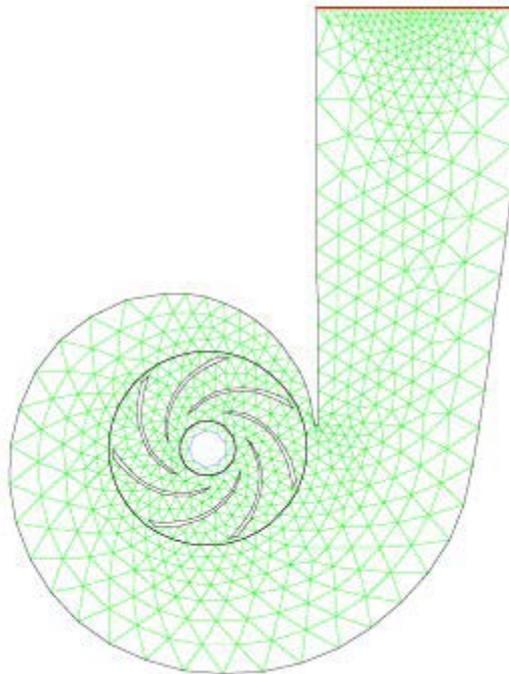


Figura 18. Mallado No Estructurado.

Ventajas:

- Flexibilidad para manejar geometrías complicadas, adaptabilidad, movimiento de contornos.
- La generación de la malla automática es más fácil, incluso para geometrías de tres dimensiones muy complicadas como el generador de mallado 'mínima entrada utilizada.

Desventajas:

- Requiere mayor almacenamiento de variables y precisa un direccionamiento indirecto.
- Las resoluciones son más complicadas en general.
- La exactitud es más baja, en general, debido a la falta de suavidad del mallado.

Mallado Multibloque

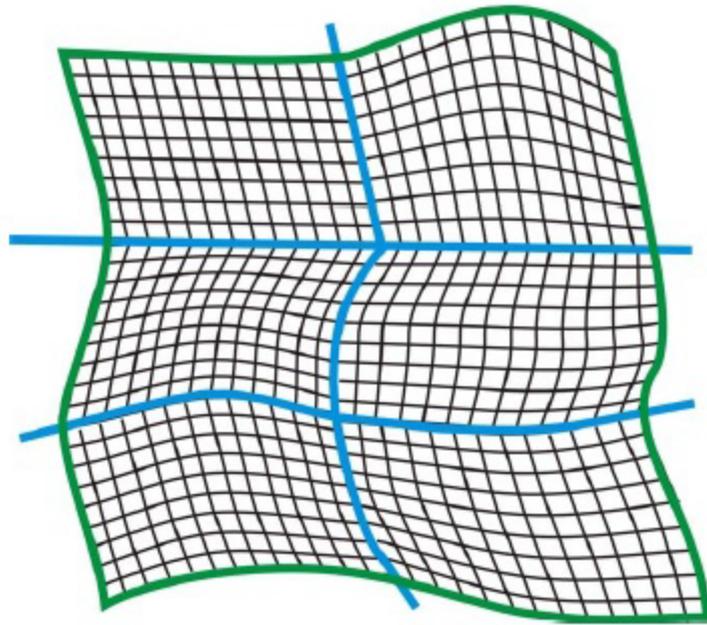


Figura 19. Mallado Multibloque.

Ventajas:

- Se pueden manejar geometrías más complicadas, lo que aumenta la flexibilidad en general.
- Permite maneras fáciles de paralelizar en un multiprocesador.
- Ahorra memoria en máquinas de secuencias.

Desventajas:

- La generación de mallados es difícil: La forma de especificar los contornos entre bloques de forma adecuada exige alto grado de experiencia.
- Es todavía menos flexible que los mallados sin estructurar, cuando existe movimiento de contornos.

4.2.12 Características básicas de los programas CFD

En este último punto nos adentraremos en el tipo de interfaz que nos ofrece las herramientas CFD, desde el punto de vista del usuario informático. Actualmente, existen gran variedad de programas de programas destinados al cálculo CFD desde códigos libres hasta códigos comerciales de gran potencia.

Actualmente podríamos agruparlos en varios bloques:

Códigos generales:

Éstos podrán englobar aquellos códigos que disponen herramientas al servicio del usuario para: generar la geometría, aplicar condiciones de contorno, discretizar el

dominio espacial (en general a este paso se le llama "mallar la geometría"), resolución del problema y presentación de resultados. Ejemplos de ellos tenemos: Tdyn, CFX, Fluent, Phoenix, Open FOAM...

Códigos específicos:

Son aquellos, los cuales van destinados a una parte concreta del proceso de aplicación de un código CFD. Aquí podemos dividirlos en: códigos para la generación de la geometría y aplicación de las condiciones de contorno, códigos para la generación de mallado, códigos encargados del cálculo específico y códigos para la visualización del resultado. De todos los anteriormente mencionados, podría decirse que son los encargados de los cálculos los puramente códigos CFD. Al igual que ocurría con los anteriores dentro de éstos existe una gran variedad como: Paraview, ezVIZ VTK, FieldView...

A continuación, veremos qué proceso es seguido para realizar un análisis mediante códigos generales. Con estos tipos de programas la experiencia y conocimientos del usuario son factores sumamente importantes para llevar a buen puerto los estudios realizados. Los códigos generales suelen dividirse normalmente en tres partes fundamentales: un preprocesador, un módulo encargado del cálculo y un postprocesador.

El preprocesador, es aquella parte del programa que se encarga de realizar todos aquellos trabajos necesarios para un correcto cálculo de las ecuaciones a resolver del problema específico. El módulo de cálculo, es la parte del programa cuya función es resolver numéricamente mediante determinadas partes las ecuaciones planteadas mediante el preprocesador.

Por último, el postprocesador, es la otra parte del programa, que una vez resuelto el problema, se encarga de mostrar de forma gráfica o similar, el resultado obtenido en el cálculo.

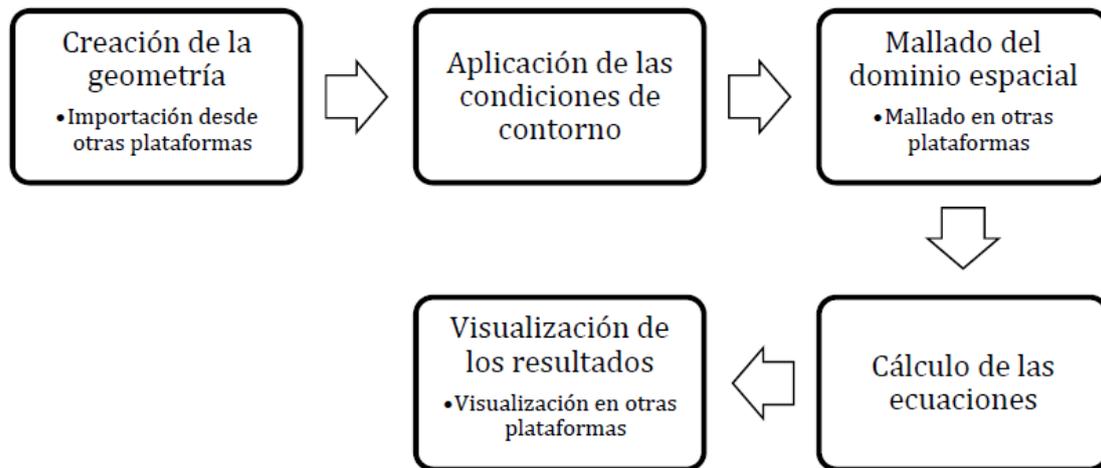


Figura 20. Progreso de cálculo de un programa CFD.

La primera parte de todo este proceso de cálculo consiste en la generación de la geometría de estudio, en lo que nos concierne será un buque. Normalmente ésta ya será exportada desde otras plataformas mediante archivos de intercambio como puedan ser: iges, 3dm, dxf, acis, parasolid... Así, solamente será necesario generar un volumen de control para el problema a estudiar, en el caso de un buque será un espacio paralelepípedo formado por dos mitades; es decir, el agua y el aire. A continuación una vez que el usuario ya tiene definida la geometría de estudio, junto con su volumen de control, pasará a la asignación de las condiciones de contorno necesarias para la resolución del problema, éstas pueden ser de tipo Neumann o Dirichlet por ejemplo. Estas condiciones serán tales como: la velocidad del fluido, rugosidad del casco, tipo de capa límite, campos de presiones y velocidades, aceleración de la gravedad, espectro de oleaje...

El siguiente paso a realizar por el especialista, es de suma importancia ya que dependiendo de la discretización del dominio espacial los resultados serán más o menos aproximados a la realidad. En este estadio, el usuario mallará toda la geometría realizada en el primer paso. Cuanto más fino sea esta discretización, o sea, el mallado, en aquellas zonas importantes mejor será los resultados. Sin embargo, no podremos mallar tan fino como queramos, ya que éste depende de la memoria RAM del ordenador y de las prestaciones de cálculo por lo que si el mallado es demasiado fino el cálculo se alargará indefinidamente.

Una vez mallado el problema, se procederá a su cálculo, para finalmente visualizar los resultados. En esta parte se pueden obtener una variedad inmensa de resultados gráficos, desde líneas de corriente hasta videos del problema en movimiento. La mayoría de los códigos CFD permiten la exportación de los mismos, de manera que el usuario pueda trabajarlos en otras plataformas.

4.2.13 Introducción del software a utilizar

Tdyn es una completa solución de ingeniería para la solución de problemas de dinámica de fluidos, flujo en medio poroso, transferencia de calor y multifísica.

El núcleo de cálculo de Tdyn CFD+HT se basa en el cálculo finitesimal (FIC-FEM) que ofrece la mayor fiabilidad y precisión, en un algoritmo robusto y rápido. La solución de análisis ha sido aplicada en simulaciones de la aerodinámica de edificios, hidrodinámica de buques, procesos de fabricación de envases de vidrio, refrigeración de dispositivos electrónicos, flujo en bombas y ventiladores, estudios de ventilación.

Dispone de diferentes módulos que permiten resolver la dinámica y la transferencia de calor tanto en sólidos como en fluidos, incluyendo efectos de turbulencia, transporte de sustancias y problemas de superficie libre. Tdyn CFD+HT también ofrece la posibilidad de realizar análisis de interacción fluido-estructura (FSI), utilizando modelos estructurales de vigas, cables, láminas, membranas y sólidos.

Los diferentes tipos de análisis disponibles en Tdyn CFD+HT se encuentran completamente integrados en una avanzada interfaz gráfica de usuario (GUI), para la definición de la geometría y los datos de entrada, la generación de malla y el post-proceso de los resultados del cálculo. La GUI de Tdyn se basa en una versátil estructura de datos en forma de árbol, facilitando el control de todo el proceso de introducción de los datos para el análisis.

Capítulo 3

Diseño del módulo de visión artificial



5- Cálculo y diseño del módulo de visión artificial óptimo para un vehículo IVER2-Ecomapper.

En el presente capítulo se procede al diseño y cálculo del módulo de visión artificial óptimo para el vehículo IVER2-Ecomapper. Se iniciará con una descripción del vehículo inicial y sus diferentes características. Después se realizará un estudio de los diferentes módulos que se instalarán en el vehículo, así como los materiales empleados en ellos. Para finalizar se realizarán un estudio de los consumidores a bordo, así como un balance de pesos del vehículo.

5.1 Descripción del vehículo IVER2-Ecomapper

En este apartado se va a realizar un estudio de todas las características y propiedades fundamentales que componen el vehículo IVER2-EcoMapper en el cual se proyectará el módulo de visión artificial. Entre estas características se encuentran las misiones probables a las cuales operará el vehículo, así como los diferentes requisitos que se le exigen. La Figura 21 muestra un ejemplo del vehículo.



Figura 21. Diseño Inicial IVER2-EcoMapper.

5.1.1 Misiones probables

El desarrollo inicial AUV es dirigido a la creación de una herramienta sencilla y funcional robusta para su uso por contratistas del sector privado, se centra en la recopilación de datos de la encuesta hidrográfica y ambiental en las zonas cercanas a la costa. La batimetría topográfica se considera inicialmente la aplicación más probable. Puertos, ríos e instalaciones portuarias, con requisitos de profundidad de menos de 60 metros y un entorno físico moderadamente difícil para las operaciones de AUV serán las áreas de operación.

5.1.2 Requisitos de diseño

Se proyecta el AUV como un elemento para llevar los sensores, con un ordenador personal sumergible para registrar los datos y la 'unidad' del AUV. Estos factores ayudan a mantener la simplicidad, por ello el desarrollo del vehículo se centra en mejorar radicalmente la dinámica de costes por lo general asociados con el históricamente pequeño mercado de los pequeños AUVs polivalentes. Al centrarse en las posibles misiones, y más concretamente en las misiones más probables, se evitan elementos complejos, costosos e innecesarios. Después de discutir sus posibles aplicaciones se desarrollan los objetivos para la funcionalidad de los componentes del sistema:

Desplazamiento

El vehículo deberá de ser lo suficientemente pequeño para poder ser desplegado y recuperado por una sola persona, ya sea desde la orilla o desde un pequeño barco. La Armada de Estados Unidos tiene una categoría mínima de tamaño AUV (UUV) llamado "*Man-Portable*", definido como menos de 45 kilogramos de desplazamiento, pero se observa que la medida es demasiado grande para la carga del sensor y la duración de un vehículo próximos a la costa útil. El desplazamiento se fija en menos de 23 kilogramos.

Peso

El tamaño y peso se deben de sincronizar necesariamente en un recipiente de flotación neutra para una fácil manipulación por el operador. Incluso teniendo en cuenta la mejora de la estabilidad de los buques más grandes, la compensación de la facilidad de manejo, y la reducción de consumo de energía y la complejidad asociados, favorece la minimización del peso.

Energía de la batería

Las baterías deben de tener un alto rendimiento, recargables, de preferencia con un sensor capaz de medir el estado de la carga para poder supervisar en tiempo real su consumo y así optimizar el tiempo de los vehículos en servicio, o para ayudar en la priorización de las misiones. Con ello se conseguirían tiempos de ejecución de misiones de más de 8 horas.

Velocidad

3 - 4 nudos (1.5 - 2m / s) para la topografía.

Navegación simple

GPS, brújula, con correcciones acústicas posibles para operaciones especiales.

Control del Vehículo.

Mayor control a baja velocidad (mejora en el sistema de aletas tradicionales) para su uso a bajas velocidades o en espacios confinados.

Profundidad operativa

30 - 60 metros, dirigidos a las aguas del puerto, costeros y lacustres.

Coste de adquisición

Un coste de adquisición bajo debido a un diseño estandarizado y simple. Suponiendo que el volumen potencial de mercado es variable con respecto al precio, el vehículo tendrá un valor menor de 50.000 euros por unidad.

Coste operativo

Bajo coste de operación, funcional, robusto, fácil de mantener, para promover las operaciones de varios vehículos como mejora en la eficacia. (Networking o enjambre)

5.1.3 Características de diseño

Electrónica

Un bajo consumo de energía en todas las funciones (X86) de la Computadora CPU y otros módulos funcionales en factor de forma PC104 (3,6 "x 3,8", además del perímetro para el cableado) minimiza el consumo interno sin dejar de utilizar los componentes de los productos básicos. Todos los dispositivos comerciales tales como cámaras y digitalizadores (de la Industria Surveillance), Radio Enlaces (de oficina Wi-Fi) Sondas (de la navegación de recreo) y muchos otros dispositivos útiles tienen pequeños esbozos, salidas de datos en serie estandarizados y los requisitos de potencia mínimos. La mayoría de los dispositivos de add-on funcionan de manera completa en Windows XP, mientras que otros sistemas operativos tienen sólo una selección limitada, incluyendo Linux.

Baterías y módulos de administración de energía.

OceanServer produce una variedad de baterías y controladores de batería en formato PC-104. Estos fueron diseñados para aplicaciones OEM embebidos, que a menudo se alojan en recintos pequeños o irregulares.

Configuración del casco

Se manipulan los modelos sólidos de los componentes del sistema en SolidWorks, con los cuales se llegó a la determinación de un casco cilíndrico con un diámetro interno de 12 a 15 centímetros. El diámetro interior seleccionado de 13 centímetros permite la flexibilidad suficiente para variar las combinaciones de baterías y electrónica sin incluir el espacio adicional que requiere lastre adicional en configuraciones mínimas del vehículo.

La longitud del tubo central, que alberga las baterías y la electrónica necesaria será un poco más de dos pies de largo para un vehículo que cumpla con todos los objetivos de diseño establecidos. Esta longitud se puede ajustar más o menos en base a la energía de la batería requerida o configuraciones de sensores opcionales, sin afectar a las secciones de proa o de cola. Las secciones de proa y de la cola fueron diseñadas para cumplir con la formación en anillos del contorno del casco. Este enfoque proporciona una longitud de 122 centímetros (sin hélice), y un desplazamiento volumétrico en agua salada de poco menos de 20 kilogramos. Esto hace al vehículo fácil de manejar, y en conformidad con el objetivo de peso para un AUV *Man Portable*.

5.1.4 Componentes funcionales

Energía de la batería

El diseño del sistema de potencia del vehículo se basa en un sistema basado en las baterías OceanServer MP-08, DC-023 y DC2U-1V. Estos componentes permiten añadir energía de la batería de litio-ion recargable a cualquier dispositivo con muy poco esfuerzo de ingeniería. El subsistema integra cargadores de baterías inteligentes y gestiona todas las políticas de seguridad para los paquetes de baterías de Litio-ion. Un nuevo paquete de litio-ion inteligente, la BA95HCL-FL, es introducido por OceanServer para mejorar el uso del espacio en la parte central del vehículo. El nuevo paquete, que contiene 12 cada uno, de 3,6 voltios, de 18650 células de iones de litio recargables, ofrece 96 vatios de potencia, con 2 5,75 x 29,85 centímetros de tamaño, y un peso de 0,65 kilogramos. El subsistema de alimentación crea 24 VDC para la propulsión del motor. Para la CPU y los sensores, el sistema incorpora un módulo convertidor de DC-023. Todos los voltajes regulados se derivan de la batería de ion-litio de tensión nominal de 16,0 - 11,5 voltios de corriente continua por los convertidores para reducir al mínimo el exceso de calentamiento que sólo puede ser retirada del vehículo por convección térmica a través de las paredes del casco.

El vehículo de base contendrá de 6 a 8 de los paquetes de batería inteligente, para una potencia total de 760 vatios. Estos alimentarán el motor de propulsión y probables sensores por más de 10 horas, lo que excede el objetivo de tiempo necesario. La recarga

de las baterías se puede completar en 3,5 horas con una fuente externa de 18 V DC, derivado de CA o de alimentación de 24 voltios de un barco.

Propulsión

Se utilizará un motor sin escobillas DC de alta eficiencia para accionar el vehículo. Se ejecuta en 24 voltios DC, y consume menos de 20 vatios de energía para propulsar el vehículo a unos 3 nudos.

Control del Vehículo

- Aletas. Cuatro aletas Airfoil, generadas por ordenador con un diseño de perfil NACA 0012, se utilizan para el control básico de guiñada, cabeceo y balanceo. Estas superficies de control son accionadas independientemente por cuatro actuadores lineales, para permitir que el software de control del vehículo divida los movimientos en el plano horizontal y vertical de forma independiente. Esta compensación activa es una característica del software de control de la misión, basado en las aportaciones de los acelerómetros en los 3 ejes contenidos en el sensor de la brújula.
- Hélice de proa. La sección de proa del vehículo incluye un 'arco propulsor' de diseño similar a los utilizados cada vez más en la industria marina para controlar barcos y buques en espacios reducidos. Posee una pequeña bomba bidireccional que proporciona suficiente fuerza para girar el vehículo a velocidad cero. Esta característica permite que el software de control del vehículo complemente las fuerzas aplicadas a las superficies de las aletas a baja velocidad, lo que mejora significativamente la maniobrabilidad, y por lo tanto permite a los diseñadores mecánicos minimizar el área de superficie de las aletas y todavía cumplir los objetivos de diseño.
- Rack del Tubo Central. El módulo de la CPU del vehículo, la unidad de disco, los módulos de control de sensores, GPS, conexión Wi-Fi, digitalizadores y subsistema de alimentación se montan en un equipo de rack independiente que puede ser operado fuera del vehículo. Esto simplifica la configuración y permite una alineación física exacta de este componente relativamente pesado. El bastidor es de aproximadamente tres pulgadas más corto que el tubo central, y una vez colocado inicialmente se fija en su lugar, se puede mover una pulgada dentro del tubo para cambiar un poco el centro de gravedad del vehículo, y por lo tanto cambiar la relación entre el centro de gravedad (CG) y el centro de carena (CB). Incluso pequeños cambios han demostrado mejorar la capacidad de los vehículos al bucear o volver a la superficie. Se situarán juntas tóricas selladoras en cada extremo para

proteger los componentes electrónicos de daño del agua causado por un mal sello entre las secciones del casco o dentro de las secciones de proa o de cola.

Sensores

Se supuso que el usuario final seleccionará sensores apropiados más allá de los necesarios para controlar el vehículo. Están disponibles una variedad de sensores de bajo consumo, con salidas de datos en serie como pueden ser YSI, RDI, Nortek, Airmar, Chelsea Instruments, Falmouth Scientific, B-Tech, bentos, y otros.

El vehículo inicial incluye los siguientes sensores:

- Sonar de barrido lateral, doble frecuencia, 300KHz / 800 KHz.
- Sonda (altura fuera inferior).
- Transductor de presión (Profundidad de superficie).
- Cámaras (IR poca luz o color bajo la luz, tanto de vídeo capaz).
- GPS diferencial (Un pie de la antena).
- Compass (Incluye sensor de actitud).

Electrónica:

El software de control del vehículo bajo el agua se incorpora en el software MissionP, que funciona con un bajo consumo de energía X86 CPU, bajo el sistema operativo MS Windows XP™. La CPU de base funciona a 1Ghz y tiene 512 MB de memoria del sistema, que apoyan sobre todo el registro de datos de los sensores a bordo.

El subsistema de baterías contiene sus propios microprocesadores en varios niveles, que hacen cumplir las políticas de seguridad redundantes y proporcionan datos de gestión para el monitoreo de las características del programa de control del vehículo bajo el agua.

Comunicaciones:

El método principal para las misiones de carga y datos de registro de recuperación es a través de una conexión inalámbrica cuando el vehículo está en la superficie. El AUV está equipado con un transceptor IEEE 802.11g Wireless Ethernet para una ruta de datos de 108 MB a un transceptor de hasta 183 metros de distancia en el vehículo de apoyo. El vehículo posee discos de datos con capacidad de 160 GB, por lo que la necesidad de la transferencia en tiempo real es eliminada en la mayoría de los casos, a favor de una transferencia de archivos de alta velocidad una vez que el Iver2 ha completado un trabajo de día. Alternativamente, el vehículo puede soportar un módem acústico, o

incluso un sistema de telemetría por satélite tal como un Inmarsat C o un enlace Satphone Globalstar, aunque estos métodos se consideran más allá de los requisitos de las iniciales Iver2 misiones.

5.1.5 Software

El software para el Iver 2, consiste en el programa de control del vehículo bajo el agua y el software MissionP los cuales están programados en Visual Studio, y están diseñados para ser fácilmente extensible para satisfacer las necesidades de aplicaciones. El software de planificación MissionP presenta una GUI intuitiva que permite al operador diseñar misiones de forma rápida, y extraer archivos de datos completos para después un post-procesamiento. La función principal del software MissionP es recoger datos de sensores y organizarla de una manera intuitiva para la clasificación y el análisis futuro.

El programa de control de vehículo submarino dirige el Iver 2 por medio de un archivo que contiene la misión (latitud / longitud) waypoints, así como los comandos y parámetros para cada waypoint. El programa utiliza un archivo de datos de la carta estándar en formato GEO NOS y permite al usuario trazar misiones utilizando tablas de la NOAA. Estos gráficos de mapa de bits se pueden comprar de varias empresas en línea, incluyendo www.thecapn.com Softcharts.

El software de planificación MissionP permite la creación de puntos de interés que se pueden arrastrar por la pantalla, para crear rutas o barridos de un área. El panel de control permite al usuario seleccionar los parámetros de funcionamiento del vehículo, como la velocidad y la profundidad, y para controlar los instrumentos de sensores tales como las cámaras de vídeo y el sonar de barrido lateral, tasa de recogida de datos. Grandes campañas pueden ser prediseñadas utilizando el software de planificación MissionP, lo que crea una serie de archivos de instrucción que más tarde se pueden cargar en el AUV y ejecutarlas.

El operador puede ver gráficamente toda la campaña, o dividirlo en misiones más pequeñas, dividir el trabajo entre varias carreras de un solo vehículo o entre varios Iver2 funcionando simultáneamente. Campañas grandes pueden diseñarse y realizarse con mayor rapidez. El software permite al operador integrar datos de múltiples carreras o vehículos, y para abrir un archivo de misión existente para la edición y actualización. El software de planificación MissionP también permite la colocación de boyas superficiales acústicas en el área de estudio, e integrará la posición y hora de los datos recogidos en un formato de archivo de la misión común. Todos los puntos de datos se muestran en LAT / LON coordenadas durante la edición. Después de resaltar un waypoint en la pantalla con el ratón del PC, el operador puede borrarlo, editar su ubicación arrastrándola a una nueva ubicación, o insertar un nuevo punto de referencia.

Los datos del waypoint y los parámetros de funcionamiento también se pueden ver en el cuadro de control y parámetros se pueden editar fácilmente. Esto incluye los parámetros de sonar de barrido lateral o parámetros foto / vídeo para este archivo de datos de waypoints que se puede cargar o descargar como imágenes a / desde el vehículo Iver2. La misión mandada, así como la pista / LON real LAT que el vehículo corrió activado mientras opera, está gráficamente presentado en un gráfico de la zona de estudio. El vehículo registra los datos de vídeo de hasta dos cámaras y estos datos se pueden ver y localizar por la imagen más cercana a esta latitud / longitud en el mapa. Esta característica hace que sea fácil para correlacionar las imágenes de vídeo cuando se realiza una búsqueda o encuesta.

VectorMap (VM) es una aplicación de software de Windows. Se utiliza para planificar las misiones de la familia de los AUV Iver. Las misiones se crean utilizando gráficos o imágenes georeferenciada.

Una vez completada una misión VectorMap permite superponer los datos de registro y los datos del sensor o exportar de otras herramientas. Nuevas misiones se pueden crear utilizando los registros de sonar como tablas de base.

Seguidamente se explican brevemente los pasos iniciales para planificar y empezar una misión

1. Cargar cualquier conjunto de gráficos o imágenes.
2. Planificar el curso del vehículo añadiendo waypoints con características propias.
3. Guardar la misión.
4. Instalar la misión en el vehículo, cargarla y comenzar la misión.

Paso 1 Cargar el mapa

Múltiples mapas pueden ser importados al VM, en la imagen siguiente un gráfico de NOAA se superpone con una imagen georegistrada. Esta característica permite a los usuarios comparar la precisión entre distintas fuentes. En el ejemplo de una imagen de la S-57 y GeoTIFF a continuación se cargan. La mayoría de los formatos de gráfico son compatibles.

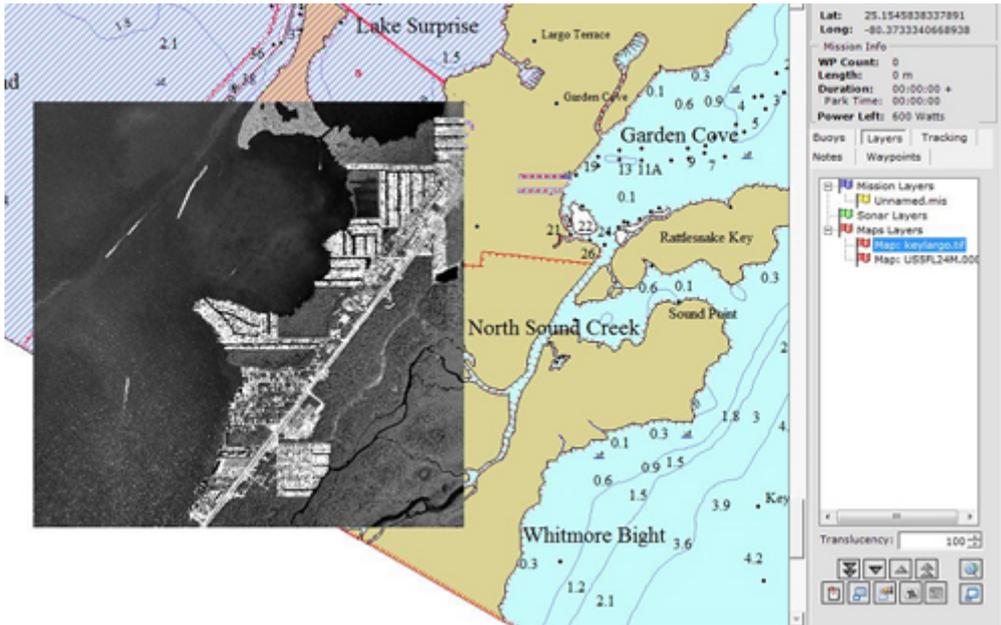


Figura 22. Combinación de imágenes superpuestas en VectorMap.

Paso 2 Añadir Waypoints

Basta con apuntar y hacer clic para añadir waypoints y cambiar el comportamiento del vehículo, el sensor registro puede ser modificado por waypoint.

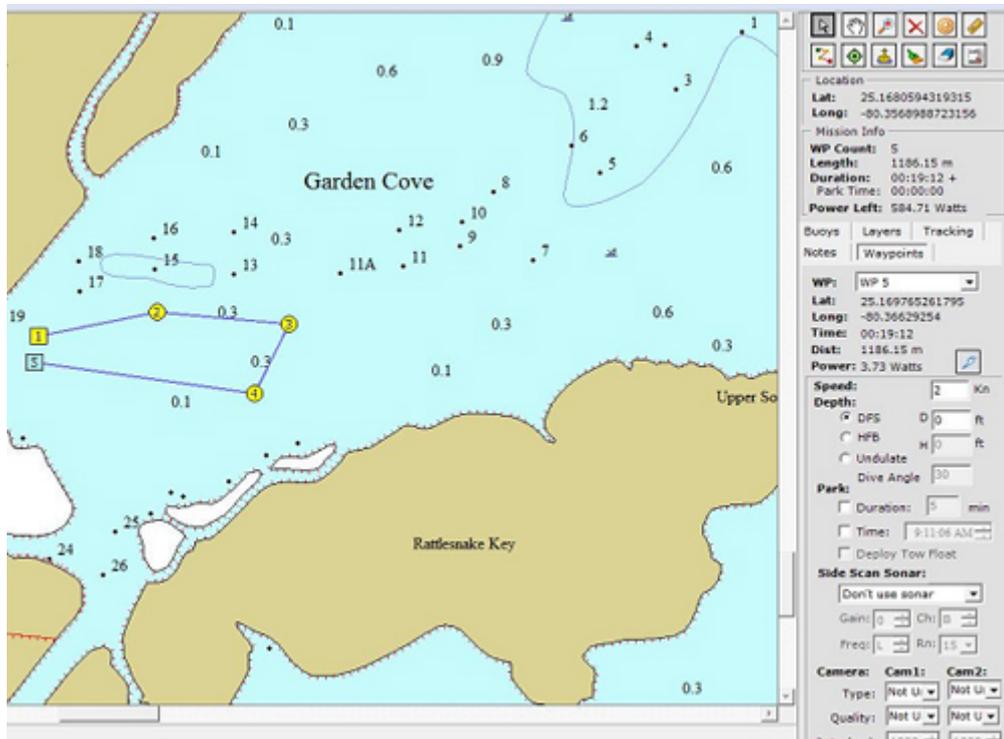


Figura 23. Ejemplo de colocación de Waypoints.

Un barrido se puede añadir fácilmente seleccionando el área e Iver escaneará y VM sintetizará de forma automática los waypoints de la misión.

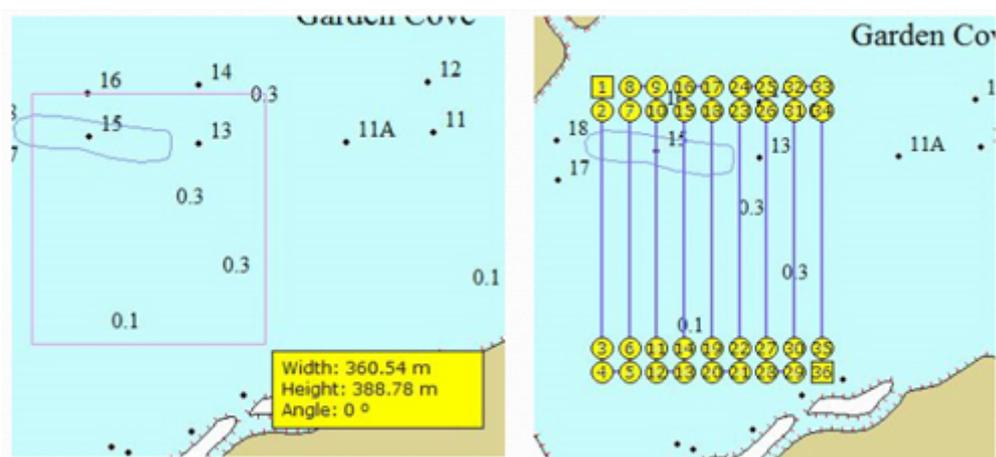


Figura 24. Misión de barrido con Waypoints.

5.1.6 Pruebas del sistema

Pruebas iniciales y misiones simuladas en agua libre han validado muchos aspectos del Iver2, además de destacar las áreas de mejora. El objetivo de hacer Iver2 robusto fue para asegurar una larga vida útil con el fin de realizar misiones de forma continua. Las soluciones completas para los problemas que surgen durante la validación Iver2 se centran en el apoyo o la asociación con sistemas OEM y/o proveedores de servicios que tienen la experiencia operativa y recursos sobre el terreno para desplegar los vehículos en aplicaciones del mundo real. Para convertirse en comercialmente viable, tiene que hacer tareas simples de una manera intuitiva para un período de servicio razonable, y ser fácil de mantener y/o reparar por el personal y los recursos que se encuentran en el sitio de trabajo.

Las características avanzadas o especializadas pueden ser consideradas en el futuro, pero la viabilidad de mercado es casi seguro que depende del vehículo actual. Sin embargo, ya que gran parte se ha trabajado en los últimos años en las áreas de control del vehículo, técnicas de topografía, algoritmos de navegación basados en inteligencia, de conexión bajo el agua, la transferencia de datos bajo el agua y la recarga, y enjambres de varios vehículos, el Iver2 fue desarrollado para aceptar fácilmente los datos de los programas de control existentes y mapear estos comandos para los sistemas de a bordo. El Programa de Control de Vehículo Submarino y el software de planificación MissionP han estado en desarrollo y validación durante 30 meses.

5.2 Módulos a insertar en el vehículo

Tras el estudio de todos los componentes del vehículo se procede a elaborar una serie de requisitos que tendrá que tener el módulo de visión artificial a instalar dependiendo de varios factores como pueden ser su utilidad, características y limitaciones. Entre los elementos que se instalarán en el módulo se pueden destacar la cámara Go Pro Hero 4 Black Edition como elemento de grabación, focos LEDs para la iluminación, así como un dispositivo laser como herramienta de medida y escala. El módulo de visión artificial será denominado Neptuno a partir de este punto en el proyecto.

5.2.1 Visión frontal

Se necesita una cámara frontal para tener visión del espacio en el sentido de avance del vehículo. Este sistema deberá de poseer las siguientes características y limitaciones:

- Gran campo de visión.
- Buena calidad de imagen tanto foto como vídeo.
- Bajo peso.
- Alta autonomía.
- Hidrodinámica adecuada.

En cuanto a la posición del módulo en el vehículo deberá de ser única para tener una referencia fija del muestreo realizado. Este módulo será extraíble con relativa facilidad para su correcto mantenimiento. Con respecto a la programación del encendido o apagado del sistema estará incluido en la planificación de la misión en el programa MissionP. En este módulo también se encuentra un láser de posicionamiento con el cual se podrá tener una distancia de referencia ya conocida de las imágenes que se están recogiendo obteniendo así un factor de escala de lo observado. Este módulo tiene 3 focos de iluminación con el objetivo de iluminar la zona en cuestión.

Se diseña un cabezal de visión nuevo en el que se incluyen elementos como cámaras para visión estereoscópica del fondo, visión de 360°, iluminación y láser de referencia de medida.

Como elemento de grabación se utilizará una cámara de video GoPro Hero 4 al ser la más potente del mercado en cuanto a ángulo de visión y calidad de video. Las características del elemento se muestran en la Tabla 6 y la Figura 25.

Cámara	Go Pro Hero 4
Dimensiones	
Longitud	41 mm
Altura	59 mm
Espesor	29 mm
Peso	89 g
Campo de visión	Ultra, ancho, medio y estrecho
Apertura de la lente	F 2.8
Tamaño del sensor	1/2.3"
Grabación	4K, HD
Conectividad inalámbrica	Wifi
Batería	1160 mAh
Tipo de almacenamiento	micro SD
Resolución de la fotografía	4K

Tabla 6. Características Cámara GoPro Hero 4.



Figura 25. Cámara Go Pro Hero 4.

La modelización de la cámara quedaría tal y como se muestra en la Figura 26.

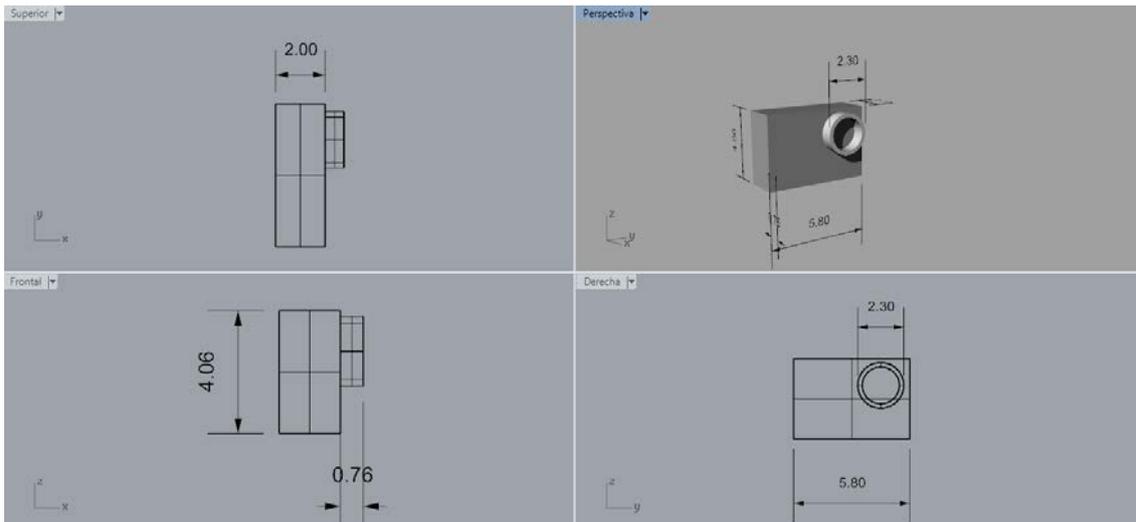


Figura 26. Modelización Cámara Go Pro Hero 4.

En cuanto al laser de posición se ha seleccionado el óptimo para esta aplicación debido a su longitud de onda y potencia de entre los disponibles en el mercado (Tabla 7 y Figura 27).

Laser	WL 58
Longitud	6.35 mm
Altura	25 mm
Espesor	100 mm
Campo de visión	70°
Profundidad	305 m
Separación entre los haces	75 mm
Longitud de onda	635nm
Divergencia del haz	Menos de 0.4mrad
Batería	80 mAh

Tabla 7. Características Laser WL 58.



Figura 27. Laser WL 58.

La modelización del láser queda según la Figura 28.

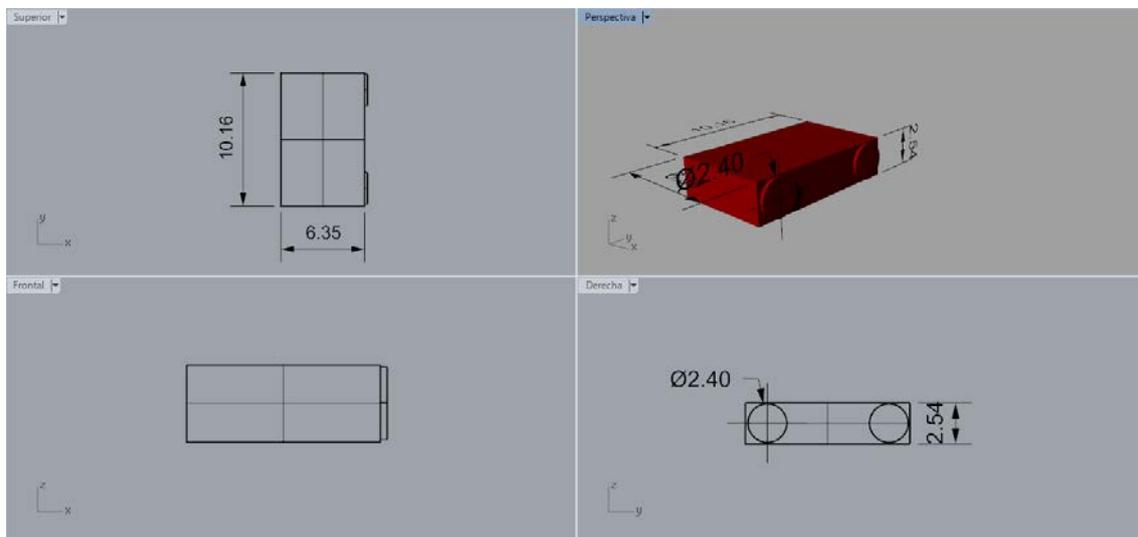


Figura 28. Modelización Laser WL 58.

Para la iluminación se han escogido los focos que soportan las profundidades estudiadas para las diferentes misiones del vehículo, así como la potencia necesaria para ésta. Estos focos estarán repartidos como se dispone en el plano de la Figura 32 para enfocar diferentes distancias del vehículo hasta la zona a mostrar, obteniendo así un rango de iluminación óptimo amplio. Las características de los focos se recogen en la Tabla 8 y se muestran en la Figura 29.

Foco	AC-LED-001A
Dimensiones	
Longitud	32 mm
Diámetro	24.9 mm
Voltaje	8-24 vdc
Profundidad	5000 m
Corriente	30mA

Color de Temperatura	7000° k
Temperatura	Desde -10°C hasta +50°C operando

Tabla 8. Características Focos.



Figura 29. Foco AC-LED-001A.

La modelización del foco queda conforme la Figura 30.

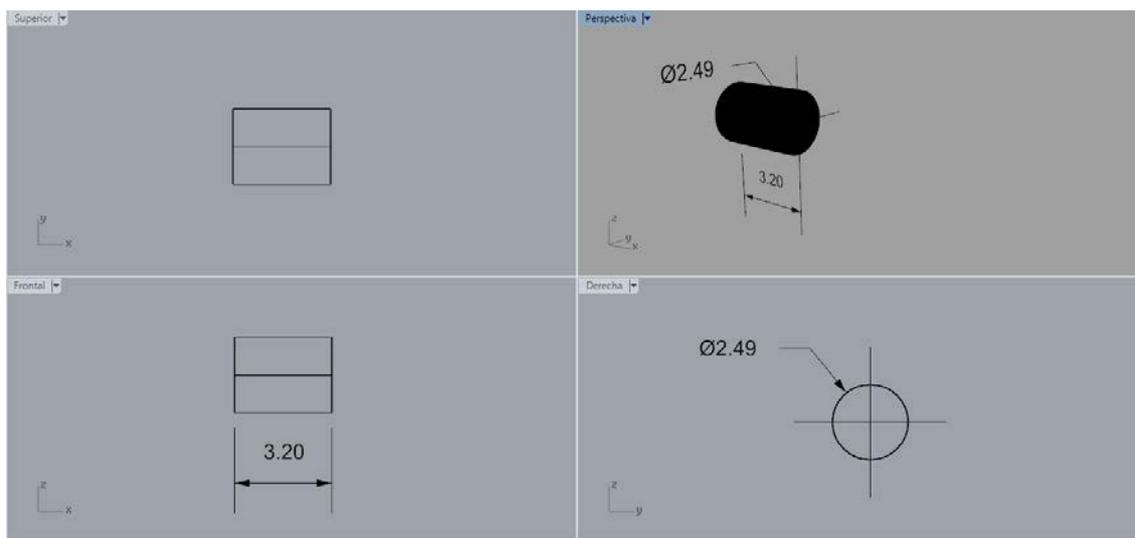


Figura 30. Modelización Foco.

A continuación, se muestra el plano de la estructura frontal del cabezal de visión. Véase en (Figura 31).

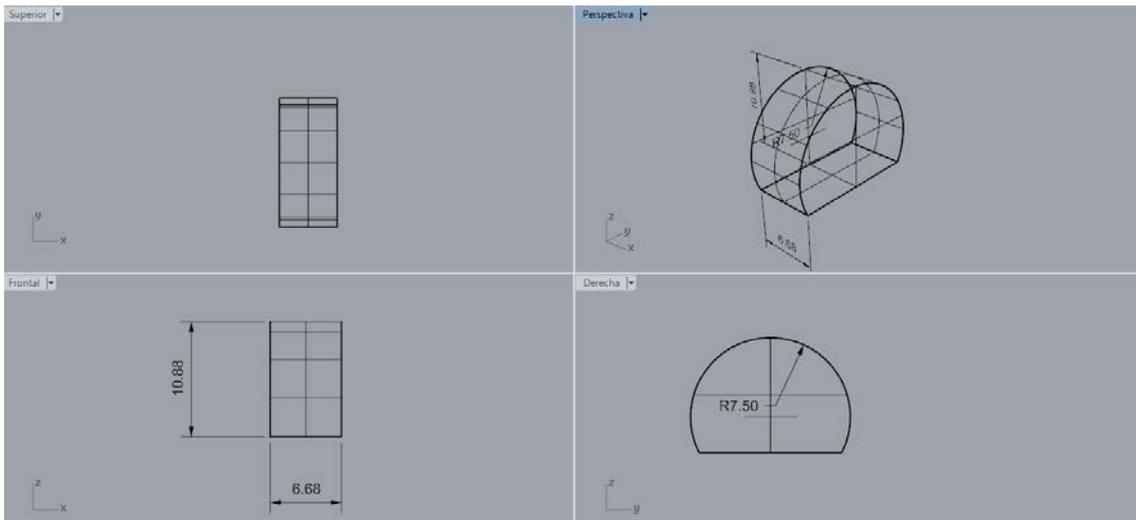


Figura 31. Disposición de la estructura frontal del cabezal de visión.

La Figura 32 muestra la disposición final del conjunto de visión frontal del vehículo.

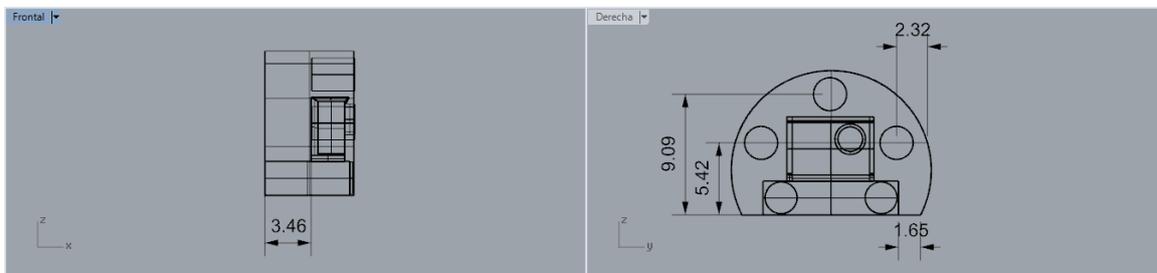


Figura 32. Disposición módulo de visión frontal.

5.2.2 Visión Estereoscópica

La parte más importante de este diseño es tener una gran visión del fondo marino para realizar muestreos, batimetrías, análisis de la topografía e inspección de buques u objetos.

Para tal misión se ha propuesto la utilización de dos cámaras Go Pro Hero 4 la cual combinada con el programa Dual System podemos obtener un muestreo en 3D del fondo marino. A su lado se encuentran tanto el dispositivo de medición laser como cuatro focos de iluminación ambos mencionados anteriormente. A continuación, véase (Figuras 33 y 34) se presenta la estructura, así como la disposición completa del módulo estereoscópico.

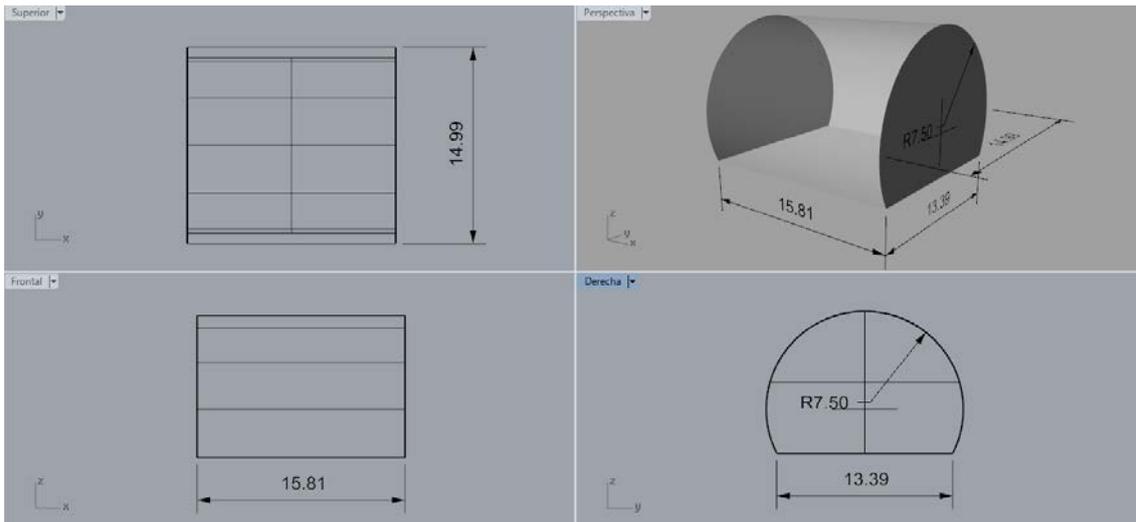


Figura 33. Plano estructura Módulo Estereoscópico.

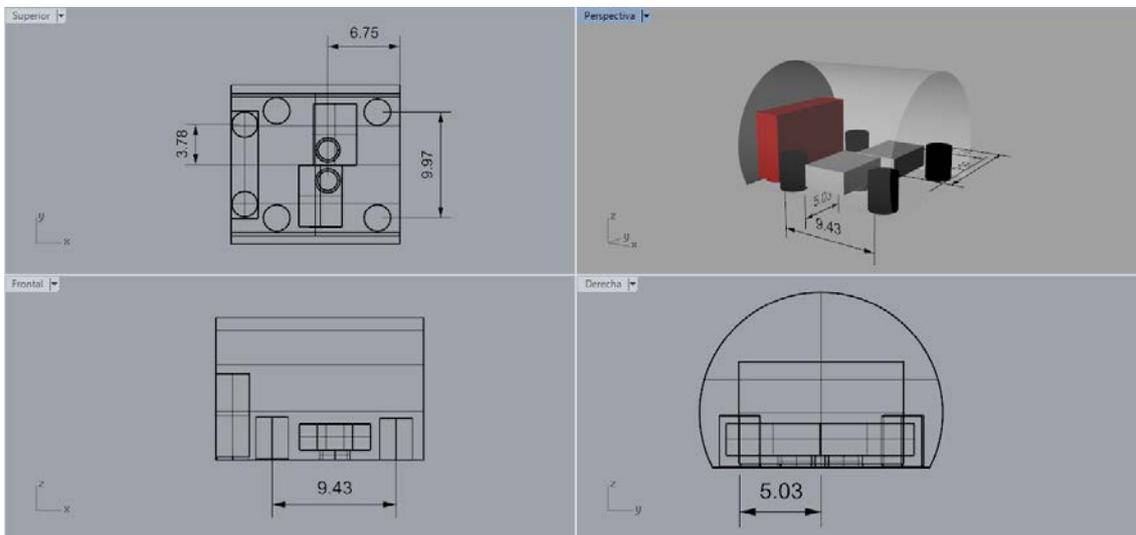


Figura 34. Plano disposición Módulo Estereoscópico.

5.2.3 Visión Anillo

Este módulo tiene como objetivo la visión del entorno que rodea al vehículo mientras realiza la campaña. Está compuesto por tres cámaras Go Pro Hero 4 dispuestas de tal forma que se obtiene una visión completa del entorno por encima y los costados del vehículo. La idea de este módulo surge de la invención de la cámara Google Jump para el grabado de 360° de un entorno específico. Debido a la imposibilidad de forma exacta se procede a la instalación de una solución aproximada a ésta en el vehículo. En este módulo se encuentran también los focos utilizados en los anteriores.

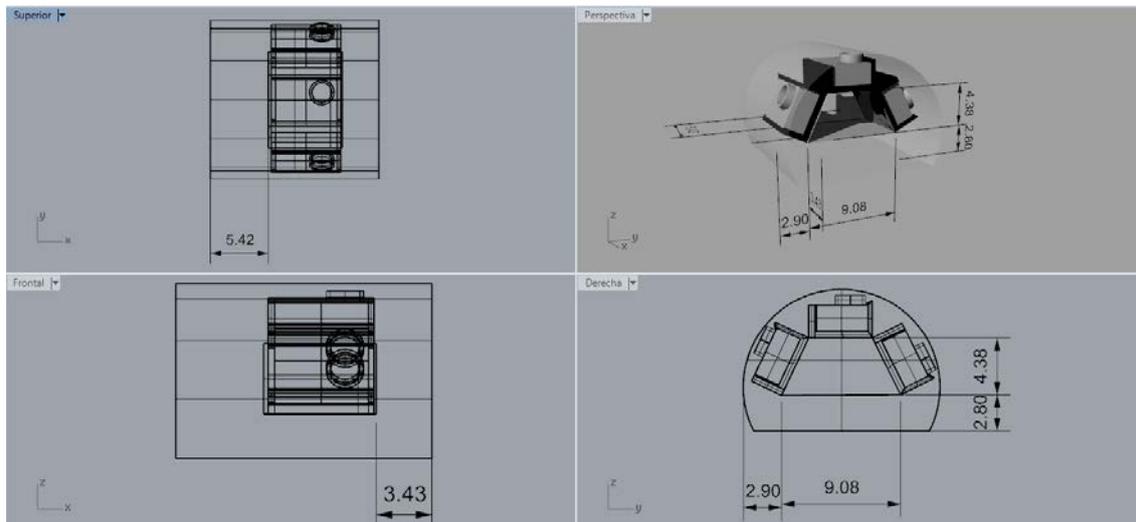


Figura 35. Plano disposición del Módulo Anillo.

5.3 Materiales a emplear en el diseño

Los materiales de los elementos que se han utilizado en las diferentes partes del vehículo se han obtenido tanto de la guía del fabricante del vehículo como de la información que posee en la UPCT sobre el vehículo. Los materiales estudiados se describen a continuación:

5.3.1 POM

El material asignado a la proa, las cuerdas de la electrónica y la zona de la bocina es el POM (poli formaldehído), el cual es un termoplástico cristalino de alta rigidez, usado en piezas de precisión que requieren alta rigidez, baja fricción y una excelente estabilidad dimensional. Sus propiedades se describen a continuación:

- Alta resistencia mecánica, a la abrasión y al calor.
- Estabilidad dimensional y fácil mecanizado.
- Bajo coeficiente de fricción.
- Buenas características eléctricas y dieléctricas.
- Baja absorción de agua.
- Elevada resistencia al estrés y a la compresión.
- Resistencia a los golpes también a bajas temperaturas.

En cuanto a sus propiedades mecánicas se pueden destacar:

- Densidad $\rho = 13.827.87 \text{ N/m}^3$.
- Resistencia máxima a la compresión (UCS) = 110,0 MPa.
- Módulo de Young $E = 2900,0 \text{ MPa}$.

- Módulo de Poisson $\nu = 0,35$.
- Módulo de elasticidad transversal o de cizalladura $G = 1.074,07$ MPa.

5.3.2 EN-AW 5083

El material asignado a la capa exterior del cilindro amarillo y a la electrónica es el aluminio, en este caso la aleación EN-AW 5083. Este material se aplica en producción de maquinarias y dispositivos, industria automovilística así como construcción naval. Sus características principales se muestran a continuación:

- Muy buen mecanizado.
- Buen resultado de anodizado.
- Facilidad de soldado.
- Buena resistencia a la corrosión.

Las propiedades mecánicas del material se muestran a continuación:

- Densidad $\rho = 26082,62$ N/m³.
- Resistencia máxima a la compresión (UCS) = 228,0 MPa.
- Módulo de Young $E = 71.700,0$ MPa.
- Módulo de Poisson $\nu = 0,33$.
- Módulo de elasticidad transversal o de cizalladura $G = 26.954,89$ MPa.

5.3.3 CFRP

El CFRP es un plástico reforzado con fibras extremadamente fuertes y ligeras que contiene fibras de carbono. El CFRP puede ser costoso de producir, pero su uso se encuentra donde se requieran alta relación de rigidez y resistencia, y peso, tales como la industria aeroespacial, automotriz y la ingeniería civil. A diferencia del resto de materiales asociados al vehículo, este material tiene comportamiento ortótropo, es decir, que su respuesta y su resistencia mecánica dependen de la dirección sobre la que se realice el esfuerzo. Las propiedades de este material son:

- Muy elevada resistencia mecánica, con un módulo de elasticidad elevado.
- Baja densidad en comparación con el acero.
- Resistencia a agentes externos y aislamiento térmico.
- Es un material frágil, con un límite elástico normalmente igual al límite de rotura.

Las propiedades mecánicas consideradas son:

- Densidad $\rho = 15.696,0$ N/m³.
- Resistencia máxima a la compresión (UCS) a 0° y $90^\circ = 570,0$ MPa.
- Módulo de Young o de elasticidad $E_x = E_y = E_z = 70.000,0$ MPa.
- Módulo de Poisson $\nu = 0,10$.

- Módulo de elasticidad transversal o de cizalladura $G_{xy} = G_{yz} = G_{zx} = 5000,0$ MPa.

5.3.4 Acero Inoxidable S325

El material que se ha asignado a la pieza que conforma la popa es el acero inoxidable. El acero inoxidable contiene aleantes añadidos para mejorar su resistencia a la corrosión marina, aunque para prevenir la corrosión en esta pieza tan importante se les añaden varios ánodos de sacrificio de Zinc para que sean estos y no la pieza los que se desgasten. Las propiedades generales de los aceros inoxidables son las siguientes:

- Muy elevada resistencia mecánica, con un módulo de elasticidad elevado.
- Relativamente dúctil y maleable.
- Permite una buena mecanización en máquinas herramientas antes de recibir un tratamiento térmico.
- Se puede soldar con facilidad.

Las propiedades mecánicas consideradas son:

- Densidad $\rho = 76.900,0$ N/m³.
- Resistencia máxima a la compresión (UCS) = 235,2 MPa.
- Módulo de Young o de elasticidad $E = 200.000$ MPa.
- Módulo de Poisson $\nu = 0,10$.
- Módulo de elasticidad transversal o de cizalladura $G = 79.365,1$ MPa.

5.3.5 Metacrilato

El metacrilato será el material asignado a las partes del módulo de visión en las cuales estarán situadas las cámaras. Estas partes serán las constituidas por una plancha situada en el fondo del módulo, la superficie cilíndrica que envuelve a las tres cámaras que constituyen el sistema de visión 360° así como la plancha que delimita el módulo de visión frontal con el exterior. El metacrilato a seleccionar tendrá el espesor suficiente para poder soportar las presiones a las cuales estará sometido el vehículo.

Las propiedades generales del metacrilato son las siguientes:

- Termoplástico duro, resistente y transparente.
- Excelentes propiedades ópticas.
- Buena resistencia al envejecimiento y a la intemperie.

Las propiedades mecánicas consideradas son:

- Densidad $\rho = 11575,8 \text{ N/m}^3$.
- Transparencia = 92%.
- Módulo de Young o de elasticidad $E = 3300 \text{ MPa}$.
- Módulo de Poisson $\nu = 0,45$.
- Módulo de elasticidad transversal o de cizalladura $G = 1700 \text{ MPa}$.

Con los materiales seleccionados se presenta el diseño final del módulo de visión artificial Neptuno (Figura 36):

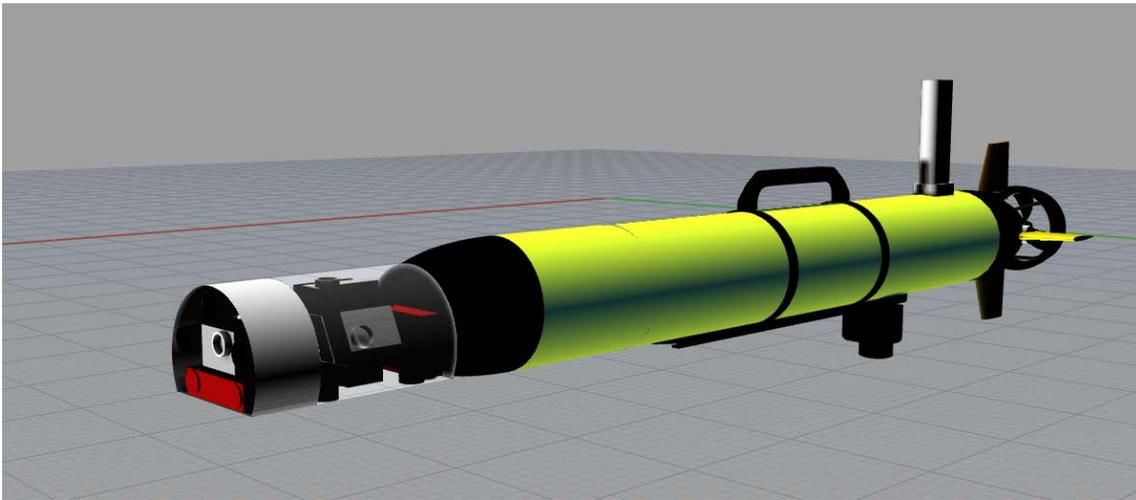


Figura 36. Diseño final Neptuno renderizado.

5.4 Selección de focos

Las características que debe cumplir un foco se establecen en función del tipo de aguas en el que vayamos a desarrollar la inmersión; de la siguiente forma:

- Luz concentrada en un cono: para aquellas aguas en las que existen gran cantidad de partículas en suspensión.
- Luces amplias: para zonas más grandes, con menos vida y menos obstáculos.

Para el estudio de viabilidad del proyecto se han tomado muestras de las áreas de operación donde se utilizará el vehículo para su estudio de propiedades.

Las áreas a estudiar son la Bahía de Cala Cortina, La playa de Isla Plana y el puerto de Cartagena. Para la obtención del coeficiente de extinción de la luz se utilizó dos galvanómetros midiendo la intensidad a la entrada y a la salida del recipiente de la muestra. Los resultados concluyen en un coeficiente de extinción de la luz alrededor del

0.6 lo cual habilita a los focos seleccionados dar la iluminación necesaria para las distintas operaciones del vehículo.

5.5 Balance de pesos

Después del estudio de los diferentes módulos a estudiar se ha realizado un balance de pesos con respecto a todos los componentes del vehículo con el fin de comprobar su estabilidad y estimar si existirá la necesidad o no de lastrar el vehículo. Dado que el vehículo ya tiene de una disposición inicial y solo se pretende sustituir el cabezal del vehículo el balance del nuevo módulo tendrá que tener las mismas características.

El balance de pesos del diseño inicial consta de los siguientes elementos (tabla 9).

Elemento	Peso (g)	x (cm)	y (cm)	z (cm)
Cuerpo popa	4.210,0	6,25	0,00	-1,10
Antena	503,7	25,21	0,00	12,25
USBL	460,0	41,24	0,00	-12,08
Asa	233,5	62,63	0,00	10,89
Raíl	393,7	63,04	0,00	-7,38
Cilindro electrónica	7.590,0	66,85	0,00	-2,77
Cilindro amarillo	2.880,0	68,55	0,00	0,00
Lastre Proa	1.016,6	77,42	0,00	-4,56
16 onzas	452,8	90,00	0,00	-7,40
DVL	3.630,0	115,25	0,00	0,00
Cabezal	1.790,0	147,38	0,00	0,00
Plomo Cabezal	860,0	155,68	0,00	0,00
Total	24.020,30	-	-	-

Tabla 9. Distribución de pesos a lo largo del vehículo.

Por lo que el módulo de visión tendrá que tener las características expresadas en la tabla 10.

Cabezal	1.790,0	147,38	0,00	0,00
---------	---------	--------	------	------

Tabla 10. Característica de pesos del morro inicial.

Los elementos que componen el nuevo módulo son los listados en la tabla 11.

Elemento	Peso g	x (cm)	y (cm)	z (cm)
Cámara Frontal	89	150.10	0.42	-0.4
Cámara Estereoscópica	178	138.19	0	-3.63
Cámara Anillo1	89	138.30	0	3.18
Cámara Anillo2	89	138.30	4.88	0.10
Cámara Anillo3	89	138.30	-4.88	0.10
Laser F	90	148.61	0	-4.08
Laser E	90	130.44	0	-2.32
Foco F 1	48	150.22	0	3.72
Foco F 2	48	150.22	5.28	-0.13
Foco F 3	48	150.22	-5.28	-0.13
Foco E 1	48	133.16	5.15	-3.7
Foco E 2	48	133.16	-5.15	-3.7
Foco E 3	48	142.92	4.8	-3.7
Foco E 4	48	142.92	-4.8	-3.7
Estructura	3643.589	141.0	0	0
Total	4693.589	141.017-	0	-0.39

Tabla 11. Distribución de pesos módulo de visión artificial.

Las posiciones de los centros de gravedad de cada uno de los elementos se han obtenido por medio del programa Rhinoceros por lo cual solo son una aproximación al valor real que tendría el módulo una vez construido. Como se puede observar se obtiene un valor similar al del modelo inicial con una posición algo más retrasada. Esta diferencia puede ser fácilmente reducida con la instalación de pesos en el sentido de la eslora del vehículo cuyo posicionamiento ya se había supuesto. En cuanto al peso del cabezal se puede ver un aumento sustancial del nuevo cabezal aunque se ve compensado con el aumento del volumen de éste. Si se comparan la relación volumen/peso de cada uno de las dos configuraciones se ve que tienen valores similares. Como consecuencia ambas disposiciones se comportarán de forma similar en el mar atendiendo a esta característica.

5.6 Estudio eléctrico de los consumidores

El balance eléctrico tiene como objetivo principal definir la Planta de Generación de energía eléctrica en el vehículo a partir de una demanda de dicha energía en las distintas situaciones que se presentan durante la explotación del mismo.

En este análisis se determinara el número y potencia de los grupos electrógenos que contendrá el AUV.

5.6.1 Situaciones de consumo eléctrico

Las situaciones de consumo eléctrico son específicas y particulares para cada tipo de vehículo, y tiene que definirse en cada caso. En este proyecto son las presentadas a continuación:

- **Reposo:** Situación en la que el vehículo se dispone inmóvil durante la misión manteniendo en activo los consumidores básicos del vehículo.
- **Navegación:** Es la situación en la que el consumo de energía eléctrica en la mar es el necesario para atender todos aquellos consumidores que afectan a servicios normales del vehículo. Es la situación de mínimo consumo.
- **Muestreo:** en esta situación también estarán conectados los sensores de toma de datos así como el sonar de barrido lateral.
- **Visión Frontal:** Además de los consumidores nombrados en la situación de navegación se activarán los consumidores en el módulo frontal.
- **Mapeo:** en este caso se activarán los consumidores situados en la parte baja del vehículo.
- **Visión total:** Situación en la cual todos los consumidores del módulo de visión así como los que componen la situación de navegación están conectados. Es la situación de máximo consumo.

5.6.2 Análisis de los consumidores

Para realizar el balance eléctrico se procede a diseñar una misión en VectorMap que estima los consumos que tiene el vehículo en función de la distancia recorrida y la velocidad.

La primera misión (Figura 37) consiste en programar el vehículo para que realice un recorrido con movimientos rectos en los que se programarán los diferentes waypoints a una separación de un kilómetro entre ellos, a una velocidad de dos nudos y a una profundidad desde la superficie de dos metros. Con esto se quiere obtener una aproximación a los consumos de cada los consumidores utilizados en la navegación como puede ser el motor eléctrico.

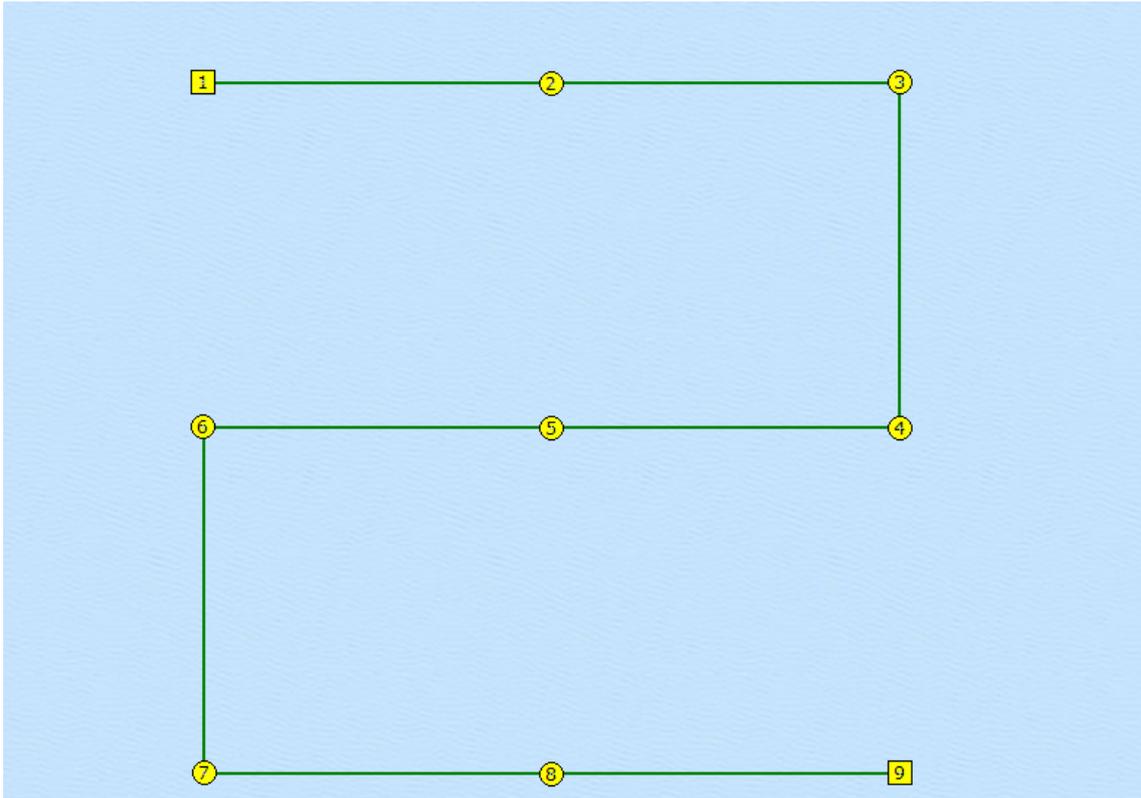


Figura 37. Misión 1 VectorMap.

Las propiedades de cada waypoint vienen registradas en la Tabla 12.

Waypoint	Distancia Recorrida m	Batería Consumida W	Batería Restante W	Tiempo
1	0	0	570.00	0
2	1000	7.85	562.15	00:16:14
3	2000	7.85	554.30	00:32:29
4	3000	7.85	546.45	00:48:43
5	4000	7.85	538.60	01:04:58
6	5000	7.85	530.75	01:21:13
7	6000	7.85	522.89	01:37:27
8	7000	7.85	515.07	01:53:39
9	8000	7.85	507.19	02:09:57

Tabla 12. Características Misión 1.

Seguidamente se realiza la misma misión añadiendo un tiempo de parada o parking durante cada uno de los waypoints (Figura 38). Si se analiza la diferencia entre cada uno

de los puntos de las dos misiones realizadas se puede obtener el consumo de los elementos que están siendo utilizados en la situación de reposo.

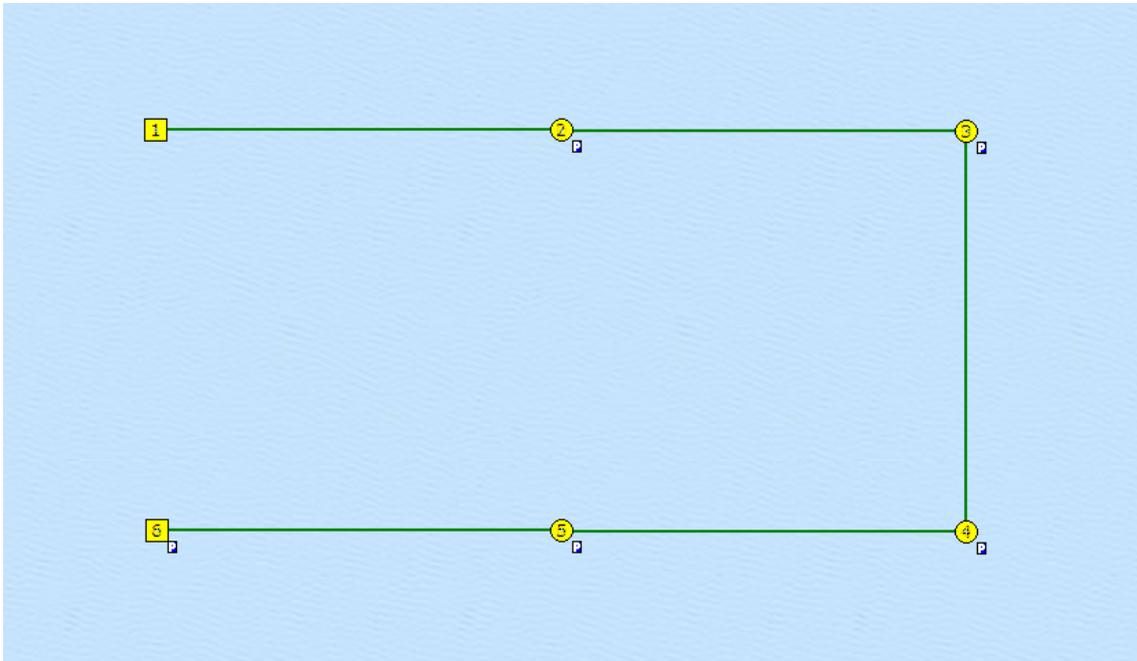


Figura 38. Misión 2 VectorMap.

En este caso se puede observar que al lado de cada uno de los waypoint aparece una letra “P” indicando que se va a realizar una parada en el waypoint en cuestión.

Las propiedades de esta misión vienen recogidas en la tabla 13.

Waypoint	Distancia Recorrida m	Batería Consumida W	Batería Restante W	Tiempo
1	0	0	570.00	0
2	1000	13.85	556.04	00:16:14
3	2000	13.85	542.19	00:52:29
4	3000	13.85	528.37	01:08:43
5	4000	13.85	514.51	01:24:58
6	5000	13.85	530.75	01:41:13

Tabla 13 Características Misión 2

Como se puede observar hay una diferencia entre los consumos de 5 w los cuales serán los atribuidos a los consumidores en la condición de reposo.

En la siguiente misión se procede a cambiar la profundidad de operación en cada uno de los waypoints para observar el consumo de las aletas horizontales de cola (Figura 39).

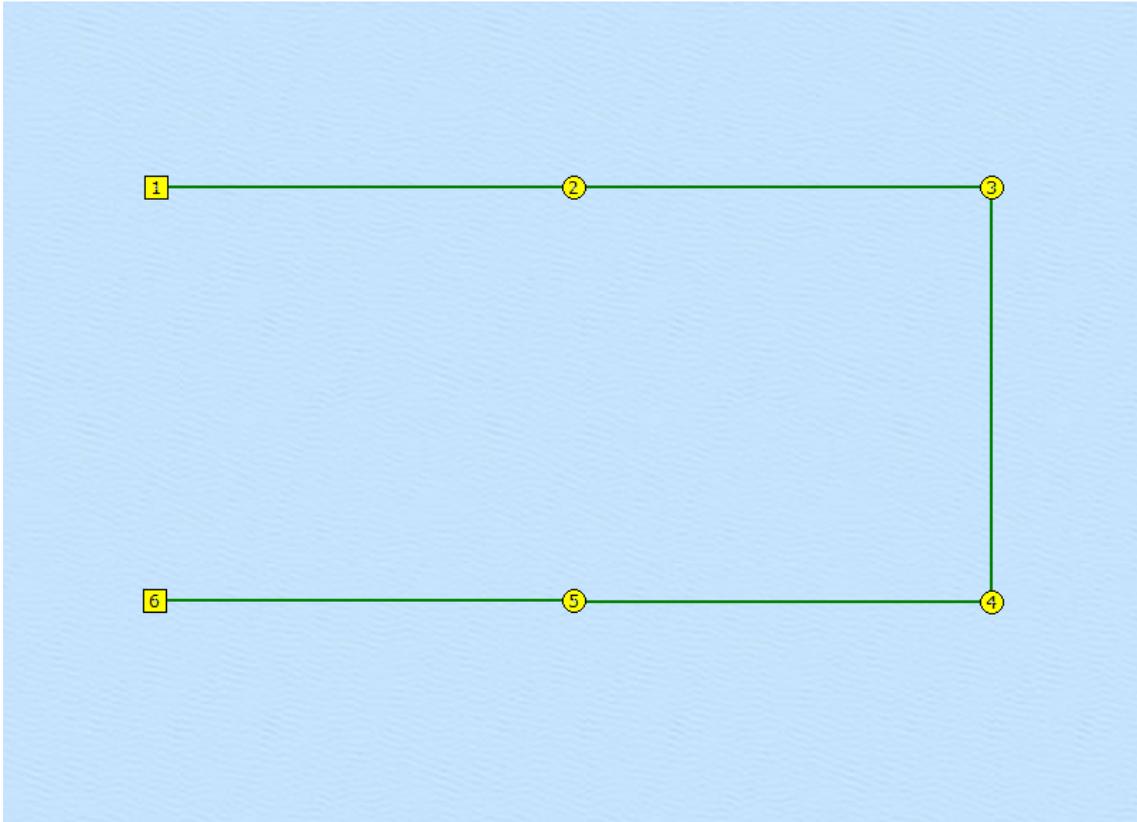


Figura 39. Misión 3 VectorMap.

Las propiedades de la misión 3 están recogidas en la tabla 14.

Waypoint	Distancia Recorrida m	Profundidad m	Batería Consumida W	Batería Restante W	Tiempo
1	0	0	0	570.00	0
2	1000	1	7.93	562.07	00:16:24
3	2000	2	7.93	554.14	00:32:49
4	3000	3	7.93	546.21	00:49:13
5	4000	2	7.93	538.35	01:05:28
6	5000	1	7.93	530.39	01:21:57

Tabla 14. Características Misión 3.

Como se puede observar comparando los consumos de la misión 1 con los obtenidos en ésta se puede destacar una diferencia de 0.08 w los cuales se atribuirán a la acción de los servo motores de las aletas de cola.

A continuación, se procede a realizar una misión en la cual se programará una trayectoria hexagonal para poder observar los consumos de las aletas en sentido vertical del vehículo (Figura 40).

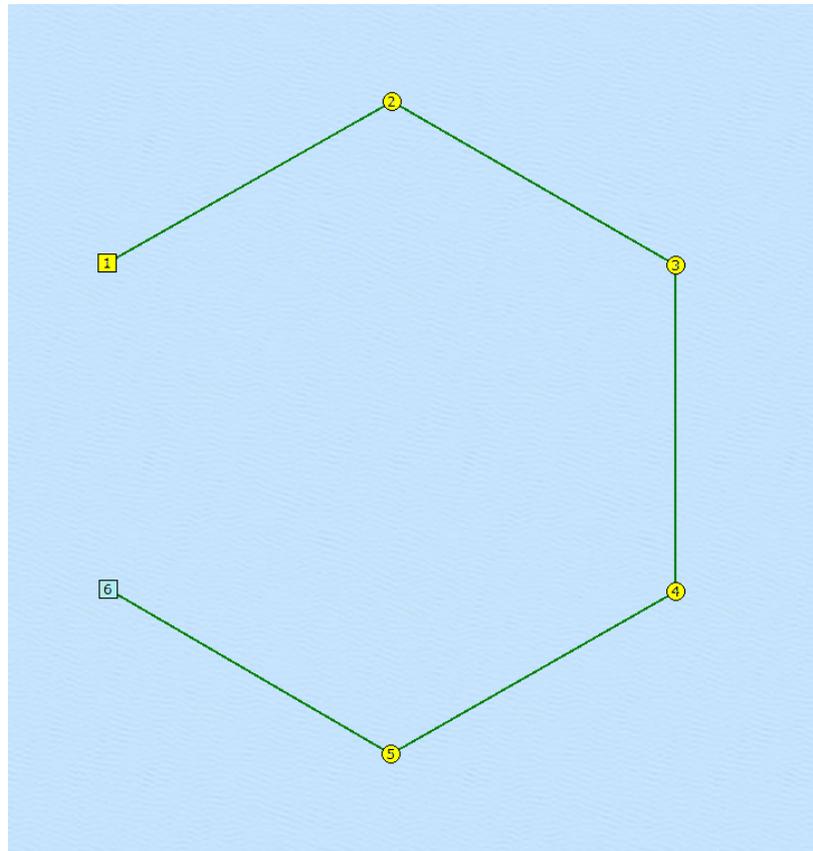


Figura 40. Misión 4 VectorMap.

Las propiedades de esta misión vienen recogidas en la tabla 15.

Waypoint	Distancia Recorrida m	Batería Consumida W	Batería Restante W	Tiempo
1	0	0	570.00	0
2	1000	7.84	562.16	00:16:12
3	2000	7.86	554.3	00:32:28
4	3000	7.88	546.42	00:48:46
5	4000	7.84	538.59	01:04:59
6	5000	7.86	530.72	01:21:16

Tabla 15. Características Misión 4.

En este caso no se percibe ninguna variación en los consumos durante la misión por lo que no se puede estimar los consumos de estas aletas con este programa.

A estos consumos hay que sumar los producidos por los instalados en el nuevo módulo de visión. Estos serán los producidos por las cámaras GoPro Hero 4 Black Edition, los producidos por los láseres de posicionamiento, así como los diferentes focos instalados en él.

La cámara Go Pro Hero 4 Black edition posee una batería de iones de litio recargable con una capacidad de 1160 mAH, 3,8 V y 4,4 Wh. Según las especificaciones del fabricante la duración de la grabación de la batería dependiendo del modo de grabación oscila entre 1 o 2 horas de duración. El consumo en WH de cada foco será de 0,72 Wh calculado de los datos presentes en la tabla 8. Por último, el consumo de los láseres será de 2,88 Wh por cada unidad.

Si se añaden estos consumos a los obtenidos por el programa VectorMap se puede realizar una estimación de la operatividad del nuevo cabezal. En esta misión se supondrá un recorrido irregular simulando la exploración de un área concreta a una profundidad constante.

Se procederá a encender las cámaras, los focos, así como los láseres de posición a partir del waypoint número 3 hasta el final de la misión, véase en al Figura41.

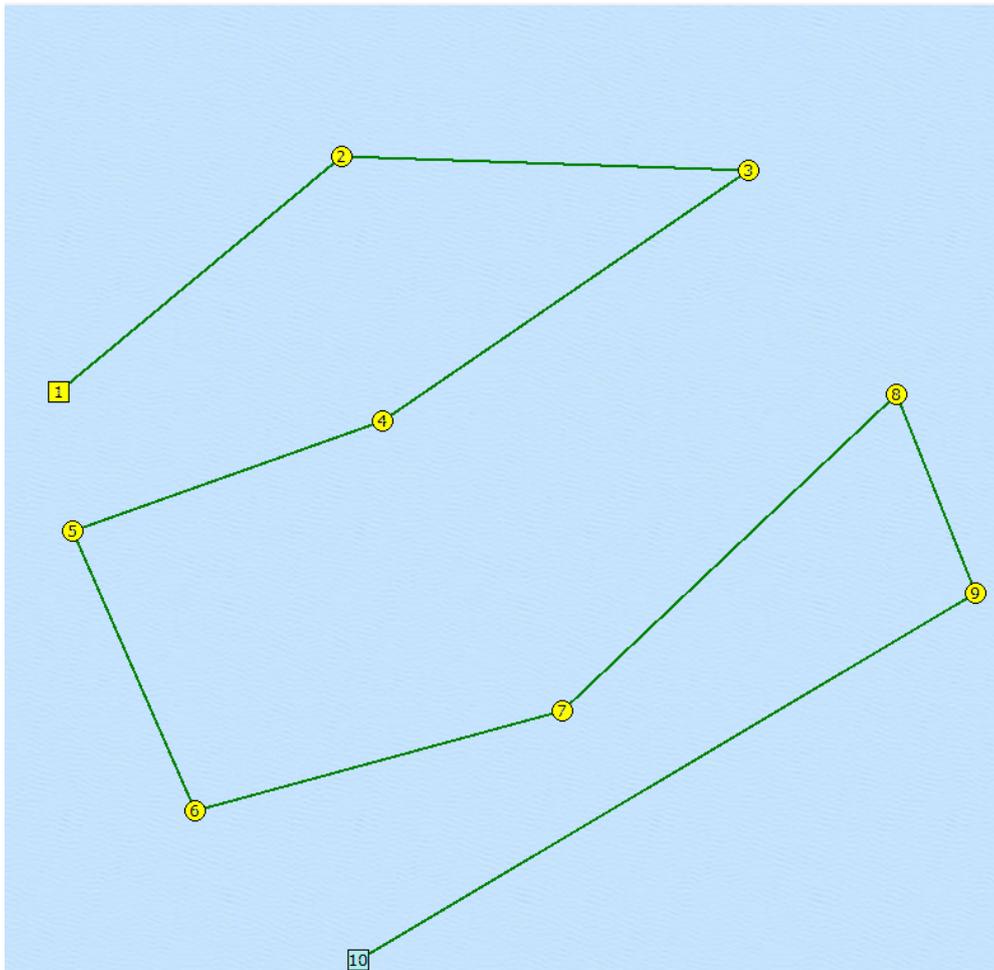


Figura 41 Misión 5 VectorMap.

Las propiedades de esta misión vienen recogidas en la tabla 16:

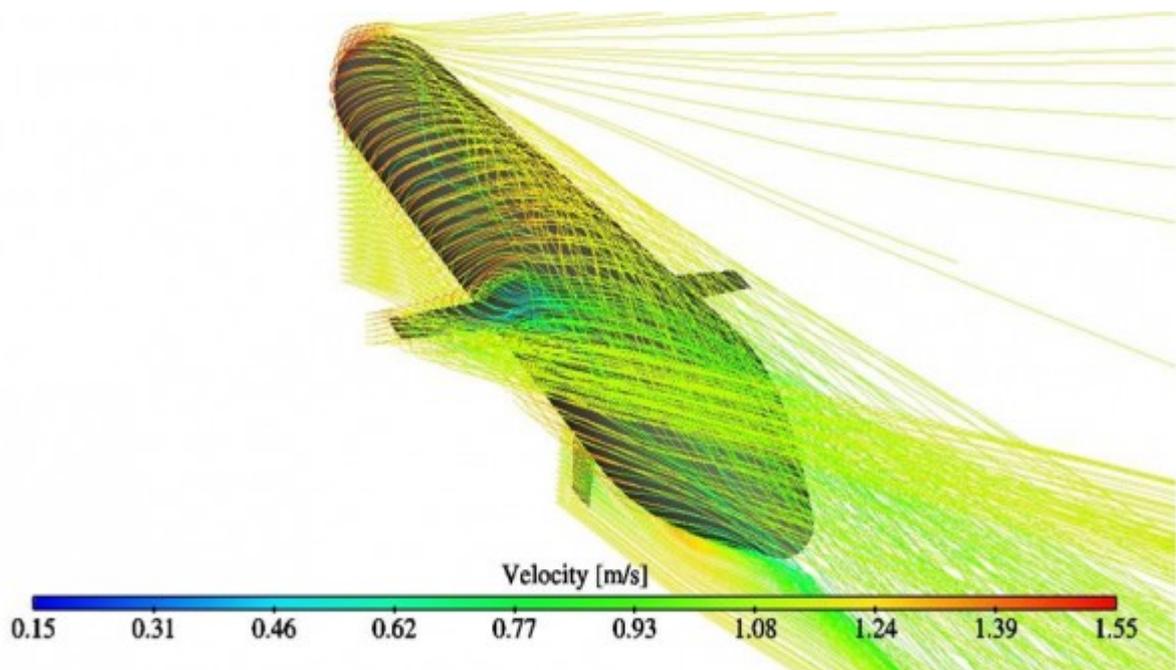
Waypoint	Distancia Recorrida m	Batería Consumida W	Batería Restante W	Tiempo
1	0	0	570.00	0
2	1222	9.57	560.43	00:19:47
3	2568	10.54	549.89	00:41:36
4	4040	26.27	523.62	01:05:26
5	5129	19.47	504.15	01:23:05
6	6146	18.18	485.97	01:39:33
7	7406	22.54	463.43	01:59:58
8	8934	27.34	436.09	02:24:43
9	9646	12.68	423.41	02:36:15
10	12028	42.55	380.86	03:14:49

Tabla 16 Características Misión 5

Como se puede observar la utilización de los elementos del módulo de visión incrementa el consumo de las baterías. Sin embargo, este incremento no es significativo ya que proporciona al vehículo la visión en todo su entorno. Cabe destacar que estos consumos son utilizando todos los focos así como láseres y cámaras durante toda la misión por lo que su autonomía sería mayor.

Capítulo 4

Cálculo de la resistencia al avance



6 Procedimiento de cálculo de la resistencia al avance mediante CFD

6.1 Primera aproximación

En este apartado se pretende realizar una primera aproximación a la resistencia de fricción según el método de Froude y el método de Hughes. A continuación, se presentan las fórmulas a utilizar en esta primera aproximación:

Número de Froude:

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (39)$$

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{LV}{\nu} \quad (40)$$

Coefficiente de fricción según la ITTC 57:

$$Cf = \frac{0.075}{(\log(Re) - 2)^2} \quad (41)$$

Resistencia de fricción según Froude:

$$Rf(F) = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_f \quad (42)$$

Resistencia de fricción según Hughes:

$$Rf(H) = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_f (1 + k) \quad (43)$$

donde (1+k) según Hoerner es:

$$(1 + k) = 1 + 1.5 \left(\frac{L}{D}\right)^{\frac{3}{2}} + 7 \left(\frac{L}{D}\right)^3 \quad (44)$$

Siendo V la velocidad en m/s, L la eslora en m, D el diámetro en m, g la gravedad en m/s² y A el área en m².

Introduciendo los valores del modelo se obtienen los siguientes resultados (Tabla 16 y 17 y Figura 41).

L	1,648
D	0,150
L/D	10,987
u	1,190E-06
A	2,200
densidad	1025,000
(1+k)	1,046

Tabla 17 Valores iniciales del cálculo de la resistencia de fricción

V m/s	Re	10⁻³Cf	R Froude N	R Hughes N
0,514	7,126E+05	5,052	1,508	1,578
1,029	1,425E+06	4,347	5,188	5,429
1,286	1,781E+06	4,151	7,740	8,099

Tabla 18. Cálculo de la resistencia de fricción del AUV Inicial Con Apéndices.

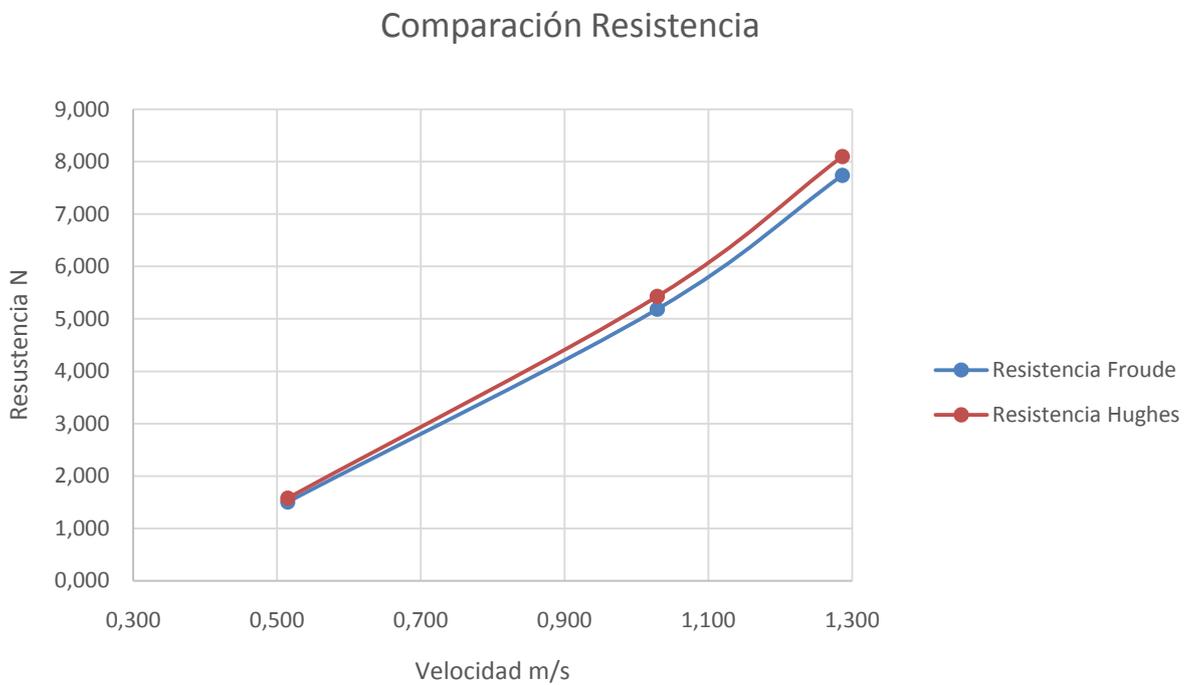


Figura 42. Comparación de la resistencia de Froude y Hughes.

Como se puede observar los resultados no son precisos debido a la escasez de datos representativos de las formas del vehículo en el cálculo. A continuación, se procederá al estudio en CFD de la resistencia al avance del vehículo.

6.2 Creación del volumen de control

En el estudio CFD se requiere la creación del espacio donde se realiza la simulación. Este espacio se denominará volumen de control y en él se definirán las condiciones de contorno del fluido en el que navega el vehículo. Las dimensiones del volumen de control deben de ser lo suficientemente grandes para no influir al flujo del fluido hacia el vehículo, pero lo suficientemente pequeño para limitar el proceso de cálculo.

Las dimensiones se calculan mediante los siguientes coeficientes (Tabla 17).

Dimensión	Coficiente
Aguas Arriba	0.70L
Aguas Abajo	1.4L
Costado	0.8L

Tabla 19. Coeficientes Volumen de Control.

Para cada uno de los modelos a estudiar se ha generado un volumen de control acorde a sus características (Figura 42).

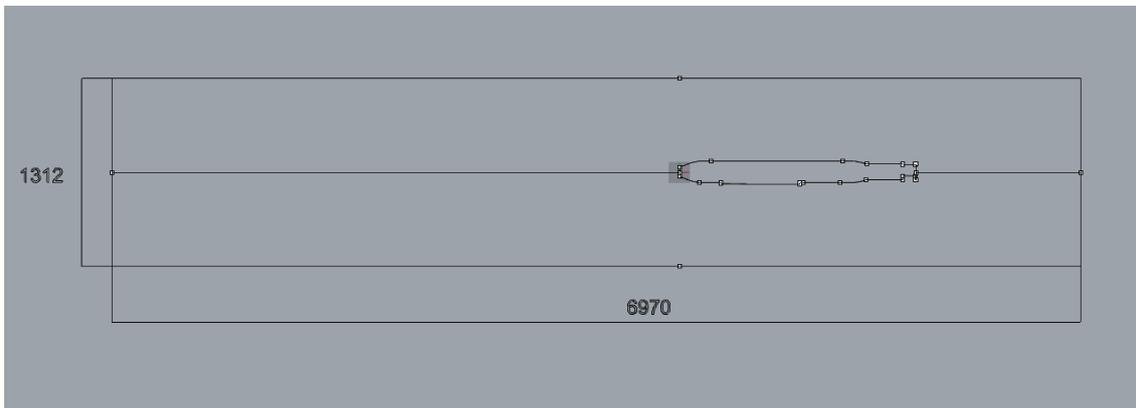


Figura 43. Volumen de control AUV Inicial sin Apéndices.

La cara de la derecha será la designada como la entrada del fluido en la componente X de un campo de velocidades, la cual tendrá una componente negativa debido a la orientación del vehículo y los ejes de referencia tomados por el programa. En el caso de los lados del volumen de control tanto superior como inferior corresponde con la componente Y, la cual para la simulación en el instante inicial será 0. Por último el lado de la izquierda será en el que se asignen las condiciones de contorno asociadas a un campo de presiones.

6.3 Introducción de la geometría

Una vez delimitado el espacio de trabajo se procederá a la introducción de las diferentes geometrías a estudiar. En este proyecto con las geometrías ya creadas con el software de modelización Rhinoceros 5.0 se procede a importar dichas geometrías al programa directamente, esto provoca una serie de inconvenientes mencionados más adelante.

Las geometrías quedarán como muestran las Figuras 43 a 46.

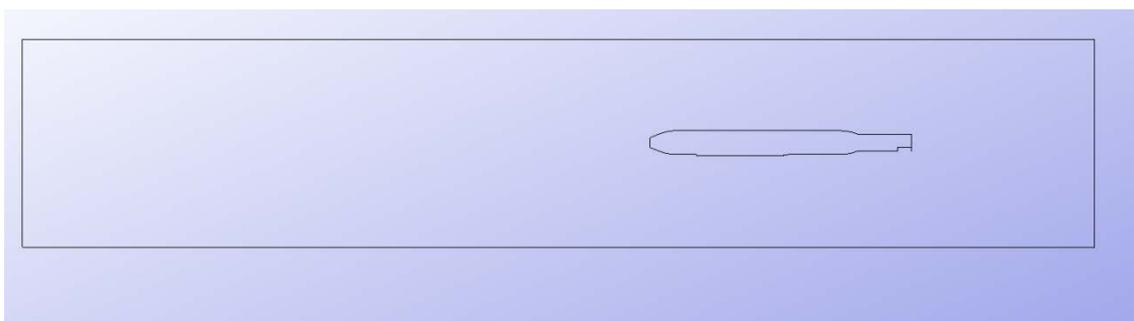


Figura 44. Geometría AUV Inicial sin Apéndices.

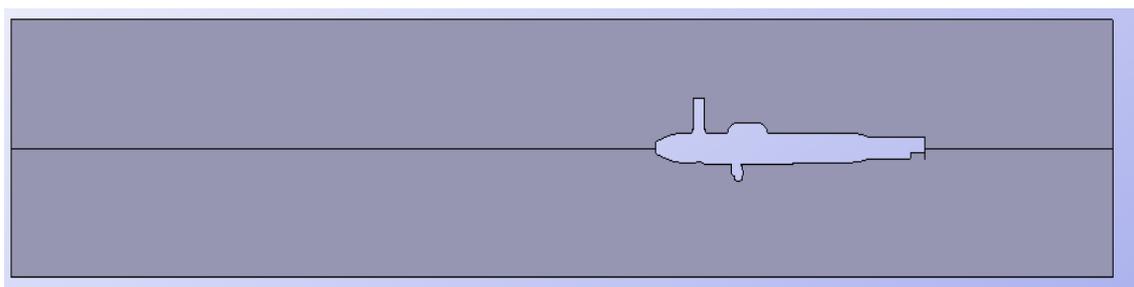


Figura 45. Geometría AUV Inicial con Apéndices.

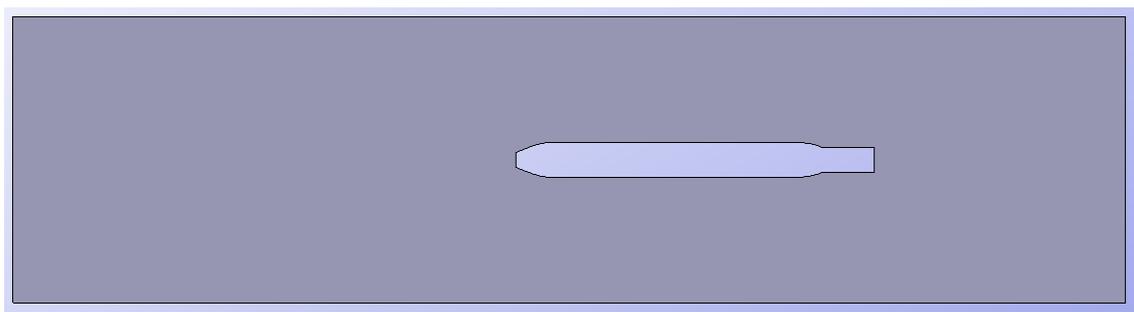


Figura 46. Geometría AUV Neptuno sin Apéndices.

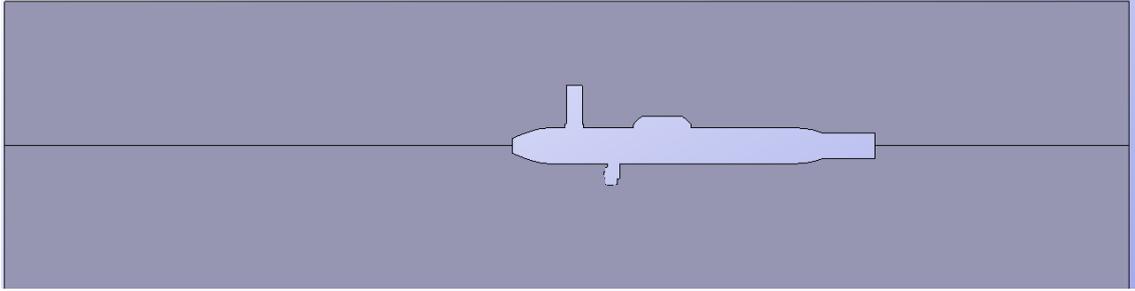


Figura 47. Geometría AUV Neptuno con Apéndices.

Después de haber introducido las geometrías y elaborado el volumen de control se procede a crear las superficies que simularán el fluido en la simulación mediante el comando *Create NURBS Surface*.

6.4 Modelos de turbulencia seleccionados

Basados en proyectos similares se ha decidido utilizar los modelos de turbulencia validados en su estudio: el modelo K- Omega SST, el modelo Spalart-Allmaras y el modelo ILES.

El modelo K-Omega SST está basado en modelos de dos ecuaciones de cierre, cuyas propiedades son las explicadas anteriormente. K - Omega SST es una variación del modelo K- Omega en el que se combinan elementos de los modelos K- Épsilon y K - Omega e ir introduciendo gradualmente el comportamiento del flujo a medida que se aleja de la misma como hace el modelo K- Épsilon. Con ello se reduce la sensibilidad al flujo libre sacrificando parte del comportamiento cerca de la pared.

El modelo Spalart-Allmaras está basado en modelos de una ecuación, explicados anteriormente. Spalart-Allmaras introduce un modelo algebraico mixing-length para desarrollar un modelo local de flujos complejos, con los que se obtiene una alternativa al uso de los métodos de dos ecuaciones de turbulencia. Este método proporciona una transición laminar-turbulenta suave y no requiere de un mallado tan fino como en el caso de los modelos de dos ecuaciones, con una buena convergencia con flujos simples. Además presenta una mejora a la hora de predecir los flujos con gradientes de presión adversos en comparación con los modelos k-omega y k-épsilon. Suele utilizar se en el caso de flujos turbulentos en elementos aerodinámicos externos, pero no suele dar buenos resultados con flujos a chorro.

El modelo ILES es el modelo implícito LES basado en la formulación del incremento cálculo finitos. El método de cálculo finito (FIC) se basa en implementación de la balanza de flujos de fluidos en un dominio de tamaño de finito. Esto introduce términos

adicionales en las ecuaciones diferenciales clásicas de momento y masa. Este modelo implementa los términos de estabilización de la matriz introducidas por la formulación FIC / FEM que permiten una mayor precisión para valores altos de número de Reynolds. El modelo implementado en Tdyn incluye una corrección para el aumento de la precisión en la resolución de la capa límite.

6.5 Parámetros de la pared

También debe de tenerse en cuenta el comportamiento del flujo en las zonas donde existe la capa límite entre la zona laminar y la turbulenta. Cuando el flujo está cerca de la pared, las fluctuaciones turbulentas de la pared se suprimen y los efectos viscosos adquieren una importancia mayor.

Para desarrollar las condiciones cerca de la pared, se utilizan una serie de parámetros dimensionales en los que se define la relación entre la velocidad de fricción y la tensión de cizallamiento provocada como consecuencia de esta fricción contra la pared.

El parámetro sigma calcula el espesor de la capa límite en función de la eslora del vehículo y el número de Reynolds. Después se procede a calcular el parámetro "y" que suele ser del orden del 10% del parámetro sigma. Para finalizar con el parámetro "y" se puede obtener el parámetro "y⁺" mediante la densidad, la viscosidad dinámica y la velocidad de fricción.

Los modelos de pared se aplican sobre las superficies de los elementos que están en contacto con el fluido, de tal forma que así se le indica al programa durante el mallado como tiene que calcular la interacción del fluido con la superficie del elemento. El modelo de pared a utilizar será el YPlusWall, el cual es una simplificación lineal de la condición de la pared implementada y basada en la ley de Richardt. Se recomienda que el valor de "y⁺" se encuentre entre 20 y 30 para tener una aproximación fina. El valor de "y⁺" deberá introducirse para cada uno de los elementos estudiados puesto que cada uno tiene una eslora y por tanto, un numero de Reynolds diferente.

6.6 Discretización del tiempo

Como último paso será necesario fijar unos valores referencia que permitan calcular partiendo de una primera aproximación del tamaño de malla necesario, tanto el tiempo de ensayo necesario para que el flujo se haya desarrollado totalmente como del número de pasos iniciales previos al cálculo.

En la **Tabla 18** se muestran los valores utilizados para el modelo AUV Neptuno sin Apéndices durante las simulaciones:

PARÁMETRO	VALOR			UNIDAD
Eslora (L)	1,515	1,515	1,515	m
Densidad (ρ)	1025	1025	1025	kg/m ³
Temperatura (T)	15	15	15	°C
Viscosidad cinemática (ν)	1,187E-06	1,187E-06	1,187E-06	m ² /s
Viscosidad dinámica (μ)	1,217E-03	1,217E-03	1,217E-03	kg/s·m
Velocidad	1	2	2,5	nudos
Velocidad	0,51445	1,0289	1,286125	m/s
Número de Reynolds (Re)	6,564E+05	1,313E+06	1,641E+06	
Aceleración de la gravedad (g)	9,81	9,81	9,81	m/s ²
Número de Froude (Fr)	1,334E-01	2,669E-01	0,334	
Superficie mojada (S)	2,1	2,1	2,100	m ²
Ratio $\mu\tau/\mu$	5	5	5	
Viscosidad turbulenta ($\mu\tau$)	6,085E-03	6,085E-03	6,085E-03	kg/s·m
Intensidad turbulenta (TIL)	0,003	0,003	0,003	
Longitud de escala turbulenta (l)	1,15E-05	5,76987E-06	4,616E-06	m
Coefficiente de fricción (Cf)	5,147E-03	4,422E-03	4,221E-03	
Tensiones de Reynolds (τ)	1,466	5,039	7,515E+00	N
Velocidad con el esfuerzo en la pared (u)	0,038	0,070	0,086	m/s
Energía cinética turbulenta (k)	1,93101E-08	6,63609E-08	9,898E-08	m ² /s ²
Espesor de la capa límite (δ)	9,350E-03	6,611E-03	5,913E-03	m
y	9,350E-04	6,611E-04	5,913E-04	m
y+	29,781	39,039	42,643	

Tabla 20. Coeficientes a introducir en la simulación AUV Neptuno Sin Apéndices.

6.7 Simulaciones a realizar

Calculados los parámetros a introducir en el programa se procederá a realizar las diferentes simulaciones las cuales serán para cada uno de las cuatro geometrías a estudiar, el estudio de la resistencia al avance para las velocidades de 1, 2 y 2.5 nudos para cada uno de los modelos de turbulencia seleccionados.

6.8 Resultados

Después de numerosos intentos se consigue unos resultados que a primera vista pueden ser satisfactorios, pero pueden estar muy distantes de los verdaderamente reales. Por ello es necesario realizar varias simulaciones ajustando los diversos parámetros con el fin de obtener un resultado que se pueda concluir en un valor máximo. Con ello y con varios intentos se obtienen los diferentes resultados para cada una de las simulaciones realizadas.

A continuación, se muestran los resultados del módulo de la velocidad, así como de la distribución de presiones en las distintas geometrías para cada velocidad y para cada modelo de turbulencia. A la izquierda se representan los módulos de velocidad obtenidos en la simulación y a la derecha la distribución de presiones. En orden las primeras imágenes corresponden al modelo de turbulencia ILES seguido del modelo K-Omega SST y por último el modelo Spalart-Allmaras.

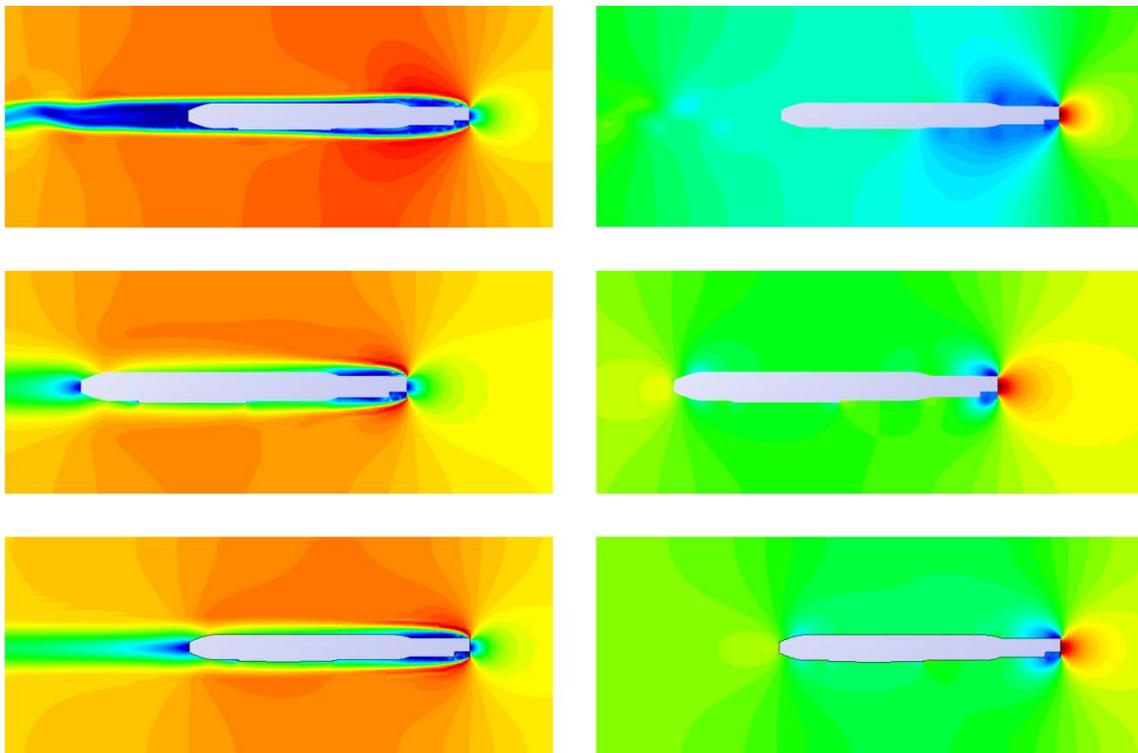


Figura 48. Modelo Inicial sin apéndices 1 Kn.

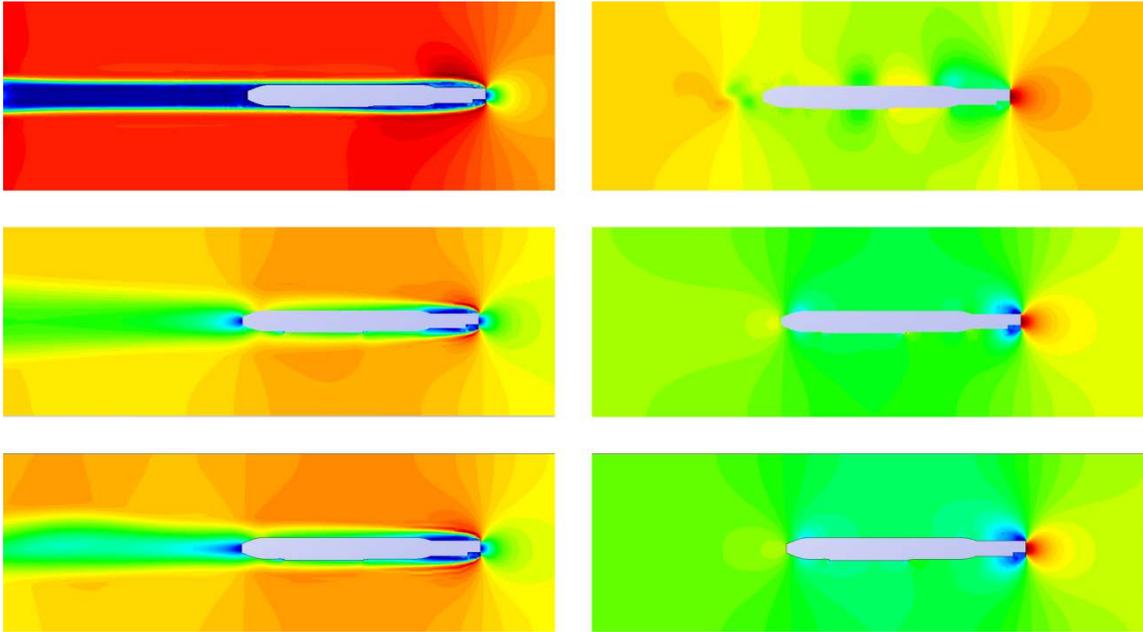


Figura 49. Modelo Inicial sin apéndices 2 Kn.

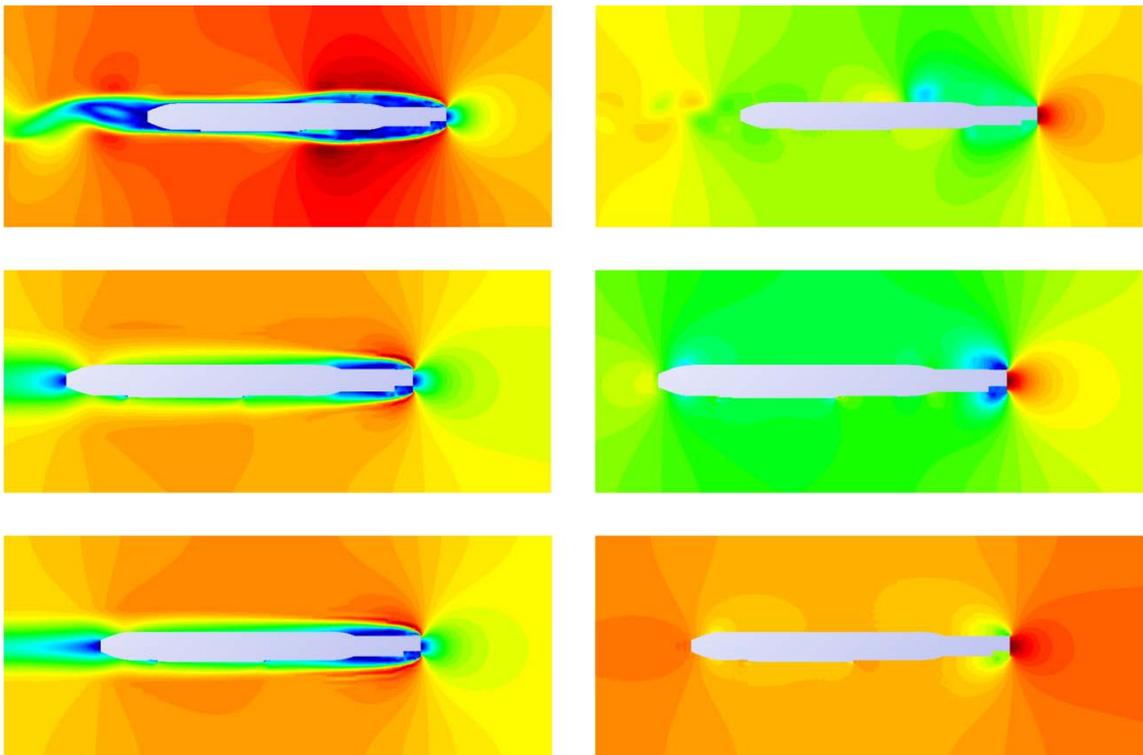


Figura 50. Modelo Inicial sin apéndices 2,5 Kn.

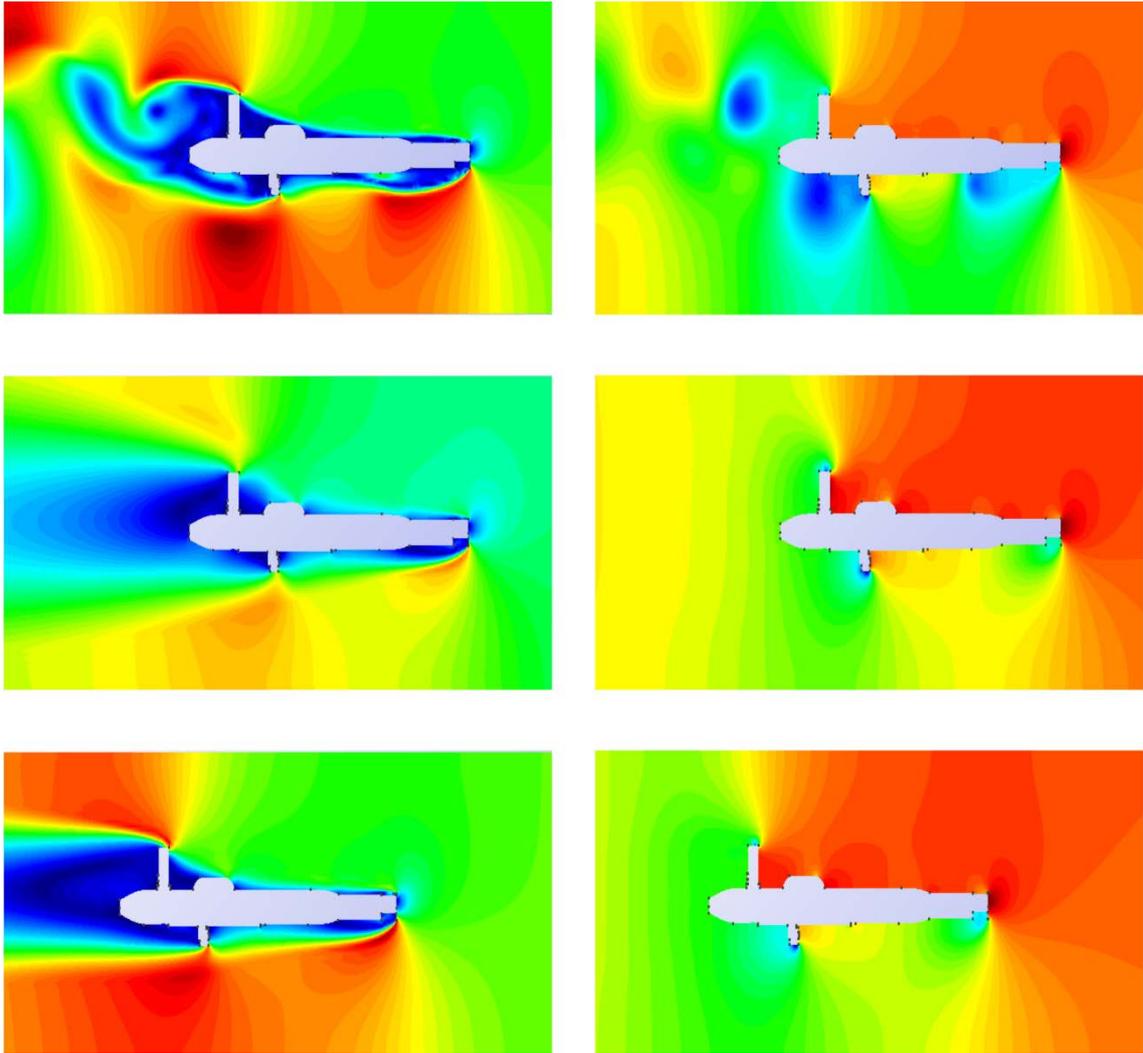


Figura 51. Modelo Inicial con apéndices 1 Kn.

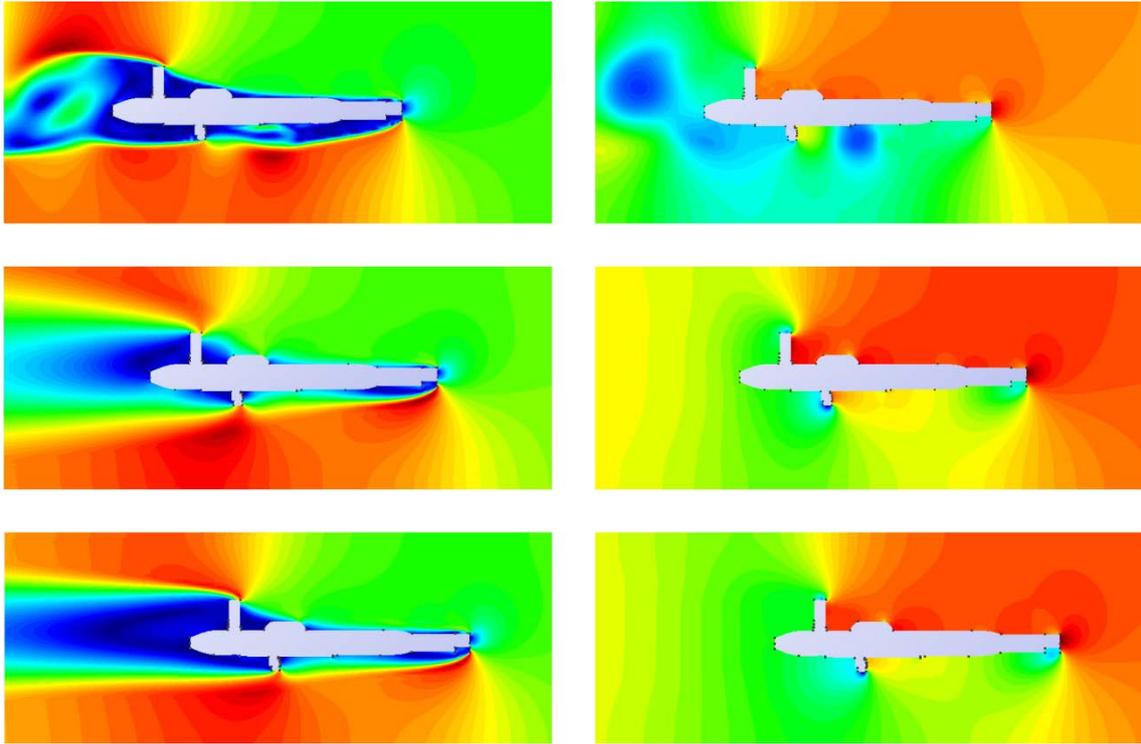


Figura 52. Modelo Inicial con apéndices 2 Kn.

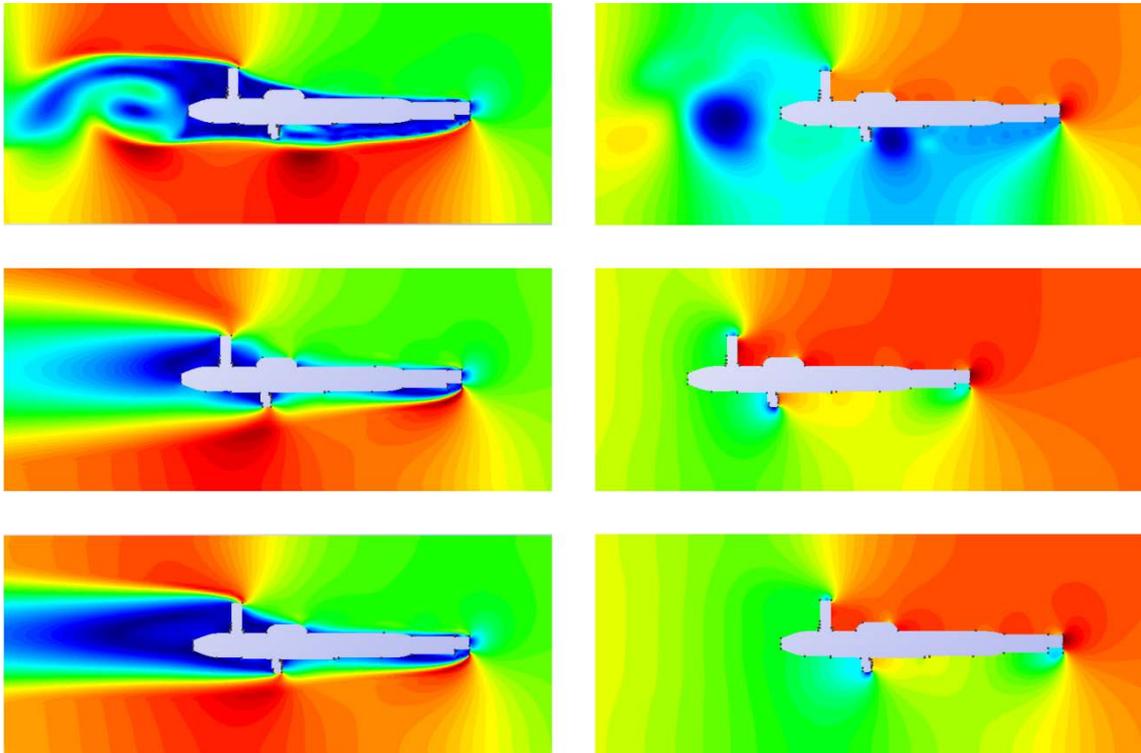


Figura 53. Modelo Inicial con apéndices 2,5 Kn.

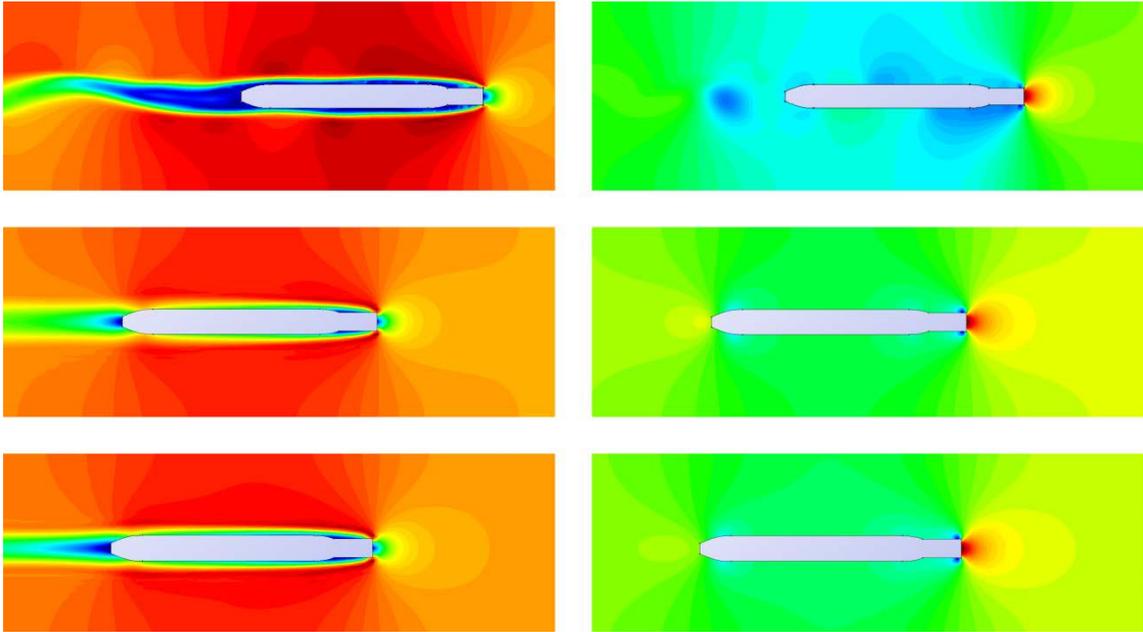


Figura 54. Modelo Neptuno sin apéndices 1 Kn.

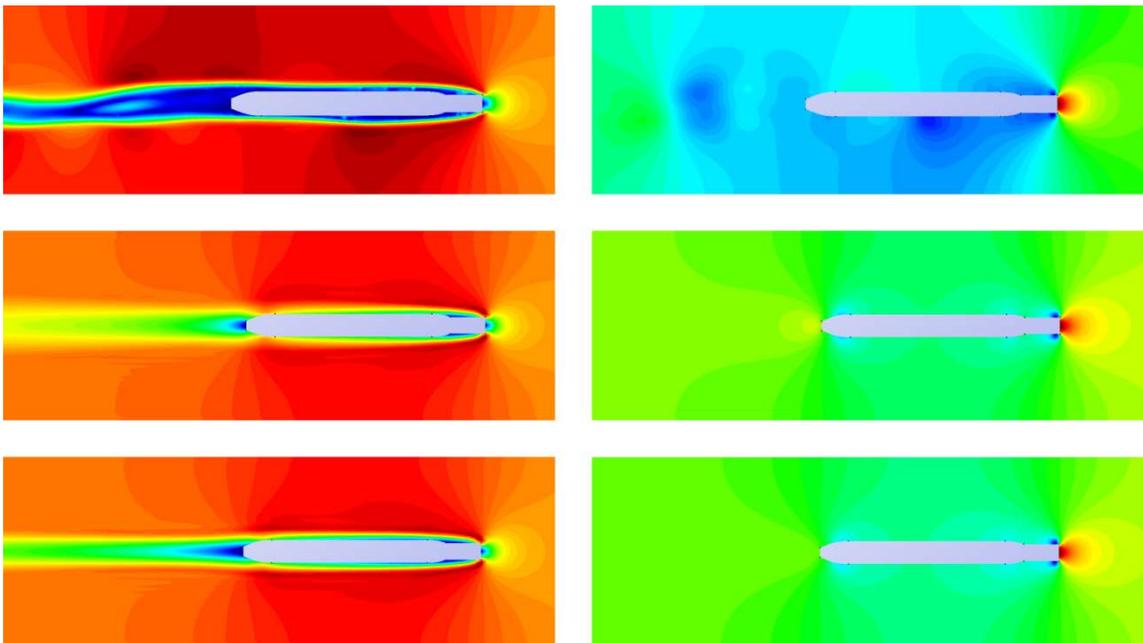


Figura 55. Modelo Neptuno sin apéndices 2 Kn.

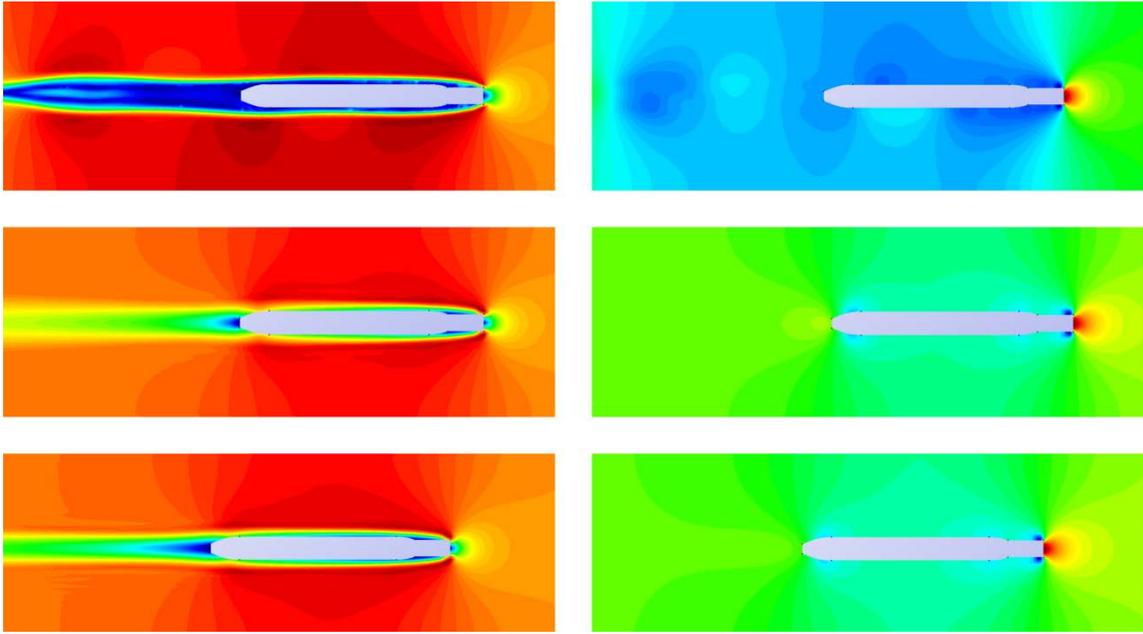


Figura 56. Modelo Neptuno sin apéndices 2,5 Kn.

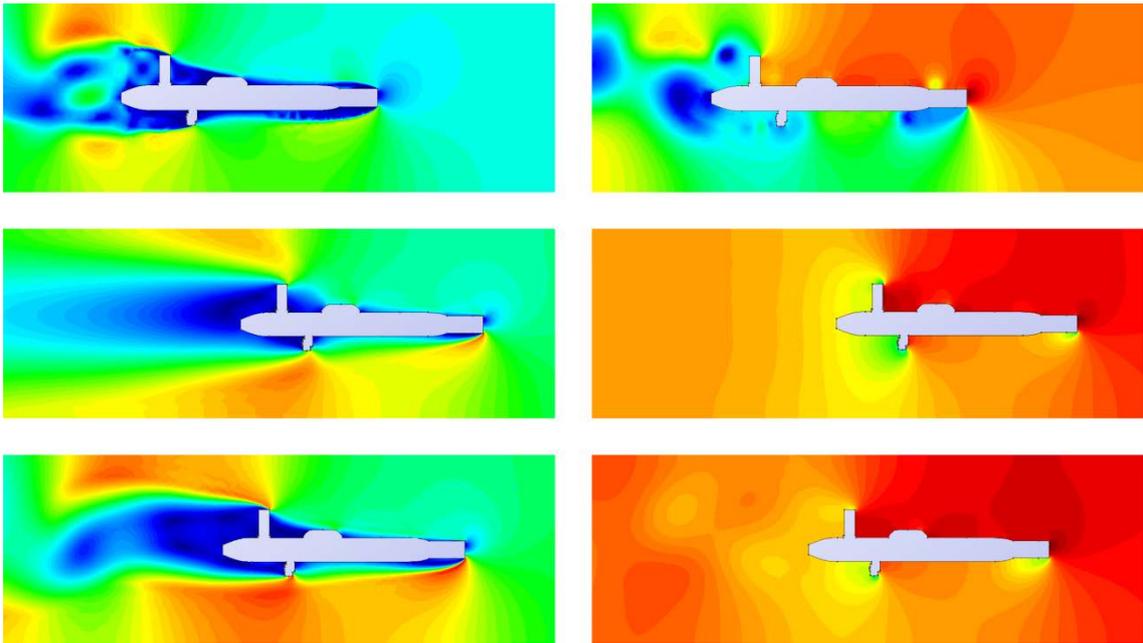


Figura 57. Modelo Neptuno con apéndices 1 Kn.

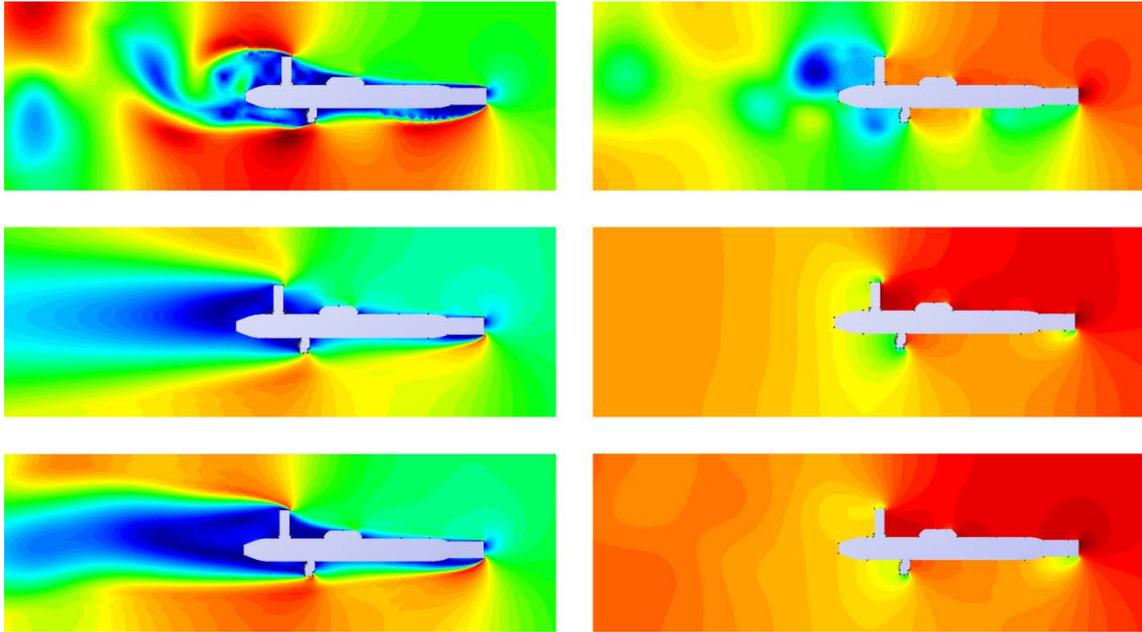


Figura 58. Modelo Neptuno con apéndices 2 Kn.

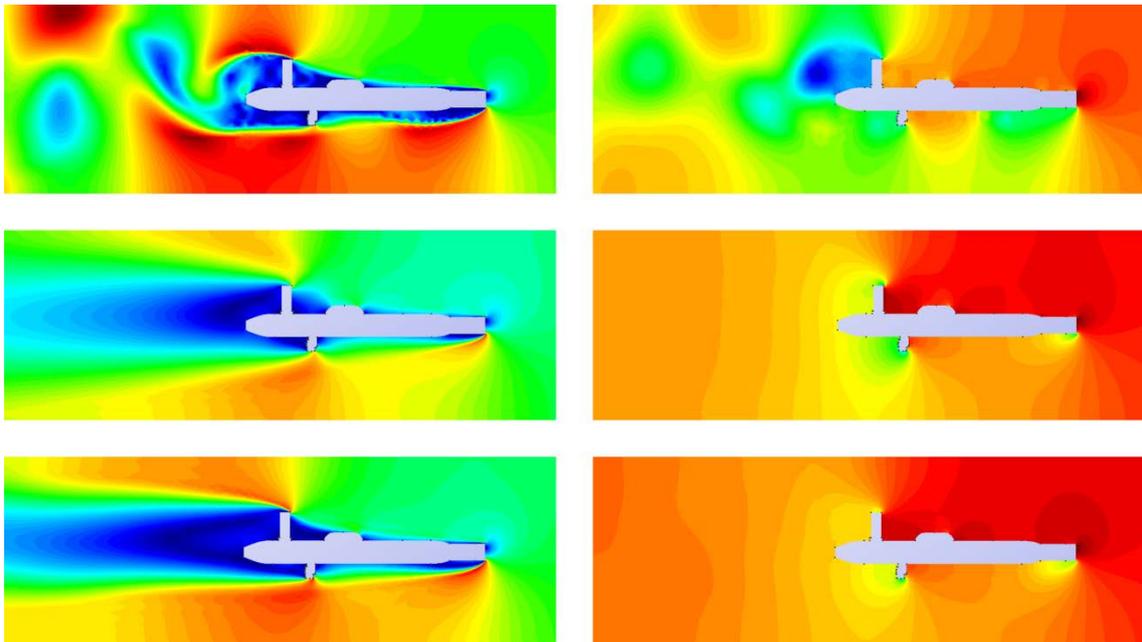


Figura 59. Modelo Neptuno con apéndices 2,5 Kn.

Como se puede observar el modelo ILES presenta grandes diferencias en cuanto a la distribución de presiones con respecto a los otros dos modelos, así como el módulo de velocidad obtenido. Como conclusión, se utilizarán los valores de la resistencia obtenida por el modelo de Spalart-Allmaras ya que presenta la distribución del flujo alrededor del vehículo. A continuación, se presentan los resultados numéricos de las simulaciones realizadas a diferentes velocidades con modelos de turbulencia distintos para cada geometría:

		Modelo	Resultados											
		Velocidad	Inicial Sin Apéndices			Inicial Con apéndices			Neptuno Sin Apéndices			Neptuno Con Apéndices		
		Turbulencia	k omega sst	Iles	Spalart Allmaras	k omega sst	Iles	Spalart Allmaras	k omega sst	Iles	Spalart Allmaras	k omega sst	Iles	Spalart Allmaras
Fuerzas de presión N	1,000	15,229	14,053	13,761	135,150	95,020	101,070	13,163	16,399	13,011	159,620	102,030	106,220	
	2,000	59,471	57,641	53,468	517,770	285,200	406,110	51,974	70,367	52,821	619,910	579,080	433,900	
	2,500	93,895	83,235	83,316	824,550	503,670	634,980	82,552	111,910	82,752	962,470	828,220	674,650	
Fuerzas Viscosas N	1,000	1,795	0,075	1,179	0,928	0,032	0,504	1,504	0,021	0,860	1,130	0,078	0,511	
	2,000	6,886	0,143	4,769	3,642	0,078	1,890	5,963	0,071	2,825	3,981	0,054	1,805	
	2,500	10,533	0,380	7,234	5,145	0,039	2,760	7,379	0,185	4,174	5,971	0,249	2,744	
Fuerzas totales N	1,000	17,024	13,978	14,940	136,080	85,052	101,570	14,666	16,378	13,871	160,750	102,110	106,730	
	2,000	66,357	57,498	58,237	521,410	285,280	408,000	57,937	70,296	55,646	623,890	579,020	435,710	
	2,500	104,430	82,856	90,550	829,690	503,710	637,740	89,931	111,730	86,927	968,440	828,460	677,4	

Tabla 21. Resultados CFD.

Como se puede observar no se aprecian diferencias significativas en cuanto a los resultados obtenidos con los modelos de turbulencia K-Omega SST y el modelo Spalart-Allmaras. Por el contrario, el modelo ILES da resultados con una gran variación de medida.

Observando los resultados cabe destacar la gran diferencia que se pueden encontrar entre los obtenidos por el método de Hughes con los observados en las simulaciones de CFD. La diferencia de estos resultados puede haber se debido a varios factores:

- En el método de Hughes y de Froude no se tiene en cuenta la curvatura del modelo.
- En las simulaciones realizadas con los modelos sin apéndices al ser calculadas en dos dimensiones se produce un incremento de la resistencia ya que no se tiene en cuenta la manga de cada uno de los elementos ni su curvatura.
- En las simulaciones realizadas con los modelos con apéndices se acentúa más el error de la estimación de la resistencia ya que no se toman las mangas de cada apéndice y el programa lo toma como un elemento plano incrementando así la resistencia drásticamente

Si se representan los valores obtenidos por medio de gráficas para cada modelo de turbulencia a cada velocidad se puede observar

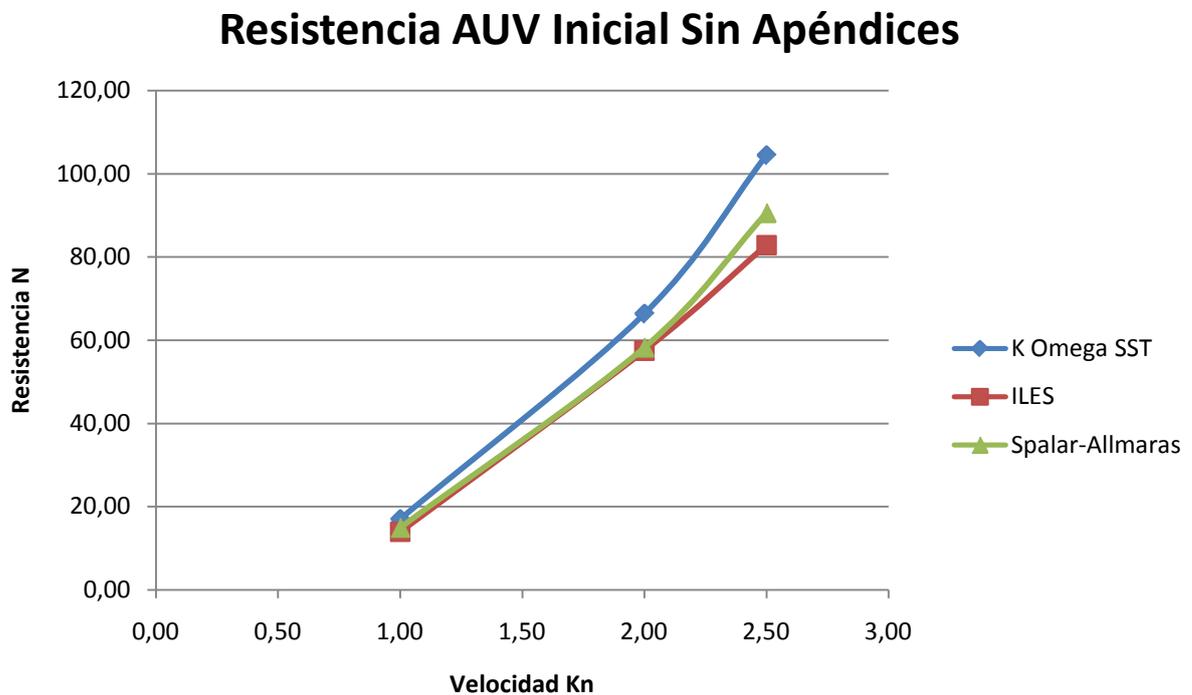


Figura 60. Resistencia AUV Inicial sin apéndices.

Como se puede observar los modelos ILES y Spalart-Allmaras dan valores similares a diferencia de los obtenidos con el modelo K-Omega SST que da valores ligeramente superiores.

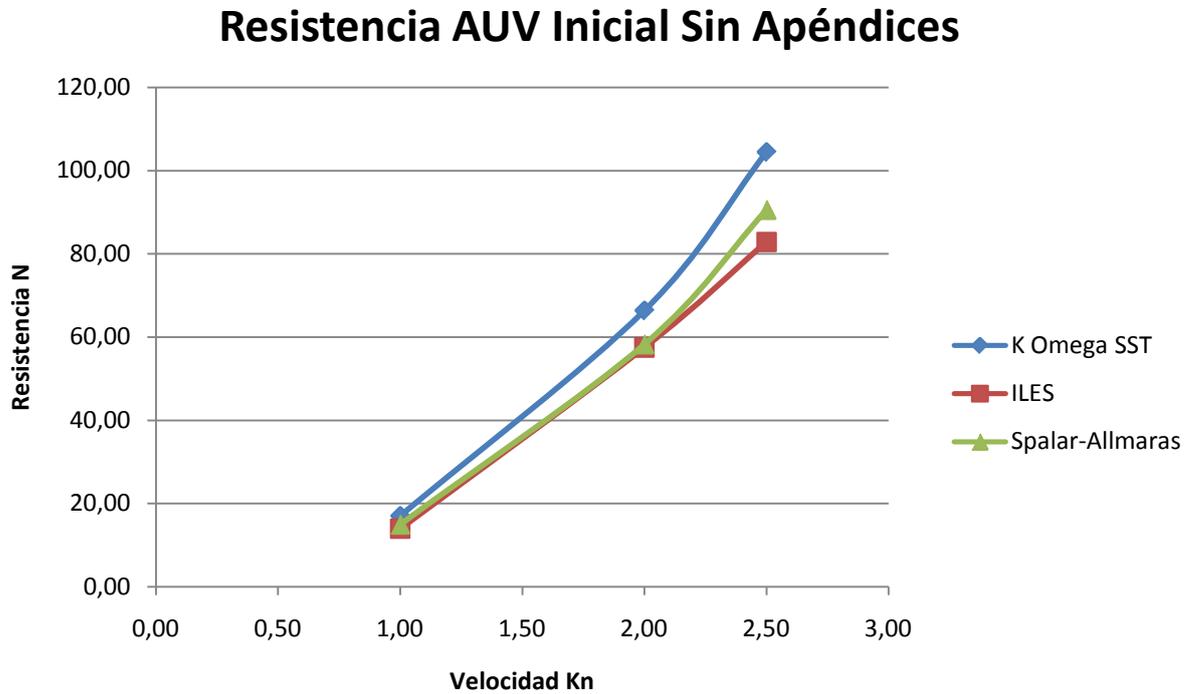


Figura 61. Resistencia AUV Inicial con apéndices.

En este caso se aprecia una diferencia entre los modelos de turbulencia seleccionados.

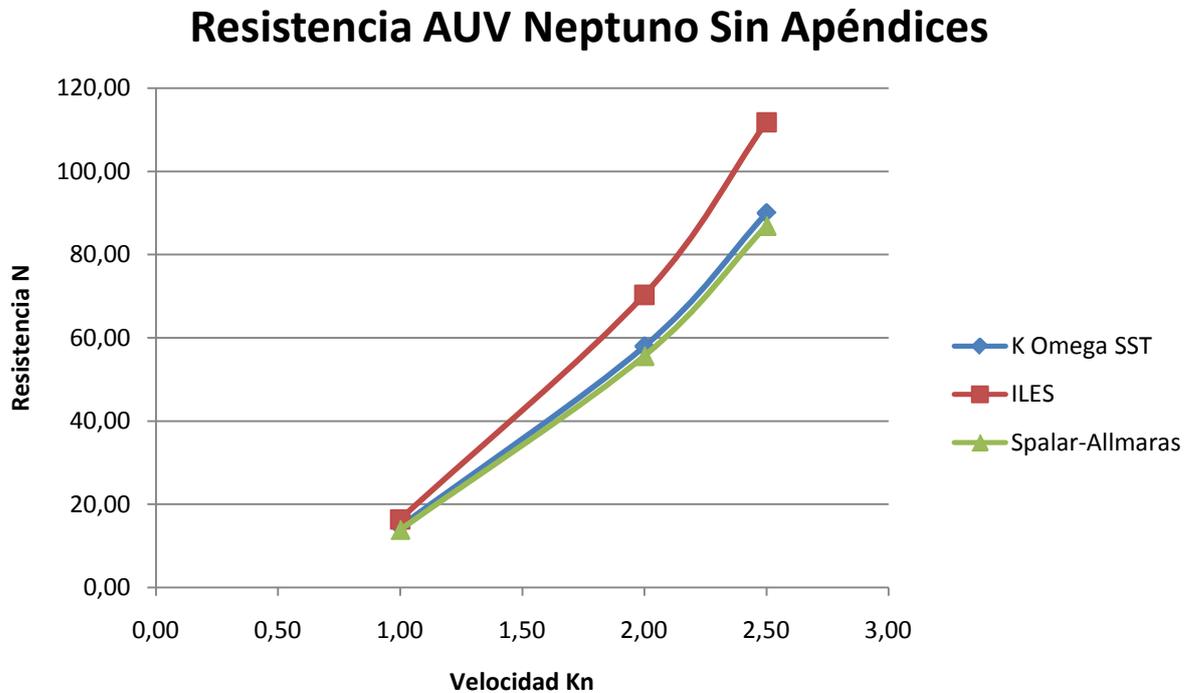


Figura 62. Resistencia AUV Neptuno sin apéndices.

Para esta geometría se observa unos resultados similares entre los modelos de turbulencia K-Omega SST y el Spalart-Allmaras.

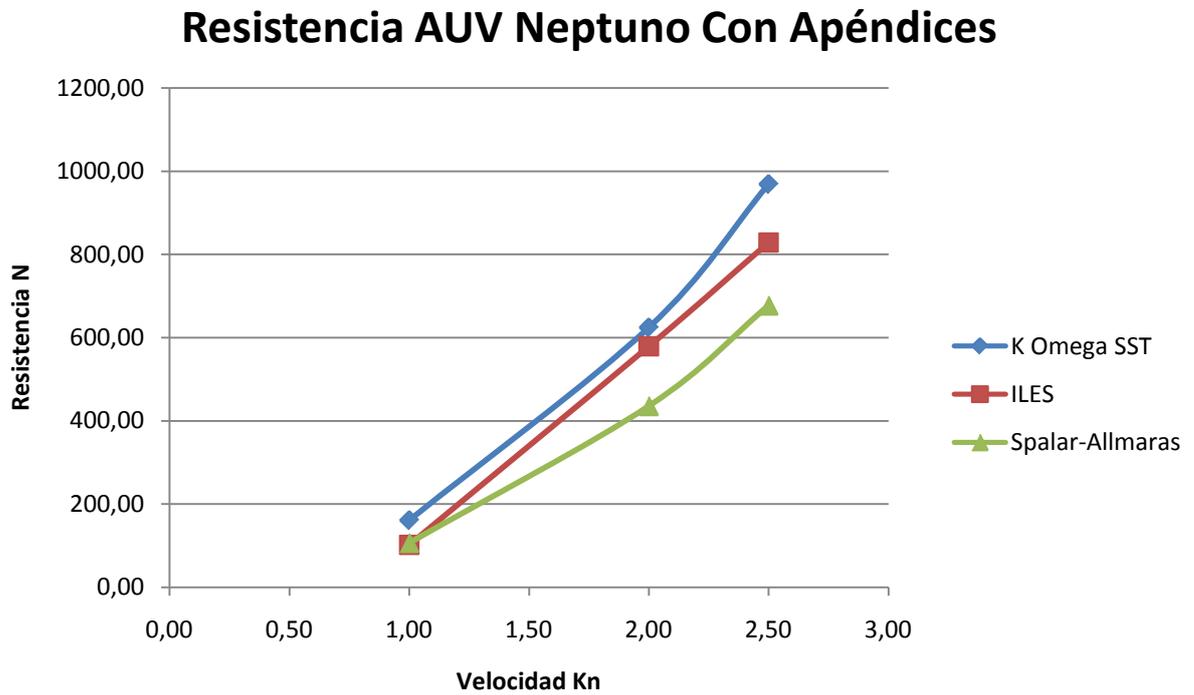


Figura 63. Resistencia AUV Neptuno con apéndices.

En este último modelo se puede observar un gran parecido entre los valores obtenidos por los modelos K-Omega SST y el modelo ILES.

Capítulo 5

Conclusiones y bibliografía



7 Conclusiones

Debido al diseño del nuevo cabezal en elementos modulares el mantenimiento de éste es relativamente sencillo, así como de fácil recambio para nuevos elementos o eliminación de los que están en desuso. Este diseño lo hace llamativo para los diferentes compradores que estén interesados en el nuevo diseño del cabezal para el vehículo Iver2 EcoMapper para las diferentes misiones que podrá realizar gracias a él. En cuanto a las características que hay que destacar en este nuevo diseño se encuentra la resistencia al avance, el estudio de los consumos eléctricos, así como del balance de pesos del mismo. Como se puede apreciar se produce un incremento en la resistencia al avance del vehículo entorno a un 15 % con la nueva geometría. Este incremento de la resistencia no supone un gran coste si se observa las capacidades que este nuevo modelo aporta al vehículo.

En cuanto a la autonomía del vehículo se ha realizado una aproximación expuesta en el apartado del balance eléctrico por la cual, dependiendo de la velocidad, de los cambios de profundidad y del uso o no de los nuevos componentes funcionales se puede obtener un valor estimado de la capacidad operativa del vehículo. A este valor de la autonomía se le deberá de aplicar un factor corrector debido a que no se pueden realizar estudios experimentales del modelo debido a la falta de los elementos que lo componen. Debido a la distribución de los elementos en el nuevo cabezal y al estudio de balance de pesos se puede estimar el buen comportamiento que tendrá el nuevo cabezal en el vehículo ya que posee características muy similares a las que tenía el vehículo de forma inicial, sin embargo este valor es solo un valor estimativo ya que no se han podido tener acceso a los elementos a tratar y los valores tanto de pesos como de centros de gravedad en las tres direcciones espaciales han sido estimados o recogidos de diferentes fuentes por lo que no asegura su posición real. En cuanto a la estimación de la resistencia al avance del vehículo mediante CFD's se tendrán que realizar nuevas simulaciones con el modelado en 3D para una mejor aproximación de la resistencia al avance.

Para ampliar este proyecto como funciones a desarrollar en el futuro podrían destacar la implantación de funciones de control de activación o desactivación de las cámaras en el cabezal, así como estudios de nuevos elementos de visión en el futuro mercado. También será necesario la incorporación de elementos capaces de medir la luminosidad en el exterior del vehículo y en función de estos regular la emisión de luz de los focos LED. Tras la comprobación de su funcionamiento durante varias misiones se estudiará la necesidad de la instalación de un nuevo paquete de baterías así como un alargamiento del cuerpo central del vehículo..

8 Bibliografía

Libros con autor:

John A. Knauss, (2008) *Introduction to physical oceanography*. Segunda edición.

Capítulo de un libro:

Javier Gilabert Cervera, *Tema 05 Propagación de la luz y el sonido de la asignatura Oceanografía Máster en Ingeniería Naval y Oceánica*.

Pedro Sosa Marcelo, *Capítulo 6 Formas y Resistencia*.

Tesis y disertaciones:

Garrido Pellicer A. *Estimación de los coeficientes hidrodinámicos de vehículos autónomos submarinos mediante CFD*.

Carrasco Pagán G. *Evaluación y análisis de un AUV mediante CFD y estudio de alternativas operativas*.

Von Alt C, (2003) *Prepared for the autonomous Underwater Lagrangian Platforms and Sensors Workshop*.

Guillén García J, (2011) *Visión Artificial aplicada en Vehículos Autónomos Submarinos*.

Páginas web:

https://en.wikipedia.org/wiki/Autonomous_underwater_vehicle

<http://auvlab.mit.edu/history.html>

<https://www.lasertoolsco.com/marine/sea-beam-laser>

<https://www.apinex.com/es/Punteros-laser-submarino/>

<http://www.nauticexpo.es/prod/bowtech-products/product-39792-416389.html>

<http://www.glowdive.com/laser/index.htm>

<http://es.shop.gopro.com/EMEA/cameras/hero4-black/CHDHX-401-EU.html>

<http://es.shop.gopro.com/EMEA/accessories/dual-hero-system/AHD3D-301.html>

<http://www.rovs.eu/>

<http://oceanexplorer.noaa.gov/facts/auv.html>

http://www.gaymarine.it/gaymarine_ita.htm

<http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0240.nsf/AllWeb/481519DA1B0207CDC12574B0002A8451?OpenDocument>

<https://www.whoi.edu/main/remus6000>

http://planet-ocean.co.uk/wp/?page_id=1819&gclid=Cj0KEQAsP-2BRCFI4Lb2NTJttEBEiQAmj2tbctd67-mgrx5XIYUVCdIzPgGwa2xcnHWI4cinyfOmD0aArMt8P8HAQ

<http://www.bowtech.co.uk/product.php?&LED-C-SERIES-Underwater-LED-Light-for-Diving-and-ROV-Applications&code=LED-C-SERIES%20Underwater%20LED%20Light&prodid=74>

<http://www.oceantools.co.uk/video/oceanled-lighting/>

<http://www.eis.uva.es/~macromol/curso04-05/pmma/documentacion/propiedades.htm>

<http://www.fotonostra.com/fotografia/propiedadesluz.htm>

[https://es.wikipedia.org/wiki/Absorci%C3%B3n_\(%C3%B3ptica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Absorci%C3%B3n_(%C3%B3ptica))

https://es.wikipedia.org/wiki/Temperatura_de_color

https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Beer-Lambert

<http://www.bluefinrobotics.com/vehicules-batteries-and-services/bluefin-9/>

<http://www.bluefinrobotics.com/assets/Downloads/Bluefin-9-Product-Sheet.pdf>

<http://auvac.org/configurations/view/8>

http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/17/htm/sec_7.html

<http://saab.com/naval/underwater-systems/mine-warfare-systems/auv62-mr/>

http://www.seaeye.com/Acoustic_Target.html

https://es.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A1nica_de_fluidos_computacional

<http://www.compassis.com/compass>

<http://www.iesmaritimopesquerolp.org/assignaturas/BIOLOGIA/Biologia%20%96%20E1%20oc%20E9ano%20y%20sus%20recursos.%20III.%20Las%20ciencias%20del%20mar.%20Oceanografia%20fisica,%20matematicas%20e%20ingenieria.pdf>

http://www.ise.bc.ca/pdfs/ISE_Theseus%20AUV_Datasheet_Jan11_compressed.pdf

<http://www.tritech.co.uk/product/rov-auv-laser-line-generator-seastripe>