

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Naval y Oceánica



PROYECTO FIN DE CARRERA

VARIACIÓN OPERACIONAL DE UN VEHÍCULO AUTÓNOMO SUBMARINO

ESTUDIO Y ANÁLISIS MEDIANTE CFD

Alumna: Carolina Rodríguez de Mesas

Director: Javier Gilabert Cervera

Fecha: 15/03/2017

Titulación: Ingeniería Naval y Oceánica.

Departamento: Ingeniería Química y Ambiental



Índice

1.	Objetivos.....	11
2.	La batimetría.....	12
2.1.	Introducción	12
2.2.	Tipos de batimetrías	16
2.3.	La transmisión de información mediante ondas acústicas.	19
2.3.1.	El sónar	26
2.3.2.	Las sondas acústicas	30
2.4.	Los sistemas anexos a la sonda.....	34
2.4.1.	Sistemas de posicionamiento	34
2.4.2.	Sistemas de cálculo de la velocidad del sonido en el agua	35
2.4.3.	Sensor inercial de navegación	37
2.4.4.	La práctica hidrográfica	37
3.	Vehículos submarinos no tripulados.....	40
3.1.	Introducción	40
3.2.	ROV's. Vehículos operados a distancia	42
3.3.	AUV's. Vehículos autónomos submarinos	43
3.4.	El diseño de un AUV.....	46
4.	El vehículo objeto de estudio.....	51
4.1.	Introducción	51
4.2.	La unidad de control del vehículo.....	55
4.3.	El sistema de propulsión.....	57
4.4.	Fuente de alimentación y balance eléctrico	59
4.5.	Sistemas de navegación.....	62
4.6.	Sensores	65
4.7.	Seguridad.....	67
4.8.	Comunicaciones.....	67
4.9.	Balance de pesos	69
4.9.1.	Vehículo sin instrumentación (V*).....	72
4.9.2.	Vehículo con la instrumentación del YSI (V _{YSI})	74
4.9.3.	Vehículo con la instrumentación de hidrocarburos (V _{HC})	77
5.	El nuevo diseño y funcionalidad	80
5.1.	Introducción	80
5.2.	Comparativa de sondas en el mercado.....	83

5.3.	Diseño.....	86
5.4.	Balance de pesos	90
5.5.	Balance eléctrico	93
6.	El cálculo CFD.....	94
6.1.	Introducción	94
6.2.	La resistencia al avance	98
6.2.1.	Vehículo sin modificaciones (V_{ysi})	98
6.2.2.	Vehículo con sonda la Sonda Multihaz	101
6.3.	El Modelado.....	103
6.3.1.	Vehículo sin modificaciones (V_{ysi})	103
6.3.2.	Vehículo con sonda la Sonda Multihaz	108
6.4.	El análisis CFD	110
6.4.1.	Formulación para Tdyn.....	111
6.4.2.	Variables vehículo sin modificaciones (V_{ysi})	118
6.4.3.	Variables vehículo con sonda la Sonda Multihaz	119
7.	Resultados del análisis CFD.....	121
7.1.	Vehículo sin modificaciones (V_{ysi})	121
7.2.	Vehículo con sonda la Sonda Multihaz	126
8.	Conclusiones.....	132
9.	Agradecimientos.....	135
10.	Bibliografía y referencias web.....	136
10.1.	Proyectos	136
10.2.	Documentos	137
10.3.	Páginas web	139
11.	Anexos	140

Índice de imágenes

Imagen 1: Obtención de isóbatas para la Carta de Navegación (Fuente: www.wordpress.com).....	14
Imagen 2: Escandallo (Fuente: https://pinake.wordpress.com/tag/escandallo/).....	16
Imagen 3: Batimetría fotográfica (Fuente: http://levantamientosbatimericos.blogspot.com.es/)	17
Imagen 4: Batimetría láser (Fuente: http://www.aet.org.es)	18
Imagen 5: Canal profundo (Fuente: Apuntes Acústica Submarina UPCT, Joaquín Fernández Perles).....	20
Imagen 6. Pérdidas por expansión cilíndrica y esférica de la onda debidas a la geometría del haz (Fuente:IHO).....	22
Imagen 7. Coeficiente de absorción en función de la frecuencia y la temperatura. (Fuente: IHO).	22
Imagen 8. Pérdidas por absorción en función de la frecuencia en distintos tipos de agua (Fuente: SUBMON)	23
Imagen 9: Refracción y reflexión (Fuente: Jfmeleiro en www.wikipedia.org).....	23
Imagen 10: Scattering de la onda sonora (Fuente: http://woodshole.er.usgs.gov).....	24
Imagen 11: Pérdidas en la dispersión (Fuente: High-Frequency Ocean Environmental Acoustic Models Handbook).....	25
Imagen 12: Pérdidas en la reflexión (Fuente: High-Frequency Ocean Environmental Acoustic Models Handbook).....	25
Imagen 13: Transductor (Fuente: Apuntes Acústica Submarina UPCT, Joaquín Fernández Perles).....	27
Imagen 14: Ejemplo de imagen tomada desde un SSS (Fuente: http://www.iver-auv.com/)	28
Imagen 15. Parámetros tipos de un SSS. (Fuente: www.GeoSoluciones.cl).....	28
Imagen 16. Detección de amplitud y de fase. (Fuente: Geología y geofísica marina y terrestre del ecuador)	30
Imagen 17. Geometría del sistema de haces cruzados (Fuente: Ifremer).....	32
Imagen 18: Descripción del funcionamiento de una sonda multihaz (Fuente: http://www.noaa.gov/).....	33
Imagen 19: Perfil de velocidad (Fuente: Apuntes Acústica Submarina UPCT, Joaquín Fernández Perles)....	36
Imagen 20. Líneas de sondaje. (Fuente: IHO).....	38
Imagen 21. Metadatos de la norma ISO 19115-2 (Fuente: ISO 19115-2)	39
Imagen 22: AUV IVER 2 de la UPCT (Fuente: www.upct.es).....	40
Imagen 23: Clasificación de los vehículos submarinos no tripulados.....	41
Imagen 24. Diferentes tipos de vehículos (Fuente: http://www.edgetech.com).....	41
Imagen 25: Diferentes ROVs, utillajes y misiones (Fuente: Google Imágenes).....	43
Imagen 26: AUV oceánico (Fuente: http://www.ise.bc.ca)	44
Imagen 27: AUV Ligerero (Fuente: http://cirs.udg.edu).....	44
Imagen 28: AUV Portátil (Fuente: http://auvac.org)	45
Imagen 29: Diferentes AUV, utillajes y funciones (Fuente: Google Imágenes).....	45
Imagen 30: Plano esquemático del AUV (Fuente: Unidad de Tecnología Marina, CSIC)	47
Imagen 31: Forma Albacore (Fuente: Apuntes de Pedro Sosa, Capítulo 6)	49
Imagen 32: Influencia de las formas en la distribución de presiones (Fuente: NOC)	50
Imagen 33: Sección de un AUV (Fuente: T. Joung).....	50
Imagen 34. EcoMapper sin instrumentación en el cabezal (V^*)	51
Imagen 35: EcoMapper de YSI basado en el IVER-2 (V_{YSI}).....	52
Imagen 36. EcoMapper con la instrumentación de hidrocarburos (V_{HC})	53
Imagen 37: Arquitectura de la electrónica del vehículo (Fuente: http://upcommons.upc.edu).....	55
Imagen 38. Estructura que contiene la electrónica del vehículo	56
Imagen 39. Cuerpo de popa, con hélice y tobera desmontadas.	57
Imagen 40: Potencia, par y revoluciones del SM2315DT (Fuente: http://www.animatics.com).....	58
Imagen 41: Batería NL2044HD22 (Fuente: http://www.inspired-energy.com/).....	59
Imagen 42: Límites de descarga de las baterías Fuente: http://www.inspired-energy.com/)	60
Imagen 43. Esquema del consumo del vehículo.....	61

<i>Imagen 44: En amarillo, el DVL de un IVER 2 (Fuente: http://www.iver-auv.com/)</i>	63
<i>Imagen 45. DVL y manómetro de la prueba de vacío.</i>	64
<i>Imagen 46. Sensor de presión</i>	64
<i>Imagen 47. Sensor HC (izquierda), sensor YSI (derecha).</i>	66
<i>Imagen 48. Asa y raíl</i>	67
<i>Imagen 49. Antena con la conexión para carga de baterías.</i>	68
<i>Imagen 50. USBL (izquierda) y modem acústico instalado en el vehículo (derecha)</i>	68
<i>Imagen 51. Lastre instalado en el cilindro de la electrónica.</i>	70
<i>Imagen 52. Lastre roscado en el cabezal del vehículo V_{HC}.</i>	71
<i>Imagen 53. 16 onzas de plomo en el raíl del vehículo</i>	71
<i>Imagen 54. 3D vehículo V^*</i>	72
<i>Imagen 55. Centros de gravedad y volumen. Vehículo V^*</i>	74
<i>Imagen 56. Sensores YSI</i>	74
<i>Imagen 57. 3D vehículo V_{YSI}.</i>	75
<i>Imagen 58. Centros de gravedad y volumen. Vehículo V_{YSI}</i>	77
<i>Imagen 59. Calibrado del sensor de rodamina.</i>	77
<i>Imagen 60. 3D vehículo V_{HC}.</i>	77
<i>Imagen 61. Centros de gravedad y volumen. Vehículo V_{HC}</i>	79
<i>Imagen 62. Wideband Multibeam Sonar de Norbit (Fuente: http://www.norbit.com/)</i>	80
<i>Imagen 63. Mesotech M3 Sonar® (Fuente: Kongsberg)</i>	83
<i>Imagen 64. GeoSwath Plus AUV. (Fuente: Kongsberg)</i>	84
<i>Imagen 65. EdgeTech 6205 (Fuente: EdgeTech)</i>	84
<i>Imagen 66. SeaBat 7125 (Fuente: Teledyne)</i>	85
<i>Imagen 67. Diseño preliminar con la Sonda Multihaz en el casco resistente</i>	86
<i>Imagen 68. Diseño preliminar con la Sonda Multihaz en el casco resistente</i>	86
<i>Imagen 69. Diseño del vehículo con la Sonda Multihaz a popa.</i>	87
<i>Imagen 70. Distribución de tensiones de Von Mises sobre la carcasa</i>	88
<i>Imagen 71. Valores de los desplazamientos sobre la carcasa</i>	89
<i>Imagen 72. 3D vehículo con modificaciones</i>	90
<i>Imagen 73. Centros de gravedad y volumen. Vehículo con la Sonda Multihaz</i>	92
<i>Imagen 74. Esquema del consumo del vehículo</i>	93
<i>Imagen 75. Vehículo submarino Autónomo en un Canal de Experiencias. (Fuente: http://www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es)</i>	94
<i>Imagen 76. Imagen ilustrativa del proceso de funcionamiento de la CFD</i>	95
<i>Imagen 77: Proceso de diseño de un AUV (Fuente: elaboración propia)</i>	97
<i>Imagen 78. V^*</i>	103
<i>Imagen 79. V_{YSI}</i>	104
<i>Imagen 80. V_{HC}.</i>	105
<i>Imagen 81. Distribución de los elementos del vehículo en capas</i>	105
<i>Imagen 82. Puntos necesarios para el generado de superficies en Tdyn</i>	106
<i>Imagen 83: Ejemplo de recorte de la antena con el casco</i>	106
<i>Imagen 84. Volumen generado en el modelo V_{YSI} (representado en azul claro)</i>	107
<i>Imagen 85. Volumen de control y vehículo</i>	107
<i>Imagen 86. Dimensiones generales de la Sonda Multihaz</i>	108
<i>Imagen 87. Modelado 3D de la Sonda Multihaz y la carcasa</i>	108
<i>Imagen 88. Renderizado 3D del vehículo con la Sonda Multihaz</i>	109
<i>Imagen 89. Modelo generado en Tdyn (en azul claro se representa el volumen)</i>	109
<i>Imagen 90. Renderizado del vehículo</i>	109
<i>Imagen 91: Dimensiones del volumen de control (unidades en centímetros)</i>	110
<i>Imagen 92. Volumen de control</i>	111
<i>Imagen 93: Ejemplo de flujo laminar y turbulento (Fuente: http://www.textoscientificos.com)</i>	112

<i>Imagen 94: Desarrollo de la capa límite (Fuente: HB Tdyn turbulence www.compassis.com)</i>	114
<i>Imagen 95. Interfaz del programa con las condiciones de contorno</i>	121
<i>Imagen 96. Número de elementos de malla creados</i>	122
<i>Imagen 97. Detalle de la malla del vehículo sin modificaciones</i>	122
<i>Imagen 98: Estabilidad de resultados en la curva de fuerzas</i>	123
<i>Imagen 99: Presiones actuantes en el vehículo</i>	124
<i>Imagen 100: Flujo de velocidades sobre el vehículo</i>	124
<i>Imagen 101: Flujo de velocidades sobre el vehículo</i>	125
<i>Imagen 102: Presiones actuantes en el vehículo</i>	125
<i>Imagen 103. Mallado de la sonda y el modem acústico</i>	126
<i>Imagen 104. Estabilidad de resultados en la curva de fuerzas</i>	127
<i>Imagen 105. Flujo de velocidades sobre el vehículo</i>	127
<i>Imagen 106. Flujo de velocidades máximas y mínimas sobre el vehículo</i>	128
<i>Imagen 107. Presiones actuantes en el vehículo</i>	128
<i>Imagen 108. Flujo de velocidades sobre el vehículo</i>	129
<i>Imagen 109. Presiones actuantes en el vehículo</i>	129
<i>Imagen 110. Flujo de velocidades sobre el vehículo</i>	130
<i>Imagen 111. Presiones actuantes en el vehículo</i>	130
<i>Imagen 112. Flujo de velocidades en V_{YSI}</i>	133
<i>Imagen 113. Flujo de velocidades en V_{MB}</i>	133

Índice de tablas

Tabla 1: Ley de Snell e Índice de refracción	23
Tabla 2: Quality of the seabed (Fuente: HQAIs Hydrographic Quality Assurance Instructions for Admiralty Surveys)	29
Tabla 3: Resolución según el equipo de medición (Fuente: https://www.lpi.tel.uva.es).....	30
Tabla 4: Frecuencia en función de la profundidad (Fuente: https://www.lpi.tel.uva.es).....	31
Tabla 5. Valores de la velocidad del sonido.....	36
Tabla 6: Clasificación de los ROV según su profundidad de trabajo	42
Tabla 7: Características de los materiales más usuales en AUV	48
Tabla 8. Características del AUV V*.....	52
Tabla 9: Características del AUV (V_{YSI})	52
Tabla 10: Características de los sensores del AUV (Fuente: http://www.iver-auv.com).....	53
Tabla 11: Características del AUV (V_{HC}).....	53
Tabla 12: Características de los sensores del AUV.....	53
Tabla 13. Resumen del balance eléctrico de los vehículos.....	61
Tabla 14. Balance del vehículo.....	62
Tabla 15: Tabla de pesos del vehículo	72
Tabla 16: Tabla de pesos del vehículo	73
Tabla 17: Posición del centro de gravedad del v*.....	73
Tabla 18: Tabla de pesos del vehículo	75
Tabla 19: Tabla de pesos del vehículo	75
Tabla 20: Posición del centro de gravedad del V_{YSI}	76
Tabla 21: Tabla de pesos del vehículo	78
Tabla 22: Tabla de pesos del vehículo	78
Tabla 23: Posición del centro de gravedad del V_{HC}	78
Tabla 24. Características principales	81
Tabla 25. Resumen de características	85
Tabla 26: Tabla de pesos del vehículo	91
Tabla 27: Tabla de pesos del vehículo	91
Tabla 28: Posición del centro de gravedad del V_{MB}	91
Tabla 29. Balance del vehículo.....	93
Tabla 30: Coeficientes y formulación para el cálculo de la resistencia de fricción	98
Tabla 31: Resistencia y potencia necesaria del vehículo sin modificaciones	99
Tabla 32: Fórmulas para el cálculo, incluyendo apéndices y rugosidad	100
Tabla 33: Espesor, cuerda y factor $1+k$ de los apéndices.....	100
Tabla 34: Resultados de la resistencia parcial y total en N	100
Tabla 35: Espesor, cuerda y factor $1+k$ de los apéndices.....	101
Tabla 36: Resultados de la resistencia parcial y total.....	102
Tabla 37: Cálculos relativos a la viscosidad.....	113
Tabla 38: Cálculo del TIL.....	113
Tabla 39: Cálculo del espesor δ y del parámetro adimensional y^+	115
Tabla 40: Cálculo del espesor δ y del parámetro adimensional U^+	115
Tabla 41: Cálculo del número de Courant, espesor δt , NOS, NOSi y Tsim	116
Tabla 42: Valores para las distintas velocidades del vehículo	118
Tabla 43: Valores para los apéndices	118
Tabla 44: Valores para los apéndices	118
Tabla 45: Valores para los apéndices	119
Tabla 46: Valores para los apéndices	119
Tabla 47: Valores para las distintas velocidades del vehículo	119
Tabla 48: Valores para los apéndices	120

Tabla 49: Valores para los apéndices120
Tabla 50. Resumen de los resultados de la resistencia para cada uno de los elementos124
Tabla 51. Resumen de los resultados de la resistencia para cada uno de los elementos126
Tabla 52. Resumen de los resultados de la resistencia para cada uno de los elementos128
Tabla 53. Resumen de los resultados de la resistencia para cada uno de los elementos129
Tabla 54. Resumen de los resultados de la resistencia para cada uno de los elementos131
Tabla 55. Resumen de los resultados obtenidos en las simulaciones132
Tabla 56: Fórmula del rendimiento propulsivo igual para ambos casos134
Tabla 57. Resumen de resultados de los vehículos de interés.134

Acrónimos

SONAR	SOund NAVigation and Ranging
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
OHI	Organización Hidrográfica Internacional
SSS	Side Scan Sonar
MBE	MultiBeam Echosounder
GIS	Sistema de Información Geográfica
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
WGS	World Geodetic System
UUV	Unmanned Underwater Vehicle
AUV	Autonomous Underwater Vehicle
ROV	Remotely Operated Vehicle
ASV	Autonomous Surface Vehicle
V*	Vehículo sin instrumentación
V _{YSI original}	Vehículo con la instrumentación del YSI original (sin modificaciones)
V _{YSI}	Vehículo con la instrumentación del YSI actual
V _{HC}	Vehículo con la instrumentación de hidrocarburos
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
UK	United Kingdom
USBL	Ultra Short BaseLine
DVL	Doppler Velocity Log
RPM	Revoluciones por minuto
CAD	Computer-Aided Design
PFC	Proyecto Final de Carrera
CFD	Computational Fluid Dynamics
PMMA	PoliMetilMetAcrilato
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
POM	POLiForMaldehído
APM-HPW	Poetileno-High Molecular Weight
PVC	PoliCloruro de Vinilo
CPVC	PoliCloruro de Vinilo Clorado
NOC	National Oceanography Centre

MLLW	Mean Lower Low Water
LIDAR	Light Detection And Ranging
GEOSAT	Geodetic Satellite
LANDSAT MMS	Multispectral Scanner System Landsat
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
RADARSAT	RADio Detection And Ranging Satellite
RADAR	RADio Detection And Ranging
NAVSTAR GPS	NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System
UPCT	Universidad Politécnica de Cartagena
DGPS	Sistema de Posicionamiento Global Diferencial
WAAS	Wide Area Augmentation System
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
MSAS	Multi-functional Satellite Augmentation System
SBAS	Satellite Based Augmentation System
CTD	Conductividad, Temperatura y Profundidad
IVEP	Impulsores Vectorizados de Estructura Paralela
CSIC	Consejo Superior de Investigaciones Científicas
LVS	Laboratorio de Vehículos Submarinos
CPU	Central Processing Unit
UC	Unidad de Control
NGC	Navegación, Guiado y Control
EHP	Potencia efectiva al avance
BHP	Potencia al freno
INS	Sistema de Navegación Inercial
ODO	Oxígeno Disuelto y Ozono

1. Objetivos

El objetivo de este proyecto se centra en analizar el Vehículo Autónomo Submarino (AUV) adquirido por el Departamento de Química y Ambiental de la Universidad Politécnica de Cartagena tras una serie de modificaciones realizadas en el mismo.

A lo largo de este proyecto se analizará el vehículo original y sus tres configuraciones posibles, incluyendo una modificación operacional añadiéndole un sónar multihaz con capacidad de sónar de barrido lateral. La importancia de este equipo se debe a que permitirá al vehículo adquirir la capacidad de realizar batimetrías del fondo marino con un elevado nivel de detalle.

El proyecto consta de una introducción a las batimetrías y a los vehículos autónomos submarinos, los balances de pesos de los diferentes prototipos evaluados y seis análisis de la resistencia al avance mediante el módulo CFD de Tdyn comparando vehículo original en varias de sus versiones con el modificado tras añadirle la Sonda Multihaz. Se realizará además un pequeño análisis estructural del diseño escogido para el vehículo modificado. En base a esta información y a proyectos realizados previamente en el departamento, se realizará un nuevo balance eléctrico en base a los registros de las misiones reales realizadas por el vehículo (los logs). El objetivo final de este proyecto es obtener conclusiones de estas modificaciones incluyendo su viabilidad operativa.

2. La batimetría

2.1. Introducción

En este capítulo se describen los principios generales de los levantamientos hidrográficos. El levantamiento hidrográfico incluye el levantamiento de un espacio acuático y usualmente puede incluir otros objetivos como mediciones de mareas y corrientes, el magnetismo terrestre o determinar las propiedades físicas y químicas del agua.

Más del 80% del transporte de mercancías mundial se realiza por vía marítima, lo que representa un peso importante para la economía en la mayor parte de los países, ya que aunque éstos no dispongan de costa, indirectamente dependen de ello para importar y exportar productos por todo el mundo.

Si bien la mayor parte del transporte de mercancías tiende a realizarse por medio de una serie de rutas internacionales, uno de los factores que garantizan que este transporte se haga de forma segura es que las cartas náuticas que dispongan los buques sean de alta calidad, para garantizar que la zona de paso y navegación sea lo más segura posible, sobre todo en el caso de zonas costeras o someras, canales y puertos. Las cartas deben contener el máximo de información posible, se actualizan constantemente y son distribuidas por los Servicios Hidrográficos pertinentes de cada Autoridad Marítima.

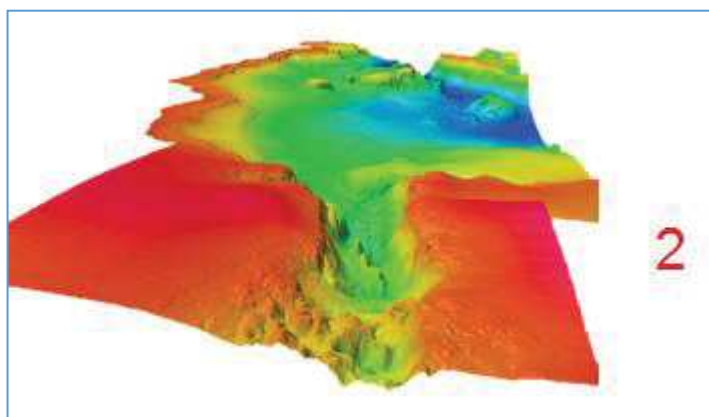
La hidrografía es la rama de la ciencia que se ocupa de la medición y la descripción de las características del mar y de las áreas costeras con el propósito de asegurar la navegación y otras actividades marinas, como la investigación, la protección del medio ambiente, y servicios de predicción. El entorno marino puede cambiar con relativa rapidez en función de las corrientes y las condiciones meteorológicas y geográficas de cada zona, por lo que el conocimiento del fondo marino es fundamental no solamente como ayuda a la navegación si no como medida de seguridad y prevención de accidentes marítimos. Una forma de analizar el estado de las zonas costeras es mediante la batimetría.

La batimetría (o levantamiento hidrográfico) es un proceso por el cual se realiza el levantamiento del relieve de superficies subacuáticas, con el fin de conocer con un grado de precisión determinado (y que depende del objetivo de la medición) el contorno submarino. Para realizar una batimetría se requiere el uso de sistemas de medición, que normalmente se basan en medios acústicos y que miden la profundidad, el relieve submarino, la posición de montes, valles o atolones por ejemplo, así como también las características físicas del lecho marino, como por ejemplo su composición (arena, rocas) y objetos depositados en él.

Por norma general el principal cometido de la batimetría es la obtención de cartas de navegación que incluyen la profundidad bajo el nivel del mar y la inclinación de la pendiente del relieve submarino para establecer zonas seguras para el tránsito de buques. Estos mapas están formados por una serie de curvas de nivel denominadas isóbatas que unen puntos de igual profundidad en el océano, como en el caso de las isóbaras en un mapa meteorológico. Estas representaciones gráficas del ambiente marino no solo indican la profundidad sino que también nos informan del comportamiento de las mareas con los datos de la bajamar y pleamar, el magnetismo terrestre en el momento de realizar la medición, incluso de grandes estructuras geomorfológicas, etc.

En la Imagen 1 se puede apreciar de forma esquemática el proceso de obtención de los datos para la zona del Estrecho de Gibraltar, donde tras realizar sondeos en la zona se transforman los datos batimétricos obtenidos en un mapa batimétrico, se digitalizan y posteriormente se aplican finalmente a una carta de navegación que se distribuirá tanto en formato físico como virtual.

En el punto 1 se muestra la zona de Gibraltar, sobre el que se han realizado una serie de pasadas mediante equipos batimétricos, obteniendo el mapa del punto 2. En este punto un software recibe la descarga de los datos y las convierte en información coherente, convirtiendo las señales recibidas por los equipos de medición mediante un procesado que las coordina con la información de posicionamiento en el tiempo. Finalmente, una vez filtrada y tratada la información del punto 2, ésta se ha plasmado en un mapa o Carta Náutica en forma de isóbatas, como se puede apreciar en el punto 3, donde se delimita el alcance de la profundidad en el relieve marino y a la que se añade el resto de información necesaria para una navegación segura en la zona:



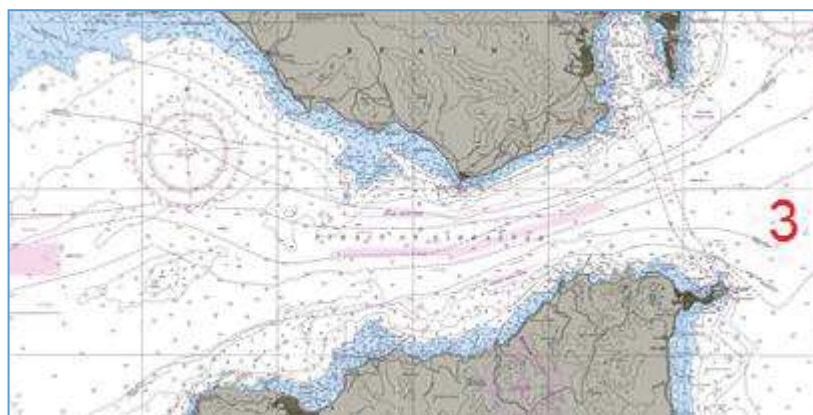


Imagen 1: Obtención de isóbatas para la Carta de Navegación (Fuente: www.wordpress.com)

La OHI (Organización Hidrográfica Internacional) es la organización intergubernamental consultiva y técnica de hidrografía, compuesta por 77 países que se encarga de establecer las normas básicas para la realización de levantamientos hidrográficos (concretamente la S-44), donde se encuentran los estándares mínimos para realizar un levantamiento destinado a la seguridad en la navegación. Se encarga, además, de publicar varios estándares, incluyendo el estándar de codificación S-57 relacionado con la transferencia de datos hidrográficos digitales empleado para cartas de navegación electrónicas¹.

Las técnicas acústicas utilizadas en la medición del fondo marino y en las batimetrías tienen más utilidades además de la elaboración de cartas de navegación ya que también permiten:

- ✓ En el sector público, la administración de zonas costeras como la construcción de puertos y su mantenimiento, conservación y mejora de canales mediante dragado.
- ✓ En el sector pesquero, localización de bancos de peces así como la localización de fondos aptos para colocación de redes de arrastre evitando pérdidas cuantiosas de aparejos de pesca. También mejoran el conocimiento de los sedimentos del fondo, delimitando zonas de trabajo y las posibilidades de encontrar determinadas especies.
- ✓ En el campo militar, su práctica fundamental se centra en la detección de obstáculos y vehículos sumergidos. Dentro del campo de los submarinos, se centra en la creación de armas antisubmarinas y contramedidas, la búsqueda de minas, etc.
- ✓ En arqueología, la capacidad de las sondas permite ubicar y localizar pecios hundidos estableciendo la composición del fondo marino en contraste, por ejemplo, con el bronce de los cañones de un barco de guerra, delatando su localización.
- ✓ En la industria, realizar el trazado de canalizaciones submarinas como conductos y tuberías, cables de comunicaciones, la realización de estudios hidrológicos, la perforación con fines extractivos, el dragado de ríos, la construcción de diques y otras obras fijas o móviles en alta mar (como los generadores eólicos marinos), mediante el análisis de la topografía del fondo.

¹ Las cartas electrónicas son el equivalente legal a la carta de papel clásica aprobada por la Organización Marítima Internacional (OMI).

- ✓ En el aspecto medio ambiental, la búsqueda de flora marina protegida, la reconstrucción de playas, la evaluación de la peligrosidad sísmica, la identificación de zonas de deposición de contaminantes en caso de vertidos, la evaluación del impacto ambiental de la actividad humana o de las corrientes, etc.
- ✓ Y finalmente, en otros casos también se utilizan siguiendo el mismo principio de orientación que utilizan algunos animales como los delfines y las ballenas para diseñar de sistemas de navegación submarina como los utilizados en vehículos submarinos.

Como se ha intuido en los ejemplos anteriores, el desarrollo de las técnicas batimétricas está fomentado fundamentalmente por el sector militar (defensa) y el sector industrial (búsqueda y explotación de recursos submarinos).

Una batimetría submarina, a diferencia del proceso que se realiza en los levantamientos terrestres (mapa topográfico), presenta una serie de inconvenientes asociados principalmente al propio medio en el que se realiza la medición, lo que provoca que actualmente poco más del 10% de los fondos marinos estén cartografiados en detalle.

Algunos de los problemas asociados a la batimetría se describen más adelante, aunque fundamentalmente se agrupan por las dificultades asociadas al movimiento de la masa de agua que provoca el desplazamiento continuo asociado de los instrumentos de medición, la dificultad de repetir mediciones en el mismo punto (lo que resta fiabilidad a los datos recogidos) y los problemas implícitos a las propiedades del entorno que influyen, como por ejemplo en la velocidad y la dirección de propagación de las ondas en el medio subacuático.

2.2. Tipos de batimetrías

Actualmente existen multitud de métodos para la realización de la batimetría del fondo marino. La determinación de las coordenadas tridimensionales $[X, Y, Z]$ de los puntos del fondo subacuático requiere determinar la posición planimétrica (plano $[X, Y]$) por un lado (explicada con detalle en el punto 2.4.1. Sistemas de posicionamiento). Si el sondeo se realiza desde una embarcación en zonas costeras, la ubicación normalmente se determina mediante el uso de sistemas GPS diferencial como se explicará más adelante, formado por una estación en tierra y el receptor a bordo. Por otro lado, mediante una sonda se determina la profundidad (eje $[Z]$) referida a la bajamar (o MLLW, Mean Lower Low Water). En mar abierto se tiene en cuenta el estudio de las mareas para corregir la variación de la cota causada por el movimiento de la lámina de agua en el transcurso del tiempo.

La batimetría puede realizarse con los siguientes sistemas descritos a continuación:

- ✓ Escandallo: es un sistema más o menos sofisticado formado por una plomada cónica, amarrada a un cabo que se lanza al agua para determinar la profundidad cuando ésta toca el fondo del mar. Este método fue el más usado hasta 1920, aunque tiene poca precisión y la medición puede verse afectada por la variación de la longitud del cable según el material empleado, la no verticalidad de la sonda y la alta influencia del oleaje.

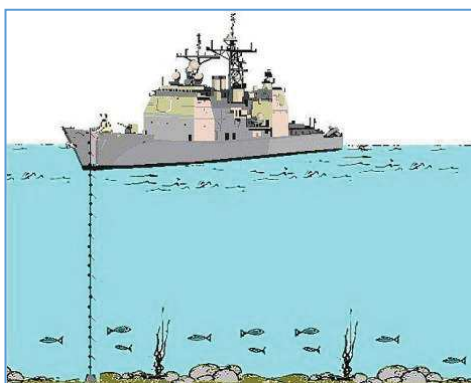


Imagen 2: Escandallo (Fuente: <https://pinake.wordpress.com/tag/escandallo/>)

- ✓ Batimetría mediante sondas acústicas: estos sistemas registran de forma continua la línea que se va levantando aprovechando las propiedades de transmisión del sonido en el medio acuático. En los trabajos de levantamientos batimétricos el uso de sonda de precisión centimétrica requieren un buen compensador de oleaje que elimine los errores de altura de ola (error vertical) o los de la posición debido a los movimientos laterales del barco (cabeceo y balanceo). La sonda se acompaña de sistemas auxiliares como el GPS o el sensor de movimiento, para afinar y corregir la medición. Existen múltiples equipos basados en esta tecnología como la sonda monohaz, la multihaz o el sónar de barrido lateral, descritos en detalle más adelante.
- ✓ Batimetría fotogramétrica: limitados a aguas muy poco profundas y claras, con los que se obtiene un error muy pequeño. Se determinan las coordenadas espaciales de varios puntos de interés mediante un mínimo de dos fotografías. Conocida la posición de las cámaras, se fotografían diferentes posiciones y se generan líneas rectas que interceptan las imágenes con los centros ópticos relativos. En la fotogrametría terrestre, el rayo se corrige debido a la atmósfera (corrección por refracción atmosférica).

En el caso de la fotogrametría batimétrica el rayo debe atravesar además de la atmósfera el medio acuático, por lo que la elección de los puntos de una triangulación aérea tienen que tener en cuenta los efectos de refracción y difracción, así como el oleaje, la salinidad del agua, la presencia de algas, etc.

- ✓ Batimetría por procedimientos fotográficos: consiste en estudiar la variación del espectro visible con fotografías en diversas condiciones desde aviones. Es posible sacar las variables temporales y realizar un promedio obteniendo las características estables del fondo, aunque se limita a aguas poco profundas también. También se conoce como fusión de imágenes temporales estáticas:



Imagen 3: Batimetría fotográfica (Fuente: <http://levantamientosbatimetricos.blogspot.com.es/>)

- ✓ Batimetría mediante láser: un sónar basado en un láser de neón permite determinar profundidades de entre 2 y 30 metros (en función de la turbidez), aunque su precisión ideal se limita a profundidades menores de los 3 metros. Se basa en la extinción de la luz en el agua según la ley de Lambert Beers. El LIDAR (Light Detection And Ranging) transmite pulsaciones de luz que se reflejan en el terreno y en otros objetos. Estas pulsaciones recibidas tras la emisión se convierten de fotones a impulsos eléctricos, y la distancia se calcula a partir del tiempo transcurrido entre la transmisión y la recepción.²

² http://www.aet.org.es/revistas/revista33/Numero33_1.pdf



Imagen 4: Batimetría láser (Fuente: <http://www.aet.org.es>)

- ✓ Batimetría mediante teledetección: con esta técnica se han determinan resultados bastante satisfactorios en mares poco profundos, mediante el uso de satélites como GEOSAT, LANDSAT MMS, SPOT o RADARSAT, que en órbita polar detectan la luz reflejada por la superficie del mar y el fondo marino. La influencia del fondo y de los sedimentos, entre otros, reducen la calidad del modelo empírico por lo que es más útil para detectar volúmenes de agua que para realizar batimetrías.³

El desarrollo de este proyecto se centra exclusivamente en las batimetrías realizadas mediante ondas acústicas, pues son las que se usan en prácticamente todos los vehículos submarinos. No obstante, el elegir una técnica u otra dependerá de la precisión deseada y del presupuesto disponible.

³ <http://www.aet.org.es/revistas/revista17/AET17-10.pdf>

2.3. La transmisión de información mediante ondas acústicas.

La transmisión de la información depende de su naturaleza y puede ser:

- ✓ Transmisión electromagnética: a través de ondas electromagnéticas se determina la localización y naturaleza de objetos o la superficie de impacto. Este soporte se usa en el medio atmosférico (aire), ya que en el agua estas ondas se atenúan muy rápidamente debido a que el agua se polariza (ya que es buena conductora eléctrica) y la energía se transforma en calor. Su velocidad en el medio marino es muy superior a las ondas acústicas, llegando aproximadamente a los $30 \cdot 10^7$ m/s debido a la menor compresión del líquido con respecto del aire. Un ejemplo de ello es la tecnología RADAR. Para implementarse en el medio acuático se tendría que aumentar mucho la potencia o disminuir la frecuencia, lo que obligaría a emplear antenas más grandes.
- ✓ Transmisión elástica: por ejemplo mediante el sonido (ondas acústicas), se determina la localización y naturaleza de objetos o la superficie de impacto. Es el soporte usado en el medio acuático ya que la atenuación de las ondas acústicas en este medio es muy baja y proporciona un mayor alcance, alcanzando velocidades de aproximadamente 1.500 m/s. Las ondas son comprimidas en la dirección de propagación (longitudinales) y no se polarizan. Un ejemplo de ello es la tecnología sónar.

La acústica es la rama de la física que estudia los fenómenos susceptibles de impresionar el oído humano, es decir el espectro audible (entre 20 Hz y 20 kHz) y las perturbaciones con frecuencias inferiores a 20 Hz que se denominan infrasonidos (u ondas subsónicas) así como las que tienen una frecuencia superior a los 20 KHz denominados ultrasonidos.

En una onda acústica la energía se transfiere de una partícula a otra, por tanto lo que se propaga no son las partículas si no la perturbación, generando de este modo vibraciones elásticas. Esta propagación de las ondas interacciona sobre el medio, que introduce atenuaciones en función de sus propiedades de absorción, difracción, refracción y difusión.

La intensidad de la onda acústica es la cantidad de energía por segundo que cruza un área de unidad:

$$I = \frac{p_e^2}{\rho c} \qquad P_e = \frac{P}{\sqrt{2}}$$

Donde, ρ es la densidad del agua, c es la velocidad del sonido en el agua, P_e es la presión acústica efectiva y P es el pico de la amplitud de la presión.

En el medio acuático el rango óptimo de funcionamiento de las ondas se encuentra entre los 15 y 200 kHz, y se escoge en función de la profundidad, la naturaleza del fondo (barro, arena, rocas u otros) y del equipo de medición. Normalmente a mayor profundidad menor tiene que ser la frecuencia de la onda, ya que la atenuación de este tipo de ondas es menor, se obtiene además menor precisión y mayor tiene que ser el transductor.

Las ondas, por tanto, viajan en forma de ondas de presión por el agua y permiten caracterizar la zona que se esté radiando. Conocida la velocidad de estas ondas (que dependen del emisor y del medio), se puede determinar la profundidad contando el tiempo que tardan en

regresar en forma de eco. Tanto la presión acústica como la intensidad normalmente se expresan en escala logarítmica en decibelios.

La efectividad de este sistema se puede ver reducida debida a una serie de condiciones que afectan a la calidad de la señal, como son el ruido, la atenuación o la reflectividad. El ruido en el océano proviene de diferentes fuentes como el oleaje, la meteorología, la actividad sísmica, el ruido térmico, los organismos vivientes o el paso de los buques entre otros.

El fondo del mar devuelve la suma de las contribuciones de energía de la interfase agua-fondo y del volumen de sedimentos (ya que una parte de la energía penetra en ellos), efecto que se mitiga aumentando la frecuencia. Así se puede determinar las características del fondo, ya que en función del material se obtienen unas velocidades (o tiempos de respuesta) u otras.

Como se describe más adelante, ni la velocidad de propagación del sonido en el mar ni el comportamiento de los rayos es uniforme, ya que entre cosas depende de la temperatura, de la salinidad, la presión hidrostática y las trayectorias que siguen los frentes de ondas.

Como consecuencia de la variación de la velocidad en el plano vertical, es posible estratificar la columna de agua en zonas en las cuales los rayos sonoros tendrán distinto comportamiento.

Las ondas sonoras radiadas hacia el fondo se curvan de vuelta a la superficie en forma de arcos sinusoidales debido a que a medida que aumenta la presión también lo hace la velocidad del sonido. Cerca de la superficie las ondas sonoras se pueden concentrar y reflejarse de vuelta al fondo, en las denominadas zonas de convergencia. La distancia y anchura de la zona de convergencia depende de la temperatura y salinidad del agua.

Si la fuente de sonido es profunda y se cumplen las condiciones adecuadas, la transmisión del sonido se realiza de forma similar a las zonas de convergencia superficial, aunque en este caso el sonido propagado en el canal de sonido profundo es mejor debido a que las pérdidas de propagación son muy pequeñas, aumentando el alcance de las ondas.

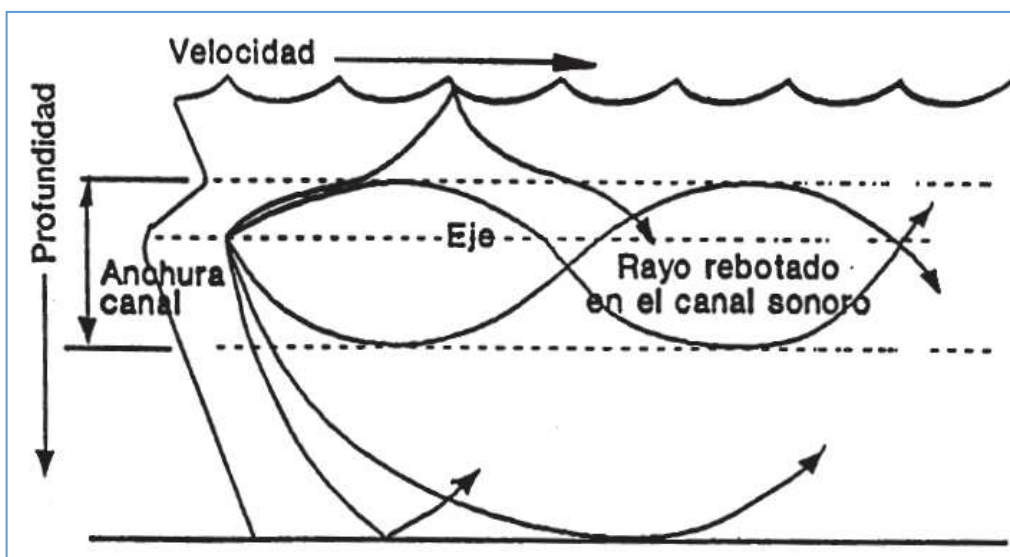


Imagen 5: Canal profundo (Fuente: Apuntes Acústica Submarina UPCT, Joaquín Fernández Perles)

Las interferencias pueden catalogarse como pérdidas en la transmisión, la reflexión y la dispersión (scattering):

- ✓ Las pérdidas en la transmisión (TL) se producen debido a las atenuaciones de la señal a medida que viaja a través del medio, reduciendo su intensidad (a mayor intensidad, mayor es la atenuación). La atenuación se produce por la absorción de la señal por parte del medio y como consecuencia de la expansión de la onda. En particular, esta absorción de la señal se produce cuando la energía acústica se transforma en calor a medida que la onda avanza en el medio (se correlaciona con una disminución de la amplitud y depende de la longitud de onda, es decir, a menor longitud de onda mayor absorción). Y la expansión (o divergencia) que provoca pérdidas al distribuirse la onda en un volumen creciente, resultando pérdidas de 6 dB cada vez que se dobla la distancia desde la fuente emisora hasta los primeros 1000 m aproximadamente si se propaga de forma esférica, a partir de ahí pasa a expandirse de forma cilíndrica perdiendo 3 dB cada vez que se dobla la distancia (en aguas someras disminuye la intensidad a razón de la cuarta potencia de la distancia recorrida por el haz).

$$TL = 20 \log_{10} r + ar$$

Donde r es la distancia al transductor y a el coeficiente de absorción

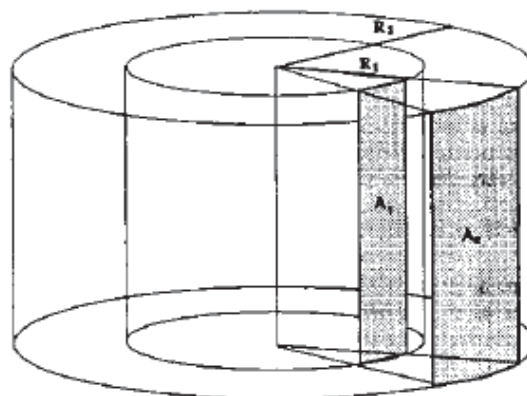
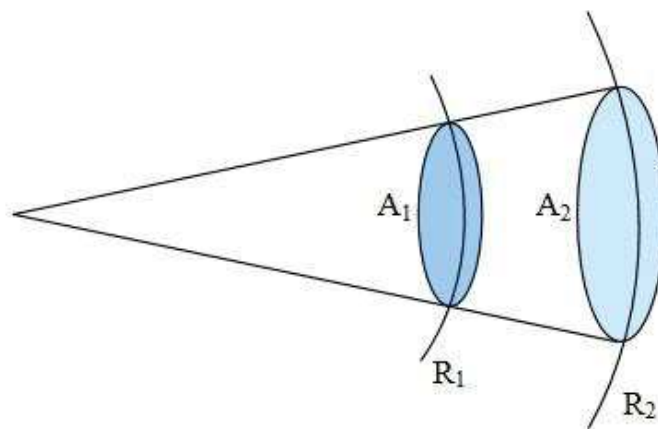


Imagen 6. Pérdidas por expansión cilíndrica y esférica de la onda debidas a la geometría del haz
(Fuente:IHO).

La absorción aumenta con la frecuencia y por debajo de los 10 kHz puede ser despreciada. Por otro lado, a mayor profundidad menor absorción, del orden de un 2% menos cada 300 metros. El conocimiento del ángulo del haz y del perfil de la velocidad del sonido en la columna de agua permite obtener la fuerza dispersa de retorno corregida por la absorción y la propagación esférica.

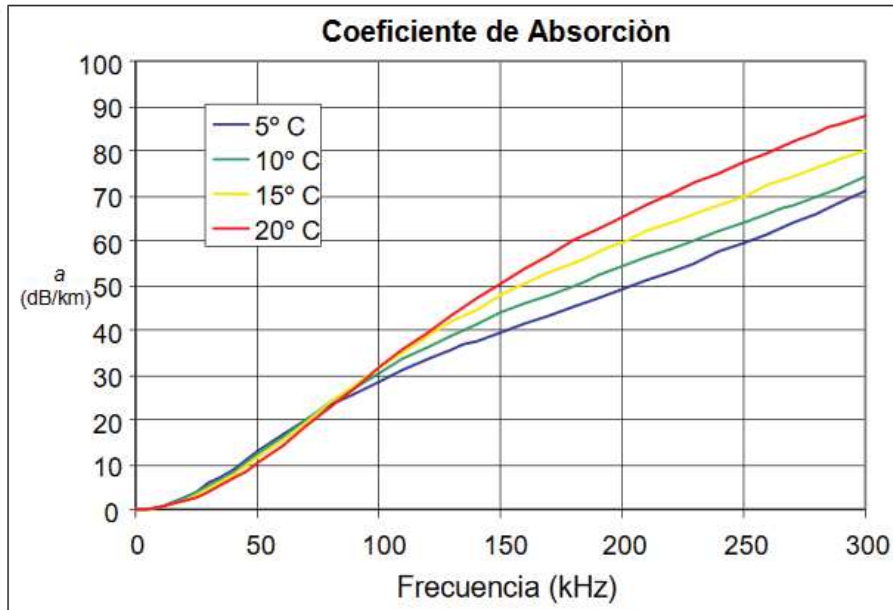


Imagen 7. Coeficiente de absorción en función de la frecuencia y la temperatura. (Fuente: IHO).

La absorción en agua de mar puede llegar a ser 30 veces mayor que en agua destilada:

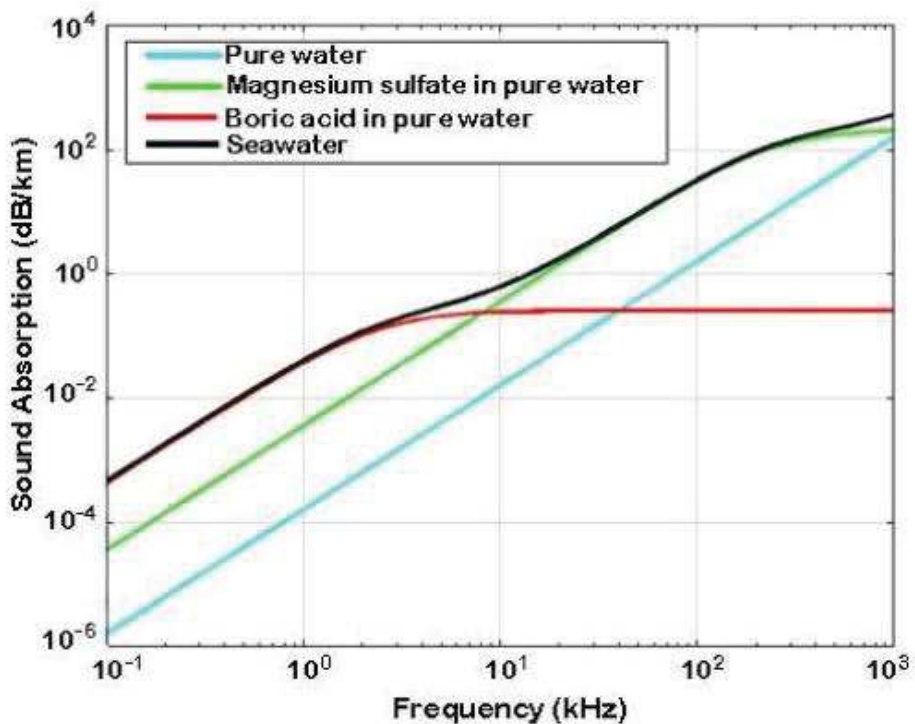


Imagen 8. Pérdidas por absorción en función de la frecuencia en distintos tipos de agua (Fuente: SUBMON)

- ✓ La reflexión y la refracción definen el comportamiento que siguen las ondas cuando se encuentran con una condición de frontera, como un cambio de medio (por ejemplo en superficie agua – aire o en el fondo agua – sólido) o un cambio de densidad (por ejemplo con la termoclina⁴). El comportamiento de las ondas, sigue la Ley de Snell y depende de los índices de refracción y el ángulo de incidencia:

$$\text{Ley de Snell } \frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} ; \text{ Índice de refracción } n = \frac{c}{v}$$

Donde n es el índice de refracción, ϑ es el ángulo del haz
 c es la velocidad del haz en el aire (m/s) y v es la velocidad del haz en el medio (m/s)

Tabla 1: Ley de Snell e Índice de refracción

La reflexión depende de la rugosidad de la superficie de impacto (estado del mar, composición del fondo, por ejemplo) así como de la frecuencia de la señal (a mayor frecuencia mayores pérdidas). Las rocas suelen tener una retrodispersión entre -10dB y -14 dB, mientras que las arenas suelen ser del orden de -15dB a -32dB. Los fondos fangosos son los que tienen valores más bajos de energía entre -33dB y -39dB.

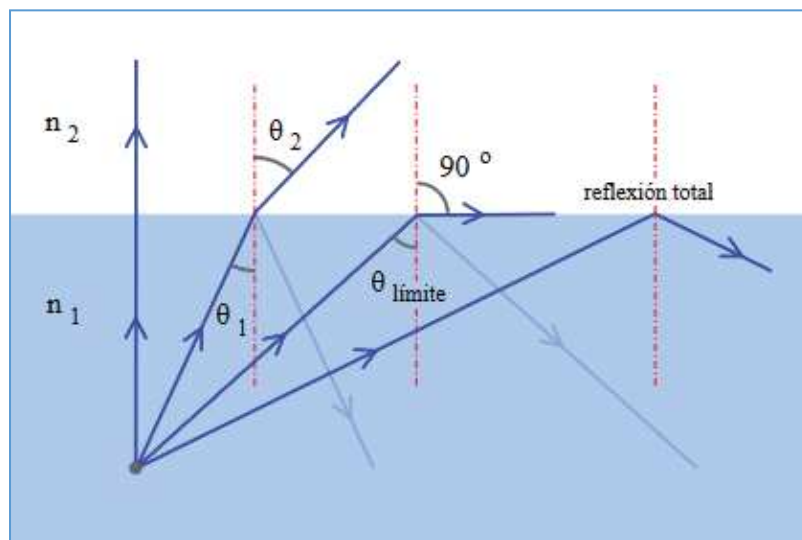


Imagen 9: Refracción y reflexión (Fuente: Jfmeleiro en www.wikipedia.org)

La refracción es el cambio de dirección que experimenta una onda cuando se encuentra con medios de distinta velocidad de propagación. De forma general, los rayos se curvan hacia las zonas de menor velocidad.

- ✓ La dispersión o *scattering* es la separación de las ondas de distinta frecuencia al atravesar o golpear un elemento (burbujas de aire, bancos de peces, plancton y masas de agua grandes de diferentes temperaturas). Todos los medios materiales son más o menos

⁴ Cambio brusco de temperatura con la profundidad

dispersivos y la dispersión afecta a todas las ondas, de tal forma que la onda se dispersa en todas las direcciones y solamente una parte del haz incidente regresa al receptor. El tamaño de los cuerpos y la frecuencia determinan el nivel de dispersión, así por ejemplo, cuerpos más pequeños afecta a las altas frecuencias y no a las bajas, o una burbuja causa mayor dispersión cuando su circunferencia es 1/10 de la longitud de onda de la frecuencia usada.

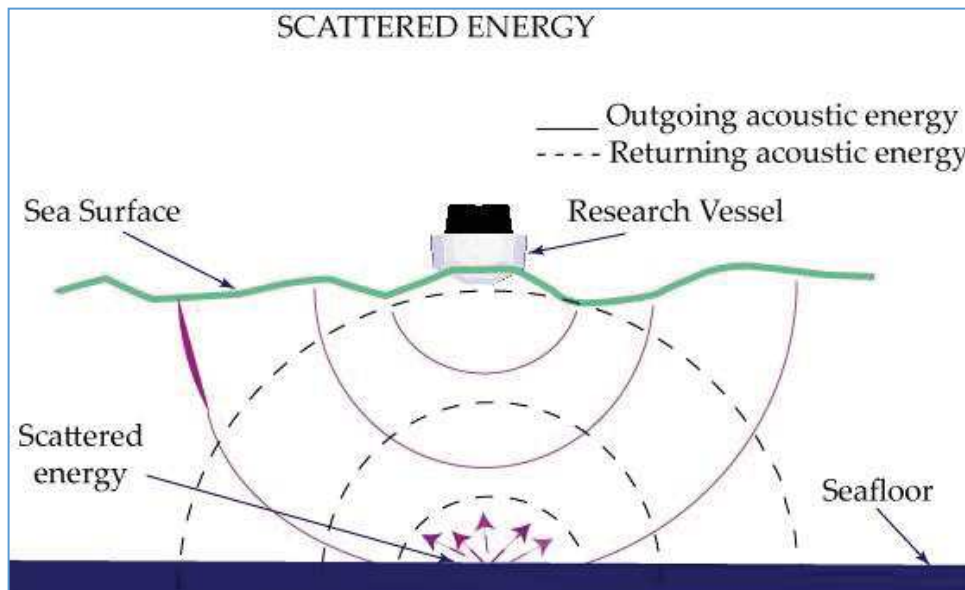


Imagen 10: Scattering de la onda sonora (Fuente: <http://woodshole.er.usgs.gov>)

Con el fin de minimizar estas pérdidas, existen correcciones de la señal en función de su recorrido y el área sondeada. Las correcciones del ángulo del haz, el recorrido del rayo y la inclinación del fondo marino local se combinan con la incidencia del ángulo de la señal que llega al fondo marino. Típicamente estos valores suelen ser de -15 dB para los haces de incidencia normal y -30 dB para los oblicuos (valores que pueden variar en +- 10 dB según el tipo de fondo).

En la imagen siguiente se relaciona la dispersión de la señal (en dB) en función del ángulo de incidencia y el tipo de fondo marino que se esté sondeando:

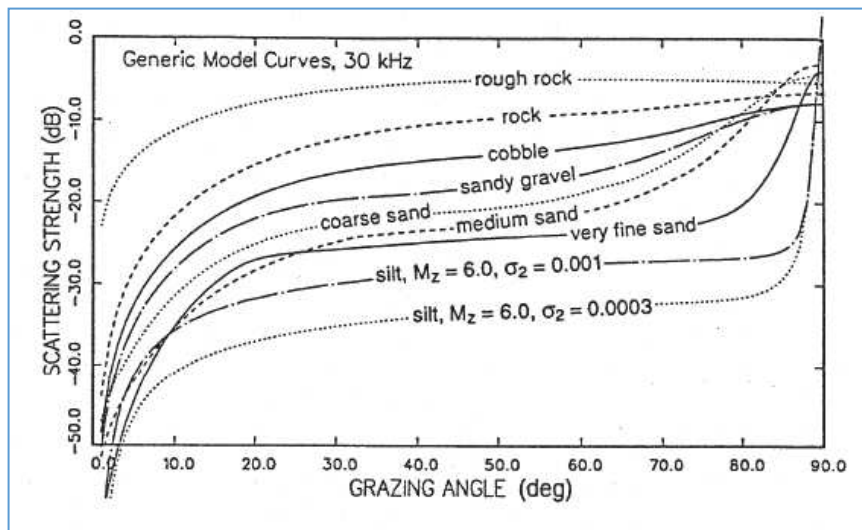


Imagen 11: Pérdidas en la dispersión (Fuente: High-Frequency Ocean Environmental Acoustic Models Handbook)

Estas correcciones dependen del rango, el tiempo, la fuente emisora y la dirección del haz. En la imagen siguiente se adjunta como en el caso anterior un ejemplo de las pérdidas (en dB) debidas a la reflexión en función del ángulo de incidencia y el tipo de fondo marino:

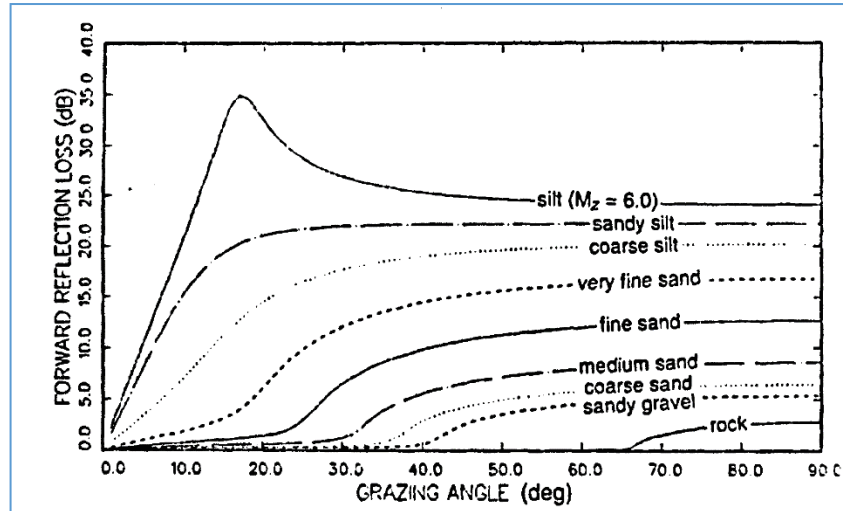


Imagen 12: Pérdidas en la reflexión (Fuente: High-Frequency Ocean Environmental Acoustic Models Handbook)

2.3.1. El sónar

Como ya se ha citado en apartados anteriores, el mecanismo de transmisión en el agua óptimo es mediante ondas acústicas y el sónar (SOund NAVigation and Ranging) se basa en este principio.

En cuanto a los sónares, existen dos tipos:

- ✓ El sónar pasivo (hidrófono): este sónar actúa como un hidrófono, escuchando el sonido que proviene de los objetos emisores ubicados en el medio ubicando su posición. Los sistemas de sónar pasivo pueden contar con una gran base de datos sónica informatizada que permite identificar el emisor del ruido (buques, dispositivos, fauna, etc.). Se ve afectado por el ruido generado por el propio buque al navegar, por lo que es más usual encontrarlo en submarinos y en redes submarinas de hidrófonos ubicadas en el fondo. Con un sistema combinado de equipos pasivos, es posible determinar de forma aproximada la distancia emisor del sonido, teniendo en cuenta los ángulos relativos entre los equipos y el emisor y las frecuencias que recibe cada uno de los equipos.
- ✓ El sónar activo: se emite un haz de ondas acústicas que cuando choca con un objeto regresa en forma de eco que es captado por el receptor, midiendo el tiempo que tarda la señal en volver. Conocida la velocidad del sonido ya sea mediante fórmulas empíricas, mediciones en el terreno o bibliografía, se puede determinar la distancia al objeto. El uso de una matriz reduce la respuesta espacial de forma que para lograr una amplia cobertura se emplean sistemas multihaz. Especialmente en transmisores de una sola frecuencia, se puede medir la velocidad del blanco mediante el efecto Doppler. Por otra parte, en el sónar activo la retrodispersión acústica o backscatter consiste en el análisis de la energía (o intensidad) sonora que es devuelta al receptor, comparándola con la energía emitida.

El efecto Doppler es el cambio de frecuencia aparente de una onda producido por el movimiento relativo de la fuente respecto de su observador. En el caso de ondas sonoras, es comúnmente conocido como el cambio del sonido emitido por una fuente aproximándose al observador que es más agudo que cuando la fuente se aleja.

Generalizando, este efecto se produce debido a que la longitud de onda es afectada por el incremento o el decremento de la distancia al observador, la propia frecuencia recibida también se ve afectada, suponiendo que la frecuencia emitida y la velocidad relativa entre ambos objetos son constantes. En el caso de que la frecuencia de emisión o las velocidades no sean constantes, el cálculo se basa en los mismos principios pero puede requerirse un postprocesado más complejo.

Normalmente, la transmisión del sonido se realiza de forma esférica y por tanto en todas las direcciones (omnidireccional). La emisión y recepción acústica se realizan normalmente con el mismo aparato, formado por el transmisor (transductor activo) y el receptor (transductor pasivo). Durante la emisión el transductor convierte los pulsos eléctricos en ondas de presión (mecánicas), mientras que el receptor transforma la onda acústica en una señal eléctrica.

El sónar está formado por:

- ✓ El generador de señales, que descarga pulsos eléctricos sobre el transmisor y éste los convierte en señales ultrasónicas. El transmisor suele ser una cerámica piezoeléctrica. La frecuencia de oscilación depende del input (voltaje) y de la cerámica.

- ✓ El receptor (hidrófono), se encarga de captar la onda rebotada del fondo y enviarla al amplificador, que la envía al apartado registrador.
- ✓ Finalmente, el aparato registrador se encarga de procesar la onda recibida.

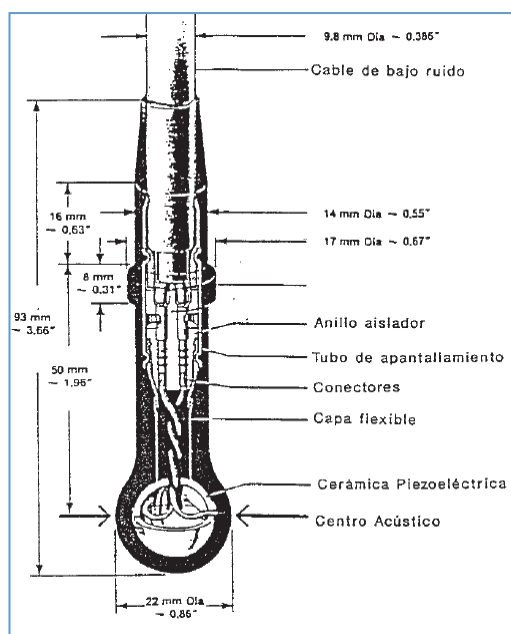


Imagen 13: Transductor (Fuente: Apuntes Acústica Submarina UPCT, Joaquín Fernández Perles)

Cuando el emisor y el receptor están en el mismo espacio, se habla de funcionamiento monoestático. Si están separados, se habla de funcionamiento biestático, mientras que si se usan más emisores o receptores espacialmente separados, se trata de multiestático.

El sónar de barrido lateral (Side Scan Sonar o SSS) es un sónar del tipo acústico que realiza barridos con un perfil cónico o en abanico hacia el fondo marino, en un ángulo perpendicular a la trayectoria de avance del dispositivo. Este tipo de dispositivos permiten de forma detallada el mapeado y la caracterización del fondo, la detección de objetos u obstáculos para la navegación, la inspección de estructuras sumergidas, el seguimiento de obras marítimas, etc. La mayoría de las sondas laterales van montadas en dispositivos sumergibles que son arrastrados por un barco, evitando en gran medida la problemática asociada al movimiento del buque. Estos dispositivos sumergibles se denominan *deep tow*.

La información obtenida se transforma en imágenes georreferenciadas o georeferenciables con las que se representa un mosaico del fondo marino, en el que se pueden diferenciar los diversos elementos que lo configuran. En arqueología subacuática esta técnica permite detectar la presencia de objetos en el lecho marino.

El eco de las señales acústicas emitidas al rebotar contra los objetos del fondo crea una imagen de las mismas que queda reflejada en un color diferente del resto (y que depende del software de procesado), en función de la reflectividad del fondo. La imagen final es bidimensional y representa el fondo a lo largo de la trayectoria recorrida.

La intensidad de las ondas suele estar entre los 100 y los 500 kHz. Como se ha comentado anteriormente, cuanto mayor sea la intensidad mayor precisión dispondrá, aunque será a costa de un menor alcance.

En la imagen siguiente se presenta un ejemplo, en el que la zona negra central señala la trayectoria del SSS:

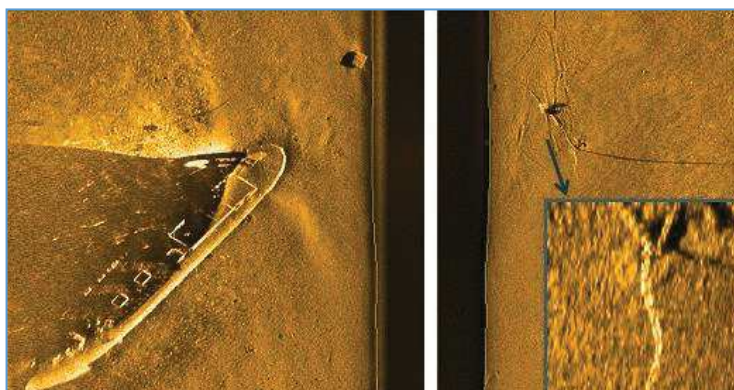
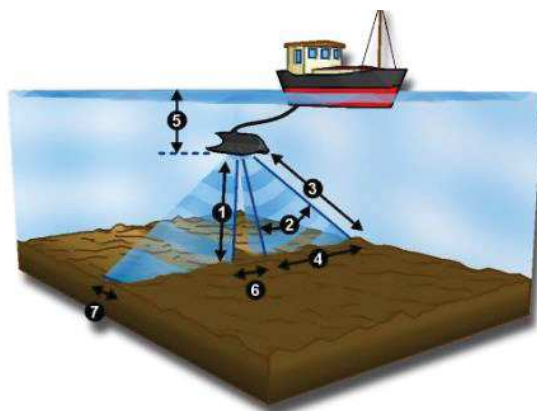


Imagen 14: Ejemplo de imagen tomada desde un SSS (Fuente: <http://www.iver-auv.com/>).

La emisión de este eco caracteriza las irregularidades del terreno permitiendo crear una batimetría de gran precisión con escalas de hasta 1:10.000 1:5.000, obteniendo una imagen equivalente a una fotografía aérea. Con este tipo de sondas aparecen sombras detrás de determinadas formaciones, lo que requiere un análisis de los datos para determinar si es necesaria otra pasada o ya si existen suficientes datos para extrapolar las mediciones próximas. Sin embargo, estas sombras pueden ser útiles para la localizar pecios o minas en el fondo.

Una imagen ilustrativa de alguno de los parámetros relevantes en un sonar de barrido lateral se muestra a continuación:



1. Profundidad desde el sonar
2. Ángulo vertical del haz
3. Rango configurado en el software (máximo rango acústico)
4. Anchura del lado sobre el fondo marino
5. Profundidad del sonar de barrido lateral
6. Separación entre el lado de babor y estribor
7. Anchura horizontal del haz

Imagen 15. Parámetros tipos de un SSS. (Fuente: www.GeoSoluciones.cl)

Como se viene intuyendo, este tipo de dispositivos se usan en la detección de accidentes geográficos y en la determinación del tipo de fondo. Un accidente es cualquier objeto ubicado en el fondo que sea diferente de los elementos que lo rodean, desde una roca aislada en una llanura

de arena a los restos de naufragio. La OHI determina los requisitos para caracterizar el tamaño mínimo buscado en cada levantamiento. La detección de accidentes permite localizar e identificar relieves de interés para la navegación.

Existen tres niveles de clasificación del fondo marino en función del requisito de conocimiento requerido para el uso al que se destinan:

- ✓ El objetivo del cartografiado náutico es obtener la información necesaria para los propósitos de la navegación. Es el nivel que menor precisión requiere, centrándose en la determinación de la composición del fondo marino para determinar a los navegantes qué fondeo realizar (dónde anclar, longitud del cable...).
- ✓ El objetivo del cartografiado comercial o ambiental es caracterizar el fondo más detalladamente que en el caso anterior, para proceder a la extracción de recursos de zonas costeras (por ejemplo plataformas petrolíferas, explotación minera) o la creación de infraestructuras (faros, puertos, espigones...)
- ✓ El objetivo del cartografiado militar es obtener con precisión los datos del fondo marino y sus atributos, para la realización de operaciones anfibas, submarinas y antisubmarinas; minado o la utilización del sónar.

La naturaleza del fondo se obtiene mediante muestras en profundidades inferiores a los 200 m para ayudar a interpretar el registro del SSS, verificar los modelos de fondo marino y determinar los anclajes posibles y los bancos, bajos y montes marinos. La posición de la extracción deberá ser precisa para que sea representativa de la zona objetivo. El tamaño de la muestra se determinará a simple vista o con herramientas estándar, como los discos de comparación. Los sedimentos se califican de acuerdo al tamaño del grano de la tabla siguiente:

Descripción General	Nombre	Límites (mm)	Comentarios	
Lodo	M	Arcilla	< 0,002	Cuando se secan a mano, no se quitan fácilmente
		Fango	0,002 – 0,063	Cuando se secan a mano, se quitan fácilmente
Arena	fS	Arena muy fina	0,063 – 0,125	Utilizar disco comparador
		Arena fina	0,125 – 0,250	
	mS	Arena media	0,250 – 0,50	
	cS	Arena áspera	0,5 – 1,0	
		muy áspera	1,0 – 2,0	
Grava	smG	Gránulos	2,0 – 4,0	De gruesos como un lápiz y del tamaño de un guisante
	P	Piedras de grava	4,0 – 64,0	Guisante pequeño al tamaño de un puño cerrado
	IG	Piedra de canto rodado	64,0 – 256,0	De un puño cerrado a una cabeza humana
Roca	R	Piedra de peñón	> 256,0	Más grandes que una cabeza humana
		Rocas		

Tabla 2: Quality of the seabed (Fuente: HQAIs Hydrographic Quality Assurance Instructions for Admiralty Surveys)

La correlación entre las muestras y la textura derivada del registro del sónar es básica para interpretar correctamente la información.

2.3.2. Las sondas acústicas

Las sondas acústicas utilizadas para realizar la batimetría se basan en el principio del sónar descrito en el apartado anterior. La distancia al fondo se determina mediante ondas acústicas, que viajan en forma de ondas de presión por el agua y que permiten caracterizar la zona que se esté radiando. Conocida la velocidad de estas ondas (que dependen del emisor y del medio), se puede determinar la profundidad contando el tiempo que tardan en regresar en forma de eco. Tanto la presión acústica como la intensidad normalmente se expresan en escala logarítmica (en decibelios).

Los métodos más habituales para medir este tiempo se basan en determinar la amplitud máxima para los haces cercanos a la vertical midiendo el tiempo en función del ángulo de recepción y la fase para los haces más oblicuos midiendo el tiempo entre la transmisión y la recepción.

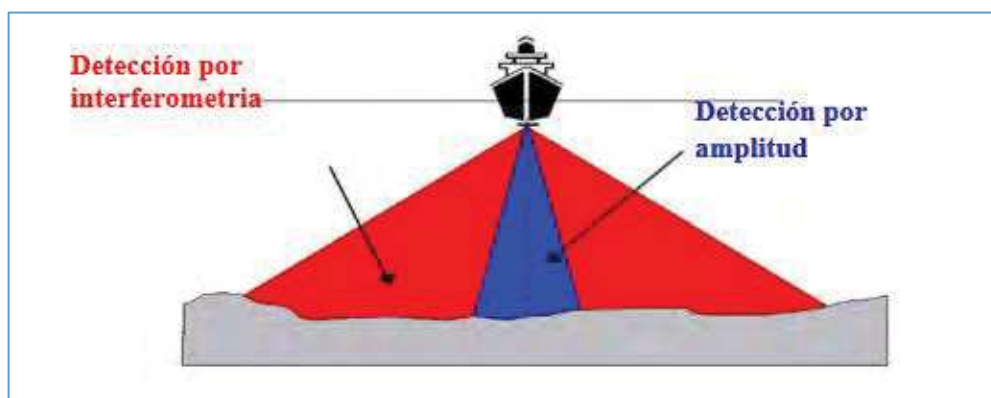


Imagen 16. Detección de amplitud y de fase. (Fuente: Geología y geofísica marina y terrestre del ecuador)

En comparación con otros sistemas de medición, la resolución de los diferentes tipos de sondas es la siguiente:

Medio	Rango	Resolución (m)
Satélite	Global	2.500
Sonda multihaz	Regional	100
Sónar barrido lateral	Local	10
Medidor tipo deep tow	Local	1
Vehículo tipo ROV	Estación	0,001

Tabla 3: Resolución según el equipo de medición (Fuente: <https://www.lpi.tel.uva.es>)

Como se ha comentado en apartados anteriores, el alcance (la atenuación del sonido crece muy rápido con la profundidad) y la profundidad de la onda depende de la frecuencia, ya que a mayor profundidad menor debe ser la frecuencia emitida para reducir el amortiguamiento de la misma, si bien una mayor frecuencia también permitirá obtener mucho más información por segundo. De igual forma, la frecuencia también influye en el tamaño de las antenas, aumentando sus dimensiones para emitir a bajas frecuencias.

Como referencia, las frecuencias utilizadas en sondas acústicas suele estar dentro de los rangos siguientes:

Zona	Profundidad (m)	Frecuencia (kHz)	Objeto
Profunda	100 – 12.000	10 – 15	Talud, dorsales y fondos abisales
Fondo mediano	30 – 3.000	30 – 50	Plataforma, talud
Fondo poco profundo	5 – 500	80 – 120	Plataforma continental
Aguas someras	0 – 100	200 – 400	Zonas litorales

Tabla 4: Frecuencia en función de la profundidad (Fuente: <https://www.lpi.tel.uva.es>)

En cualquier tipo de frecuencia, la intensidad de la señal se degrada con la distancia, por lo que siempre existirá una mayor degradación en los extremos. Este efecto debe tenerse en cuenta cuando se empleen los datos recibidos para establecer la composición del fondo en estas regiones, es decir cuando se esté realizando un análisis de la reflectividad.

El fondo del mar devuelve la suma de las contribuciones de energía de la interfase agua-fondo y del volumen de sedimentos (una parte de la energía penetra en ellos), efecto que se mitiga aumentando la frecuencia. Así se puede determinar las características del fondo, ya que en función del material se obtienen unas velocidades (o tiempos de respuesta) u otros.

Dentro de las sondas acústicas dedicadas a la batimetría, en función del número de haces se pueden encontrar los siguientes tipos de sonda:

- ✓ Sondas monohaz: emiten en una sola frecuencia por encima del sonido audible para el ser humano (ultrasonidos) y un único haz, cubriendo muy poco terreno, lo que implica que para exploración de grandes extensiones son muy poco útiles. Es por ello que ya no se emplean para cartografiar, debido a su baja precisión y el coste asociado a su uso. Sin embargo, debido a su facilidad de manejo y fiabilidad en alcances de hasta 1.000 metros, aún se emplean en la localización de bancos de peces. Una variante de este tipo de sondas son las sondas bifrecuencia, que pueden emitir en alta o en baja frecuencia (24 – 200 kHz) o ambas, cuyo uso se reserva para grandes profundidades o según el tipo de fondo, aunque la densidad de la información obtenida sea menor.
- ✓ Sondas multihaz: están formadas por un conjunto de haces que emiten en varias direcciones y frecuencias determinadas, lo que permite corregir los errores de medición interpolando los resultados obtenidos. Estas sondas son más precisas y rápidas y cubren un área mayor que las anteriores, reduciendo el coste del cartografiado. Con estas sondas, a mayor profundidad la información es menos densa a no ser que se realicen múltiples pasadas; estrechando el haz se mejora la resolución del fondo y se incrementa esta densidad. Normalmente tienen separados los haces de transmisión y recepción (proyectores e hidrófonos, orientados de manera longitudinal y transversal respectivamente). Como referencia, se puede tomar que se consiguen amplitudes de barrido 3,5 veces mayores que la profundidad alcanzada.

A continuación se muestra un ejemplo de haces en un sistema de sonda multihaz:

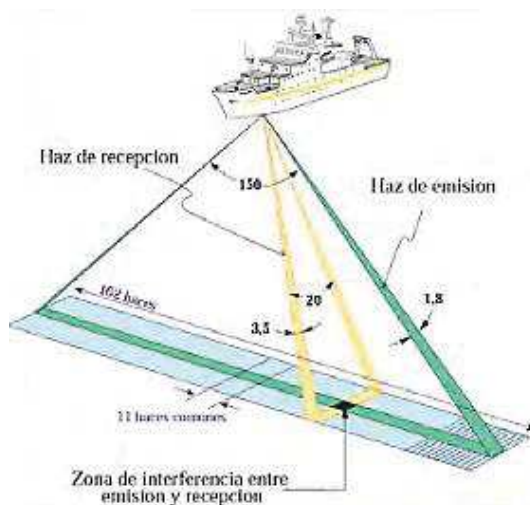


Imagen 17. Geometría del sistema de haces cruzados (Fuente: Ifremer)

El haz transmisor es ancho al través y estrecho a lo largo y al contrario los haces de recepción. Las intersecciones de estos haces en el fondo son las huellas para las que se obtienen las profundidades.

A bordo del buque o vehículo, un procesador se encarga de analizar los datos adquiridos en tiempo real y generar un mosaico, que después del postprocesado genera el modelo batimétrico digital en tres dimensiones y el curvado de las isóbatas, como se describe en Imagen 18. Estos equipos tienen la capacidad de corregir los errores de medición debidos al movimiento del buque, ajustando la posición del sistema mediante el uso del GPS diferencial, que aporta mayor precisión a la hora de ubicar la medición en la carta náutica.

Se agrupan aquellas áreas del fondo marino con características similares de intensidad acústica reflejada, asignándoles un valor numérico. Posteriormente con muestras del fondo mediante buzos, equipo especializado o material fotográfico se identifican y confirman estos grupos para diferenciar en la carta los distintos substratos que se encuentran en la zona sondada.

Las sondas multihaz están formadas por un número elevado de transductores que barren el fondo transversalmente al sentido de avance. Estos haces están orientados en diferentes direcciones en forma de abanico, lo que aumentan la zona de barrido y la corrección de errores mediante la interpolación de los resultados obtenidos.

Para el sondeo de aguas someras se utilizan frecuencias de trabajo más elevadas, longitudes de pulsos más cortos y un mayor número de repeticiones en las medidas en el mismo espacio de tiempo, lo que representa una mayor resolución (esto es de especial interés en puertos y canales de navegación). En el caso de aguas profundas la frecuencia debe reducirse para alcanzar el fondo, por lo que la resolución disminuye y se requieren más pasadas para obtener la misma cantidad de información; en cualquier caso, siempre será más efectivo que el uso de una sonda monohaz.

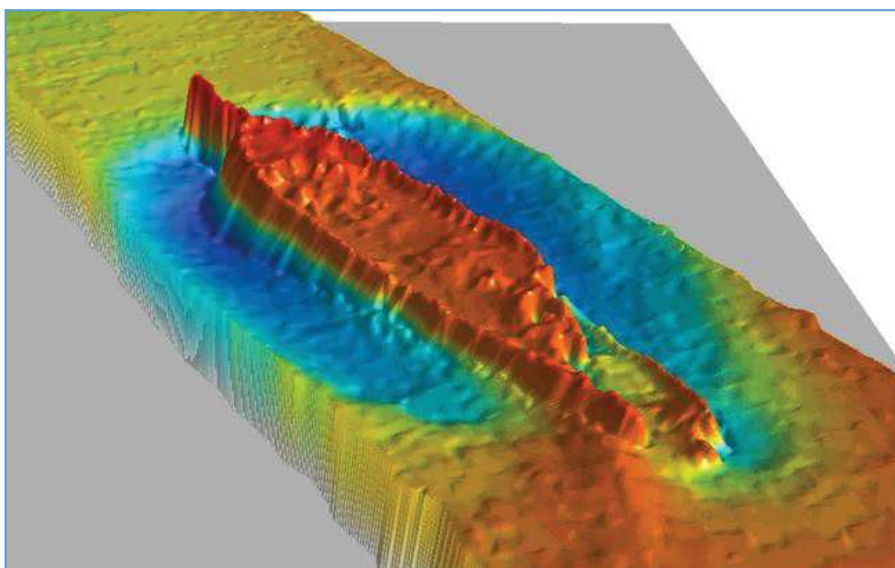


Imagen 18: Descripción del funcionamiento de una sonda multihaz (Fuente: <http://www.noaa.gov/>)

Deben intentar reducirse al máximo las incertidumbres a la hora de realizar un levantamiento, ya que éstas son función no solamente del sistema de barrido sino también de la localización, de los desplazamientos y de las exactitudes de los sensores auxiliares.

Algunas de estas incertidumbres son: errores del sistema de posicionamiento (desalineamiento del transductor), errores de alcance y de haz, error asociado al modelo de la trayectoria del rayo y su ángulo (que depende fundamentalmente de un buen perfil de la velocidad del sonido), error en el rumbo del vehículo, errores de los sensores de movimiento del vehículo, errores de sincronización de tiempo/latencia, mediciones incorrectas de marea, pendiente del fondo del mar, etc.

Uno de los objetivos principales de este proyecto es instalar en el vehículo objeto de estudio una sonda multihaz con capacidad también de sónar de barrido lateral, por lo que en el capítulo 5 se procederá a describir con más detalle las posibilidades que ofrecen ambos tipos de equipos y las ventajas de disponer de ellos a bordo.

2.4. Los sistemas anexos a la sonda

2.4.1. Sistemas de posicionamiento

Anexos al funcionamiento de la sonda, es necesario el uso de sistemas de posicionamiento para referenciar los datos medidos con su posición real en la carta. Estos sistemas de posicionamiento son fundamentales para correlacionar estas mediciones. Se debe ofrecer como mínimo una confianza del 95% de la incertidumbre de la posición horizontal y vertical registrada.

La determinación con exactitud de la posición se basa en la ciencia geodésica, cuyo marco de referencia es el Sistema de Información Geográfico (GIS). La determinación de la posición en la superficie terrestre requiere establecer coordenadas en el sistema de referencia geodésica o Datum.

En un sistema de referencia geodésico, el Datum es el punto donde el geoide (superficie prolongada de los mares en reposo por debajo de los continentes) y el elipsoide (el sistema de referencia) son tangentes. En este caso el Datum de referencia mundial es el WGS-84.

La posición se determina generalmente mediante el uso del Sistema NAVSTAR GPS (NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System). El sistema de localización GPS se basa en el posicionamiento del dispositivo mediante la recepción de señales de radio emitidas desde una nube de satélites situados en órbita alrededor de la Tierra. Esta red está formada por 24 satélites ubicados a 20.200 km de altura, lo que garantiza la visibilidad de al menos 3 de ellos en cualquier momento.

Estos satélites se identifican de forma única con el receptor e informan de la hora del reloj de a bordo de cada uno de ellos, sincronizándose para calcular el tiempo que tardan en llegar las señales al equipo y así medir la distancia al satélite mediante el método de trilateración inversa. Una vez conocidas las distancias, se determina posición propia relativa respecto de los satélites, y disponiendo de la posición de cada uno de ellos se obtiene la posición absoluta o coordenadas reales del punto de medición posición 3D exacta (latitud, longitud y altitud).

La precisión oficial de los equipos GPS es de aproximadamente 15 m el 95 % del tiempo, aunque se puede llegar hasta los 2,5 – 3 metros. Con los sistemas WAAS / EGNOS / MSAS activado, la precisión alcanza de 1 a 2 metros.

Si se activa el sistema DGPS llamado SBAS (WAAS-EGNOS-MSAS), la precisión mejora siendo inferior a un metro en el 97 % de los casos. El DGPS o GPS diferencial es un sistema que proporciona a los receptores GPS correcciones de los datos recibidos de los satélites para aumentar la precisión en la posición calculada. La corrección consiste en tomar como referencia un receptor GPS fijo en tierra (del que se conoce exactamente su posición), que al recibir los datos de los satélites calcula el error producido entre la posición real y el valor calculado por el sistema.

Para que las correcciones DGPS sean válidas, el receptor tiene que estar relativamente cerca de alguna estación DGPS, generalmente a menos de 1.000 km. La precisión obtenida con los receptores diferenciales es de pocos centímetros.

La problemática asociada al uso del GPS en sistemas batimétricos instalados por debajo de la superficie está relacionada con las frecuencias de las ondas del GPS. La frecuencia de la red

GPS es de 1,5 GHz lo que impide que las ondas se propaguen bajo el agua, por lo que se presentan dos opciones:

- ✓ En el caso de los vehículos autónomos submarinos, el vehículo debe establecer su posición cuando se encuentre en la superficie, contando con un sistema de navegación submarina lo suficientemente fiable como para que los datos que esté recogiendo sean útiles una vez se contrasten fuera del agua
- ✓ En otros equipos y sondas, se debe contar con un sistema de posicionamiento relativo respecto del barco (que cuenta con su receptor GPS) o una estación fija, por ejemplo boyas con localización GPS conectadas formando una red de comunicaciones submarinas, obteniendo múltiples referencias y ubicándose mediante triangulación y geometría. Éste último ejemplo se denomina GIB (GPS Intelligent Buoy).

Las señales GPS se ven altamente afectadas por la humedad y las multi-rutas. Además las señales de los satélites pueden ser alteradas por razones de seguridad nacional por el gobierno estadounidense, por lo que el uso de sistemas diferenciales elimina la mayoría de estos errores

2.4.2. Sistemas de cálculo de la velocidad del sonido en el agua

La velocidad del sonido en el agua es función de la salinidad, temperatura y profundidad.

Mackenzie presenta la siguiente fórmula empírica donde la velocidad del sonido c (en m/s) es aproximadamente:

$$c = 1.448,96 + 4,591 \cdot T - 5,304 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 + 2,374 \cdot 10^{-4,2} \cdot T^3 + 1,340 \cdot (S - 35) + 1,630 \cdot 10^{-2} \cdot D + 1,675 \cdot 10^{-7} \cdot D^2 - 1,025 \cdot 10^{-2} \cdot T \cdot (S - 35) - 7,139 \cdot 10^{-13} \cdot T \cdot D^3$$

Donde T es la temperatura (en °C, para valores entre 2 y 30 °C), S es la salinidad (en partes por mil, para valores entre 25 y 40), D es la profundidad (en m, para valores entre 0 y 8.000 m), sin tener en cuenta efectos como la termoclina o la dispersión del sonido.

Ecuación 1: Velocidad del sonido en el agua según Mackenzie (Fuente: <https://es.wikipedia.org/>)

La velocidad del sonido varía con la densidad y la elasticidad del medio, o lo que es lo mismo, la salinidad, la temperatura, y la presión:

- ✓ La temperatura depende de la ubicación geográfica, la estación del año y la hora del día (es decir de la cantidad de radiación solar que reciba), así como de la profundidad (donde también intervienen otros factores como las corrientes y la termoclina). La medición de la profundidad es sensible a las variaciones del perfil de la velocidad del sonido, por ejemplo variar 1°C puede traducirse en una diferencia de 4,5 m/s en la velocidad del sonido. Esto requiere para batimetrías de precisión una constante medición de perfiles de velocidad.
- ✓ La salinidad es la medición de la cantidad de elementos disueltos en el agua, normalmente definida en gramos por litro (g/L). El promedio de salinidad del agua de mar es de alrededor del 35 g/L, por lo que por cada g/L que se aleje de este promedio la velocidad del sonido cambia 1,3 m/s.

- ✓ La presión es directamente proporcional a la profundidad y afecta principalmente en aguas profundas. La velocidad del sonido cambia 1,6 m/s por cada 10 atmósferas (una atmósfera equivale aproximadamente a 10 metros de profundidad).

Para medir estos parámetros se puede utilizar un equipo CTD (conductividad, temperatura, y profundidad), calculando la velocidad del sonido en el agua mediante ecuaciones empíricas. La salinidad es directamente proporcional a la conductividad y se puede obtener a partir de la cantidad del ion cloruro tal que $S = 1,80655 \cdot Cl$.

Un instrumento para medir directamente la velocidad del sonido a lo largo de la columna de agua es el perfilador de la velocidad. Este instrumento dispone de un sensor de presión para medir la profundidad y un conjunto transductor-reflector, que mide el tiempo que tarda la onda emitida por el primero a llegar al segundo.

La conclusión de estas propiedades es que la velocidad del sonido está gobernada por la variación de temperatura entre la superficie y la zona inferior de la termoclina, y a partir de ahí es la presión quien gobierna su comportamiento. Como se puede apreciar en la imagen siguiente, el factor que más influye en la velocidad es la profundidad (por la densidad):

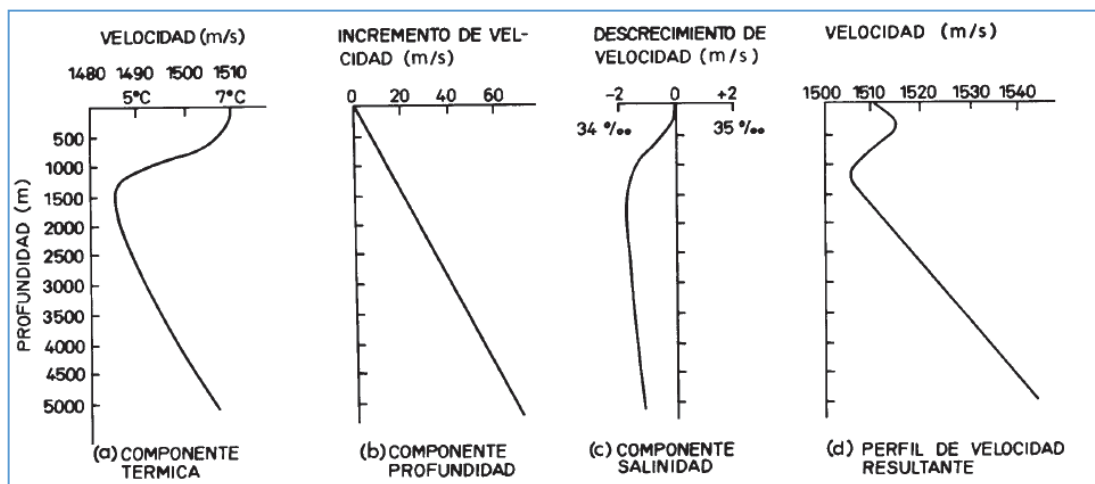


Imagen 19: Perfil de velocidad (Fuente: Apuntes Acústica Submarina UPCT, Joaquín Fernández Perles)

La variación aproximada de la velocidad del sonido con cada uno de estos parámetros es la siguiente:

Parámetro	Incremento	Velocidad del sonido
Temperatura	1°C	4.5 m/s
Salinidad	1 parte por mil	1.21 m/s
Profundidad	60 metros	1 m/s

Tabla 5. Valores de la velocidad del sonido

A partir de los 200 metros de profundidad no suele ser necesario corregir las mediciones realizadas en base a la velocidad del sonido, tomando como referencia una velocidad del sonido estandarizada de 1.500 m/s o utilizar correcciones como las descritas por D.J. Mathews en "Tables of the velocity of sound in pure water and sea water for use in echo-sounding and sound-ranging", del Hydrographic Department, Ministry of Defense, United Kingdom.

Los resultados de mediciones incorrectas en la velocidad del sonido resultan en soluciones de refracción erróneas y en consecuencia en la medición de la profundidad y posicionamiento. También puede introducir errores en el ángulo puntero del haz por lo que es conveniente realizar mediciones también en las proximidades del transductor.

2.4.3. Sensor inercial de navegación

Se trata de realizar mediciones precisas del cabeceo, balance y guiñada así como el rumbo con el fin de minimizar los errores de medición de la sonda. Esto se realiza mediante sensores inerciales, consistentes en tres acelerómetros montados en ejes triortogonales y tres sensores angulares, por lo que aplicando las leyes de Newton para el movimiento se obtienen los desplazamientos.

Además de la corrección de los movimientos del vehículo se deben tener en cuenta el nivel del agua durante la realización de la batimetría debido a que las mareas, elevaciones y corrientes afectan en la medición a la hora de tomar datos sobre la distancia al fondo.

En general, el factor que más afecta a la altura de la superficie del mar son las mareas, mientras que en el caso de lagos y ríos lo es la elevación (por ejemplo debido a una crecida por lluvias). Las características de la marea, del nivel de agua y de la corriente de agua varían en el tiempo y en el espacio, por lo que debe tenerse en cuenta durante la planificación del estudio para realizar levantamientos y cartas precisos.

Las mareas son el resultado de muchos factores como la respuesta del fondo del océano a las fuerzas de producción de mareas, los efectos de aguas poco profundas de bahías y ríos locales o los efectos regionales y locales del clima en los niveles de agua. Las fuerzas gravitacionales de la Luna y el Sol y la fuerza centrífuga del sistema Sol – Tierra – Luna actúan sobre las aguas del océano de la Tierra y son el principal factor generador de mareas. Estas fuerzas externas son ejercidas en forma de fuerzas de producción de marea o fuerzas de tracción. Sus efectos se superponen a la fuerza gravitacional de la Tierra y actúan para delinear las aguas del océano horizontalmente a varios puntos de la superficie de la Tierra.

Teniendo esta información en cuenta, se debe ofrecer como mínimo una confianza del 95% sobre la posición vertical registrada para validar la batimetría que se esté llevando a cabo, teniendo en cuenta todos los factores descritos en este apartado.

2.4.4. La práctica hidrográfica

Se detalla a continuación un pequeño listado de buenas prácticas para el proceso de realización del levantamiento hidrográfico, desde la planificación a la adquisición de los datos y el tratamiento y publicación de los resultados para asegurar la calidad del mismo.

La planificación del levantamiento consta de:

- ✓ Planificación general del proyecto: incluye los requerimientos del levantamiento, la preparación de una especificación con información detallada sobre la programación de operaciones, duración y costes estimados, límites y escalas de los sondeos, relación con autoridades externas, planes para la recolección y revisión de datos así como para su entrega, delimitación de la línea costera si fuese necesario, reconocimiento de la zona tanto geodésico como de mareas, etc.

- ✓ Evaluación del levantamiento: descripción detallada de los métodos que se van a usar como el control posicional, calibración, mareas, muestras del fondo marino, líneas costeras, etc.
- ✓ Control horizontal y vertical: se define la precisión exigida.
- ✓ Sondaje: consta de la planificación de las líneas que van a ser realizadas en los barridos.

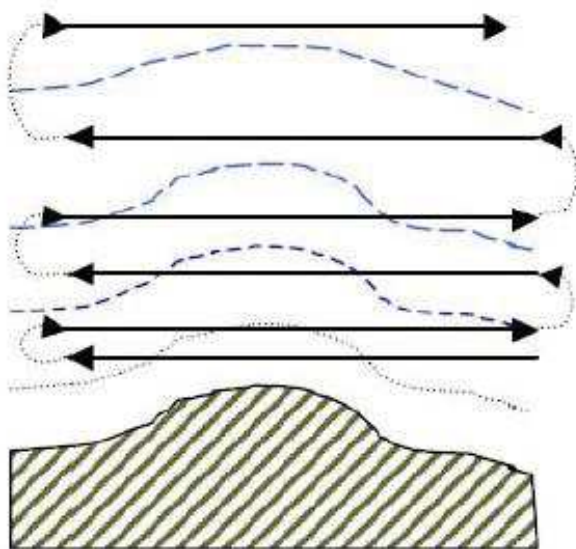


Imagen 20. Líneas de sondaje. (Fuente: IHO)

- ✓ Organización del equipo
- ✓ Recolección y revisión de los datos: esto se realiza a través de controles de calidad y comparación con datos de batimetrías realizadas previamente. Los metadatos deben ser comprensivos y deben abarcar como mínimo información sobre:
 - El levantamiento en general, p.e. propósito, fecha, área, equipo usado, nombre de la embarcación del levantamiento;
 - El sistema geodésico de referencia usado, es decir datum horizontal y vertical incluyendo la vinculación a un marco de referencia geodésico basado en ITRF (p.e.WGS84) si se utiliza un datum local;
 - Procedimientos de calibración y resultados;
 - Método de corrección de la velocidad del sonido;
 - Datum y reducción de marea;
 - Incertidumbres alcanzadas y los respectivos niveles de confianza;
 - Cualquier circunstancia especial o excepcional;
 - Reglas y mecanismos empleados para reducir la densidad de los datos.

3. Vehículos submarinos no tripulados

3.1. Introducción

La seguridad de la navegación, la explotación de recursos submarinos, la búsqueda y el rescate de naufragios y pecios son algunas de las motivaciones que han incrementado el interés por conocer mejor los océanos, las costas, corrientes y fondos marinos. De estas premisas se han desarrollado en los últimos años en el sector marítimo un gran número de equipos y sistemas que permiten de forma eficiente, segura y económica ampliar el conocimiento en este entorno hostil, muchos de ellos en forma de vehículos submarinos.



Imagen 22: AUV IVER 2 de la UPCT (Fuente: www.upct.es)

Un vehículo submarino no tripulado (en inglés, Unmanned Underwater Vehicle, en adelante UUV) es un robot que viaja bajo el agua y que o bien posee su propia capacidad de control a bordo o está controlado por un operador remoto a través de algún tipo de enlace de comunicaciones. Estos vehículos han revolucionado la exploración marina, obteniendo más información, a mayor profundidad y en ambientes más extremos, con más seguridad para el personal y a un coste menor.

Los UUV's forman parte de un grupo más amplio de sistemas submarinos. Una clasificación más precisa incluye principalmente a los Vehículos Autónomos Submarinos (Autonomous Underwater Vehicle, en adelante AUV), que no necesitan del control directo de un operador y los no autónomos operados a distancia (Remotely Operated Vehicle, en adelante ROV) que se controlan y alimentan desde la superficie por un operador a través de un cordón umbilical.

Fuera de esta clasificación se encuentran por ejemplo los vehículos autónomos de superficie (en inglés, Autonomous Surface Vehicle, ASV), que son propulsados aprovechando la energía de las olas, el viento y el sol, por lo que pueden permanecer operativos durante largos periodos de tiempo y en condiciones meteorológicas adversas. También existen los vehículos remolcados sin sistema de propulsión, que actúan como plataformas flotantes remolcados desde barcos mientras van midiendo distintos parámetros ambientales.

A continuación se propone una posible clasificación en función de las características de cada vehículo en relación con lo descrito en el párrafo anterior:

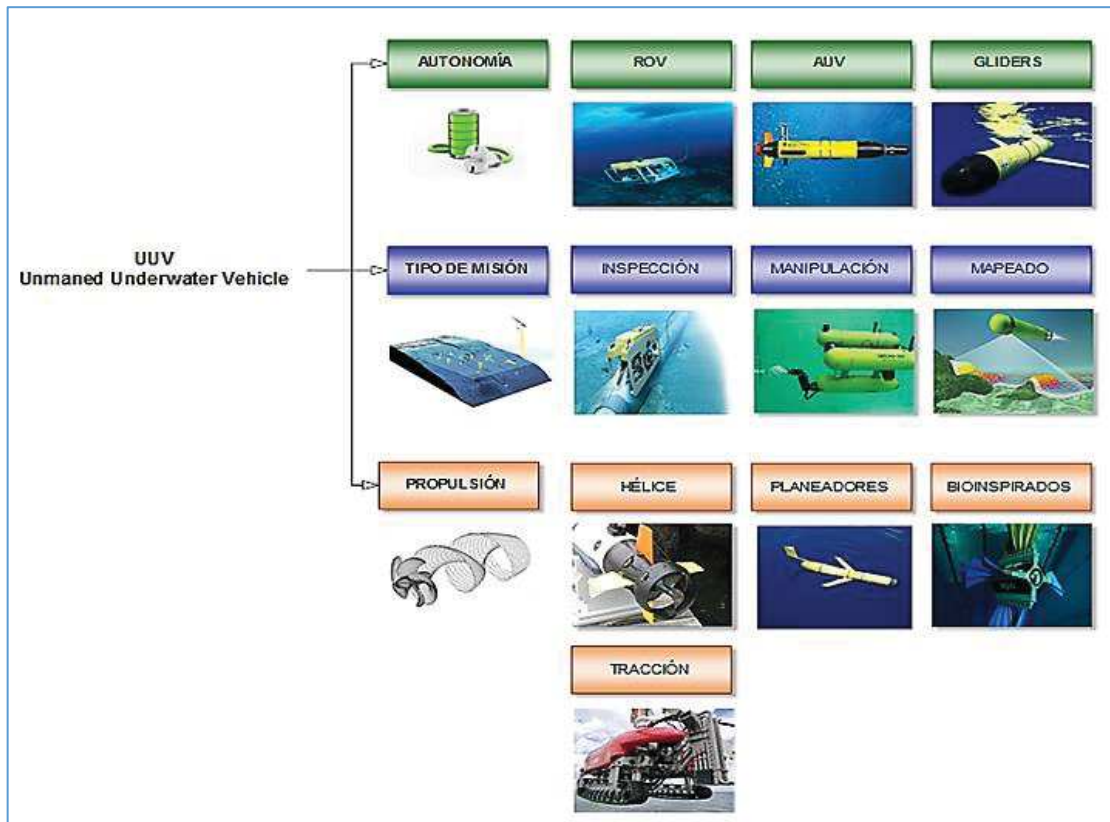


Imagen 23: Clasificación de los vehículos submarinos no tripulados

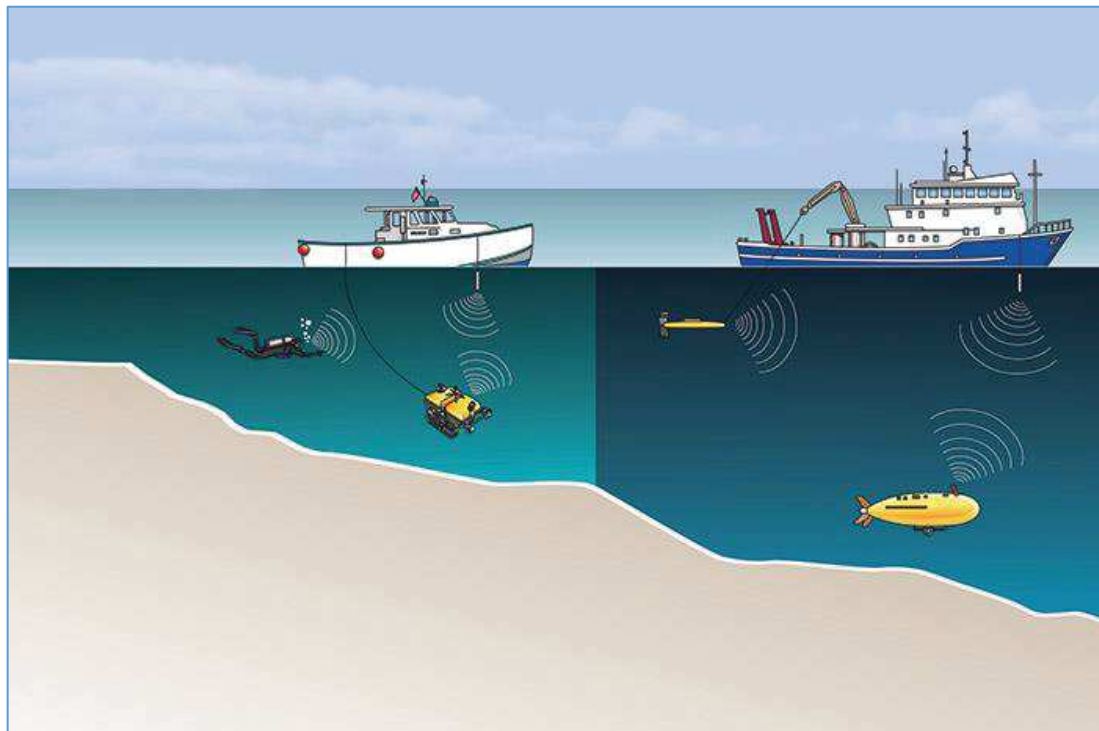


Imagen 24. Diferentes tipos de vehículos (Fuente: <http://www.edgetech.com>)

3.2. ROV's. Vehículos operados a distancia

Los Vehículos operados a distancia (ROV) están conectados mediante un cable umbilical a un buque o plataforma en superficie. Con esta conexión se provee de energía al vehículo y sirve además como fuente de transmisión de información bidireccional, ya sea por ejemplo en forma de comandos de control o señales de vídeo. Así el operador conoce en todo momento la ubicación del vehículo y obtiene en tiempo real información clara de lo que se encuentra en el fondo.

Las misiones clásicas de este tipo de vehículos son de reconocimiento del fondo marino, la investigación de pecios, la instalación de componentes y el mantenimiento de tuberías submarinas. También se dedican a mantener operativa infraestructuras sumergidas críticas el mayor tiempo posible, como es el caso de plataformas offshore por ejemplo.

Estos vehículos no suelen tener forma hidrodinámica, debido a que por una parte el suministro de energía no es crítico y por lo tanto no hay necesidad de optimizar para reducir el consumo eléctrico, y por otro lado esta configuración permite incorporar brazos robóticos con los que poder manipular objetos, y otras herramientas como cestas para depositar muestras recogidas en el fondo.

Por norma general, suelen ir provistos de varios motores a distribuidos a lo largo de su estructura con el fin de incrementar su maniobrabilidad en los tres ejes, lo que incrementa la potencia necesaria. Suelen tener al menos un actuador por cada grado de libertad lo que los hace propicios para tareas de manipulación e inspección de entornos de maniobra restringida.

También existen vehículos con impulsores vectorizados de estructura paralela (IVEP) que permiten controlar la dirección y orientación del propulsor. El IVEP consiste principalmente en un impulsor de hélice y un mecanismo paralelo que controla la posición y orientación del impulsor con respecto al cuerpo del vehículo. Este sistema permite maniobrar a baja velocidad con múltiples grados de libertad, muy importante en áreas confinadas.

Uno de los problemas asociados a la operativa de este tipo de vehículos es que el umbilical incrementa el riesgo de quedar atrapado en cavidades, cuevas o pecios, aunque tener el vehículo localizado mediante el umbilical aumenta las probabilidades de recuperación del vehículo en caso de fallo.

Según su profundidad máxima se han clasificado en la tabla siguiente:

Tipo	Profundidad máxima (m)	Potencia instalada (HP)
Micro observación	100	5
Mini observación	300	10
Trabajos ligeros / medios	2.000	100
Trabajos ligeros / observación	3.000	20
Observación / medición de datos	3.000	25
Trabajos pesados / gran capacidad de carga	3.000	120
Trabajos pesados / gran capacidad de carga	3.000	300

Tabla 6: Clasificación de los ROV según su profundidad de trabajo

Algunos ejemplos de estos vehículos se presentan a continuación:

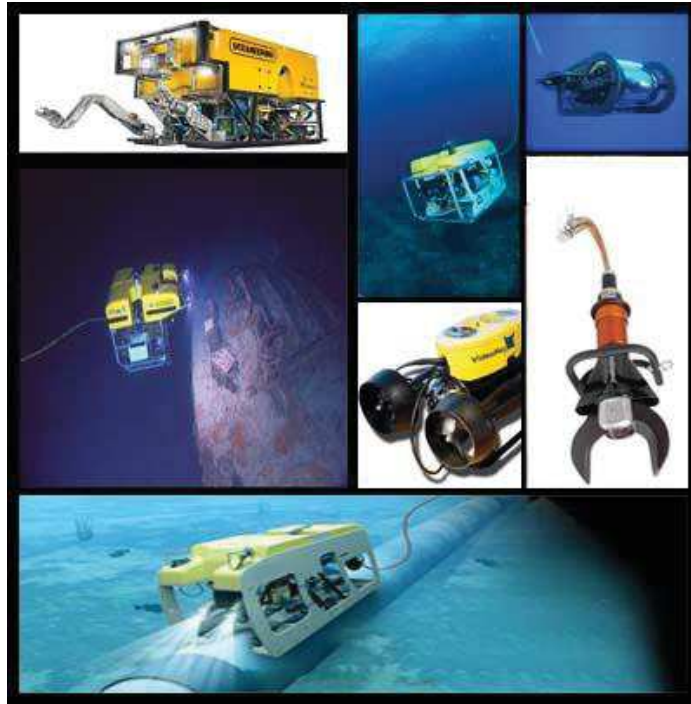


Imagen 25: Diferentes ROVs, utillajes y misiones (Fuente: Google Imágenes)

3.3. AUV's. Vehículos autónomos submarinos

Los Vehículos Autónomos Submarinos (AUV) no necesitan enlaces con la superficie y pueden recorrer grandes distancias sin disponer de un buque operando a su lado que les transmita energía e información. Para ello almacenan la energía que necesitan en baterías, disponen de sistemas de navegación con la información de la misión y formatos físicos (como discos duros) en los que almacenan los datos adquiridos. Por tanto, al contrario que en el caso de los ROV, la optimización de las formas es crítica para ahorrar la mayor cantidad de energía posible, ya que esto determina su autonomía.

Normalmente están formados por un cuerpo cilíndrico resistente en el que van ubicados los diferentes componentes principales, como las baterías, los sistemas electrónicos y en algunos de ellos el control de la flotabilidad con tanques de lastre.

Este cilindro va unido en proa a un cuerpo cónico donde suelen tener la mayoría de los sensores, y otro cuerpo en popa donde se encuentra el propulsor y las aletas, que son los timones de dirección (rumbo) y profundidad (guiñada). El cono de popa debe estar diseñada para reducir la fricción que causa la caída de presión a popa del vehículo, mientras que la hélice empuja el vehículo a la velocidad deseada.

Los AUV se pueden clasificar más detalladamente en función de su capacidad de carga:

- ✓ AUV Oceánicos: miden entre 3 y 20 m y disponen de una autonomía de hasta 72 horas, debido a sus elevados consumos. La profundidad máxima que pueden alcanzar es de 6.000 m. Las misiones típicas normalmente están destinadas a la entrega de carga útil, ya que su capacidad es superior a los 35 Kg.



Imagen 26: AUV oceánico (Fuente: <http://www.ise.bc.ca>)

- ✓ AUV Ligeros: pesan entre 50 y 300 Kg y alcanzan profundidades de hasta 2.000 m. Su capacidad de carga está entorno a los 35 Kg y pueden lanzarse desde aviones o buques de superficie, con misiones que suelen ser de corta duración.



Imagen 27: AUV Ligero (Fuente: <http://cirs.udq.edu>)

- ✓ AUV Portátil: pesan menos de 50 Kg, con autonomías menores a las 20 horas y una profundidad máxima de 200 m. Su capacidad de carga es inferior a los 5 Kg y pueden lanzarse desde pequeñas embarcaciones por una o dos personas.



Imagen 28: AUV Portátil (Fuente: <http://auvac.org>)

Otros ejemplos de este tipo de vehículos trabajando se presentan a continuación:



Imagen 29: Diferentes AUV, utillajes y funciones (Fuente: Google Imágenes)

3.4. El diseño de un AUV

Las características principales en el diseño de un AUV son:

- ✓ Autonomía: es la característica que determina la duración de la misión, lo que implica planificar los diferentes objetivos de la misma tener en cuenta situaciones de riesgo que incluyan la posibilidad de un fallo de suministro. Los sistemas de almacenamiento de la energía son normalmente baterías (por ejemplo de ion-litio), si bien por el momento no es posible montar a bordo las más eficientes debido al espacio disponible y al coste de las mismas. En AUV se pueden encontrar baterías de Níquel, de Ion- Litio, Zinc, de NIMH o células de hidrógeno.
- ✓ El coeficiente de indiscreción: estos vehículos poseen un bajo perfil acústico con una baja detectabilidad en superficie (normalmente una fracción pequeña del cilindro y la antena de comunicaciones). Este aspecto es crítico en el sector militar, donde este coeficiente es clave en misiones de infiltración y vigilancia.
- ✓ La capacidad de despliegue: cada vez más, a estos vehículos se les exige que puedan operar conjunta y coordinadamente, barriendo grandes extensiones con misiones específicas. Actualmente, el despliegue de los mismos se está mejorando a fin de poder lanzarse desde diferentes buques, submarinos, aeronaves o instalaciones en tierra.
- ✓ La diversidad operacional: estos vehículos pueden funcionar a diferentes profundidades y lugares a voluntad, en condiciones de mal tiempo y bajo temperaturas extremas. Este aspecto es diferenciador de por ejemplo otros sistemas como las boyas o los gliders.
- ✓ La recolección de los datos: existen tres grandes grupos de información a recolectar, que son la resolución temporal, que define el volumen de los datos tomados en un determinado punto; la resolución espacial, que define la precisión de la medida y la extensión total observable, que define el área o distancia desde la que el instrumento puede tomar los datos en una zona específica.
- ✓ Al ser un vehículo no tripulado, aumenta las posibilidades de realizar misiones de un perfil de alto riesgo o trabajar en zonas de difícil acceso, incluso de realizar misiones preliminares de reconocimiento antes de que el personal se despliegue.

Las ventajas operativas del uso de un AUV respecto de los vehículos remolcados son:

- ✓ Los vehículos remolcados no pueden adaptarse a los cambios bruscos de dirección.
- ✓ Mantener un vehículo remolcado a la profundidad correcta es mucho más difícil.
- ✓ El posicionamiento de un AUV es autónomo y no requiere posicionar el sistema remolcado en aguas profundas mediante el USBL.
- ✓ En los sistemas remolcados la velocidad depende de la profundidad de remolque, mientras que la velocidad de un AUV es independiente de la profundidad, siempre que se encuentre lo suficientemente alejado de la superficie y del fondo).

Sin embargo los AUV tienen que comprobar su posición real respecto la calculada con su sistema de navegación mediante el GPS (saliendo a la superficie cada cierto tiempo) o utilizar sistemas de referencia en red como por ejemplo boyas con sistemas GPS. Así mismo, la transmisión de las comunicaciones es más limitada y requiere de un mayor consumo relativo de energía respecto a otros sistemas como los ROV.

El diseño de un AUV pasa por la espiral de diseño. Estructuralmente pueden tener diversas configuraciones que dependen de las misiones para las que se diseña el vehículo. Los aspectos a tener en cuenta en el diseño la disposición de un AUV son:

- ✓ Dimensiones, autonomía y misión principal
- ✓ Restricciones de diseño y márgenes de ampliación para futuras incorporaciones
- ✓ Profundidad de diseño y tensiones asociadas al efecto de la presión
- ✓ Integridad estructural de los apéndices
- ✓ Resistencia al impacto
- ✓ Permeabilidad al agua, a la corrosión y ante ataques químicos
- ✓ Resistencia de los materiales a la fatiga
- ✓ Estética y visualmente llamativo, factor crítico en alta mar
- ✓ Accesibilidad de acceso y versatilidad para posibles modificaciones
- ✓ Reducción de la resistencia hidrodinámica mediante un estudio optimizado de las formas
- ✓ Estabilidad estática y dinámica, tanto en superficie como en inmersión
- ✓ Rangos de temperatura de funcionamiento
- ✓ Facilidad de uso y de mantenimiento
- ✓ Coste

El AUV objeto de estudio en este proyecto hace referencia a un vehículo del tipo portátil, con un peso inferior a los 30 kg, una profundidad máxima de trabajo igual o inferior a los 100 metros y una autonomía aproximada de unas 8 horas (baterías nuevas y cargadas al 100%). Se muestra a continuación un plano un vehículo de características similares utilizado por la Unidad de Tecnología Marina del CSIC:



Imagen 30: Plano esquemático del AUV (Fuente: Unidad de Tecnología Marina, CSIC)

Como puede verse en la imagen superior, estos vehículos están basados en un cuerpo cilíndrico central en el que se ubica el ordenador de a bordo, el equipo eléctrico y electrónico (convertidores de señal, sensores, tarjetas electrónicas, etc.) y las baterías. El casco es estanco en proa y popa por medio de dos mamparos transversales que disponen de aberturas (pasacables), por donde se conectan los dispositivos electrónicos contenidos en sección de proa (sensores) y en los de popa (propulsión).

En la proa se instalan los sensores encargados de realizar la misión, y la popa se aloja el sistema propulsivo compuesto por la hélice, las aletas y los timones, el eje y el motor. En algunos vehículos la hélice puede ir protegida por una tobera, que a su vez mejora el flujo de agua incrementando el rendimiento de la hélice.

A la hora de diseñar un vehículo submarino deben tenerse en cuenta los materiales que se encargarán de soportar la presión y el ambiente marino. Por tanto, las características básicas en AUVs deben tener unas buenas propiedades mecánicas, peso reducido y una buena resistencia a la corrosión.

En la tabla siguiente se muestran los materiales más usados en este tipo de vehículos con sus propiedades principales. La mayoría de estos materiales son metálicos, aunque se está ampliando el uso de materiales compuestos y plásticos de alta resistencia como el plástico acrílico (PMMA), transparente y de alta resistencia, usado que en cúpulas para el alojamiento de cámaras de video.

Comercialmente debe tenerse en cuenta que el coste sea reducido. Es debido a ello que el uso de materiales como titanio se ve muy restringido aunque tenga una mayor relación resistencia/peso que el aluminio o el acero, su precio es muy superior por lo que su uso no es tan habitual (excepto en aplicaciones militares).

Material	Comportamiento	ρ (N/m ³)	σ máx (MPa)	E (MPa)
Aleación de Aluminio (5083)	Isótropo	26.087	228	71.700
Aleación de Aluminio (7075)	Isótropo	28.449	503	70.000
Acero A37 (S235)	Isótropo	76.900	235	210.000
Acero alta resistencia (HY80)	Isótropo	77.107	550	207.000
Aleación de Titanio (6-4 STOA)	Isótropo	44.145	830	120.000
CPVC	Isótropo	15.299	60	30.000
PVC-2	Isótropo	13.734	48	35.000
APM-HMW	Isótropo	9.317	15	1.177
POM	Isótropo	13.828	110	2.900
Acrílico	Isótropo	11.772	103	3.100
CFRP	Ortótropo	15.696	570	70.000

Tabla 7: Características de los materiales más usuales en AUV

En cuanto a las formas, la geometría que mejor se adapta a los requisitos de resistencia hidrodinámica al avance y a la resistencia de la presión hidrostática a la que se ven sometidos los vehículos submarinos es la adaptación cilíndrica de las denominadas formas Albacore o de "gota de agua".

Después de la Segunda Guerra Mundial, la Marina estadounidense realizó unos estudios hidrodinámicos para evaluar la eficiencia de los submarinos alemanes tipo XXI capturados.

Descubrieron que sus formas hidrodinámicas les permitían alcanzar grandes velocidades en inmersión, por lo que en los años 50 se realizaron estudios en túneles de viento con el objetivo de determinar la mejor solución hidrodinámica, obteniendo las conocidas formas Albacore o de gota de agua (forma de lágrima), con los que consiguieron rendimientos hidrodinámicos de hasta un 85%.

Actualmente, las formas de los vehículos submarinos derivan de esos estudios modificadas según las necesidades de cada diseño, como por ejemplo la capacidad de carga. A continuación se muestra la forma Albacore original y la modificación clásica que consiste en alargar la zona cilíndrica para albergar más volumen interior (ya que es la solución que menos compromete la hidrodinámica):

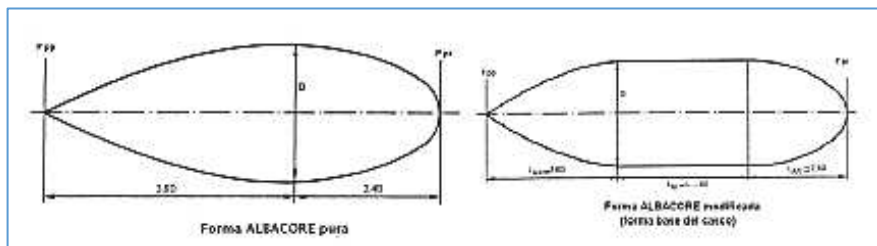


Imagen 31: Forma Albacore (Fuente: Apuntes de Pedro Sosa, Capítulo 6)

Estructuralmente hablando, la esfera es la forma geométrica más resistente a la presión, aunque en comparación con un cilindro dispone de menos volumen para el almacenamiento de los distintos sistemas. Además, es posible alargar la eslora del cilindro para aumentar el volumen disponible sin perder cualidades significativas (estabilidad, resistencia hidrodinámica, geometría...), mientras que en el caso de la esfera esto se restringe a aumentar el radio o se reducir la circularidad añadiendo apéndices.

No obstante, un cilindro tiene menos estabilidad en comparación con otras figuras geométricas (como por ejemplo un vehículo ortoédrico). Por otro lado, la fabricación de un cilindro es relativamente sencilla y esto tiene consecuencias favorables para la reducción del coste de construcción. Por tanto, el alargamiento cilíndrico de las formas hidrodinámicas permite la instalación de más equipos con un mínimo compromiso de resistencia al avance a la y a su vez es la solución de compromiso que menos reduce la resistencia a la presión.

En la imagen siguiente se realiza una comparativa realizada por Phillips, Turnock y Furlong del National Oceanography Centre (NOC, Southampton, UK) en el documento "The use of CFD to aid cost-effective hydrodynamic design of AUV". Se aprecian diferentes formas de proa y su influencia en la resistencia de presión. Con una proa más hidrodinámica el coeficiente de presión es menor (forma elipsoidal) que con otras más llenas (formas hemisféricas).

Para vehículos diseñados para trabajar a altas velocidades no se aconseja proas demasiado llenas, ya que ello contribuye al aumento de la resistencia al avance y puede provocar la aparición de la cavitación, que no solo aumenta la resistencia si no que puede llegar a erosionar la proa. Es por ello que generalmente esto implica una situación de compromiso entre la carga útil y la resistencia al avance.

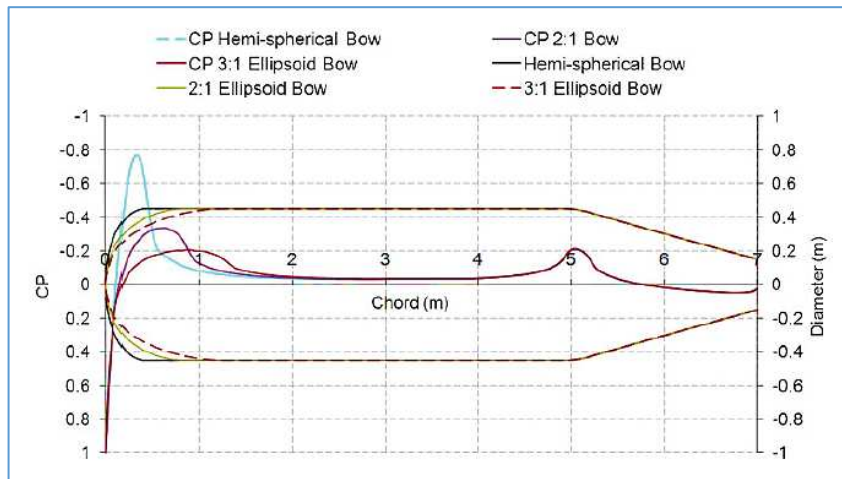


Imagen 32: Influencia de las formas en la distribución de presiones (Fuente: NOC)

En AUV las formas se suelen basar en las ecuaciones de Myring y perfiles NACA. Para minimizar las pérdidas de la hélice se coloca una tobera con perfil NACA, consiguiendo mayor empuje a bajas velocidades. Se muestra a continuación las formas obtenidas mediante estas ecuaciones, estudio realizado por T. Joung en "A study on the design optimization of an AUV by using CFD Analysis":

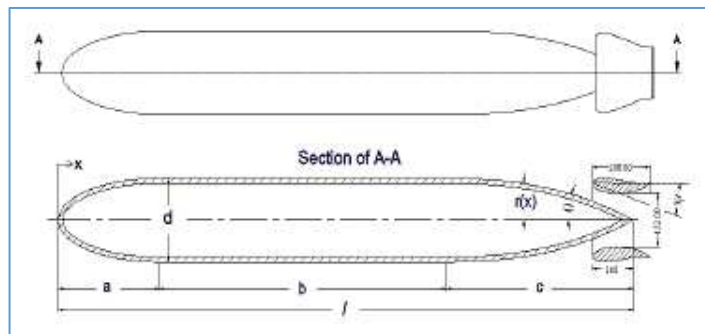


Imagen 33: Sección de un AUV (Fuente: T. Joung)

4. El vehículo objeto de estudio

4.1. Introducción

El AUV objeto de estudio fue adquirido por la Universidad Politécnica de Cartagena en el año 2013 con fines científicos. El vehículo se encuentra en el Laboratorio de Vehículos Submarinos (LVS) de esta Universidad que dispone además de otros equipos e infraestructuras para realizar trabajos de investigación.

El LVS forma una Unidad de Investigación multidisciplinar que engloba a expertos en Arquitectura y Construcción Naval, Oceanografía, Geología, Robótica Submarina, Ingeniería de Sistemas y Automática, Inteligencia Artificial, Electrónica Submarina, Ingeniería Mecánica, Matemática Aplicada y Telecomunicaciones. También dispone de una embarcación de 8 m de eslora, una zodiac e instrumentación que permiten el despliegue de este vehículo.

El modelo del AUV original es el EcoMapper IVER – 2 de la empresa YSI, que está basado en el IVER-2 de Ocean Server. Al AUV original se le realizan modificaciones que incluyen la instalación de una nueva CPU en la zona de la electrónica (Raspberry Pi), una nueva antena, diferentes cabezales con sensores (como por ejemplo de rodamina) y medios de comunicación como el USBL o el módem acústico. Estos cambios han modificado su estabilidad y la relación peso – empuje, lo que ha obligado a la instalación de nuevos lastres. De la misma forma, la velocidad máxima se ha visto afectada debido al aumento de la resistencia al avance.

Para este proyecto se han tenido en cuenta 3 configuraciones posibles, que difieren entre sí principalmente por el tipo de sensores con el que se desea operar el vehículo, lo que implica modificaciones en el lastrado. El modelo aproximado y características principales de cada una de estas configuraciones se muestran a continuación:

- ✓ Vehículo sin instrumentación (V*): formado por tres elementos principales, el cuerpo de popa, el cilindro de la electrónica y el cuerpo de proa (que incluye el DVL). Estos se subdividen en pequeños elementos como el motor, la hélice con la tobera, el lastre, etc. Esta primera configuración no contiene ningún tipo de sensor en el cabezal. Se trata del vehículo en su configuración más simple, y del que solo se realiza el balance de pesos en este proyecto.

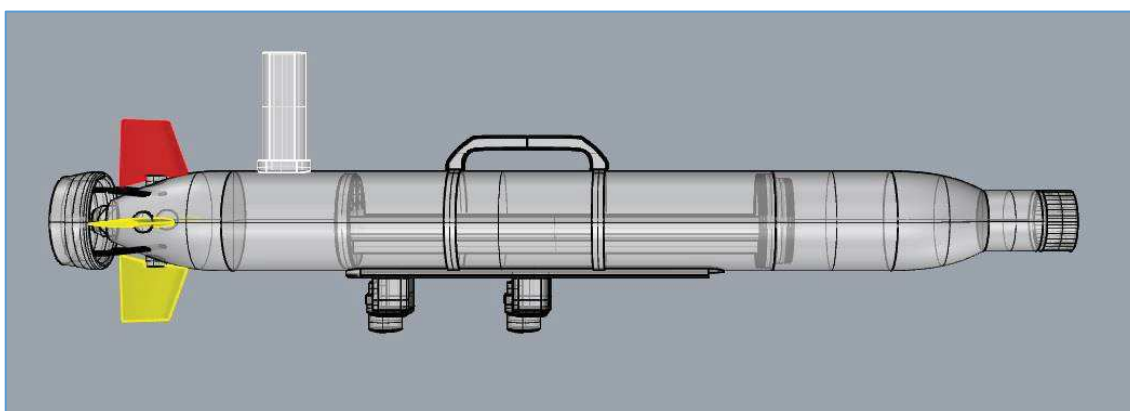


Imagen 34. EcoMapper sin instrumentación en el cabezal (V*)

Variación Operacional de un AUV

Las características principales del vehículo sin instrumentación son las siguientes:

<ul style="list-style-type: none"> - Eslora: 151 cm aprox. - Diámetro: 15 cm - Peso: 24,2 Kg - Profundidad máxima: 100 metros - Autonomía: 6 horas- 1,35 kn aprox. - Rango de velocidades: 1-4 kn 	<ul style="list-style-type: none"> - Comunicaciones: Wi-fi 802,11n - Potencia: 18 – 24V corriente continua - Navegación: GPS en superficie; DVL, sensores, software y brújula en inmersión - Baterías: 6 baterías de Li-ion, 570 Wh en total - 4 aletas en cruz de control direccional
---	---

Tabla 8. Características del AUV V*

- ✓ Vehículo con la instrumentación YSI (V_{YSI}): formado por cuatro elementos principales, el cuerpo de popa, el cilindro amarillo de la electrónica, el cuerpo de proa (que incluye el DVL) y los sensores del YSI. Estos se subdividen en pequeños elementos como el motor, la hélice con la tobera, el lastre, etc. Para el proyecto, este vehículo se subdivide a su vez en dos configuraciones; la primera (V_{YSI} original), es el vehículo sin el USBL ni el modem acústico, para el que se disponen de datos reales de consumo, autonomía, etc. extraídos de los logs y el cual será la base para realizar el balance eléctrico y por ende tendrá influencia en el cálculo CFD, pero no se realizará ningún balance de pesos en este proyecto. La segunda es la configuración actual del vehículo (V_{YSI}) tras instalar nueva electrónica en su interior, el USBL, el modem acústico y realizar cambios en la transmisión de la cola que afectan directamente al balance de pesos, que sí está incluido en el apartado 4.9.

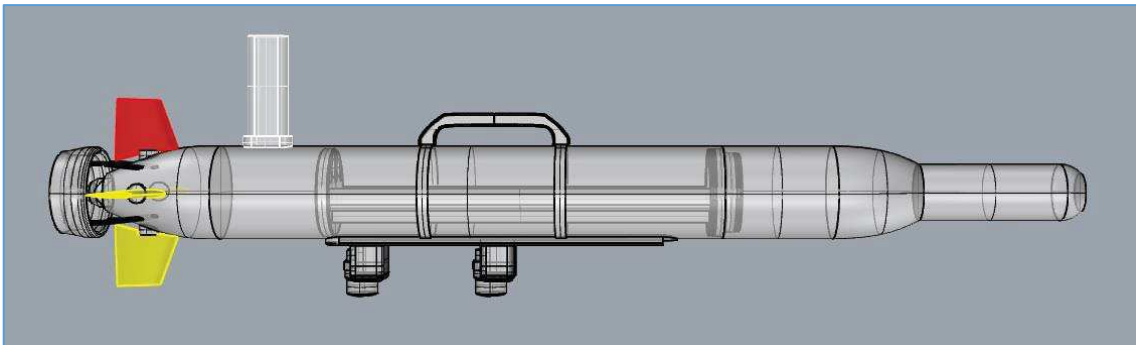


Imagen 35: EcoMapper de YSI basado en el IVER-2 (V_{YSI})

Las características principales del vehículo son las siguientes:

<ul style="list-style-type: none"> - Eslora: 164 cm aprox. - Diámetro: 15 cm - Peso: 24,97 Kg - Profundidad máxima: 100 metros - Autonomía: 6 horas- 1,35 kn aprox. - Rango de velocidades: 1-4 kn 	<ul style="list-style-type: none"> - Comunicaciones: Wi-fi 802,11n - Potencia: 18 – 24V corriente continua - Navegación: GPS en superficie; DVL, sensores, software y brújula en inmersión - Baterías: 6 baterías de Li-ion, 570 Wh en total - 4 aletas en cruz de control direccional
--	---

Tabla 9: Características del AUV (V_{YSI})

Variación Operacional de un AUV

La instrumentación del vehículo con la instrumentación del YSI incluye los siguientes sensores:

<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura (interna y externa) - Conductividad del agua - Profundidad total - Distancia al fondo (altura) - Brújula de navegación de tres ejes 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensor óptico de oxígeno disuelto - Sensor de turbidez - Sensor de clorofila fluorescente - Sensor de fluorescencia azul-verde de algas - pH y ORP
---	--

Tabla 10: Características de los sensores del AUV (Fuente: <http://www.iver-auv.com>)

- ✓ Vehículo con la instrumentación de hidrocarburos (V_{HC}): formado por cuatro elementos principales, el cuerpo de popa, el cilindro amarillo de la electrónica, el cuerpo de proa (que incluye el DVL) y los sensores de hidrocarburos y rodamina. Estos se subdividen en pequeños elementos como el motor, la hélice con la tobera, el lastre, etc. En esta configuración, se tienen valores de consumo reales extraídos de los logs, los cuales ya contienen datos de los cambios realizados en el vehículo como la instalación de nueva electrónica y el USBL, por tanto, se tendrá en cuenta en el balance eléctrico y se realizará su balance de pesos, pero no tendrá ningún interés en el cálculo CFD.

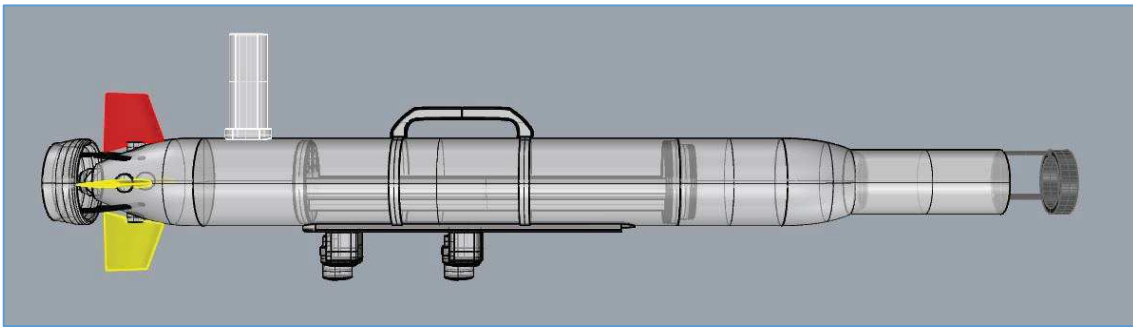


Imagen 36. EcoMapper con la instrumentación de hidrocarburos (V_{HC})

Las características principales del vehículo son las siguientes:

<ul style="list-style-type: none"> - Eslora: 174 cm aprox. - Diámetro: 15 cm - Peso: 25.39 Kg - Profundidad máxima: 100 metros - Autonomía: 6 horas a 1,5 kn aprox. - Rango de velocidades: 1-4 kn 	<ul style="list-style-type: none"> - Comunicaciones: Wi-fi 802,11n - Potencia: 18 – 24V corriente continua - Navegación: GPS en superficie; DVL, sensores, software y brújula en inmersión - Baterías: 6 baterías de Li-ion, 570 Wh en total - 4 aletas en cruz de control direccional
--	---

Tabla 11: Características del AUV (V_{HC})

La instrumentación del vehículo con el cabezal de hidrocarburos incluye los siguientes sensores:

<ul style="list-style-type: none"> - Sensor de Rodamina - Sensor de Hidrocarburos - Profundidad total - Distancia al fondo (altura) - Brújula de navegación de tres ejes

Tabla 12: Características de los sensores del AUV

Durante las misiones el vehículo almacena la siguiente información de interés en los logs:

- ✓ La temperatura interna del vehículo.
- ✓ La posición de los servomecanismos para el autocontrol.
- ✓ Varios tipos de alarmas, como por ejemplo el sensor de humedad en caso de inundación.
- ✓ La evolución de la descarga de la batería, para estimar su capacidad y su vida útil.
- ✓ Estadísticas de tiempo, profundidad y distancia de inmersión recorrida para mejorar la planificación y la logística.
- ✓ Recopilación de información para realizar informes científico – técnicos, basada en la información que recogen los sensores descritos en estos apartados.

4.2. La unidad de control del vehículo

En este apartado se describe la gestión de la electrónica, realizada por la unidad de control del vehículo. Este sistema se diseña de forma modular, para controlar la Navegación, el Guiado y el Control (NGC) del vehículo de forma independiente e interconectada. Por norma general, el NGC está compuesto por subsistemas gestionados por la unidad de control (UC), que consiste en un procesador embebido que recoge los datos provenientes de todos los sensores, con el fin de realizar los cálculos necesarios para mantener el rumbo y regular los diferentes subsistemas que gobiernan el AUV.

En la mayoría de vehículos estos subsistemas se comunican entre ellos a través de una estructura jerárquica, donde la comunicación se realiza verticalmente entre los diferentes niveles. Esto permite al vehículo obtener datos del medio a través de los sensores que envían esta información al siguiente nivel para planear nuevas acciones. Existen otras arquitecturas del tipo paralelo donde los módulos se comunican entre ellos sin necesidad de un supervisor principal. Un ejemplo de arquitectura común se puede ver en la figura siguiente, con los subsistemas de alimentación, navegación, propulsión/inmersión, seguridad, comunicaciones y el de adquisición de datos.

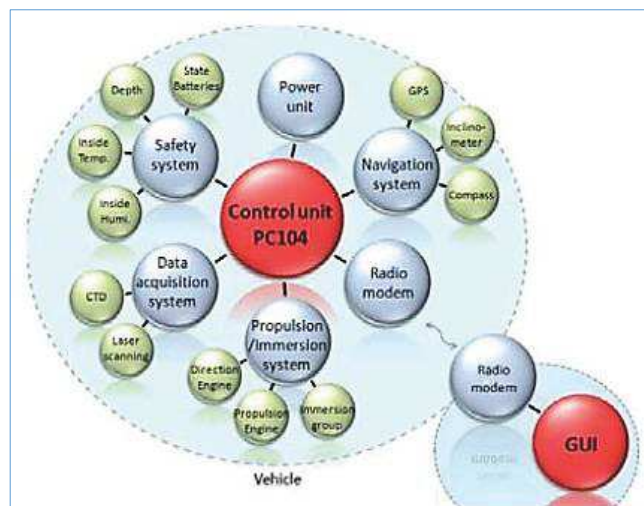


Imagen 37: Arquitectura de la electrónica del vehículo (Fuente: <http://upcommons.upc.edu>)

La Unidad de Control es el dispositivo encargado de controlar el comportamiento del vehículo, en base a la información proveniente de los sensores y a la misión prefijada. Un ejemplo de misión puede ser seguir por una ruta predeterminada o buscar un patrón presente en el agua. La UC está formada por el ordenador embebido de a bordo, que en este tipo de vehículos suele estar basado en un procesador del tipo PC/104+. En el caso del EcoMapper, la UC opera con Windows XP. El ordenador de a bordo dispone de un sistema de almacenamiento de datos del tipo disco duro, donde se almacena toda la información relativa a la misión y los datos recogidos por los sensores.

La UC es el piloto automático del vehículo, manteniendo el rumbo durante las misiones. El control de la navegación se realiza en base a la información de la brújula, el GPS, el sistema de navegación inercial o los sensores acústicos junto con el software de posicionamiento. Este sistema se encarga de comparar la información que recibe con la misión y controla el vehículo en un bucle retroalimentado.

El operador del vehículo se encarga de comunicarse con la UC mediante un software de control, como por ejemplo el VectorMap. Los puertos de comunicación que conectan los periféricos con la UC (el motor, los servos, los sensores) suelen ser del tipo RS-232 o NMEA (National Maritime Electronics Association).

Todo el sistema se controla mediante el software ubicado en el vehículo y en la estación base. El software del vehículo transmite la telemetría y controla los parámetros descritos del vehículo, mientras que el de la estación recibe esta información y la hace legible mediante una interfaz gráfica al operador. El software de abordaje suele dividirse entre el sistema de navegación (GPS, INS, sensor de profundidad...), el de guiado (seguimiento de trayectorias o waypoints) y el de control (piloto automático en bucle cerrado).

Identificación de los elementos del vehículo relacionados:

Cilindro electrónica y cilindro amarillo: La CPU se encuentra en el raíl de la electrónica cubierto y protegido por el cilindro amarillo (casco resistente), alberga todos los elementos electrónicos y los dispositivos informáticos.

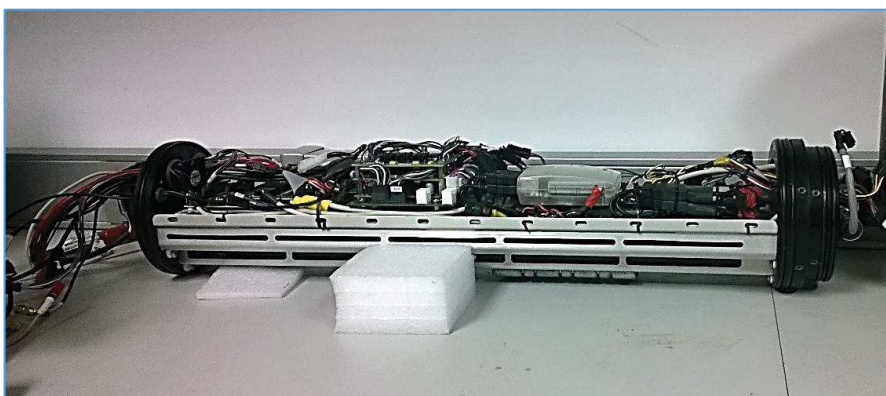
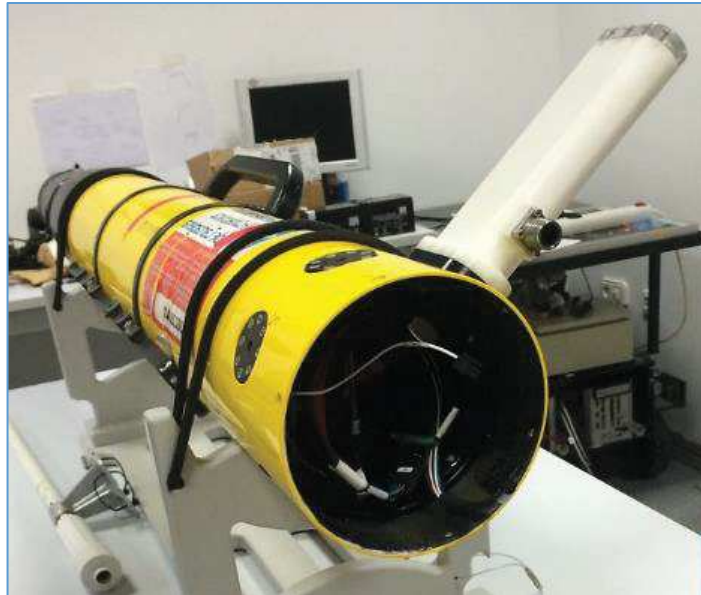


Imagen 38. Estructura que contiene la electrónica del vehículo

4.3. El sistema de propulsión

El sistema de propulsión está formado por componentes que permiten al vehículo desplazarse por el medio acuático mediante la transformación de la energía en empuje. La propulsión, está basada en un conjunto formado por un motor eléctrico acoplado a una hélice, que son los responsables del avance del vehículo. En AUV, los rangos de potencias de estos motores son inferiores a los 10 CV, con velocidades máximas de hasta 6 nudos. El principal inconveniente de estos dispositivos es el ruido generado por la hélice, por lo que en determinadas aplicaciones es poco adecuado, como por ejemplo en el ámbito militar.

El control de los movimientos de cabeceo, viraje y balanceo se realiza mediante aletas y timones, que conforman un sistema sencillo pero con una maniobrabilidad limitada con bajas velocidades. La configuración de propulsores definirá su maniobrabilidad y su coste económico y energético.

Identificación de los elementos del vehículo relacionados:

Cuerpo popa: formado por la hélice, los timones y aletas, la tobera y el cuerpo donde va alojado el motor propulsor, con los engranajes y cojinetes necesarios para el funcionamiento del conjunto.



Imagen 39. Cuerpo de popa, con hélice y tobera desmontadas.

El motor es un SM2315DT, motor eléctrico de 8 polos cuya variante DT aporta el doble de par que su versión anterior (SM2315D). Este motor está diseñado para trabajar a 48 V, 42 V y 24 V generando una potencia máxima efectiva de 160 W a 3.500 rpm con un par de 0,40 N·m.

El voltaje disponible en el vehículo es 24 V, cuya curva de carga se presenta a continuación:

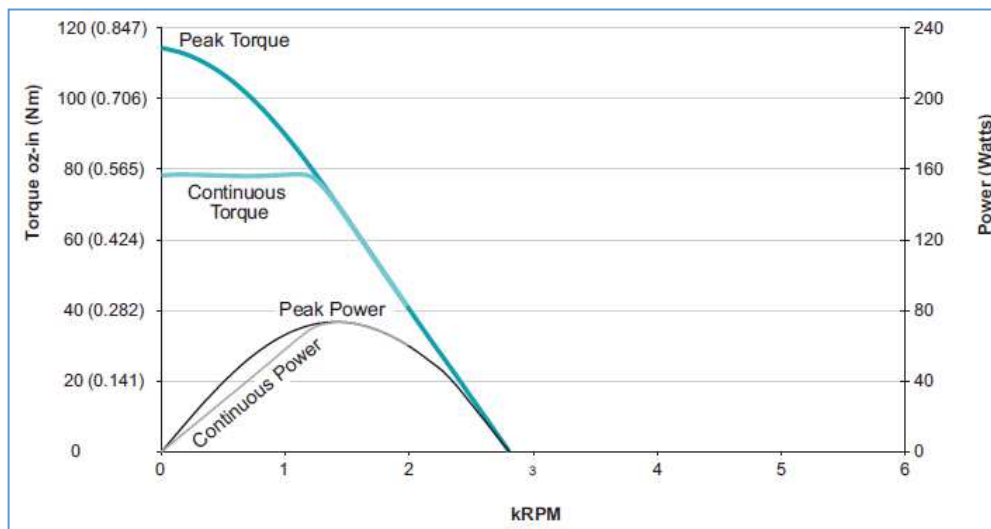


Imagen 40: Potencia, par y revoluciones del SM2315DT (Fuente: <http://www.animatics.com>)

En estas condiciones el motor eléctrico es alimentado con 24 V y puede generar una potencia máxima de 74 W a unas 1.300 rpm con un par de 0,54 N·m. El motor puede funcionar a un máximo de 2.000 rpm (ver línea gris), por lo que analizando el valor de las revoluciones de los logs se puede determinar el régimen del mismo, que en este caso marca con el código 255 en adelante a máximas revoluciones y 128 a motor parado, puesto que lo representa en binario, siendo por tanto el 0 el valor de marcha atrás.

Por tanto, cuando los logs marcan 208 el vehículo navega a máxima potencia, que corresponde a 1.250 rpm, entregando 71,65 W con un par de 0,547 N·m.

Actualmente el vehículo ha sido modificado con la actualización y sustitución completa del módulo de popa, que incluía entre otros el sellado de la bocina y la instalación de un sistema de propulsión magnético. Este sistema sustituye el sistema tradicional de transmisión del empuje del motor eléctrico mediante un eje que atraviesa el casco por un sistema que mediante corrientes magnéticas se encarga de hacer girar la hélice sin necesidad de pasos de casco.

A fin de simplificar este trabajo, este cambio del módulo de popa se ha considerado su impacto solamente en el balance de pesos teniendo en cuenta el peso de la nueva cola, pero sin embargo a efectos propulsivos y en el balance eléctrico, se ha considerado que el motor y el sistema propulsivo sigue siendo el mismo que el de la cola antigua para simplificar el análisis y por no disponer de datos reales con estas modificaciones. Así mismo, se mantienen en la medida de lo posible las condiciones iniciales y permite comparar el aumento de la resistencia en la máxima igualdad posible de condiciones (rendimiento mecánico, curva de par y potencia y en el rendimiento propulsivo).

4.4. Fuente de alimentación y balance eléctrico

El almacenamiento energético es la característica más crítica en los AUV, ya que delimitan el perfil de la misión, fijando el tiempo de funcionamiento del vehículo y su peso. Las fuentes de energía más comunes en AUV son:

- ✓ Baterías: pueden ser Ni-Cd, Ni-Zn, Plomo – Ácido, Li primaria, Alcalina, Li-Polymer, Plata – Zinc o Li – Ion. Todas las baterías están compuestas por una o más celdas electroquímicas que convierten la energía química almacenada en energía eléctrica.
- ✓ Placas solares: la energía solar se utiliza para recargar las baterías en superficie durante la misión alargando así su autonomía inicial.
- ✓ Células de combustible: generan energía eléctrica por medio de una reacción química entre un flujo de combustible constante y un agente oxidante. Aportan mayor autonomía que las baterías, pero requieren de tanques de combustible presurizados.

El consumo energético es la energía demandada por unidad de tiempo que los diferentes equipos extraen de las baterías. El consumo se divide entre los diferentes equipos que tiene el vehículo, agrupados según si forman parte del sistema propulsivo, del conjunto de sensores o de los sistemas de control. El consumo es variable y depende de la situación de la misión, ya que por ejemplo el consumo cambia según la velocidad del vehículo, el tipo de sensores que esté montando o si se encuentra en stand-by.

La capacidad de las baterías refleja la cantidad de energía almacenada en ellas. La descarga de la energía será más rápida cuanto más elevado sea el consumo energético que demanden los equipos, como se ha descrito en el párrafo anterior. La capacidad define la autonomía del vehículo y limita el tiempo de la misión sin un suministro eléctrico adicional.

El AUV objeto de estudio utiliza las baterías de ión – Litio (Li-ion) NL2044HD22 de la empresa Inspired Energy de 12 celdas (similares a las de un ordenador portátil) de 14,4 V, que a 6,6 Ah dan una capacidad de almacenamiento de 95Wh y un peso de 710 g cada una. Según se ha podido determinar en los logs (analizados extensamente en el trabajo de Gabriel Carrasco (Enero de 2016), por lo que no se explicarán con detalle en este proyecto), la capacidad total del vehículo al 100% de la carga es de aproximadamente 570 Wh, por lo que se deduce que hay 6 baterías.

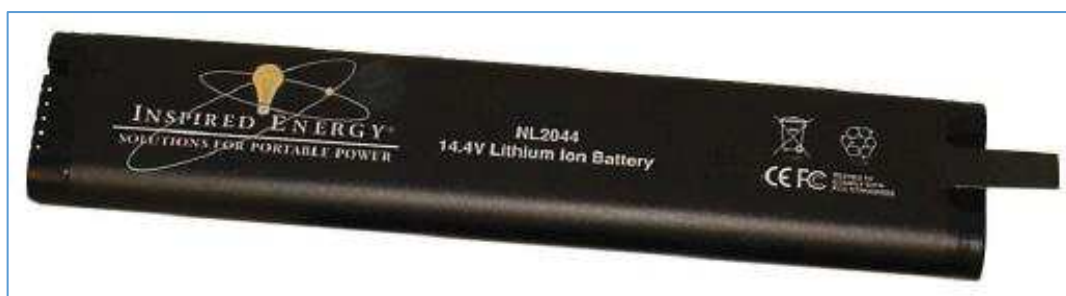


Imagen 41: Batería NL2044HD22 (Fuente: <http://www.inspired-energy.com/>)

Según el fabricante estas baterías pueden mantener un 80% o más de su capacidad inicial después de 300 ciclos de carga / descarga si se cumplen las condiciones de carga (voltaje e intensidad) y de utilización (temperatura), por lo que las hace bastante adecuadas para su uso en AUVs.

A continuación se muestra los límites operativos de funcionamiento de las baterías en el vehículo; puesto que el vehículo opera con una temperatura interior de unos 45°C a unos 6 A, está dentro del rango de funcionamiento previsto por el fabricante:

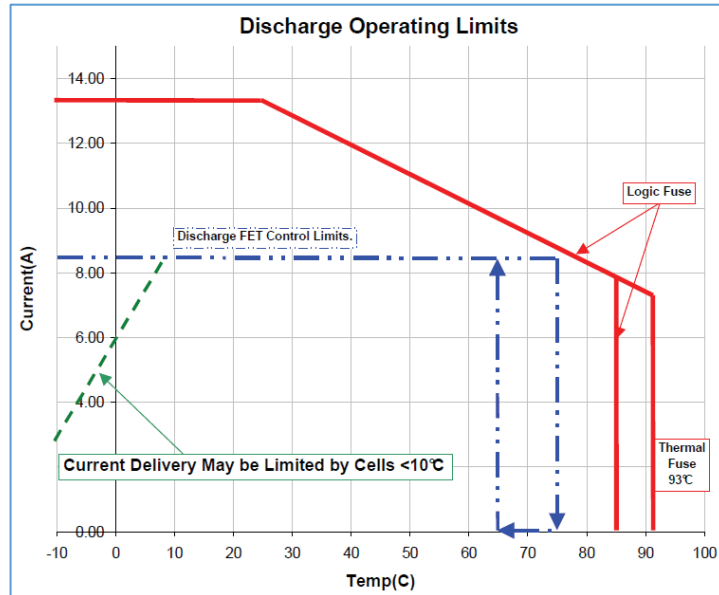


Imagen 42: Límites de descarga de las baterías Fuente: <http://www.inspired-energy.com/>

Para validar los resultados de los ensayos CFD, se han utilizado dos logs de misiones reales realizadas, una de ellas el vehículo operando con la instrumentación YSI y otra con los sensores de hidrocarburos (entre otras diferencias). Del vehículo sin instrumentación no se dispone de logs por lo que no se tomará como referencia. El vehículo almacena en el disco duro información relativa tanto a la navegación (rumbo, velocidad, profundidad y altitud, posición de los timones...) como a la información relativa a la electrónica (medición de los sensores, estado de las baterías, voltaje e intensidad instantáneas...). De toda esta información generada, los valores que interesan en este estudio buscan un lapso de tiempo lo suficientemente largo como para que pueda considerarse estacionario y poder, con ello, compararlo con los resultados del CFD. Para el estudio se fijan las siguientes condiciones:

- ✓ El vehículo se desplaza a la máxima velocidad posible para buscar la condición límite de resistencia y de consumo; el motor eléctrico se encuentra girando a las máximas revoluciones.
- ✓ El vehículo navega a profundidades en las que la superficie no tiene una influencia sobre la resistencia del mismo al tratarse de un análisis de resistencia en inmersión.
- ✓ El consumo total está formado por el consumo “parado” más al consumo en “navegación” (y que dependerá en cada caso del rendimiento propulsivo⁵ de cada vehículo).

⁵ Es la relación entre la potencia efectiva al avance (EHP) y la potencia que está entregando el motor eléctrico (potencia al freno, BHP)



Imagen 43. Esquema del consumo del vehículo

Del apartado anterior se tiene que el vehículo avanza a una potencia efectiva de 71,65 W, por lo que si se supone un rendimiento del motor del 92% (valores típicos en motores eléctricos de corriente continua) y sabiendo que la capacidad total de baterías es de 570 Wh, se resumen los cálculos realizados en la tabla siguiente:

Modelo	Estado	Consumo Instantáneo (W)	Diferencia (motor, W)	Diferencia (resto navegación, W)	Potencia real (W)	BHP (W)	EHP (W)	Autonomía (h)
Vehículo con instrumentación YSI original	Navegación 1,541 m/s	93,25	80,37	2,48	77,88	71,65	25,33	6,11
	Parado	12,88						
Vehículo con instrumentación hidrocarburos	Navegación 1,414 m/s	97,35	79,97	2,08	77,88	71,65	30,77	5,85
	Parado	17,38						

Tabla 13. Resumen del balance eléctrico de los vehículos

A partir de estos valores, que como ya se ha indicado han sido analizados con detalle en otro proyecto, se escoge el vehículo con la instrumentación del YSI al cual se le introducirá la Sonda Multihaz, para el que se realiza un análisis más detallado.

A diferencia del vehículo analizado en la tabla anterior, el vehículo actual con la instrumentación del YSI dispone de algunas modificaciones entre las que se destaca una segunda CPU, otro módulo Wi-fi en la antena de mayor alcance, un USB y un modem acústico. La mayoría de estas modificaciones ya estaban incluidas en el vehículo con la instrumentación de hidrocarburos, por lo que se asumiendo que ambos sensores tienen el mismo consumo, se le añadirá a la condición de parado del vehículo con la instrumentación de hidrocarburos, el consumo del modem acústico y el resultado se sumará al consumo del motor del vehículo con la

instrumentación del YSI. Se determinará en el estudio CFD si la nueva situación con la instalación de la Sonda Multihaz hace necesario incluir más espacio para baterías o servirá asumir una pérdida de velocidad.

Se sabe, por las especificaciones de los manuales, que el consumo de potencia del USBL es de 3,5 W transmitiendo y de 7,92 W para el modem acústico. Asumiendo que el rendimiento propulsivo es similar, tras el análisis CFD, se calcula la pérdida de velocidad. Los datos se resumen a continuación:

Modelo	Estado	Consumo Instantáneo (W)	Potencia real (W)	Potencia al freno (W)	Resistencia efectiva al avance (W)	Autonomía (h)
Vehículo con instrumentación YSI	Navegación 1,355 m/s	105,67	77,88	71,65	25,33	5,4

Tabla 14. Balance del vehículo

Se estima que con las nuevas modificaciones el vehículo ha perdido alrededor de 40 minutos de autonomía, además de navegar 0,18 m/s más lento.

4.5. Sistemas de navegación

El sistema de navegación está formado por los componentes encargados de ubicar el vehículo y desarrollar la misión siguiendo una ruta o un patrón determinados. El vehículo debe saber en todo momento su posición de la forma más exacta posible, y para ello existen diferentes sistemas que van desde el GPS, a equipos acústicos como el USBL o el sistema de navegación inercial, basado en las aceleraciones y velocidad del vehículo.

Los sistemas de navegación basados en **señales acústicas** son los más empleados en vehículos submarinos. Se basan en medir la velocidad de la señal del sonido a través del agua y contando el tiempo que tarda ésta en regresar (eco), se obtiene la distancia a los elementos del entorno. Es decir el sistema actúa como un sónar activo formando por equipos de emisión (transmisores) y recepción (receptores). Este principio se utiliza también para detectar la posición del AUV (mediante el USBL), transmitir información bidireccionalmente (el módem acústico) o determinar la distancia al fondo o a la superficie (el DVL). Por tanto estos sistemas dependen de la correcta transmisión de la señal en el medio, que depende de la distancia, la frecuencia y la temperatura entre otros factores, como la reflexión que afecta a la calidad y a la fiabilidad de las señales emitidas, aspectos descritos en apartados anteriores.

El sistema **Doppler Velocity Logs (DVL)** se basa en el efecto Doppler, es decir la medición de la velocidad del vehículo con respecto al fondo marino. Un pulso de sónar emitido desde el vehículo con una frecuencia concreta rebota en el fondo y se registra la frecuencia de la señal reflejada. Entonces se compara la frecuencia de la señal emitida con la recibida y se determina la velocidad del vehículo en la dirección en que se emitió el haz. La configuración típica del DVL es de 3 haces de sónar distanciados 120° o 4 haces a 90°, determinando la velocidad del vehículo en

las tres direcciones del espacio. Integrando estos valores es posible determinar desplazamientos. De la misma forma también se mide la distancia al fondo.

Por tanto, su aplicación principal en los vehículos autónomos submarinos (AUV) es ubicar espacialmente el vehículo midiendo la profundidad (distancia a la superficie) y la altitud (distancia al fondo) cuando navega en inmersión.



Imagen 44: En amarillo, el DVL de un IVER 2 (Fuente: <http://www.iver-auv.com/>)

El **sistema de navegación inercial (INS)** se basa en sistemas pasivos (giroscopios, acelerómetros, sensores de presión...) para determinar la posición del vehículo bajo el agua. Debido a la falta de compensación del giroscopio, los errores en acelerómetros y las alteraciones no lineales (como por ejemplo las debidas a corrientes, el ruido electrónico...), al final se va perdiendo precisión con el tiempo y acumulándose el error cometido. Es por ello que se requieren de otros sistemas como el GPS que en superficie corrigen la posición del vehículo.

El INS calcula su posición con las siguientes herramientas en base a una posición inicial conocida:

- ✓ La aceleración angular: los giróscopos miden la fase entre dos haces de luz que viajan en direcciones opuestas, determinando la velocidad angular. Se emplean habitualmente en vehículos de bajo coste. Existen giróscopos basados en un sistema de espejos que son silenciosos debido a que no hay elementos móviles.
- ✓ La aceleración lineal: los acelerómetros emplean resortes o masas para medir los pequeños desplazamientos provocados por fuerzas externas, midiendo las aceleraciones a largo de ejes ortogonales. Esta información se combina con la de los giróscopos y los otros sensores para crear una trayectoria espacial tridimensional.
- ✓ La orientación: la brújula determina la orientación del vehículo con respecto al campo magnético terrestre. Esta orientación también debe corregirse con la declinación magnética para utilizar el norte verdadero y debido a los campos magnéticos locales.
- ✓ La inclinación: los inclinómetros aportan información utilizando el vector gravedad de los giros entorno a los ejes longitudinal (trimado) y transversal (escora) del vehículo, comparando su medición respecto la línea base.
- ✓ La profundidad: los sensores de profundidad determinan la distancia del vehículo hasta la superficie midiendo la presión hidrostática. También utiliza el DVL, que se basa, como se ha descrito, en métodos acústicos para determinar por una parte la profundidad del vehículo respecto de la superficie y por otra parte la altura al fondo. Por tanto sumando ambas se obtiene la profundidad total de la zona en la que esté navegando el vehículo.

Identificación de los elementos del vehículo relacionados:

DVL: se trata del cuerpo a proa del cilindro amarillo, incluye el DVL que permite al vehículo posicionarse en el fondo y superficie, el sensor de presión y los elementos dedicados a la decodificación de las señales de los sensores del cabezal. Dispone además del orificio para realizar la prueba de vacío del vehículo, realizada antes de cada inmersión cuando el vehículo ha sido abierto por alguna de sus partes.

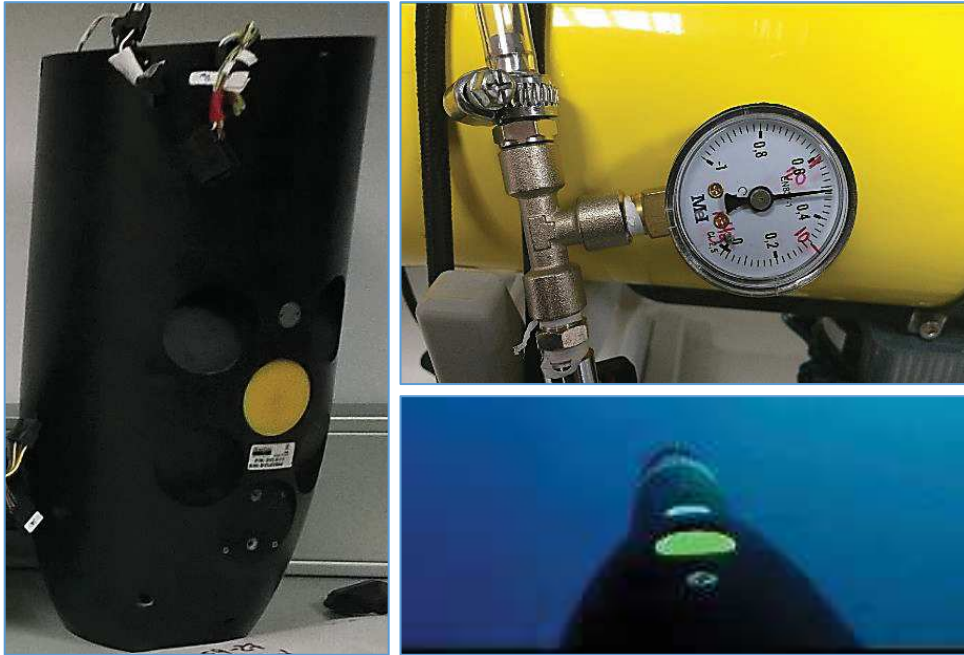


Imagen 45. DVL y manómetro de la prueba de vacío.



Imagen 46. Sensor de presión

4.6. Sensores

Los sensores se encargan de recoger la información del medio con una frecuencia de muestreo determinada y transmitirla a los sistemas de almacenamiento electrónicos, que normalmente consisten en discos duros o en tarjetas de memoria. Las características que se les exigen a estos sensores son la versatilidad, la rapidez, el bajo consumo, un tamaño reducido y un alto rendimiento.

Se pueden distinguir diferentes tipos de sensores, según si miden información interna o externa al vehículo. Un ejemplo de los sensores internos son los encargados del posicionamiento y que son una ayuda a la navegación, como por ejemplo el DVL, el sensor de profundidad, la brújula, los inclinómetros o los acelerómetros. Otros sensores internos miden factores como la temperatura interna o la humedad que están relacionados con la protección de la electrónica del vehículo y su integridad.

Los sensores de medición de parámetros externos o ambientales son aquellos relacionados con el desarrollo de la misión y que se dedican a la medición de clorofila, el oxígeno disuelto, la turbidez, la temperatura, la salinidad y conductividad del agua, la rodamina o los hidrocarburos por ejemplo. A continuación se definen algunos de ellos:

- ✓ El sensor de **presión** es un sensor interno que determina la profundidad en base a la presión hidrostática recibida por el vehículo en inmersión y que depende directamente de la altura de la columna de agua. La presión actúa sobre una membrana elástica, que convierte la flexión en una señal eléctrica mediante un transductor. El transductor suele ser del tipo piezorresistivo, por lo que su resistencia eléctrica cambia según la compresión que lo deforma. Conocidas las características del material, se puede relacionar la deformación recibida con la señal eléctrica que sale del transductor obteniendo la profundidad del vehículo.
- ✓ El sensor de **inundación**, es un sensor interno que informa al ordenador de a bordo un fallo en la estanqueidad en el vehículo, señal de que se está produciendo una vía de agua que puede comprometer su seguridad. En AUV es común utilizar un sensor **de humedad** que mide el ambiente del interior del vehículo. Existen varios tipos: los de conductividad actúan en presencia de agua salina, los capacitivos están basados en el cambio de la capacidad del condensador en presencia de la humedad y los resistivos, que se basan en el principio de que cuanto más cantidad de agua hay en la muestra mayor es su conductividad.
- ✓ Los sensores de consumo eléctrico son los **voltímetros y amperímetros**, que son sensores internos que miden el voltaje (en V) y la intensidad (en A) de los equipos eléctricos como los motores y baterías a fin de regular el consumo de éstos y determinar la autonomía que le resta al vehículo.
- ✓ El sensor de **temperatura interna** es un dispositivo interno ubicado en la zona de la electrónica y se encarga de controlar la temperatura, debido a que el efecto Joule el paso de la electricidad tiende a aumentar la temperatura y es una zona cuya refrigeración es crítica para asegurar el correcto funcionamiento de los elementos instalados. Suele tener asociada una alarma de sobretemperatura y dispone de uno o varios ventiladores para forzar la circulación del aire, bajando la temperatura que suele concentrarse en los procesadores. En estos sensores la tensión de salida es proporcional a la temperatura y su respuesta está calibrada de forma lineal.

En el caso del sensor de **temperatura externa** el principio es el mismo pero ubicado en el exterior del vehículo para medir la temperatura del agua, en cuyo caso requiere un refuerzo adicional para soportar la presión.

- ✓ El sensor de **conductividad** (en mS/cm) y el de **salinidad** (en ppt) son sensores externos que suelen ir asociados al sensor de **temperatura**, en lo que se conoce como un sensor **CTD**. Este tipo de sensor se basa en la relación que existe entre la conductividad y la temperatura para obtener la salinidad, porque es la concentración de sales y minerales las que determinan la conductividad del fluido (el agua pura no es conductora, por lo que aumentar las sales aumenta la conductividad). Conocida la proporción de sales que hay en el océano, se puede determinar la concentración de las mismas en las muestras que va tomando el vehículo.
- ✓ El sensor de **turbidez** es un sensor externo que mide los sólidos en suspensión del agua (en NTU), mediante un sistema óptico que mide la cantidad de luz recibida a través del agua.
- ✓ El sensor de **clorofila o de fluorometría** es un sensor externo que mide la pigmentación (en $\mu\text{g/L}$) verde de la clorofila, que absorbe la radiación solar para realizar la fotosíntesis en las células vegetales, algas y cianobacterias. Para realizar la medición de la clorofila se utiliza el concepto de la fluorescencia: un sensor utiliza un LED de excitación y un lector de respuesta mide la fluorescencia emitida y filtrada por el medio. Finalmente, esa información se convierte en una señal eléctrica que es proporcional a la concentración del medio.
- ✓ El sensor de **rodamina** y el sensor de **hidrocarburos** están basados en el mismo principio de la fluorometría. Cada uno de estos compuestos tiene un color y una longitud de onda diferentes, que cada sensor debe capturar para determinar su concentración.
- ✓ El sensor de **Oxígeno Disuelto y Ozono (ODO)** es un sensor externo fluorométrico que mide la concentración de oxígeno (en mg/L o en % saturación); puede ser un sensor galvánico, que contiene un ánodo y cátodo de tal forma que se genera un voltaje potencial que depende del oxígeno disuelto. También puede ser un sensor polarográfico, que es similar al galvánico pero donde la fuente de alimentación es externa.

Identificación de los elementos del vehículo relacionados:

Cabezal del vehículo: El cabezal YSI es el elemento que contiene los sensores de pH, oxígeno disuelto, turbidez, clorofila, conductividad, temperatura del agua, etc. Y es de menor peso y volumen que el cabezal nuevo, que contiene los sensores añadidos en la modificación del AUV original, es decir, los sensores de rodamina.



Imagen 47. Sensor HC (izquierda), sensor YSI (derecha)

4.7. Seguridad

Los sistemas de seguridad son aquellos dispositivos que protegen al vehículo en caso de una emergencia. Estos sistemas están formados por los elementos pasivos y los activos. Dentro de los sistemas pasivos descritos en el apartado anterior, están el sensor de profundidad (alarma de profundidad excesiva o de proximidad al fondo), el sensor de temperatura interna (alarma por sobretemperatura), el sensor de humedad (alarma de vía de agua) y de estado de la batería (alarma de batería baja) que provocan una reacción inmediata del vehículo, que suele provocar la salida a la superficie o impedir que realice la inmersión.

También se incluyen sistemas activos que auxilian al vehículo en caso de emergencia, y que son el pinger, que se encarga de emitir un pitido acústico periódico indicando la posición del vehículo en caso de hundimiento y por otro lado el sistema flotador, que es un sistema tipo airbag que se llena de aire a presión en caso de que el vehículo sobrepase la profundidad máxima o no sea capaz de volver a la superficie por sus propios medios en caso de emergencia.

Identificación de los elementos del vehículo relacionados:

Asa y raíl: el asa es el elemento que permite asir el vehículo para recoger o depositarlo en el agua y el raíl donde se ubican algunos de los elementos auxiliares conectados al AUV, como el USBL, el lastre exterior (en este caso 16 onzas), etc.



Imagen 48. Asa y raíl

4.8. Comunicaciones

Las comunicaciones con los vehículos se realizan mediante medios inalámbricos que dependen del medio en el que se encuentre el vehículo. En superficie, el vehículo se comunica mediante ondas de radio o mediante redes inalámbricas tipo Wi-fi, cuyo alcance depende de la antena y el estado del mar. En estas comunicaciones se transmiten las instrucciones de la nueva misión y se recibe el estado del vehículo y los resultados de la misión ya realizada.

Cuando el vehículo se encuentra en inmersión estos medios no son válidos debido a que las frecuencias utilizadas no traspasan el medio acuático, por lo que se utilizan medios de transmisión acústicas como el USBL o el módem acústico, que permite la comunicación bidireccional con el buque. Este sistema también permite el control manual del vehículo por un operador externo.

Identificación de los elementos del vehículo relacionados:

Antena: la antena se extrajo completamente de la zona del cilindro amarillo y se pesó de forma independiente. Contiene la única conexión con el exterior del vehículo para comunicaciones (wi-Fi, GPS, Iridium, etc.) y la carga de baterías.



Imagen 49. Antena con la conexión para carga de baterías.

USBL y módem acústico: estos dispositivos están ubicados en la zona inferior del AUV en el raíl metálico, permitiendo ubicar el vehículo bajo el agua y las comunicaciones bidireccionalmente con el buque de soporte.



Imagen 50. USBL (izquierda) y módem acústico instalado en el vehículo (derecha)

4.9. Balance de pesos

Paso previo a la colocación de la Sonda Multihaz y al cálculo CFD, es necesario mostrar el balance de pesos del vehículo realizado para tres condiciones reales cuyas características particulares de cada modelo se detallan a continuación junto con la descripción de las simplificaciones asumidas en este estudio.

Como se ha venido describiendo a lo largo de los capítulos anteriores, las diferentes versiones de configuración del vehículo se deben fundamentalmente al cambio de instrumentación que se le practica al vehículo para realizar los diferentes perfiles de misiones (instrumentación YSI, instrumentación para la detección de hidrocarburos y Rodamina o sin instrumentación). Con el cambio de instrumentación va asociado un cambio en el lastre del vehículo y del balance de pesos general. Con esta información, se obtiene un punto de partida real con el que realizar el nuevo balance una vez añadido la Sonda Multihaz.

Por tanto el primer paso será describir cada una de las tres configuraciones del vehículo, identificar sus elementos y realizar el balance de pesos, cuya medición se realizó en el laboratorio del departamento de Ingeniería Química y Ambiental. Las primeras mediciones se realizaron aprovechando una de las paradas técnicas del vehículo en noviembre de 2014 y durante las sucesivas modificaciones que fueron realizadas durante el año 2015, donde se desmontó en gran medida y se pudieron pesar individualmente gran parte de los elementos. Estas tareas de mantenimiento y mejora también incluyeron varias pruebas en tanque de agua salada para comprobar y validar los resultados obtenidos.

Realizar un buen balance de pesos es fundamental para el adecuado comportamiento en la mar del vehículo. Debido a las reducidas dimensiones del vehículo y el empacho de sus elementos, es muy sensible a cualquier pequeño cambio de pesos, por lo que teniendo en cuenta que el traslado de pesos no se puede realizar en las posiciones óptimas debido al poco espacio disponible en su interior, cualquier cambio influye y debe estudiarse con detenimiento para no mermar la operatividad. Esto se traduce en que el balance es crítico ya que de lo contrario el software no permitirá realizar la inmersión del vehículo.

Por ello, una vez definidos los pesos de cada una de las configuraciones del vehículo y obtenido sus respectivos centros de gravedad, será necesario realizar un proceso iterativo actuando sobre el lastre del vehículo (peso del cabezal, pesos en el rail y peso interior fijado en el cilindro) modificando con ello el centro de gravedad con el fin de conseguir no solo el calado deseado (obtenido gracias a los diferentes volúmenes extraídos con Rhinoceros) sino también un trimado aceptable.

Debe tenerse en cuenta, como se ha citado anteriormente, que se cambió la cola del vehículo debido al desgaste del cojinete de la hélice y las pequeñas filtraciones de agua en inmersión. Esta reparación supuso un aumento de peso de 1 kg con respecto al vehículo original. Este aumento se ve reflejado ya en el balance de pesos, por lo que en este estudio se proponen un conjunto de lastres que el vehículo real aún no ha incorporado, pero que se recomiendan para asegurar su correcto funcionamiento en base al balance obtenido.

Los elementos del vehículo sobre los que se actúa en el balance de pesos, se describen brevemente a continuación:

Lastre Proa: lastre colocado en el interior del vehículo con el fin de bajar el centro de gravedad, ha sido desplazado lo más a proa posible en este análisis para contrarrestar el aumento de peso de la popa.



Imagen 51. Lastre instalado en el cilindro de la electrónica

Lastre Cabezal: el lastre del cabezal se introdujo como consecuencia del incremento de flotabilidad aparecida al añadir el nuevo cabezal, necesario para que el AUV pudiera sumergirse con normalidad bajo el agua. De igual forma, como consecuencia del aumento de peso en la cola del vehículo deberá adaptarse un lastre en el cabezal para cada una de las condiciones.

En el vehículo sin instrumentación en el cabezal (V^*) el lastre fijado es de bronce (densidad $8,90 \text{ g/cm}^3$) de 885 g de peso (ver Imagen 54).

En el vehículo V_{VSI} , no se instala lastre a proa ya que la carcasa que protege los sensores es abierta y permite la libre circulación de agua. Puesto que en Rhinoceros se ha considerado la carcasa como un volumen cerrado (de cara a simplificar la simulación CFD), se debe sustituir el empuje perdido con la entrada de agua por su peso equivalente. Esto reemplaza al lastre que debería añadirse en el caso de que la carcasa estuviese cerrada (ver Imagen 57).

Finalmente, en el vehículo V_{HC} (con la instrumentación de hidrocarburos) el vehículo dispone de un lastre de bronce fijado mediante rosca de 860 gr (ver la imagen a continuación e Imagen 60).



Imagen 52. Lastre roscado en el cabezal del vehículo V_{HC}

Plomo en el raíl: en todos los casos se han mantenido 16 onzas en el raíl del vehículo.



Imagen 53. 16 onzas de plomo en el raíl del vehículo

4.9.1. Vehículo sin instrumentación (V*)

El vehículo V* corresponde a la configuración sin ningún sensor en el cabezal (sin instrumentación):

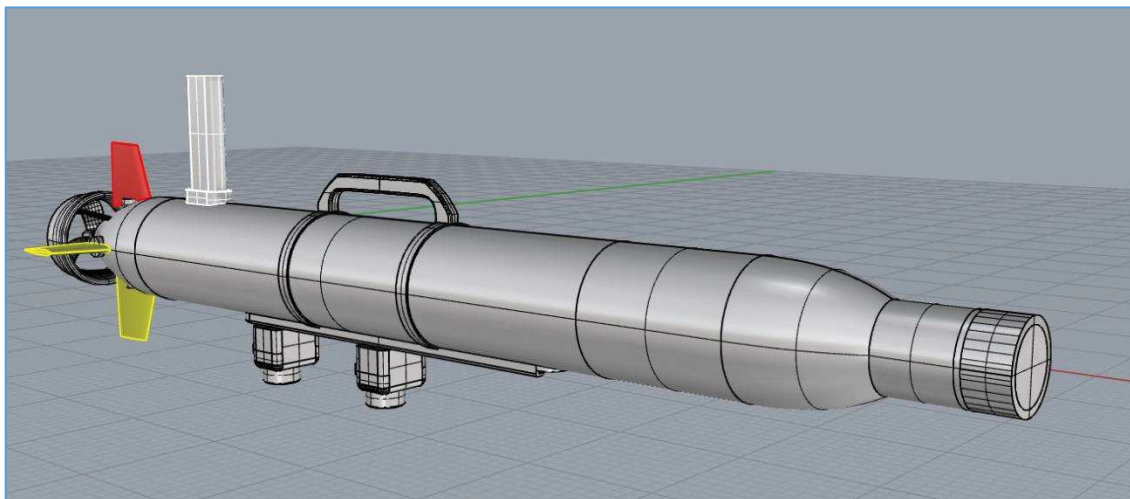


Imagen 54. 3D vehículo V*

Se muestra a continuación la tabla resultante, teniendo en cuenta que la posición longitudinal del centro de gravedad (XG) se toma respecto del extremo de popa y las posiciones transversal (YG) y vertical (ZG) respecto el centro geométrico del cilindro:

Elemento	Peso (g)	x (cm)	y (cm)	z (cm)	FX	FY	FZ
Antena	503,7	25,21	0,00	12,25	12.698,28	0,00	6.170,33
Lastre Proa	1.016,6	84,67	0,00	-4,56	86.075,52	0,00	-4.635,70
DVL	3.630,0	115,25	0,00	0,00	418.357,50	0,00	0,00
Cuerpo popa	5.100,0	6,25	0,00	-1,10	31.875,00	0,00	-5.610,00
Cilindro amarillo	2.880,0	68,55	0,00	0,00	197.424,00	0,00	0,00
Raíl	393,7	63,04	0,00	-7,38	24.818,85	0,00	-2.905,51
Sujeciones lastre móvil	23,8	40,03	0,00	-8,23	975,80	0,00	-195,87
Asa	233,5	62,63	0,00	10,89	14.624,11	0,00	2.542,82
Cilindro electrónica	7.590,0	66,85	0,00	-2,77	507.391,50	0,00	-21.024,30
Tapa del cabezal sin sensores	160,0	142,74	0,00	0,00	22.838,40	0,00	0,00
Cabezal sin sensores	420,0	135,46	0,00	0,00	56.893,20	0,00	0,00
Lastre en el cabezal	885	142,30	0,00	0,00	125.935,50	0,00	0,00
USBL	460,0	41,24	0,00	-12,08	18.970,40	0,00	-5.556,80
Modem Acústico	460,0	56,72	0,00	-12,08	26.091,20	0,00	-5.556,80
16 onzas en rail	452,8	90,00	0,00	-7,40	40.752,00	0,00	-3.350,72

Tabla 15: Tabla de pesos del vehículo

Peso total	24.209,1	g
Suma FX	1.630.721,25	g · cm
Suma FY	0,00	g · cm
Suma FZ	-44.758,26	g · cm

Tabla 16: Tabla de pesos del vehículo

Por tanto la posición del centro de gravedad será:

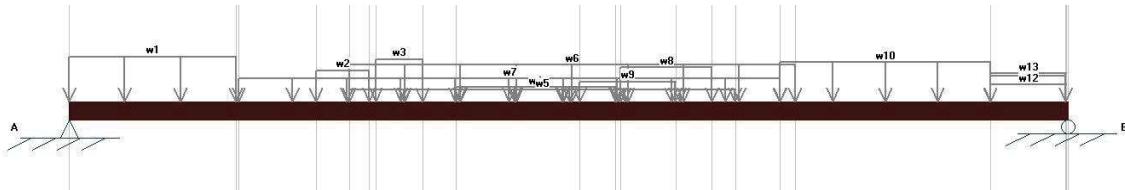
$$XG = \frac{\sum FX}{\sum P} = \frac{1.630.721,25}{24.209,1} = 67,35 \text{ cm}; YG = 0 \text{ cm}$$

$$ZG = \frac{\sum FZ}{\sum P} = \frac{-44.758,256}{24.209,1} = -1,84 \text{ cm}$$

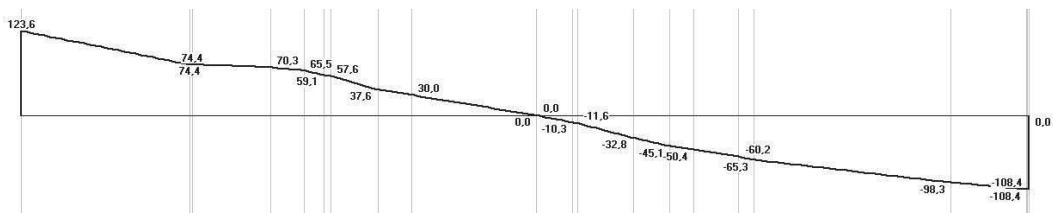
Donde, FX = sumatorio de momentos en g · cm, P = sumatorio de pesos en g, αG = posición centro gravedad en cm

Tabla 17: Posición del centro de gravedad del v*

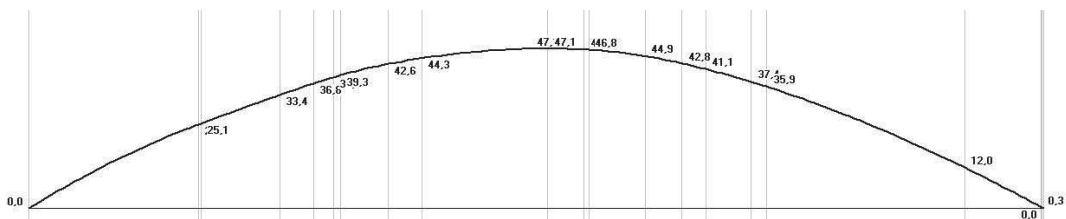
Y las curvas de pesos, cargas y momentos simplificados son las siguientes:



Gráfica 1: Curva de pesos



Gráfica 2: Curva de cargas



Gráfica 3: Curva de momentos

Se define como reserva de flotabilidad la relación entre el empuje del volumen desplazado por el vehículo y el peso del mismo. En cualquier vehículo de estas características, lo deseable es que el vehículo tenga una flotabilidad positiva (aunque sea pequeña), por dos razones: la primera y fundamental es relativa a la seguridad, ya que en pruebas o en fallo eléctrico o mecánico, el vehículo tiende a subir solo a superficie donde puede ser recuperado (siempre que no se haya quedado enganchado en el fondo); la otra razón es una cuestión energética, ya que se invierte más energía en mantener el vehículo con flotabilidad positiva para evitar que se precipite hacia el fondo.

En la siguiente figura se muestra la flotabilidad del vehículo (v^*) cuyo volumen desplazado es el obtenido mediante el modelo 3D de Rhinoceros con un calado de 13.93 cm y un centro de carena situado en $X_C = 67.68$ cm respecto del extremo de popa, resultando por tanto un ligero trimado apopante.

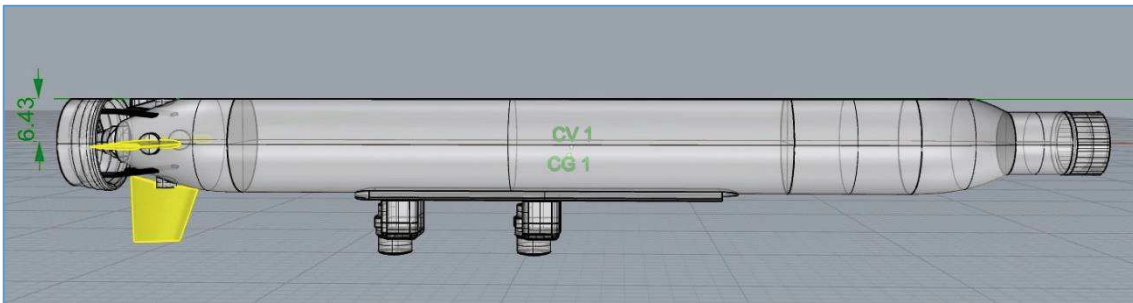


Imagen 55. Centros de gravedad y volumen. Vehículo V^*

$$\text{Reserva flotabilidad} = E_e - P = 25.194,73 - 24.209,1 = 985,63 \text{ g (3.91\%)}$$

E_e = volumen desplazado, en g; P = Peso, en g

4.9.2. Vehículo con la instrumentación del YSI (V_{YSI})

El vehículo V_{YSI} corresponde a la configuración con los sensores YSI en el cabezal:

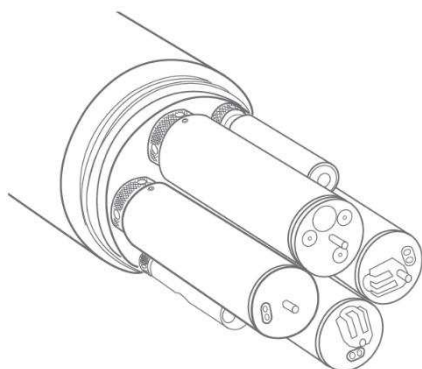


Imagen 56. Sensores YSI

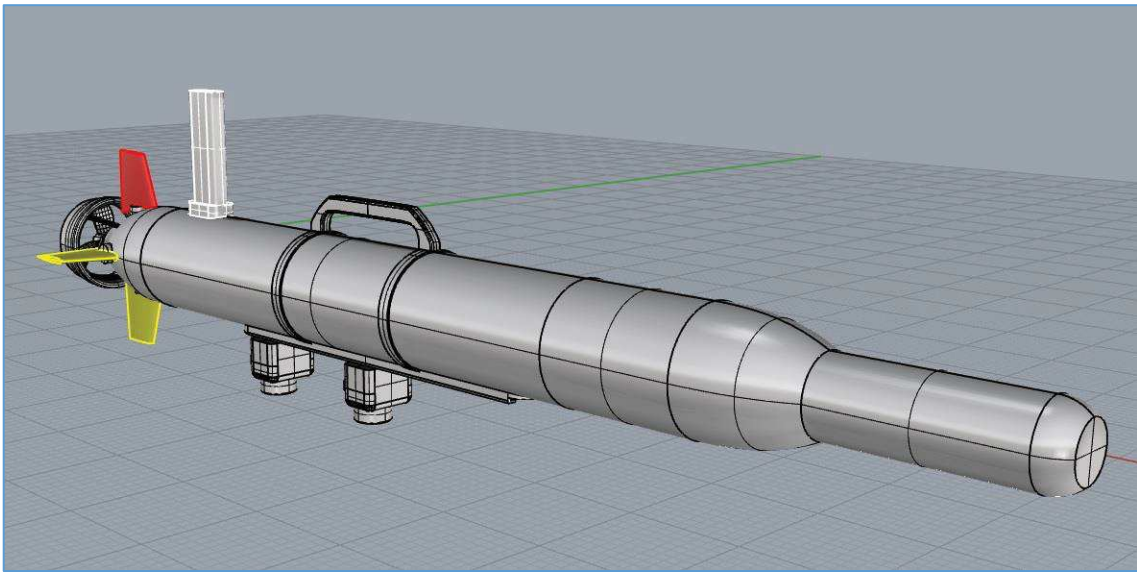


Imagen 57. 3D vehículo V_{YSI}

Se muestra a continuación la tabla resultante del balance de pesos, teniendo en cuenta que la posición longitudinal del centro de gravedad (XG) se toma respecto del extremo de popa y las posiciones transversal (YG) y vertical (ZG) respecto el centro geométrico del cilindro:

Elemento	Peso (g)	x (cm)	y (cm)	z (cm)	FX	FY	FZ
Antena	503,7	25,21	0,00	12,25	12.698,28	0,00	6.170,33
Lastre Proa	1.016,6	84,67	0,00	-4,56	86.075,52	0,00	-4.635,70
DVL	3.630,0	115,25	0,00	0,00	418.357,50	0,00	0,00
Cuerpo popa	5.100,0	6,25	0,00	-1,10	31.875,00	0,00	-5.610,00
Cilindro amarillo	2.880,0	68,55	0,00	0,00	197.424,00	0,00	0,00
Raíl	393,7	63,04	0,00	-7,38	24.818,85	0,00	-2.905,51
Sujeciones lastre móvil	23,8	60,04	0,00	-8,23	1.428,00	0,00	-195,87
Asa	233,5	62,63	0,00	10,89	14.624,11	0,00	2.542,82
Cilindro electrónica	7.590,0	66,85	0,00	-2,77	507.391,50	0,00	-21.024,30
Protector cabezal	860,0	155,34	0,00	0,00	133.592,40	0,00	0,00
Cabezal YSI	1.370,0	148,54	0,00	0,00	203.499,80	0,00	0,00
Modem Acústico	460,0	56,72	0,00	-12,08	26.091,20	0,00	-5.556,80
USBL	460,0	41,24	0,00	-12,08	18.970,40	0,00	-5.556,80
16 onzas en rail	452,8	90,00	0,00	-7,40	40.752,00	0,00	-3.350,72

Tabla 18: Tabla de pesos del vehículo

Peso total	24.974,10	g
Suma FX	1.762.598,55	g · cm
Suma FY	0	g · cm
Suma FZ	-44.758,26	g · cm

Tabla 19: Tabla de pesos del vehículo

Variación Operacional de un AUV

Por tanto la posición del centro de gravedad será:

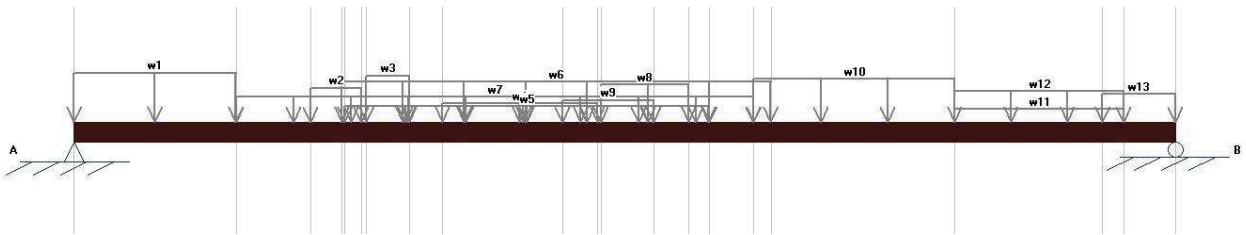
$$XG = \frac{\sum FX}{\sum P} = \frac{1.762.598,55}{24.974,10} = 70,57 \text{ cm}; \quad YG = 0 \text{ cm}$$

$$ZG = \frac{\sum FZ}{\sum P} = \frac{-44.758,26}{24.974,10} = -1,79 \text{ cm}$$

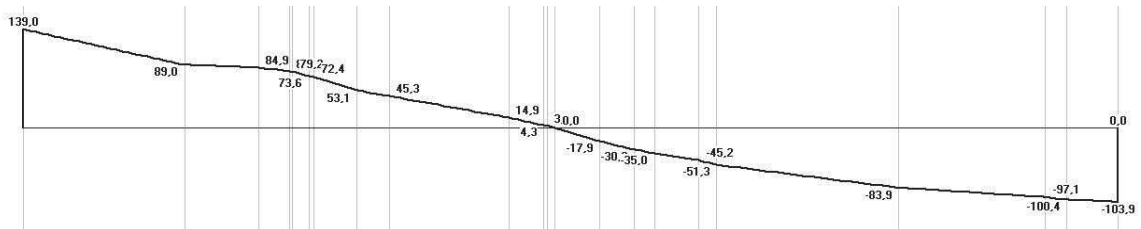
Donde, FX = sumatorio de momentos en $g \cdot \text{cm}$, P = sumatorio de pesos en g , αG = posición centro gravedad en cm

Tabla 20: Posición del centro de gravedad del V_{YSI}

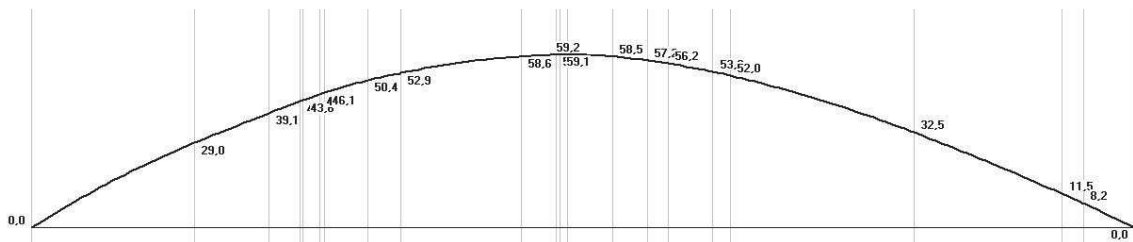
Y las curvas de pesos, cargas y momentos simplificados son las siguientes:



Gráfica 4: Curva de pesos



Gráfica 5: Curva de cargas



Gráfica 6: Curva de momentos

En la siguiente figura se muestra la flotabilidad del vehículo (V_{YSI}) cuyo volumen desplazado es el obtenido mediante el modelo 3D de Rhinoceros con un calado de 13,97 cm y un centro de carena situado en $XC= 70.69 \text{ cm}$ respecto del extremo de popa.

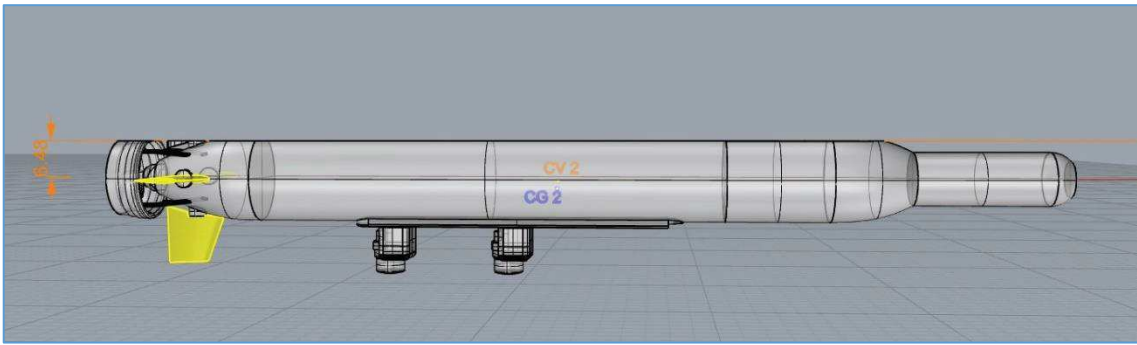


Imagen 58. Centros de gravedad y volumen. Vehículo V_{YSI}

$$\text{Reserva flotabilidad} = E_e - P = 26.103,74 - 24.974,10 = 1.129,64 \text{ g (4,32\%)}$$

E_e = volumen desplazado, en g; P = Peso, en g

4.9.3. Vehículo con la instrumentación de hidrocarburos (V_{HC})

Finalmente, la configuración del vehículo V_{HC} corresponde con la instrumentación de rodamina e hidrocarburos, e incluye un lastre de bronce en proa:



Imagen 59. Calibrado del sensor de rodamina

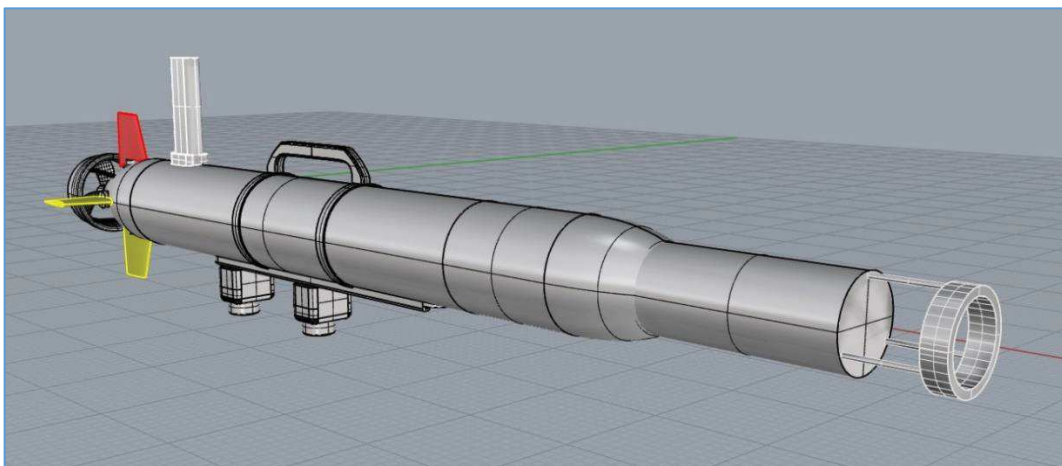


Imagen 60. 3D vehículo V_{HC}

Variación Operacional de un AUV

Se muestra a continuación la tabla resultante, teniendo en cuenta que la posición longitudinal del centro de gravedad (XG) se toma respecto del extremo de popa y las posiciones transversal (YG) y vertical (ZG) respecto el centro geométrico del cilindro:

Elemento	Peso (g)	x (cm)	y (cm)	z (cm)	FX	FY	FZ
Antena	503,7	25,21	0,00	12,25	12.698,28	0,00	6.170,33
Lastre Proa	1.016,6	84,67	0,00	-4,56	86.075,52	0,00	-4.635,70
DVL	3.630,0	115,25	0,00	0,00	418.357,50	0,00	0,00
Cuerpo popa	5.100,0	6,25	0,00	-1,10	31.875,00	0,00	-5.610,00
Cilindro amarillo	2.880,0	68,55	0,00	0,00	197.424,00	0,00	0,00
Raíl	393,7	63,04	0,00	-7,38	24.818,85	0,00	-2.905,51
Sujeciones lastre móvil	23,8	60,04	0,00	-8,23	1.428,00	0,00	-195,87
Asa	233,5	62,63	0,00	10,89	14.624,11	0,00	2.542,82
Cilindro electrónica	7.590,0	66,85	0,00	-2,77	507.391,50	0,00	-21.024,30
Cabezal HC	1790,0	147,38	0,00	0,00	263810,20	0,00	0,00
Lastre del cabezal	860,0	155,68	0,00	0,00	133.844,80	0,00	0,00
Modem Acústico	460,0	56,72	0,00	-12,08	26.091,20	0,00	-5.556,80
USBL	460,0	41,24	0,00	-12,08	18.970,40	0,00	-5.556,80
16 onzas en rail	452,8	90,00	0,00	-7,40	40.752,00	0,00	-3.350,72

Tabla 21: Tabla de pesos del vehículo

Peso total	25.394,1	g
Suma FX	1.783.748,35	g · cm
Suma FY	0	g · cm
Suma FZ	-44.122,56	g · cm

Tabla 22: Tabla de pesos del vehículo

Por tanto la posición del centro de gravedad será:

$$XG = \frac{\sum FX}{\sum P} = \frac{1.783.748,35}{25.394,1} = 70,24 \text{ cm}; \quad YG = 0 \text{ cm}$$

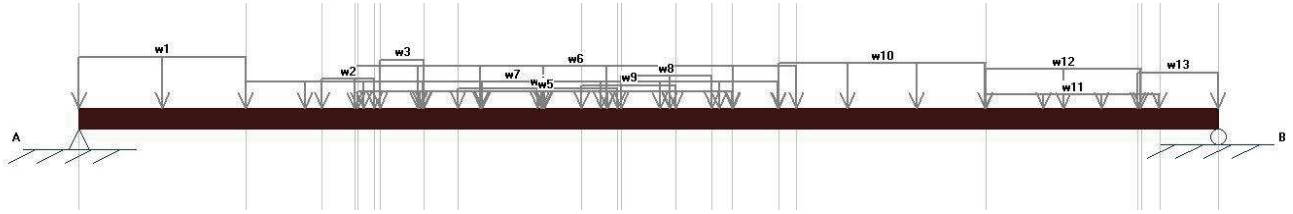
$$ZG = \frac{\sum FZ}{\sum P} = \frac{-44.122,56}{25.394,1} = -1,58 \text{ cm}$$

FX = sumatorio de momentos en g · cm, P = sumatorio de pesos en g, αG = posición centro gravedad en cm

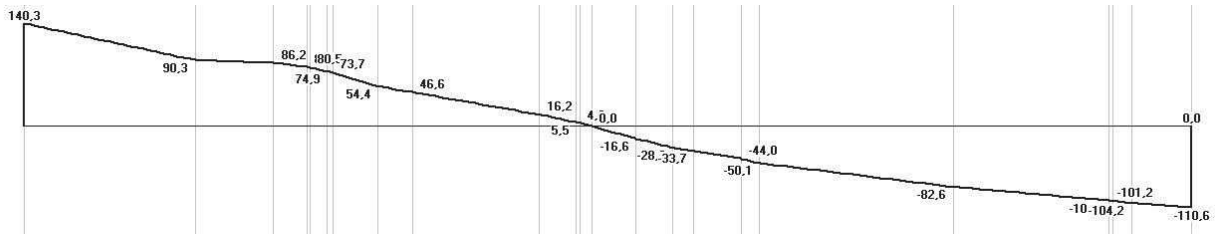
Tabla 23: Posición del centro de gravedad del V_{HC}

Variación Operacional de un AUV

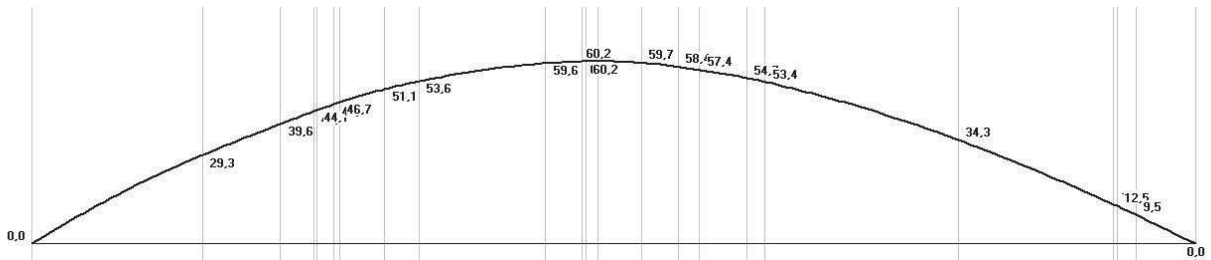
Y las curvas de pesos, cargas y momentos simplificadas son las siguientes:



Gráfica 7: Curva de pesos



Gráfica 8: Curva de cargas



Gráfica 9: Curva de momentos

En la siguiente figura se muestra la flotabilidad del vehículo (V_{HC}) cuyo volumen desplazado es el obtenido mediante el modelo 3D de Rhinoceros con un calado de 13,82 cm y un centro de carena situado en $XC= 71.2$ cm respecto del extremo de popa, resultando por tanto un ligero trimado apopante.

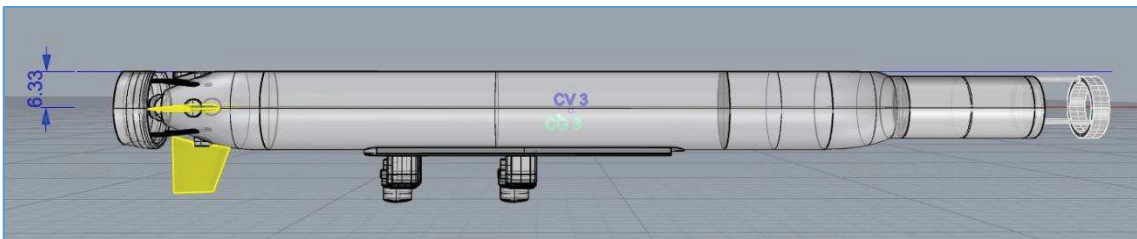


Imagen 61. Centros de gravedad y volumen. Vehículo V_{HC}

$$\text{Reserva flotabilidad} = E_e - P = 26.636,84 - 25.394,1 = 1.242,74 \text{ g (4,66\%)}$$

E_e = volumen desplazado, en g; P = Peso, en g

5. El nuevo diseño y funcionalidad

5.1. Introducción

En este capítulo se describe con detalle la sonda de estudio, seleccionada por el Departamento como de interés para su instalación en el vehículo. La configuración del vehículo seleccionada para el análisis es la que contiene la instrumentación del YSI, descartando la configuración sin instrumentación (V^*) puesto que no se dispone de datos reales para poder verificar que los resultados de resistencia obtenidos en el análisis CFD son aceptables. Por otro lado, se considera que los sensores del vehículo V_{HC} , no aportan ningún valor añadido al funcionamiento de la sonda, por lo que no se tendrá en cuenta tampoco en el análisis de resistencia al avance, no obstante como ya se ha indicado anteriormente, al disponer de datos reales de consumo para esta configuración, sí se ha estudiado su balance eléctrico.

La sonda escogida es la Wideband de la empresa NORBIT, destinada a la realización de batimetrías de alta resolución y que funciona conjuntamente como sonda multihaz y un sonar de barrido lateral, proporcionando medidas de profundidad y de retrodifusión del fondo, permitiendo realizar imágenes sonar y batimetría a la vez:



Imagen 62. Wideband Multibeam Sonar de Norbit (Fuente: <http://www.norbit.com/>)

El avance tecnológico ha permitido la construcción conjunta de un sistema de sonar de barrido lateral y de sonda multihaz, lo cual ha favorecido las interpretaciones geológicas, dado que permiten identificar con gran precisión si los cambios en la reflectividad del fondo pueden ser causados por variaciones de relieve o de textura.

El registro del nivel de retrodifusión de la señal acústica con el fondo, que depende tanto de la naturaleza del sedimento como de su morfología, permite generar estas imágenes, representando la intensidad recibida respecto a la emitida. En definitiva, la unión del sonar multihaz con el sonar de barrido lateral mejora en gran medida las interpretaciones geológicas ya que se identifica con gran precisión si la causa de los cambios de reflectividad del fondo se

debe a diferentes profundidades o diferentes materiales; para ello en el análisis se superponen las diferentes señales obtenidas con el postprocesado.

Se obtienen por tanto las ventajas del ecosonda multihaz describiendo el relieve subacuático por medio de las isóbatas que serán reflejadas en las cartas batimétricas, y la caracterización de las grandes estructuras geomorfológicas que nos proporciona el sónar de barrido lateral.

Este tipo de instrumentos son sonares ultra compactos diseñados específicamente con un bajo consumo de energía, aspecto crucial para su instalación en el vehículos autónomos submarinos. El equipo seleccionado integra un sensor de velocidad del sonido cumpliendo con las órdenes de la OHI, procesando la señal tanto con frecuencia modulada (FM) como en onda continua (CW). Las características principales del equipo se detallan a continuación:

Sonda Multihaz NORBIT	
Cobertura	140 ° nominal
Rango de resolución	<10 mm
Número de haces	256-512 EA-ED
Frecuencia	400 kHz w/80 kHz ancho de banda
Rango de ping	Mayor a 50 Hz
Rango de profundidad	0,2-275 m
Resolución	0,9° a través, 1,9° a lo largo
Peso	<4,5 kg
Potencia	<28 W
Voltaje	10-28VDC
Interfaz	Ethernet
Profundidad	100 m
Temperaturas de trabajo	-4° C a 40° C
Temperaturas de almacenamiento	-20° C a 60° C

Tabla 24. Características principales

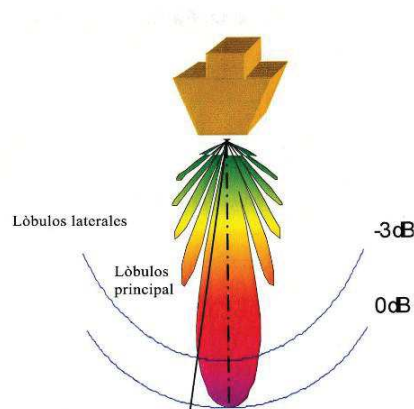
Breve descripción de las características principales:

- ✓ Cobertura: corresponde a la zona insonificada.
- ✓ Rango de resolución: capacidad del sistema para distinguir dos objetos cercanos, depende de la anchura del haz, cuanto más fino mayor es su resolución.
- ✓ Número de haces: EA (equiangular): el ángulo entre el eje de dos haces consecutivos es constante, el usuario define el número de haces. ED (equidistante): la distancia entre los centros de los haces es constante.
- ✓ Frecuencia: determina el alcance y la penetración del sonido en los sedimentos.
- ✓ Rango de ping: determina la duración del impulso emitido. Cuanto mayor es la duración del impulso, mayor es el alcance pero menor resolución. La cadencia de emisión es el tiempo transcurrido entre dos pings consecutivos.

- ✓ Rango de profundidad (alcance): profundidad límite a partir de la cual el sistema es incapaz de dar mediciones confiables.
- ✓ Resolución: A lo largo: es la anchura angular longitudinal del haz de emisión. A través: es la anchura angular de cada haz de recepción su valor suele estar entre 1 y 5 grados.

Los parámetros que determinan las características principales de la Sonda Multihaz son:

- ✓ La frecuencia: que determina el alcance, el tamaño del transductor y la resolución espacial.
- ✓ Tipo de transductores: magnetostrictivo (eje de hierro con espiral de níquel que se contrae al paso de la electricidad), piezoeléctrico (el cuarzo varía su grosor al paso del potencial eléctrico) y electrostrictivo (de cerámicas policristalinas o polímeros sintéticos polarizados)
- ✓ La precisión final dependerá en parte de la precisión de la sonda (medida de ángulos y distancia) y en parte de la precisión de los sensores auxiliares (sistemas de posicionamiento, velocidad del sonido, altitud, etc.)
- ✓ El ancho del haz: depende de la longitud de onda y del tamaño del transductor. Para haces del mismo ancho las bajas frecuencias requieren un transductor más grande. Durante la transmisión a menor ancho de banda mayor calidad del transductor. Durante la recepción, no obstante interesa una calidad baja con el fin de mejorar la discriminación de los ecos de cualquier otra señal. Los haces anchos se usan para identificar riesgos en la navegación y los angostos para un trazado de alta resolución.
- ✓ El nivel de lóbulos laterales: tienen efectos indeseables, su reducción se consigue mediante funciones de sombreado.



5.2. Comparativa de sondas en el mercado

Adicionalmente a la sonda escogida por el Departamento como candidata a ser instalada en el vehículo, se ha realizado un sondeo en el mercado con el fin de evaluar otras alternativas a la misma analizando brevemente su idoneidad versus la sonda seleccionada.

La primera opción evaluada la proporciona el fabricante Kongsberg con el modelo Mesotech M3 Sonar® que es una sonda multihaz con capacidad de generación de imágenes y perfiles de profundidad. Según el fabricante puede detectar objetos pequeños a 150 metros combinándolo con un campo de visión de 120 ° a 140 ° que permite al operador ver la imagen del fondo completa en tiempo real. Tiene además un bajo peso y un bajo consumo ideal para ser instalado en un vehículo submarino. Sus dimensiones son menores al de Norbit por lo que lo hace un posible candidato alternativo a la Sonda Multihaz estudiada.

P/N 922-20130000

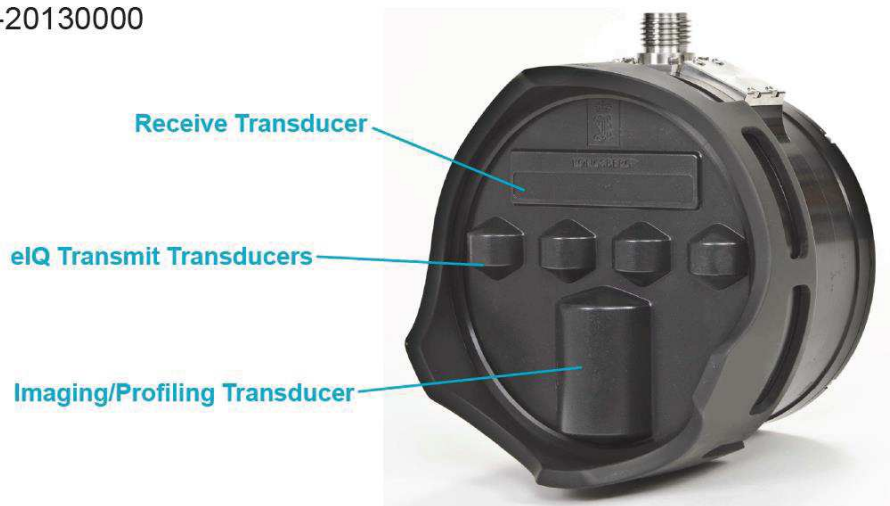


Imagen 63. Mesotech M3 Sonar® (Fuente: Kongsberg)

La segunda opción también es de Kongsberg, que ofrece también el GeoSwath Plus AUV, con un bajo consumo de energía. Se trata de un módulo de electrónica al que se le pueden conectar sensores de control y periféricos del AUV mediante conexiones Ethernet y Serial. Los transductores se pueden montar directamente en el módulo o en una posición alternativa en el vehículo, además de estar disponible en tres frecuencias distintas de operación, lo que ofrece gran versatilidad. El paquete de software GS4 incluye capacidades completas de adquisición, calibración y procesamiento de datos para producir el mapa de batimetría final y las imágenes del barrido lateral. No obstante su peso y dimensiones son elevados, por lo que difícilmente puede ser una opción para el AUV objeto de estudio.

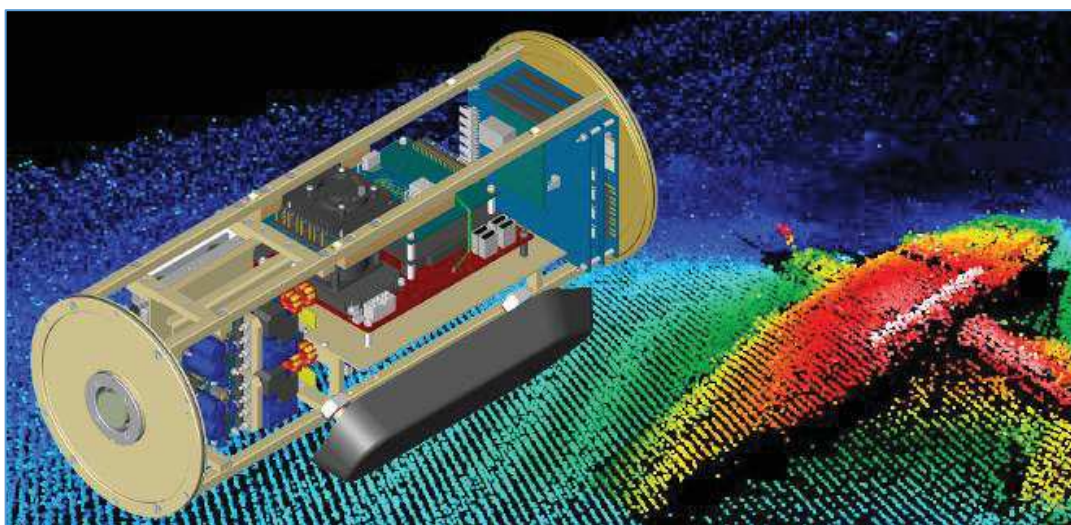


Imagen 64. GeoSwath Plus AUV. (Fuente: Kongsberg)

La tercera opción es de la empresa EdgeTech fabrica un dispositivo similar al anterior, el 6205, adaptado para el cumplimiento de la norma IHO. Incluye sensor de velocidad del sonido, giróscopos, sistema de navegación inercial, GPS entre otros. No obstante su peso y consumo son elevados para su instalación en el vehículo de estudio.

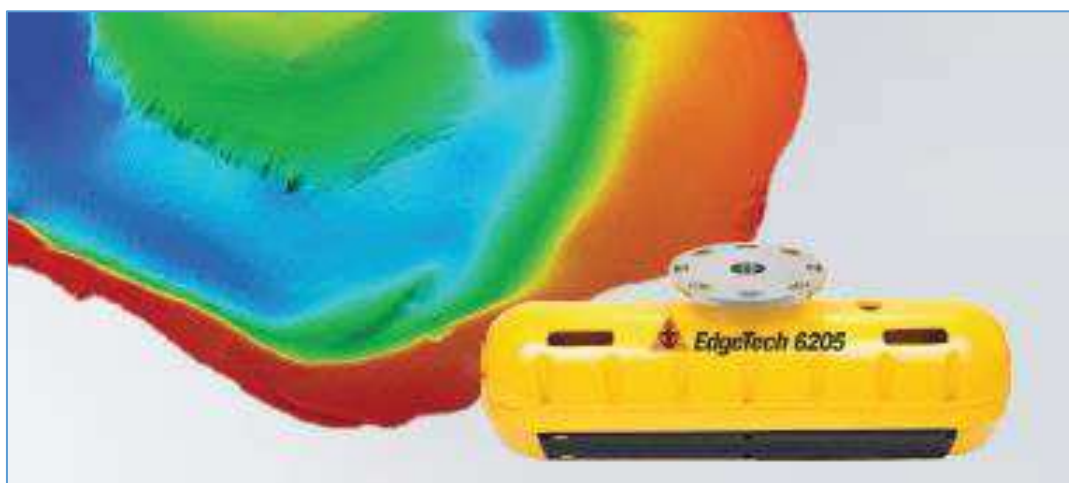


Imagen 65. EdgeTech 6205 (Fuente: EdgeTech)

Finalmente, la cuarta alternativa evaluada es el Seabat 7125 de la empresa Teledyne RESON, diseñado específicamente para su instalación en AUV. No obstante su peso y consumo siguen siendo elevados para el caso de estudio. A pesar de que en las especificaciones del fabricante no se incluyen los consumos eléctricos para la versión de reducida para AUV, es de esperar que el consumo sea el más elevado de todos puesto que en sus otras versiones de ROV y en superficie el consumo máximo alcanza los 250 W. No obstante, si se alargara el vehículo podría ser una opción viable colocando más baterías, ya que sus dimensiones podrían encajar en el vehículo sin perder tanta resistencia al avance manteniendo por tanto su forma hidrodinámica.



Imagen 66. SeaBat 7125 (Fuente: Teledyne)

Se adjunta a continuación el resumen de las sondas multihaz con funciones sonar analizadas:

Marca	Modelo	Capacidad	Rango	Profundidad	Peso	Consumo
Norbit	WBMS	MB + SSS	0,2 – 275 m	100 – 900 m	4,5 Kg	28 W
Kongsberg	M3 – 500	MB + SSS	0,2 – 150 m	500 m	4,7 Kg	22 W
Kongsberg	GEOSWATH	MB + SSS	0 – 190 m	100 m	12 Kg	50 W
Edgetech	6205	MB + SSS	0 – 250 m	50 m	19,9 Kg	55 W
Seabat	7125	MB + SSS	0,5 – 150 m	175 – 45 m	10,7+2,7 kg	-

Tabla 25. Resumen de características

La conclusión de esta selección es que la sonda escogida por el Departamento es la adecuada para el vehículo, por lo que no se realizará ningún estudio adicional con las sondas anteriores. Sin embargo, se produce una situación de desequilibrio entre el peso del equipo y el empuje en el agua, por lo que como se detallará en el apartado siguiente, es necesario aportar un extra al vehículo para que funcione con las condiciones óptimas.

5.3. Diseño

Para la instalación de la Sonda Multihaz en el vehículo se parte del vehículo con la instrumentación del YSI (V_{ysi}). Tras esta selección, el siguiente paso es colocar la Sonda Multihaz mientras se realiza un proceso iterativo con el balance de pesos para conseguir que el diseño mantenga al vehículo con flotabilidad positiva y un trimado aceptable, y además sea fácil de instalar y mantener.

Tras un primer análisis, se opta por colocar la Sonda Multihaz fuera del cilindro amarillo, ya que su diámetro supera al del vehículo (ver dimensiones en 6.3.2 sobre el modelado), además esta opción requeriría la instalación de pasacables externos, ya que por la geometría del elemento taponaría el paso del cableado por el casco interior, tanto a proa (conexión del DVL y los sensores) como en popa (el motor de cola y las aletas), respectivamente.

En las imágenes siguientes se pueden ver dos diseños preliminares que pretendían instalar la Sonda Multihaz dentro del casco resistente del vehículo añadiéndole una sección de geometría variable. En la Imagen 67 para mantener las condiciones óptimas de funcionamiento de la sonda se ha generado una superficie envolvente ajustada a la geometría de la sonda que permite el paso del cableado de proa a popa por su interior; sin embargo esta opción se descarta ya que al tratarse de un vehículo submarino una estructura no circular penaliza la resistencia a la presión y con ello la profundidad de funcionamiento.

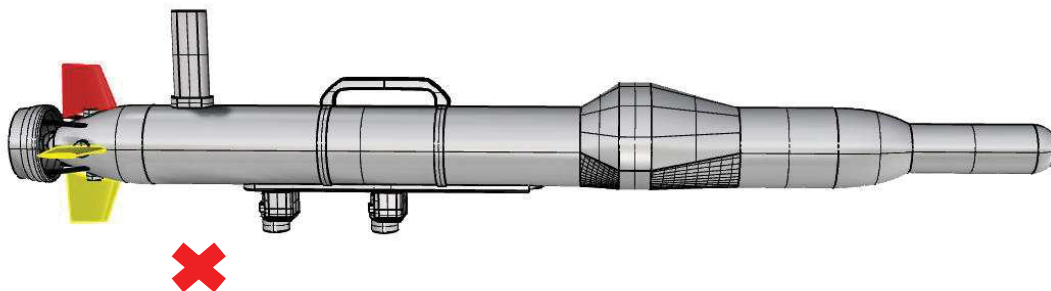


Imagen 67. Diseño preliminar con la Sonda Multihaz en el casco resistente

En la Imagen 68 se ha mantenido la sección circular, lo que obliga a que la Sonda Multihaz trabaje en condiciones no aceptables.

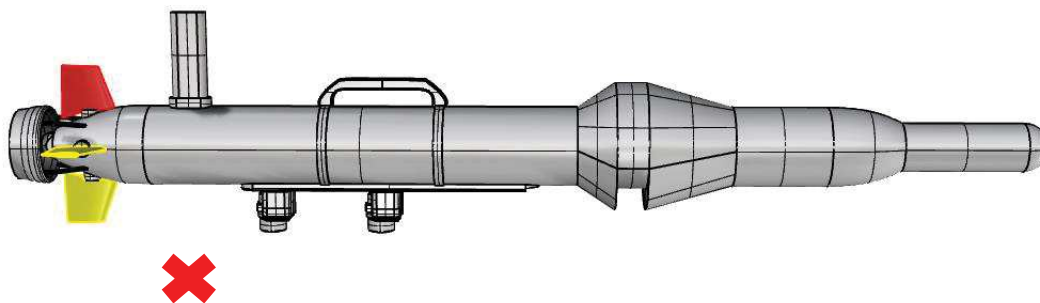


Imagen 68. Diseño preliminar con la Sonda Multihaz en el casco resistente

Una vez determinado que la mejor solución constructiva es colocar el dispositivo fuera del cuerpo del vehículo, se optó por realizar un alargamiento del cilindro amarillo para ganar la flotabilidad perdida por la instalación de la Sonda Multihaz, con lo que se solucionaba el paso de los cables además de ganar espacio para la colocación de baterías adicionales en el caso que fuese necesario. El diseño se muestra en la figura siguiente:

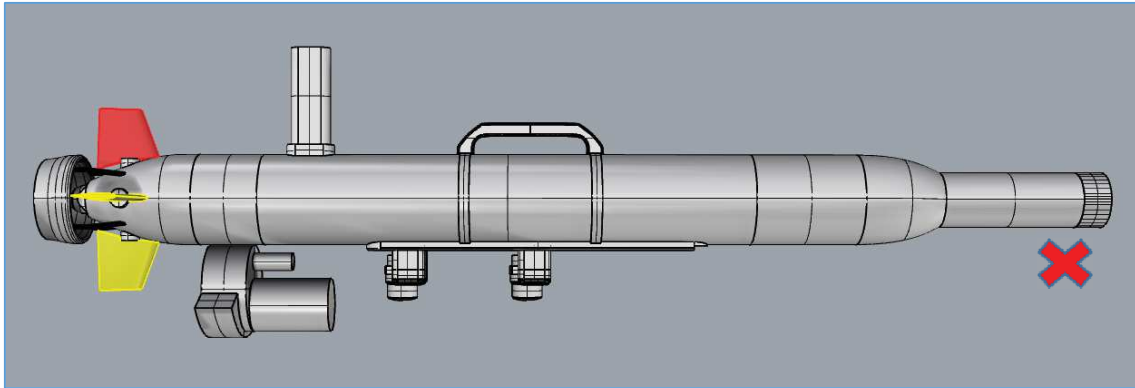


Imagen 69. Diseño del vehículo con la Sonda Multihaz a popa.

Esta solución se probó tanto a proa como a popa del cilindro que contiene la electrónica, no obstante no se conseguía con ello un buen trimado del vehículo debido a que se produce un desequilibrio importante en el balance de pesos - empuje. Dada la importancia que de ello deriva para el correcto funcionamiento del vehículo, se opta finalmente por trasladar la Sonda Multihaz cerca del centro de gravedad del vehículo, sobre el rail mejorando notablemente su trimado y obteniendo el mejor resultado constructivo.

Para ganar la flotabilidad perdida y evitar el hundimiento del vehículo, se ha colocado una carcasa que envuelve la parte delantera de la Sonda Multihaz que permite contener una cantidad de aire suficiente como para compensar la flotabilidad no contrarrestada debida al peso de la Sonda Multihaz. Además, debido a su forma más hidrodinámica se espera mejorar su resistencia al avance respecto a su montaje sin la misma.

Para verificar la resistencia de la carcasa a la presión hidrostática, se ha realizado un pequeño análisis estructural de la carcasa, seleccionando el material en función de sus características mecánicas y peso para la fabricación de la carcasa y garantizando la resistencia estructural. Para ello se ha utilizado el módulo RamSeries de Tdyn® de Compass Sistemas.

Tras varios análisis, se determina que la mejor opción es utilizar POM (poliformaldehído) material del cual están fabricados varios componentes del AUV, como el DVL o la bocina. Se trata de un tipo de termoplástico de alta rigidez con las siguientes propiedades:

- ✓ Alta resistencia mecánica, a la abrasión y al calor
- ✓ Estabilidad dimensional y fácil mecanización
- ✓ 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

Las propiedades mecánicas consideradas para este ensayo son las siguientes:

- ✓ Densidad $\rho = 13.827,87 \text{ N/m}^3$ (1.410 Kg/m^3)
- ✓ Resistencia máxima a la compresión (UCS) = $110,0 \text{ MPa}$
- ✓ Módulo de Young o de elasticidad $E = 2.900,0 \text{ MPa}$
- ✓ Módulo de Poisson $\nu = 0,35$
- ✓ Módulo de elasticidad transversal o de cizalladura $G = 1.074,07 \text{ MPa}$

La presión de ensayo a aplicar sobre la carcasa sobre la pared exterior de la carcasa será la correspondiente a 100 m de profundidad, que es la máxima establecida por el fabricante para el funcionamiento del vehículo:

$$P = \frac{h \cdot g \cdot \rho}{1.000.000} = \frac{100 \cdot 9,807 \cdot 1.037}{1.000.000} = 1,017 \text{ MPa}$$

Siendo, P = presión exterior en MPa (N/mm²), h = profundidad en m, g = gravedad (9,807 m/s²),
 ρ = densidad (1.037 kg/m³)

El límite elástico del material a compresión es de 110 MPa. Para la simulación se han restringido los desplazamientos en la parte de popa para simular la fijación de la Sonda Multihaz y se ha aplicado una presión uniforme a todas las superficies exteriores. Como se aprecia en la imagen siguiente, el análisis de las tensiones resultantes muestra valores máximos de Von Mises de 17 MPa, por lo que se obtiene un coeficiente de seguridad de 6,47, un valor lejos del límite elástico a partir del cual el material se deformaría plásticamente y la estructura colapsaría ante la presión exterior.

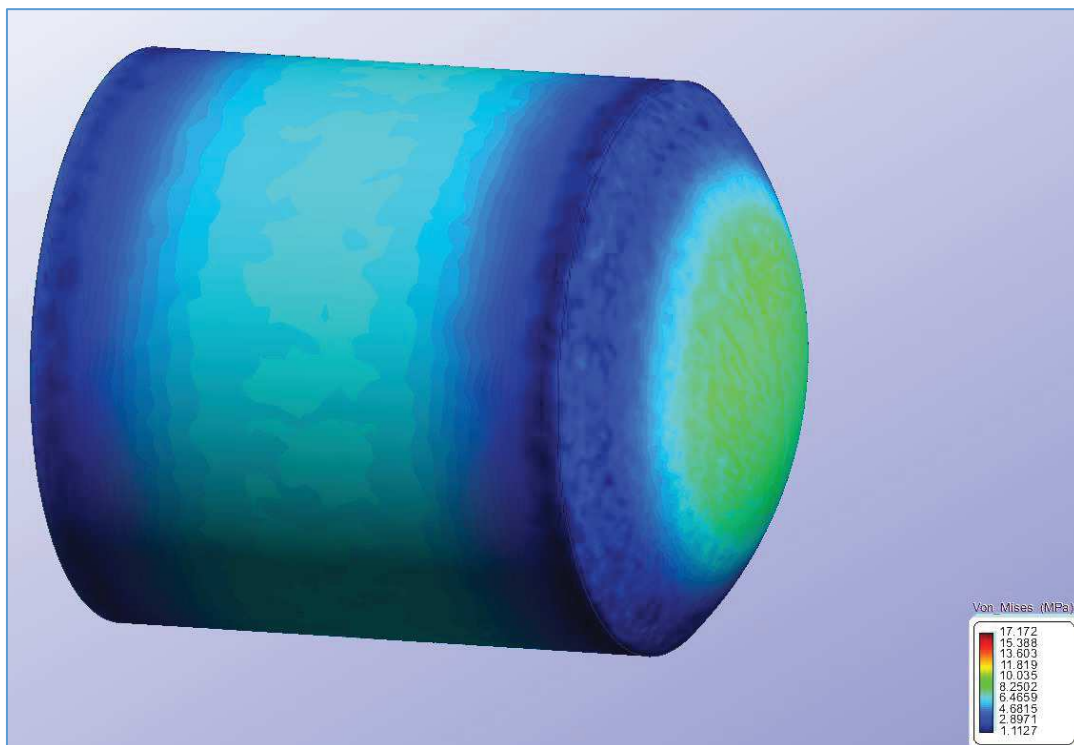


Imagen 70. Distribución de tensiones de Von Mises sobre la carcasa

La simulación se ha realizado con paredes de 1 cm de espesor, obteniendo una deformación inferior a 0,5 mm, por tanto el diseño se considera estructuralmente válido.

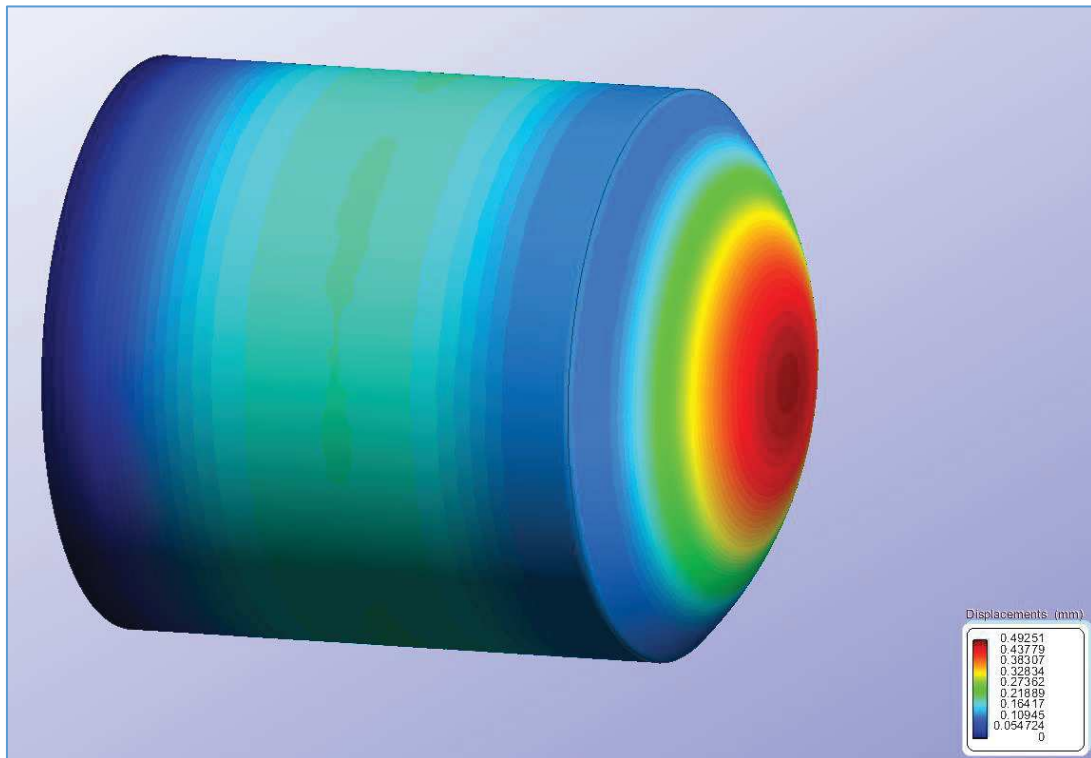


Imagen 71. Valores de los desplazamientos sobre la carcasa

5.4. Balance de pesos

Como se ha definido anteriormente este vehículo estará formado por cinco elementos principales que son el cuerpo de popa, el cilindro amarillo de la electrónica, el cuerpo de proa (que incluye el DVL), los sensores del YSI (pH, oxígeno disuelto, turbidez, clorofila, conductividad, temperatura del agua, etc.) y la Sonda Multihaz que permitirá realizar batimetrías y localización de objetos en el fondo marino. Estos, como en los casos anteriores, se subdividen en pequeños elementos como el motor, la hélice con la tobera, el lastre, etc.

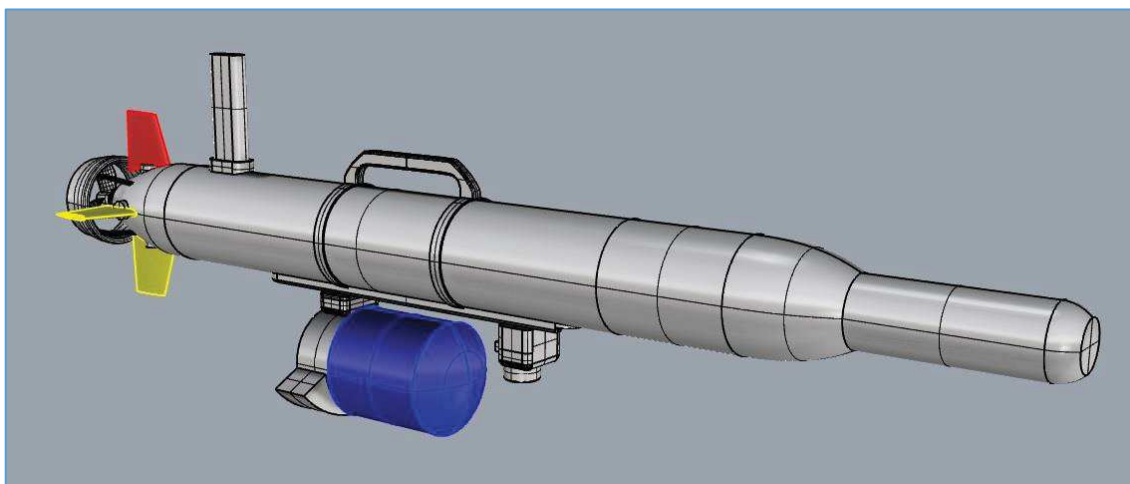


Imagen 72. 3D vehículo con modificaciones

Los cambios con respecto al vehículo V_{YSI} son la eliminación del USBL, pues se considera redundante con el modem acústico, y la introducción de la sonda Multihaz. Para ello se ha desplazado el modem acústico a lo largo del raíl hacia la proa y a popa de éste se coloca la Sonda Multihaz. Las posiciones escogidas son en base al balance de pesos con el fin de que el vehículo se encuentre con su calado y trimado óptimos en todo momento.

Se muestra a continuación la tabla resultante del balance de pesos, teniendo en cuenta que la posición longitudinal del centro de gravedad (XG) se toma respecto del extremo de popa y las posiciones transversal (YG) y vertical (ZG) respecto el centro geométrico del cilindro:

Elemento	Peso (g)	x (cm)	y (cm)	z (cm)	FX	FY	FZ
Antena	503,7	25,21	0,00	12,25	12.698,28	0,00	6.170,33
Lastre Proa	1.016,6	84,67	0,00	-4,56	86.075,52	0,00	-4.635,70
DVL	3.630,0	115,25	0,00	0,00	418.357,50	0,00	0,00
Cuerpo popa	5.100,0	6,25	0,00	-1,10	31.875,00	0,00	-5.610,00
Cilindro amarillo	2.880,0	68,55	0,00	0,00	197.424,00	0,00	0,00
Raíl	393,7	63,04	0,00	-7,38	24.818,85	0,00	-2.905,51
Sujeciones lastre móvil	23,8	60,04	0,00	-8,23	1.428,00	0,00	-195,87
Asa	233,5	62,63	0,00	10,89	14.624,11	0,00	2.542,82
Cilindro electrónica	7.590,0	66,85	0,00	-2,77	507.391,50	0,00	-21.024,30
Protector cabezal	860,0	155,34	0,00	0,00	133.592,40	0,00	0,00
Cabezal del YSI	1.370,0	148,54	0,00	0,00	203.499,80	0,00	0,00

Variación Operacional de un AUV

Modem Acústico	460,0	82,49	0,00	-12,08	26.091,20	0,00	-5.556,80
16 onzas en rail	452,8	90,00	0,00	-7,40	40.752,00	0,00	-3.350,72
Carcasa	1.365,0	62,50	0,00	-18,76	85.312,50	0,00	-25.606,72
Sonda Multihaz	4.000,0	53,23	0,00	-20,29	212.920,00	0,00	-81.160,00

Tabla 26: Tabla de pesos del vehículo

Peso total	29.879,1	g
Suma FX	2.044.658,85	g · cm
Suma FY	0	g · cm
Suma FZ	-145.968,17	g · cm

Tabla 27: Tabla de pesos del vehículo

Por tanto la posición del centro de gravedad será:

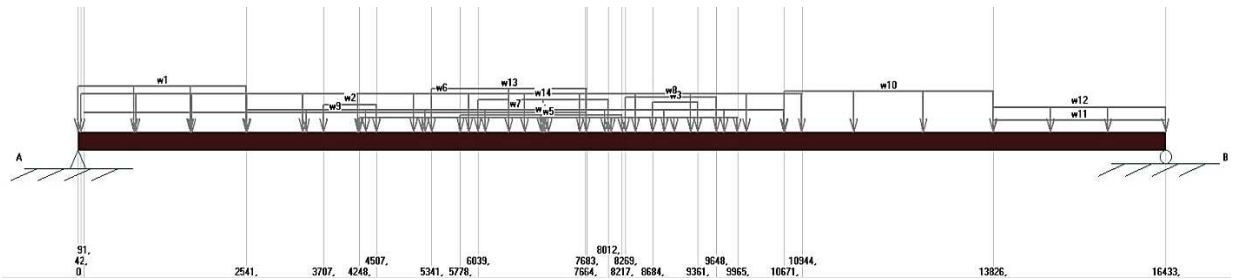
$$XG = \frac{\sum FX}{\sum P} = \frac{2.044.658,85}{29.879,1} = 68,43 \text{ cm}; \quad YG = 0 \text{ cm}$$

$$ZG = \frac{\sum FZ}{\sum P} = \frac{-145.968,17}{29.879,1} = -4,88 \text{ cm}$$

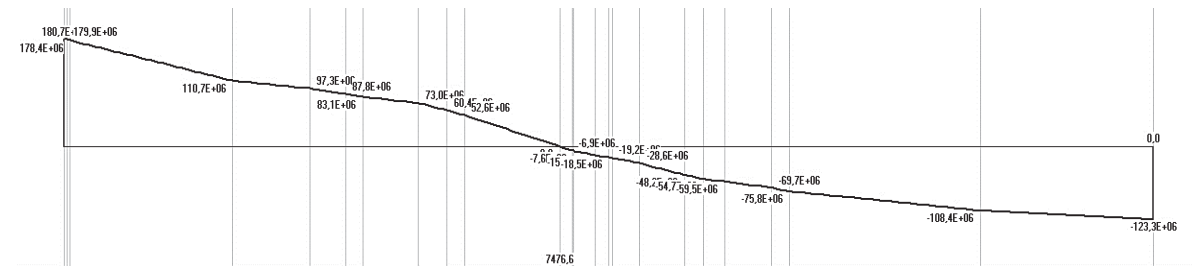
FX = sumatorio de momentos en g · cm, P = sumatorio de pesos en g, αG = posición centro gravedad en cm

Tabla 28: Posición del centro de gravedad del V_{MB}

Y la curva de pesos, cargas y momentos simplificadas son la siguiente:

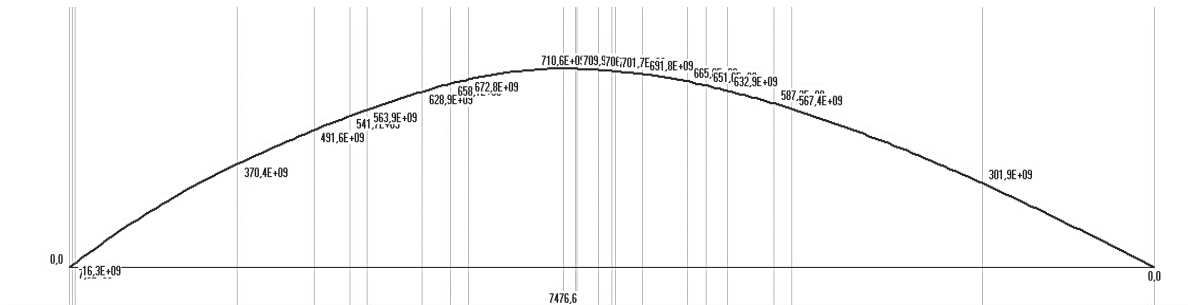


Gráfica 10: Curva de pesos



Variación Operacional de un AUV

Gráfica 11: Curva de cargas



Gráfica 12: Curva de momentos

En la siguiente figura se muestra la flotabilidad del vehículo cuyo volumen desplazado es el obtenido mediante el modelo 3D de Rhinoceros con un calado de 13,259 cm y un centro de carena situado en $X_C = 69.07$ cm respecto del extremo de popa.

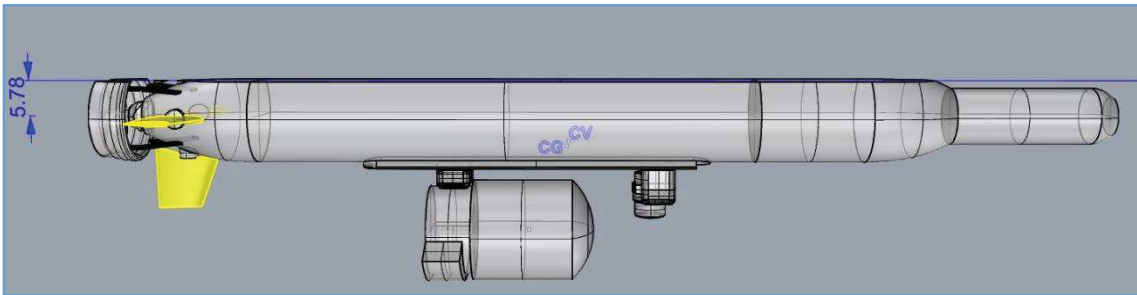


Imagen 73. Centros de gravedad y volumen. Vehículo con la Sonda Multihaz

$$\text{Reserva flotabilidad} = E_e - P = 31.455,11 - 29.879,1 = 1.576,01 \text{ g (5,01\%)}$$

E_e = volumen desplazado, en g; P = Peso, en g

5.5. Balance eléctrico

En este apartado se realiza el balance eléctrico del vehículo tras la instalación de la Sonda Multihaz. Se sabe, por las especificaciones de los manuales, que el consumo de potencia de la sonda instalada es de 28 W. Asumiendo que el rendimiento propulsivo es similar V_{YSI} original, tras el análisis CFD, se calcula la pérdida de velocidad y con ello resulta el siguiente balance eléctrico:

Modelo	Estado	Consumo Instantáneo (W)	Potencia real (W)	Potencia al freno (W)	Resistencia efectiva al avance (W)	Autonomía (h)
Vehículo con sonda Multihaz	Navegación 1,155 m/s	133,67	77,88	71,65	25,33	4,26

Tabla 29. Balance del vehículo

Se estima que con las nuevas modificaciones el vehículo ha perdido poco más de una hora de autonomía, además de navegar 0,386 m/s más lento.

Un esquema de los consumidores del vehículo se muestra a continuación:



Imagen 74. Esquema del consumo del vehículo

6. El cálculo CFD

6.1. Introducción

El objetivo de esta parte del trabajo consiste en evaluar con una herramienta de CFD (Computacional Fluid Dynamics) el vehículo con la instrumentación del YSI para el que se tiene una referencia del consumo real en navegación extraído de los log de misiones efectuadas durante 2014-2015, analizando el flujo de agua a su alrededor en inmersión y de esta manera obtener su resistencia al avance. Posteriormente se modificará su diseño y funcionalidad, incluyendo la sonda la Sonda Multihaz y se obtendrá la nueva resistencia al avance mediante CFD.

Con los modelados en Tdyn del apartado anterior, se deben calcular con las fórmulas siguientes los valores necesarios para calcular la resistencia al avance y la caracterización del flujo alrededor del vehículo. Este ensayo CFD tiene la particularidad de que se realiza en un flujo estacionario a velocidad es constante (excepto los pasos iniciales, que son progresivos en tiempo y velocidad) y que simula el avance del vehículo a una profundidad suficiente en la que no se genera resistencia por olas.

La dinámica de fluidos computacional (CFD) permite resolver de forma aproximada las ecuaciones que gobiernan los flujos y el movimiento de los fluidos (Ecuaciones de Navier-Stokes) en unas condiciones de contorno determinadas mediante el cálculo computacional. Esta herramienta permite la simulación rápida y eficaz del flujo de fluidos, obteniendo como resultado los valores de las fuerzas y momentos para el cálculo de la resistencia al avance de un modelo que de otro modo solo se podría obtener en un canal de experiencias. Con este método se consigue una disminución en el tiempo de cálculo y en la construcción de un prototipo que poder ensayar, así como en el coste asociado que esto conlleva.



Imagen 75. Vehículo submarino Autónomo en un Canal de Experiencias. (Fuente: <http://www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es>)

El método consiste en ir realizando iteraciones en las que la solución obtenida se introduce nuevamente en la ecuación, obteniendo una nueva solución. Esta solución se compara con la anterior de forma que, si no existen singularidades, la diferencia entre ambas debe ir convergiendo. Dado que nunca se llega a obtener una diferencia de cero, es importante establecer un criterio de convergencia o bien un número máximo de iteraciones, para optimizar los tiempos de cálculo.

Si el ensayo se realiza correctamente, obteniendo estas soluciones convergentes conseguidas mediante diferentes condiciones de contorno, los resultados pueden aproximarse lo suficiente a la realidad para considerarlos fiables. Si los resultados no son los deseados siempre se puede modificar el diseño con relativa facilidad.

Existen numerosos softwares de CFD, pero todos tienen una estructura de funcionamiento similar, que se describe a continuación:

- ✓ Pre-procesado: se crea y prepara el modelo para la simulación. En primer lugar se selecciona el tipo de ensayo a realizar junto con los intervalos de tiempo, número máximo de iteraciones, etc. A continuación puede generarse el modelo en un sistema CAD y exportarse, aunque si el diseño es complejo no suele dar buenos resultados. El siguiente paso es definir las condiciones de contorno del problema, es decir, definir el volumen de control que será el dominio de cálculo del problema, el modelo de turbulencia que se va a utilizar, parámetros de la pared, velocidad de ensayo, el fluido y sus propiedades, etc. Finalmente se define y crea el mallado necesario para la obtención de los resultados deseados, que no es más que dividir el conjunto en un número finito de partes a cuyos nodos se les ha asignado los parámetros anteriores. Si existen errores en la geometría el mallado no podrá realizarse.
- ✓ Procesado: herramienta del programa que realiza la simulación planteada del problema, mediante iteraciones se van resolviendo las ecuaciones y generando las soluciones. Si existen errores de convergencia se muestran en esta parte del proceso.
- ✓ Post-procesado: es la herramienta que permite la representación gráfica de los resultados, permitiendo además obtener resultados indirectos operando las soluciones del modelo. Si los resultados obtenidos no son los esperados, debe volverse al pre-procesado para realizar cambios en el diseño, en las condiciones de contorno o en el tipo de análisis a realizar.

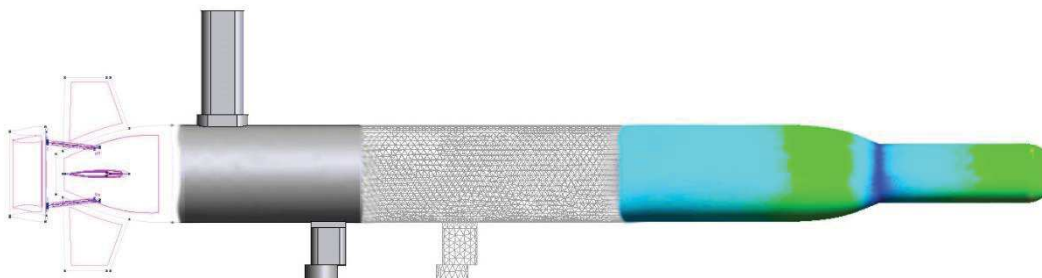


Imagen 76. Imagen ilustrativa del proceso de funcionamiento de la CFD

El software escogido de dinámica de fluidos computacional para realizar los cálculos de este proyecto es Tdyn® de Compass Sistemas (www.compassis.com).

Existen varias formas de resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, no obstante en el contexto que ocupa el método usado será el de RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes). En este método se malla y se resuelven las ecuaciones RANS para todo el dominio de cálculo empleando elementos tetraédricos, piramidales, prismáticos y/o hexaédricos en el mallado. Esto incluye la influencia de los efectos turbulentos en el flujo, aunque la turbulencia no se resuelve de manera directa, como se describe en los métodos de resolución más adelante). Esta metodología proporciona resultados bastante precisos con un coste computacional moderado, asumiendo el fluido incompresible e irrotacional.

Existen otros métodos de ensayo como el método de elementos de contorno que está basado en flujos potenciales, cuyas ecuaciones se resuelven únicamente en las fronteras utilizando paneles cuadriláteros. Este método tiene un gasto computacional pequeño pero no tiene en cuenta los efectos de la viscosidad o la separación del fluido alrededor del cuerpo.

Otros métodos, los denominados directos, son el de Large Eddy Simulation (LES) o el Direct Numerical Simulation (DNS) y resuelven el modelo mediante una discretización lo suficientemente fina para resolver todas las escalas de turbulencia, lo que incrementa mucho el coste computacional y por ello no se considera en este proyecto.

Las variables que influyen en el resultado son el tamaño del mallado de la discretización espacial y el modelo de turbulencia utilizado, que depende de la geometría del modelo y las condiciones de contorno. La resolución de las ecuaciones es una aproximación iterativa y su resultado debe ser lo más cercano posible a la realidad, es decir que se acerque lo suficiente al valor objetivo con una precisión que depende del caso estudiado.

Actualmente existe una demanda por parte de los usuarios de los AUV para mejorar los vehículos hacia una nueva generación de vehículos que puedan viajar a mayores profundidades, a mayores velocidades y con una mejor maniobrabilidad y autonomía. Para ello se trabaja en la mejora de la precisión en el cálculo de la resistencia al avance, en la eficiencia propulsiva y en el volumen y la eficiencia de las baterías que puede transportar.

Los CFD tratan de hacer rentable la mejora del rendimiento hidrodinámico de estos vehículos, equilibrando el coste computacional y el análisis de la mecánica de fluidos sin necesidad de túneles de viento o canales de experiencia hidrodinámicos. Con los CFD se obtienen resultados relativamente económicos, rápidos y fiables aplicables al diseño del casco y los sistemas de control y propulsión, lo que conlleva mejoras en las misiones que llevan a cabo.

En la página siguiente se muestra el proceso de diseño de un AUV, elaborado a partir del documento "*The use of computational fluid dynamics to aid cost-effective hydrodynamic design of AUV*", mencionado anteriormente.

En naranja, se resaltan las tareas donde el uso de CFD aporta valor añadido actualmente:

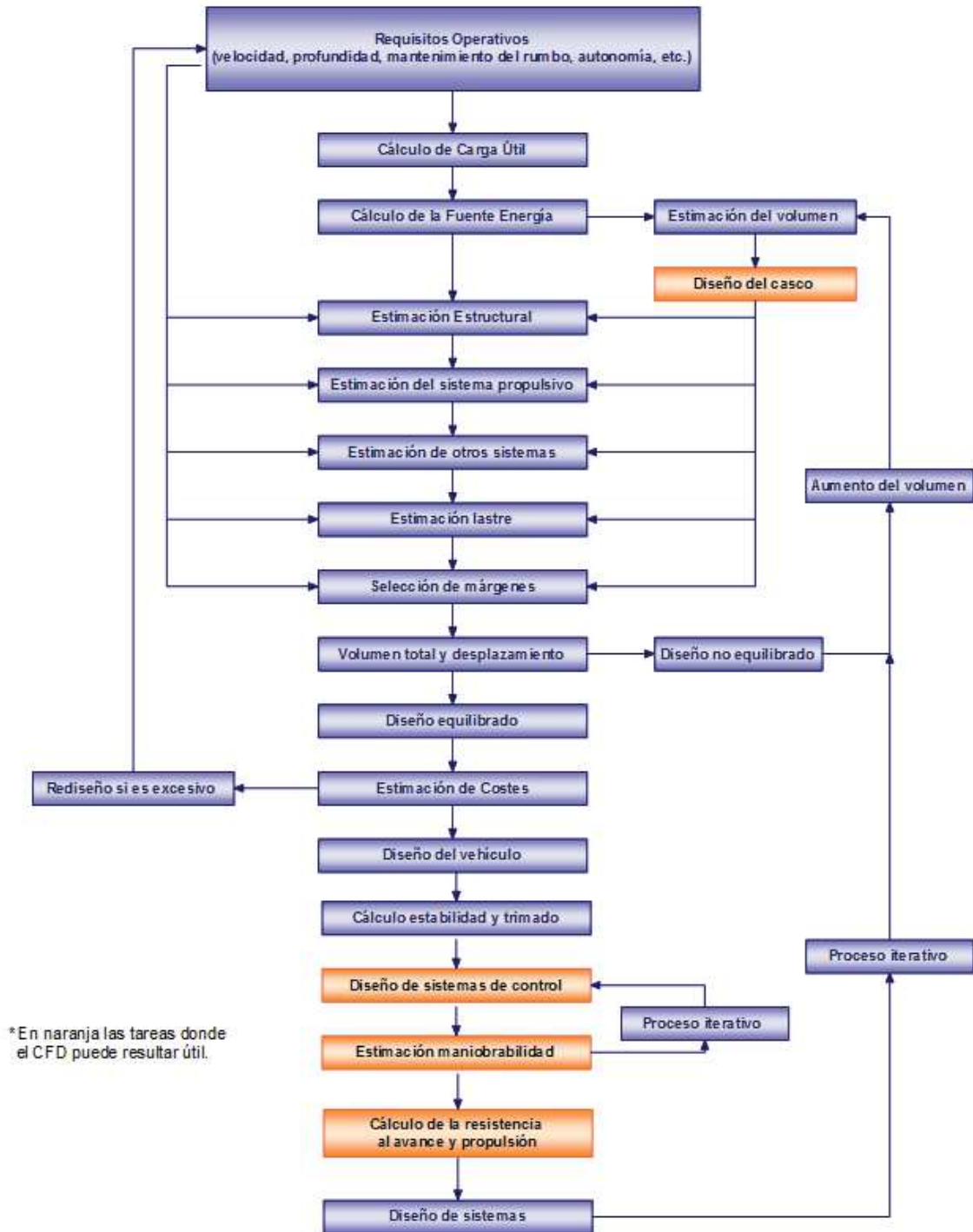


Imagen 77: Proceso de diseño de un AUV (Fuente: elaboración propia)

6.2. La resistencia al avance

La resistencia al avance se puede descomponer en la resistencia de fricción de la superficie del vehículo con el agua (que depende de la superficie mojada y del número de Reynolds) y en resistencia residual, que corresponde a la presión que ejerce el agua al tener que separarse en la proa del vehículo para dar paso y después cerrarse a su paso, y que está muy influenciada por los apéndices (ambas de origen viscoso).

En los ensayos que se realizaron a los conocidos vehículos *REMUS*, se obtuvo que la mitad de la resistencia al avance era producida por los apéndices, concluyendo que la resistencia debida al casco desnudo no es a menudo la componente principal contribuyente a la resistencia total. La resistencia de fricción en un casco desnudo es del orden del 90% de la resistencia total, pero este porcentaje se reduce hasta un 60 – 70% cuando se incluyen apéndices, ya que éstos producen una resistencia importante en proporción a su tamaño.

La resistencia por formación de olas en un cuerpo que navega completamente sumergido es prácticamente nula si el fluido es homogéneo en su densidad. Por tanto este estudio no se considerará puesto que todos los análisis se centran en el vehículo navegando totalmente sumergido en un fluido homogéneo ya que se entiende que esa es su condición de diseño.

Con el fin de obtener una idea estimada de la resistencia al avance del vehículo, se desarrollan a continuación las fórmulas básicas para calcular la resistencia de fricción según el método de Hughes (corregida con el factor de formas (1+k)) con y sin los apéndices para ambos modelos.

6.2.1. Vehículo sin modificaciones (V_{ysl})

1. Resistencia de fricción sin apéndices:

La formulación empleada para el cálculo es la siguiente:

$$\text{Número de Reynolds } Rn = \frac{L \cdot V}{\nu}$$

$$\text{Coeficiente de fricción según la ITTC 57 } Cf = \frac{0,075}{(\log(Rn) - 2)^2}$$

$$\text{Resistencia de fricción según Hughes } Rf (N) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot Cf \cdot (1 + k)$$

$$\text{Donde } (1 + k) \text{ según Hoerner es } = 1 + 1,5 \cdot \left(\frac{L}{D}\right)^{\frac{3}{2}} + 7 \cdot \left(\frac{L}{D}\right)^3$$

Las constantes utilizadas para el agua salada a 25°C:

$$\rho = 1.037 \frac{kg}{m^3} \text{ y } \nu = 9,425 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

Donde v es la velocidad (m/s), L = eslora (m), D = diámetro (m), g = gravedad (9,807 m/s²),

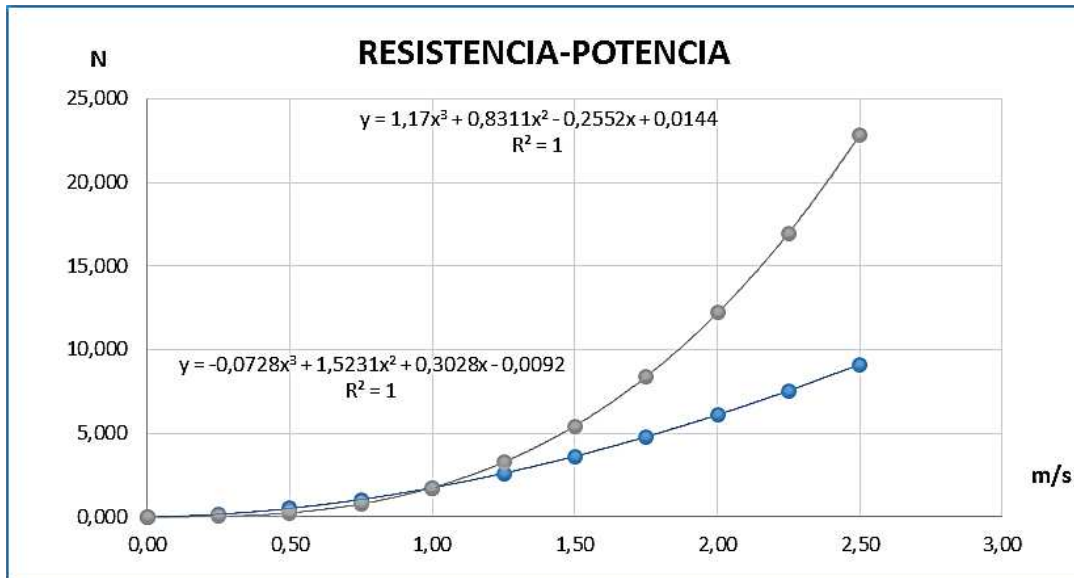
A = Área (m²) ρ = densidad en kg/m³, ν = viscosidad cinemática en m²/s

Tabla 30: Coeficientes y formulación para el cálculo de la resistencia de fricción

Obteniendo la siguiente estimación de la resistencia de fricción y la potencia:

Velocidad (m/s)	Fn	Rn	Cf ITTC - 57	Rf (N)	Pot (W)
0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000
0,25	0,06	4,18E+05	5,72E-03	0,149	0,037
0,50	0,13	8,36E+05	4,88E-03	0,507	0,254
0,75	0,19	1,25E+06	4,47E-03	1,045	0,784
1,00	0,25	1,67E+06	4,20E-03	1,750	1,750
1,25	0,32	2,09E+06	4,02E-03	2,613	3,267
1,50	0,38	2,51E+06	3,88E-03	3,629	5,444
1,75	0,45	2,93E+06	3,76E-03	4,793	8,387
2,00	0,51	3,34E+06	3,66E-03	6,100	12,201
2,25	0,57	3,76E+06	3,58E-03	7,549	16,986
2,50	0,64	4,18E+06	3,51E-03	9,136	22,841

Tabla 31: Resistencia y potencia necesaria del vehículo sin modificaciones



Gráfica 13. Curvas resistencia de fricción / potencia del vehículo sin apéndices

2. Resistencia al avance con apéndices:

En este apartado se calcula la resistencia al avance incluyendo la influencia de los apéndices y el incremento debido a la rugosidad (factor adimensional Δf). Está basado en la formulación descrita en la documentación creada por Pedro Sosa relativa a submarinos en su "Capítulo 6: Formas y Resistencia".

En este caso se le ha asignado un valor de $\Delta f = 0,001$ para el casco del vehículo y de $0,0006$ en el caso de los apéndices.

La formulación utilizada en este caso para el cálculo es la siguiente:

$$\text{Resistencia de fricción } R_f (N) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A \cdot (C_f + \Delta_f) \cdot (1 + k)$$

$$(1 + k) \text{ casco según Hoerner es } = 1 + 1,5 \cdot \left(\frac{L}{D}\right)^{\frac{3}{2}} + 7 \cdot \left(\frac{L}{D}\right)^3$$

$$(1 + k) \text{ apéndices según Hoerner es } = 1 + \left(2 \cdot \frac{t}{c} + 120 \cdot \left(\frac{t}{c}\right)^4\right)$$

V = velocidad (m/s), L = eslora (m), D = diámetro (m), g = gravedad (9,807 m/s²),

A = Área (m²), c = cuerda (cm), t = espesor (cm)

Tabla 32: Fórmulas para el cálculo, incluyendo apéndices y rugosidad

Los valores de cuerda y espesor medidos en el vehículo (c y t) se presentan a continuación para el cálculo de (1+k) correspondiente:

Apéndice	c (m)	t (m)	(1+k)
Antena	0,07	0,03	5,74
Tobera	0,06	0,02	1,97
Aletas	0,09	0,01	1,31
Modem acústico	0,07	0,05	27,09
USBL	0,07	0,03	27,09

Tabla 33: Espesor, cuerda y factor 1+k de los apéndices

Aplicando las fórmulas se han obtenido los resultados expresados en la tabla siguiente:

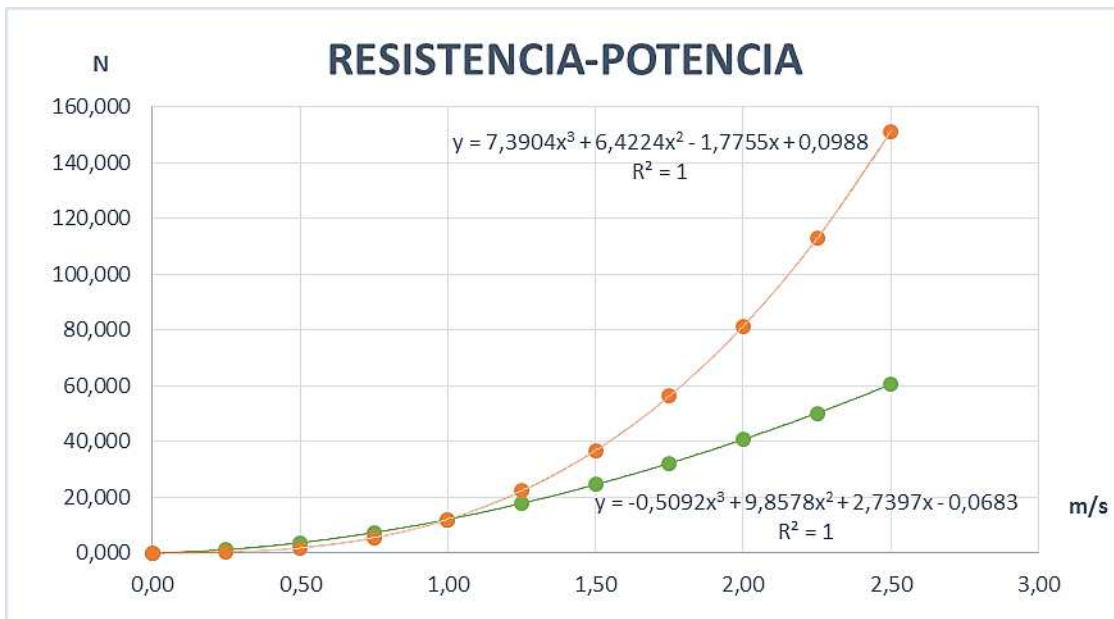
Velocidad (m/s)	Casco	Aletas	Antena	Tobera	Modem	USBL	TOTAL
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	0,17	0,04	0,10	0,05	0,38	0,38	1,14
0,50	0,61	0,13	0,31	0,17	1,22	1,22	3,65
0,75	1,28	0,27	0,61	0,34	2,42	2,42	7,33
1,00	2,17	0,44	1,00	0,55	3,95	3,95	12,07
1,25	3,26	0,65	1,47	0,80	5,81	5,81	17,81
1,50	4,57	0,90	2,02	1,10	7,97	7,97	24,52
1,75	6,07	1,18	2,65	1,44	10,42	10,42	32,17
2,00	7,77	1,49	3,34	1,81	13,16	13,16	40,72
2,25	9,66	1,83	4,11	2,23	16,17	16,17	50,16
2,50	11,74	2,21	4,95	2,68	19,45	19,45	60,48

Tabla 34: Resultados de la resistencia parcial y total en N

Según los resultados obtenidos para la máxima velocidad el vehículo tiene una resistencia al avance de 60,48 N lo que supone una potencia necesaria de 151 W.

Estos resultados se utilizarán a título orientativo de la resistencia que debería salir del estudio en CFD, si bien este análisis no tiene en cuenta la forma del vehículo (más allá del coeficiente de forma (1+k)).

También debe tenerse en cuenta que la aproximación realizada para los apéndices no es del todo acertada en el caso de los elementos que no tienen forma hidrodinámica como por ejemplo el USBL o la tobera. La gráfica siguiente plasma estos resultados:



Gráfica 14: Gráfico Resistencia Potencia para el vehículo sin modificaciones

6.2.2. Vehículo con sonda la Sonda Multihaz

En este caso solo se estudiará la resistencia al avance con apéndices, puesto que el cuerpo sin apéndices es igual en ambos casos:

De igual forma, se le ha asignado un valor de $\Delta f = 0,001$ para el casco del vehículo y de 0,0006 en el caso de los apéndices. Los valores de cuerda y espesor medidos en el vehículo (c y t) se presentan a continuación para el cálculo de (1+k) correspondiente:

Apéndice	c (m)	t (m)	(1+k)
Antena	0,07	0,03	5,74
Tobera	0,06	0,02	1,97
Aletas	0,09	0,01	1,31
Multihaz	0,27	0,16	18,92
Modem	0,07	0,05	27,09

Tabla 35: Espesor, cuerda y factor 1+k de los apéndices

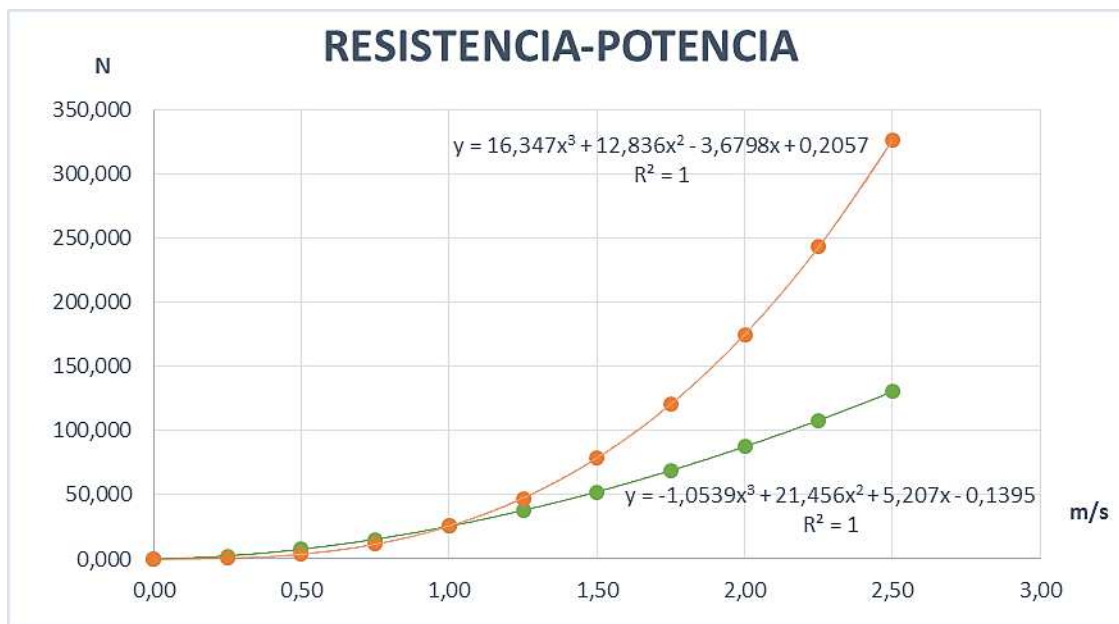
Aplicando las fórmulas se han obtenido los resultados expresados en la tabla siguiente:

Velocidad (m/s)	Casco	Aletas	Antena	Tobera	Modem	Multihaz	TOTAL
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	0,17	0,04	0,10	0,05	0,38	1,56	2,31
0,50	0,61	0,13	0,31	0,17	1,22	5,16	7,60
0,75	1,28	0,27	0,61	0,34	2,42	10,50	15,41
1,00	2,17	0,44	1,00	0,55	3,95	17,45	25,56
1,25	3,26	0,65	1,47	0,80	5,81	25,93	37,93
1,50	4,57	0,90	2,02	1,10	7,97	35,87	52,43
1,75	6,07	1,18	2,65	1,44	10,42	47,25	68,99
2,00	7,77	1,49	3,34	1,81	13,16	60,00	87,57
2,25	9,66	1,83	4,11	2,23	16,17	74,12	108,12
2,50	11,74	2,21	4,95	2,68	19,45	89,57	130,60

Tabla 36: Resultados de la resistencia parcial y total

Según los resultados obtenidos para la máxima velocidad el vehículo tiene una resistencia al avance de 130,60 N lo que supone una potencia necesaria de 326 W. Del orden del doble que en el vehículo sin modificaciones.

De igual forma, estos resultados se utilizarán a título orientativo de la resistencia que debería salir del estudio en CFD. La gráfica siguiente plasma estos resultados:



Gráfica 15: Gráfico Resistencia Potencia para el vehículo con modificaciones

6.3. El Modelado

6.3.1. Vehículo sin modificaciones (V_{vs1})

Previo al estudio en CFD, se ha partido de un modelado inicial en 3 dimensiones que elaboró Dionisio Tudela para el Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. Partiendo de las dimensiones principales y la medición de diferentes puntos intermedios se ha generado un modelo en formato .3dm en Rhinoceros®, que incluye los elementos principales del AUV: los cuerpos de proa y popa, 3 configuraciones de cabezales distintos, el cilindro con la electrónica, las aletas, la tobera, la antena, el USBL y el módem acústico, añadidos posteriormente por el Laboratorio de Vehículos Submarinos de la UPCT.

Para cada una de las configuraciones, se ha actualizado el peso del cabezal como se ha visto en el balance de pesos incluido su modelado. Ha sido necesario que todas las superficies estén cerradas para poder calcular el volumen correspondiente de cada una de las partes.

En las siguientes imágenes se muestra el modelado en Rhinoceros® para cada una de las configuraciones:

- ✓ Configuración 1. Vehículo sin instrumentación

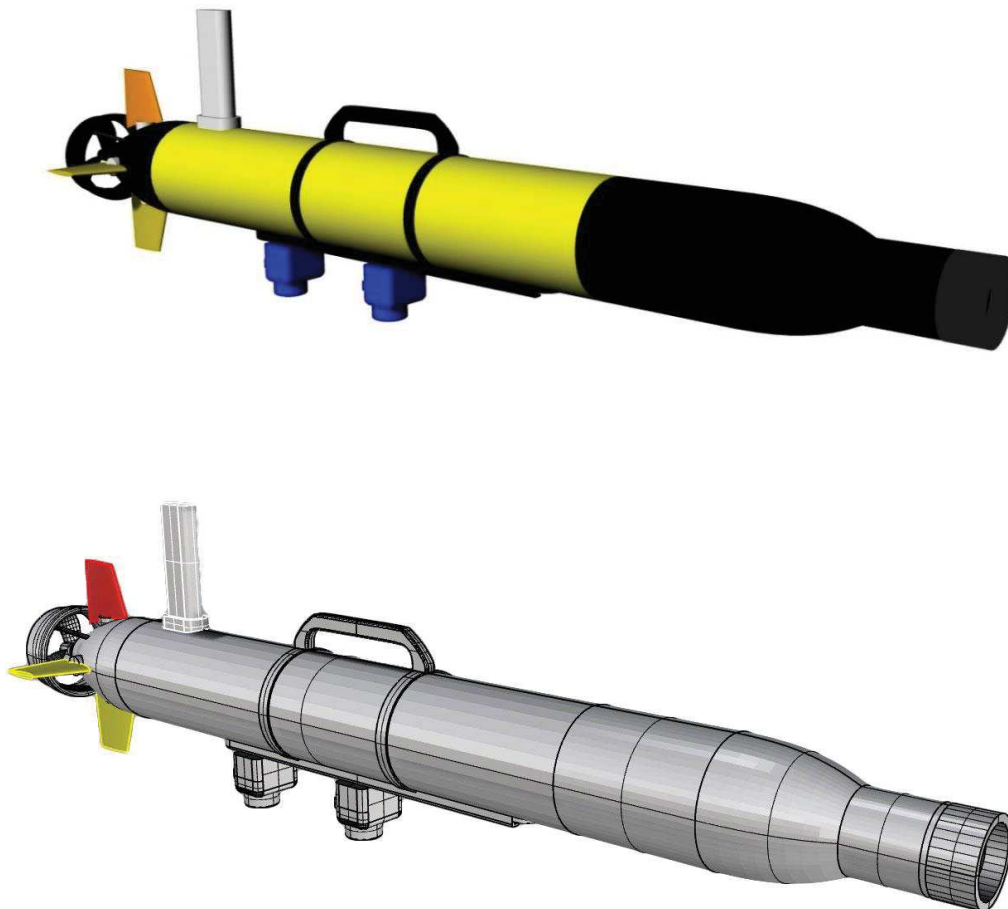


Imagen 78. V*

- ✓ Configuración 2. Vehículo con la instrumentación del YSI

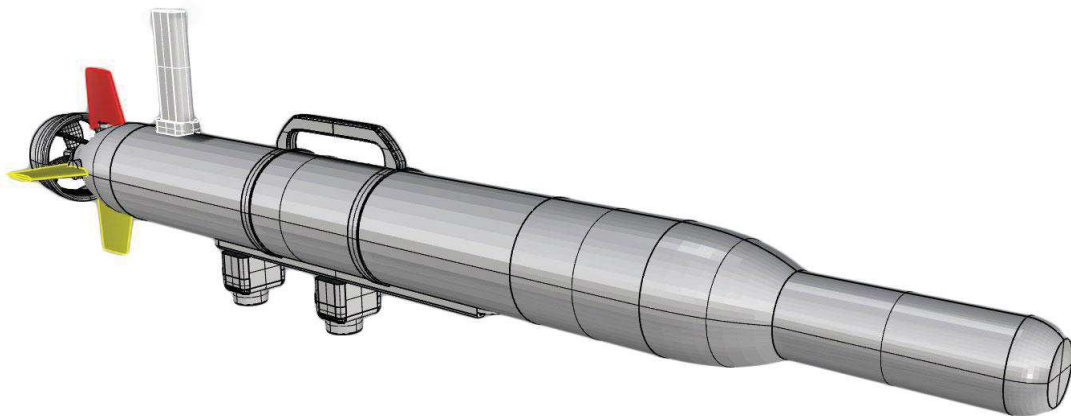
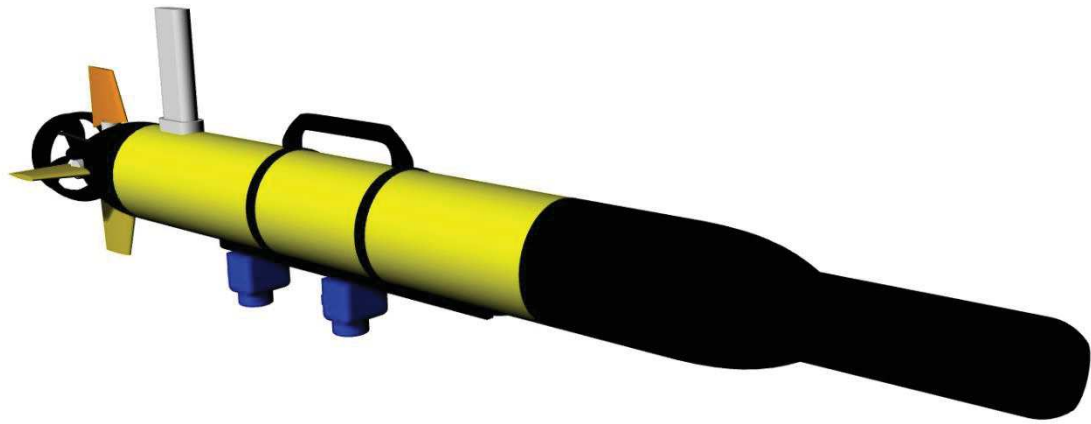
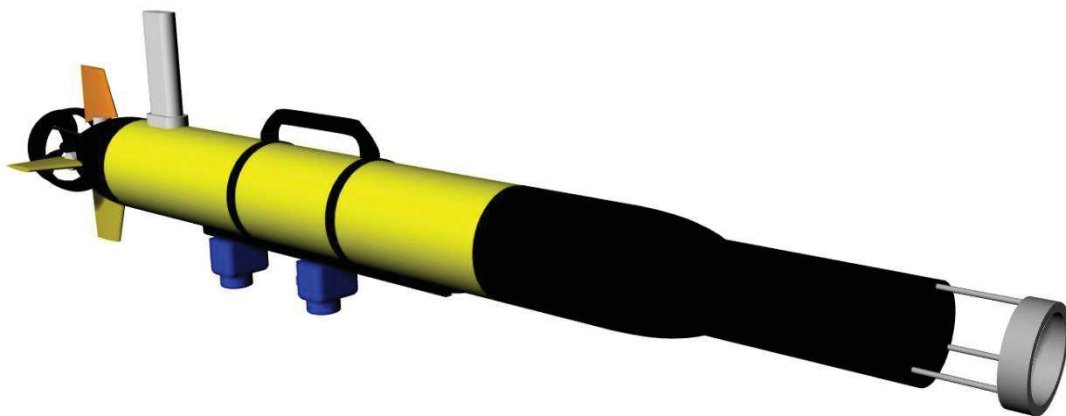


Imagen 79. V_{YSI}

- ✓ Configuración 3. Vehículo con la instrumentación de HC



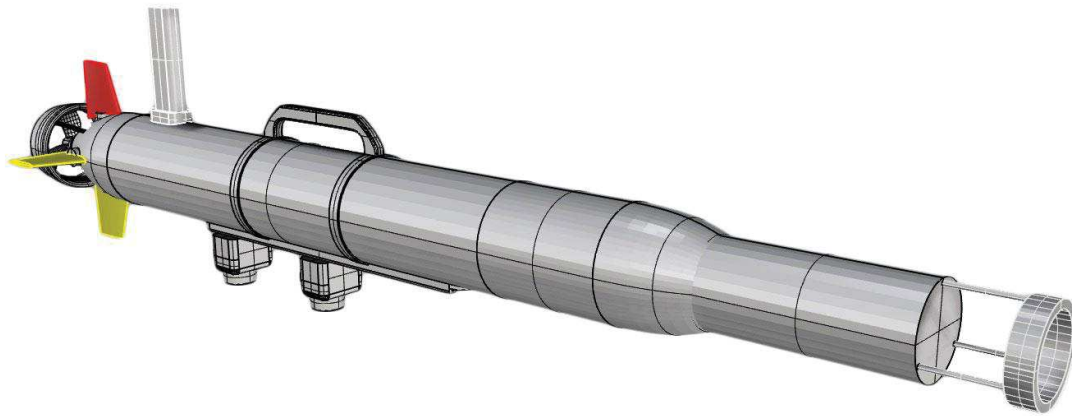


Imagen 80. V_{HC}

Con este modelado de 3D de las 3 configuraciones se ha realizado el balance de pesos de cada una de ellas, visto anteriormente.

Así pues con la configuración V_{YSI} se procede a generar el modelo en el software de CFD (Tdyn[®]). Este proceso es crítico ya que para el mallado hay que evitar errores como la duplicación de elementos, establecer un origen de coordenadas coherente así como prestar especial atención a la unión de superficies.

En primer lugar, se generan a partir del modelo de Rhinoceros[®] los puntos de la superficie necesarios (puntos de control que pertenecen a las superficies NURBS y que están en contacto con el fluido y otros puntos de apoyo para poder generar las superficies) para adecuarlo a su introducción en Tdyn, ya que la exportación de superficies complejas de un programa a otro con no suele dar buenos resultados. Por otro lado, se han simplificado algunos elementos como la hélice, el asa y el rail ya que no se espera que aporten una resistencia significativa que justifique su introducción en Tdyn. Conforme se introducen los puntos en Tdyn se clasifican en capas diferentes (“layers”) según el elemento que se trate para poder trabajar de forma más clara.

Name	C	I/O	F/U	Tr	B
Aletas					
Antena					
Caja					
Cuerpo	✓				
Modem					
Sup. Contacto					
Tobera					
USBL					
Volumen					

Imagen 81. Distribución de los elementos del vehículo en capas

Uniendo los puntos en forma de rectas, curvas y arcos se conforman las líneas base para generar las superficies del volumen:

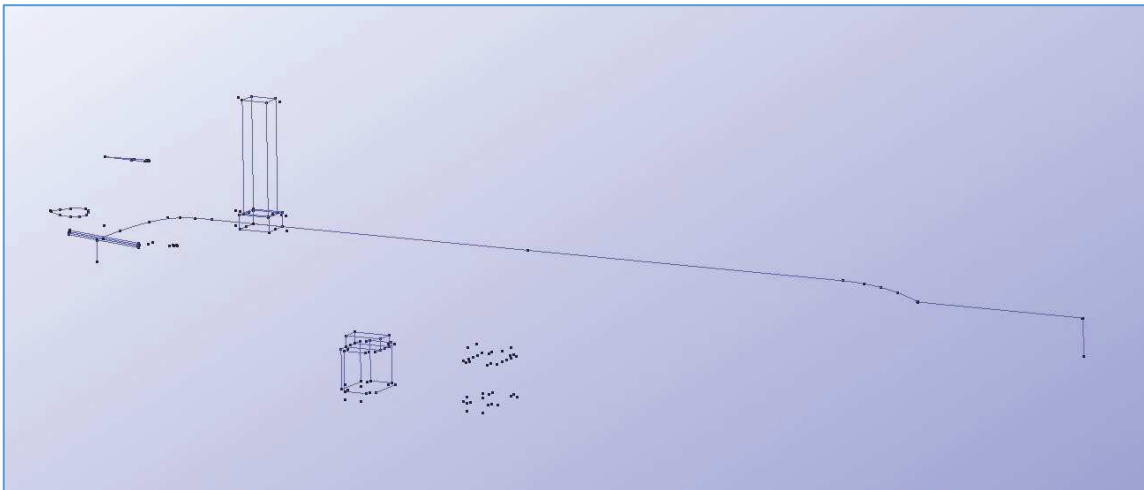


Imagen 82. Puntos necesarios para el generado de superficies en Tdyn

Durante la generación de los apéndices se han alargado las superficies que están en contacto con el cuerpo principal para recortarlas con el mismo posteriormente, obteniendo un contacto exacto entre ambas; como ya se ha indicado anteriormente no deben existir superficies duplicadas para asegurar que el cuerpo esté completamente cerrado y poder generar el volumen de control, necesario para realizar el análisis de CFD.

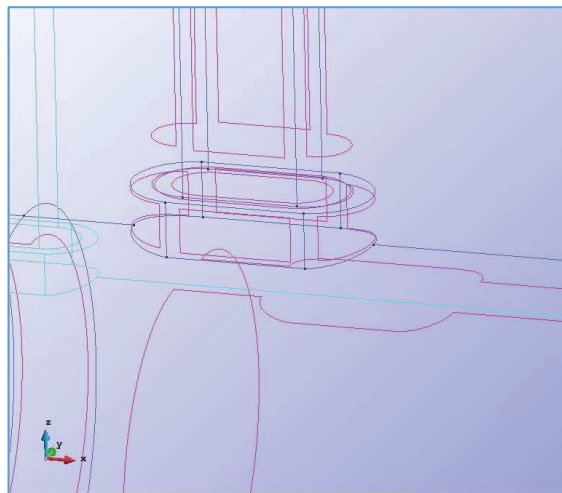


Imagen 83: Ejemplo de recorte de la antena con el casco

Finalmente, una vez creado el cuerpo, sus apéndices y la caja, se genera el volumen que representa el fluido (agua de mar). Este volumen debe generarse sin presentar ningún problema, ya que de lo contrario significa que no se ha elaborado correctamente el modelado.

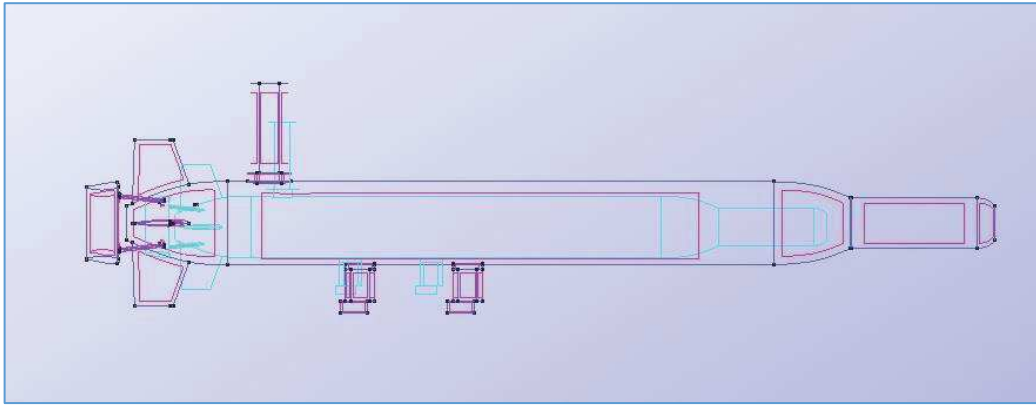


Imagen 84. Volumen generado en el modelo V_{VSI} (representado en azul claro)

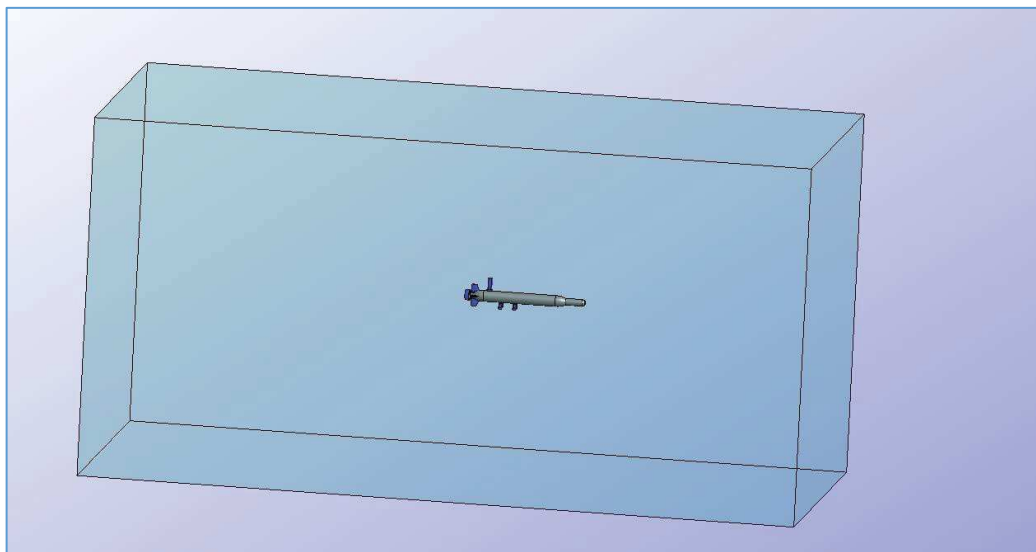


Imagen 85. Volumen de control y vehículo

Una vez generados el modelo en 3D en Tdyn se pasa a definir las condiciones de contorno del apartado siguiente.

6.3.2. Vehículo con sonda la Sonda Multihaz

Una vez validado el método del cálculo de la resistencia al avance del modelo V_{YSI} , se introducen los nuevos puntos correspondientes al sónar multihaz y la carcasa desarrollada en apartados anteriores. Las dimensiones originales del dispositivo se muestran en la imagen siguiente:

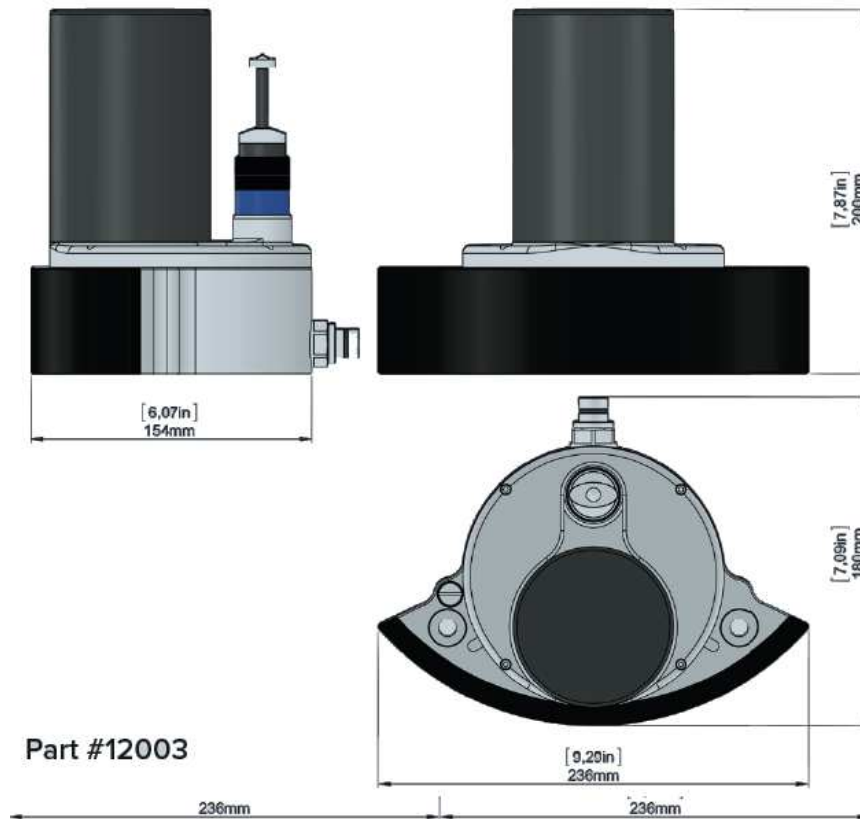


Imagen 86. Dimensiones generales de la Sonda Multihaz

Para su análisis en CFD se ha procedido de manera similar que con el vehículo, creando primero el modelo en 3D en Rhinoceros®, simplificando en la medida de lo posible la geometría y realizando un proceso iterativo con el balance de pesos para conseguir que el diseño mantenga al vehículo con flotabilidad positiva y un trimado aceptable.

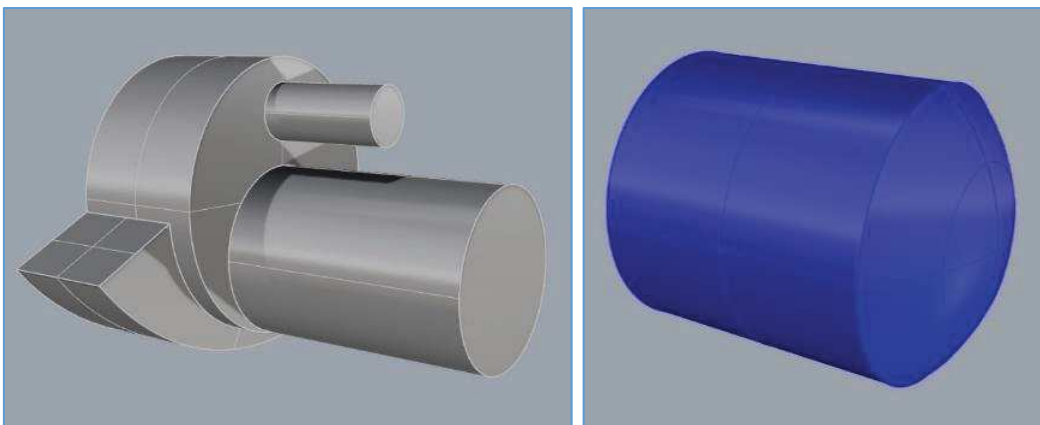


Imagen 87. Modelado 3D de la Sonda Multihaz y la carcasa

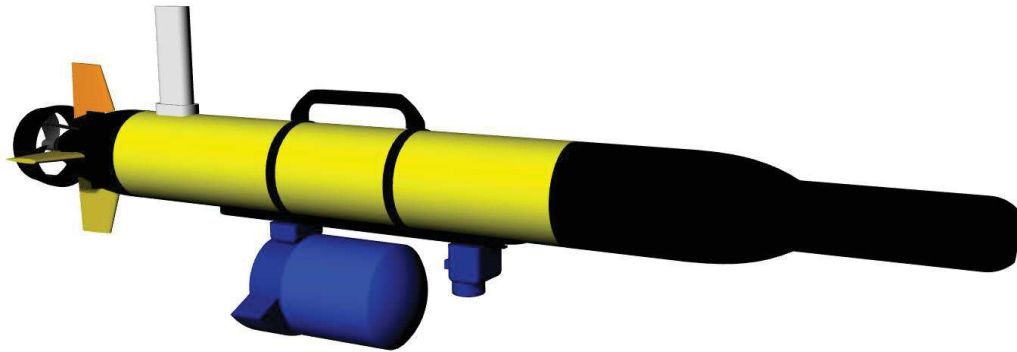


Imagen 88. Renderizado 3D del vehículo con la Sonda Multihaz

Con el modelado en Rhinoceros®, se procede a generar el modelo en Tdyn. Este proceso es igual al apartado anterior, desplazando el modem acústico sobre el raíl hacia proa y colocando la Sonda Multihaz en la posición correcta. Por tanto, se generan de igual forma los puntos de la superficie.

Una vez finalizado el proceso de unión de puntos, y corte de superficies el modelo final resulta como sigue en la imagen siguiente:

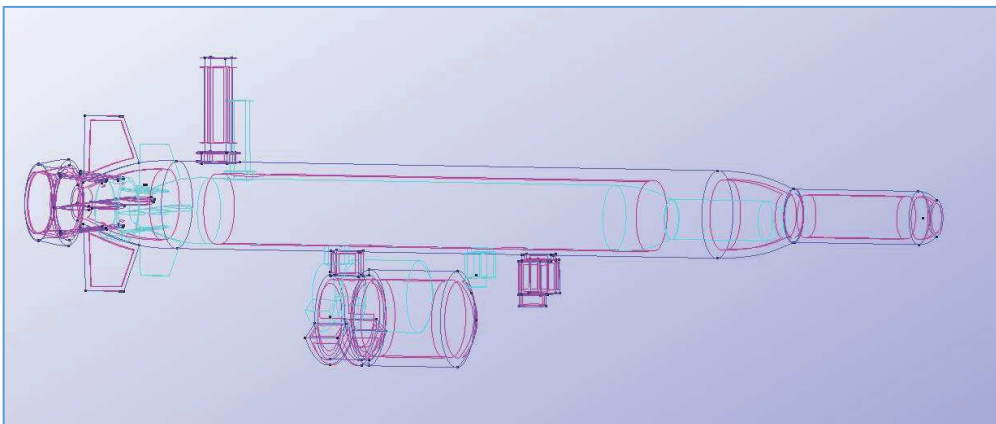


Imagen 89. Modelo generado en Tdyn (en azul claro se representa el volumen)

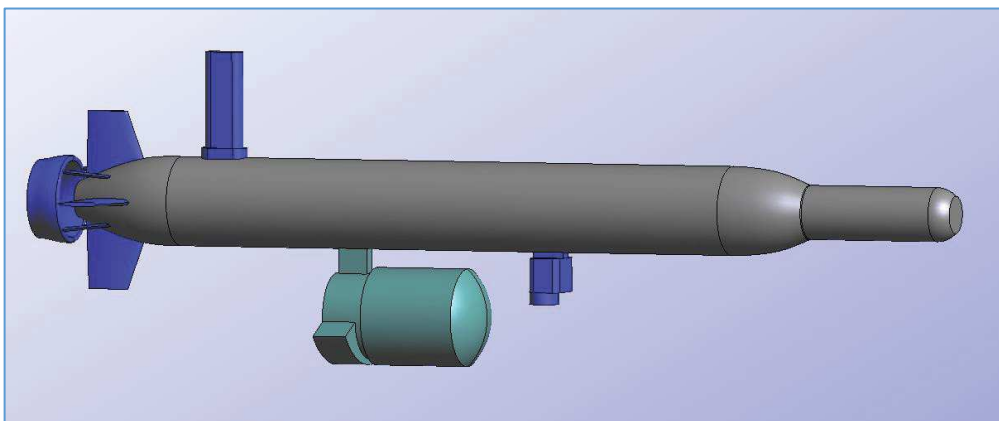


Imagen 90. Renderizado del vehículo

6.4. El análisis CFD

En primer lugar, en cualquier estudio CFD se requiere establecer un volumen de control, que delimita la zona de estudio y donde se definen las condiciones de contorno del fluido en el que navega el vehículo. Las paredes del volumen de control deben estar lo suficientemente lejos del vehículo para que no influyan en el flujo, pero no demasiado para reducir el número de nodos innecesarios y con ello el tiempo de cálculo.

Si bien existen varias posibilidades a la hora de generar el volumen de control, se ha optado finalmente por un volumen de control de geometría rectangular respecto de una cilíndrica, ya que aunque el número de nodos es ligeramente inferior y los resultados no demuestran diferencias significativas, las gráficas de convergencia del resultado muestran resultados mucho más estables para la configuración rectangular:

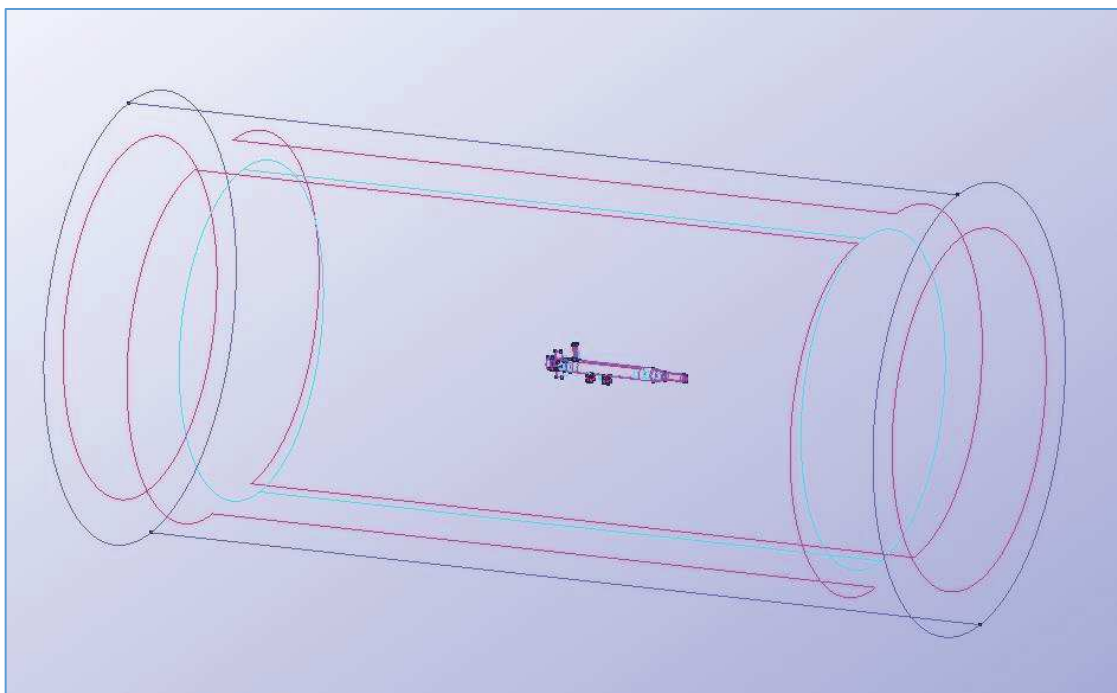


Imagen 91: Dimensiones del volumen de control (unidades en centímetros)

Por tanto las dimensiones finales del volumen de control son las siguientes:

$$\begin{aligned} \text{Distancia proa} - \text{frontal} &= 2 \cdot \text{Eslora} = 329,6 \text{ cm} \\ \text{Distancia crujía} - \text{lateral} &= 1,5 \cdot \text{Eslora} = 247,2 \text{ cm} \\ \text{Distancia popa} - \text{trasera} &= 3 \cdot \text{Eslora} = 494,4 \text{ cm} \\ \text{Distancia crujía} - \text{fondo} &= 1,5 \cdot \text{Eslora} = 247,2 \text{ cm} \end{aligned}$$

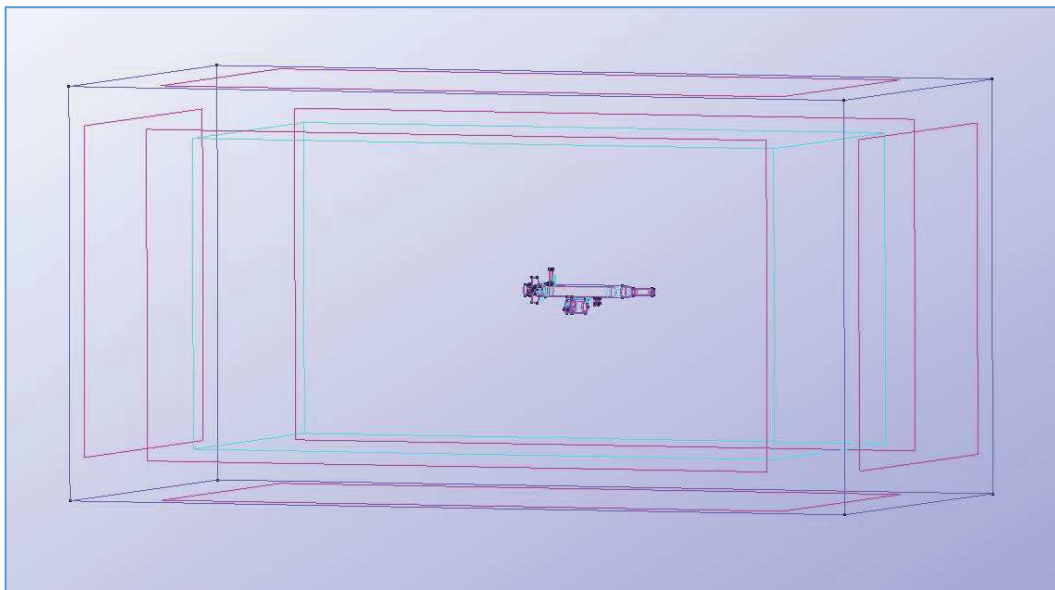


Imagen 92. Volumen de control

La cara de entrada tiene una velocidad de componente $[X, Y, Z]$ correspondiente a la velocidad de entrada del fluido, cuya componente será negativa debido al sentido del modelado, es decir en dirección contraria al mismo. En el caso de las laterales será de 0 m/s. La cara de salida del flujo se considera como cara de presión. Las paredes estarán configuradas como Fix Initial, para que el arranque de la simulación en esas caras en los pasos iniciales sea en modo Both (Time + Speed), es decir que sea progresivo en el tiempo y velocidad para estabilizar el flujo.

6.4.1. Formulación para Tdyn

En este apartado se definen las fórmulas relativas a las condiciones de contorno que se introducen en el cálculo CFD del programa Tdyn. Estas condiciones de contorno son específicas para cada vehículo y velocidad ensayados.

Esta formulación se refiere a aspectos como el modelo de turbulencia o las condiciones de la pared (que definen el comportamiento del fluido a lo largo del modelo) y dependen del tipo de ensayo que se esté realizando, ya que no es lo mismo ensayar el comportamiento de una hélice que el casco de una embarcación de planeo, por ejemplo.

1. FÓRMULAS RELATIVAS A LA TURBULENCIA

Uno de los elementos clave del análisis CFD es conocer y caracterizar el comportamiento del flujo y concretamente su interacción con los cuerpos. En función de la geometría, la velocidad, la viscosidad del fluido o la rugosidad de la pared se condiciona la aparición del fenómeno de la turbulencia, que es la situación que se presenta al romperse la capa límite una vez superadas determinadas condiciones de contorno, momento en el que el fluido deja de ser laminar.

La turbulencia del fluido se caracteriza por tener cambios bruscos de presión y velocidad a lo largo de su recorrido en el tiempo, que suele presentarse en forma de vórtices o remolinos.

Gran parte de la energía cinética de la turbulencia se transforma en estructuras a gran escala que mediante el fenómeno de la energía en cascada se transforma en estructuras más pequeñas, en forma de una infinidad de vórtices.

La complejidad de la turbulencia es elevada debido a que su presencia y el momento así como las condiciones en las que aparece influyen en el comportamiento del vehículo una vez se desarrolla, dominando el comportamiento del resto del flujo e incrementando la energía disipada y la resistencia al avance. En la imagen siguiente se muestra la transición del flujo laminar a uno turbulento después de que el fluido impacte contra un objeto circular. La geometría de los vehículos es fundamental para retrasar o reducir la aparición de la capa turbulenta:

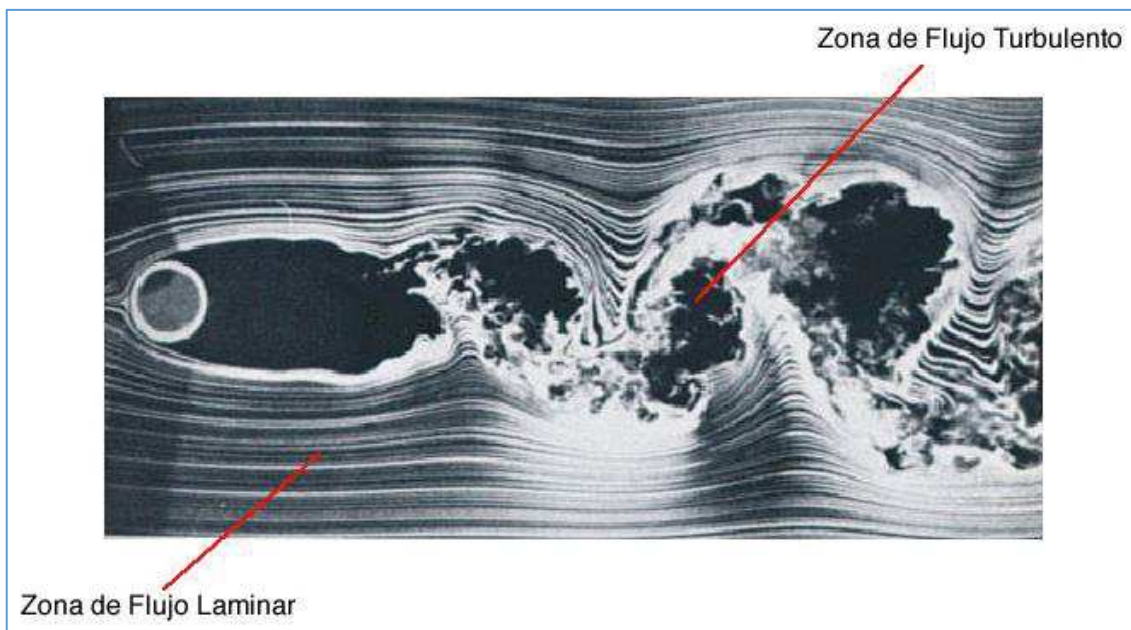


Imagen 93: Ejemplo de flujo laminar y turbulento (Fuente: <http://www.textoscientificos.com>)

En función del modelo de turbulencia utilizado se puede obtener un resultado numérico más o menos cercano al resultado real del vehículo.

El modelo de turbulencia seleccionado para los vehículos de estudio en este proyecto es el K – Omega SST (K- ω SST) puesto que comparando resultados con otros proyectos de vehículos de características similares, se ha demostrado una mayor correlación de los resultados con éste método, aceptándolo como válido.

El K- ω SST se basa en modelos de dos ecuaciones que determinan la velocidad V y la longitud de escala turbulenta L en combinación con el factor K . Estos modelos son muy conocidos y utilizados en aplicaciones industriales debido a su simplicidad y no son dependientes de la geometría o del régimen del flujo.

El modelo K- ω SST es una variación del modelo K – Omega (K- ω) en el que se combinan elementos de los modelos K- ϵ (K Epsilon) y K- ω . Esta combinación intenta mantener las propiedades calculadas cerca de la pared del modelo K- ω caracterizando gradualmente a su vez el comportamiento del flujo a medida que se aleja de la pared, característica del modelo K- ϵ . Con ello, se reduce la sensibilidad al flujo libre del modelo K- ϵ sacrificando parte del comportamiento cerca de la pared del modelo K- ω .

Cuanto más complejo sea el elemento y más fino el mallado más tiempo de procesado será necesario, por lo que al final se necesita un compromiso entre el grado de semejanza con el modelo real (complejidad del modelo), el mallado (más fino o más grueso) y la precisión del resultado.

Para empezar a realizar los cálculos utilizando los modelos RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes) se requiere calcular los parámetros de la viscosidad dinámica turbulenta. Las viscosidades cinemática y dinámica turbulentas se obtienen mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Viscosidad dinámica } \mu = \rho \cdot \nu$$

El ratio $\frac{\text{viscosidad turbulenta}}{\text{viscosidad}}$ debe ser tal que $1 < \frac{\mu_\tau}{\mu} < 10$.

se supone un ratio que vale 5 \rightarrow Viscosidad dinámica turbulenta $\mu_\tau = 5 \cdot \mu$

$$\text{Viscosidad cinemática turbulenta} = \frac{\mu_\tau}{\rho} \cdot \nu$$

$$\text{Velocidad adimensionalizada en la pared } v_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$

$$\text{Longitud de escala turbulenta (m)} \quad l = \frac{\mu_\tau}{\rho \cdot V}$$

$$\text{Energía cinética turbulenta } K = \frac{3}{2} \cdot (TIL \cdot v_\tau)^2$$

ν = viscosidad cinemática en m^2/s , μ = viscosidad dinámica en $\text{Pa} \cdot \text{s}$, ρ = densidad en kg/m^3
 V = Velocidad en m/s , v_τ = velocidad adimensionalizada en la pared, τ_w = resistencia de fricción

Tabla 37: Cálculos relativos a la viscosidad

Con los valores de viscosidad cinemática y dinámica turbulentas, se deben calcular también los siguientes parámetros necesarios para caracterizar el flujo: la velocidad adimensionalizada en la pared, la longitud de escala turbulenta y la energía cinética turbulenta. Esta velocidad en la pared depende de la resistencia de fricción y la densidad del fluido.

La longitud de escala turbulenta depende de densidad y la velocidad del fluido. Un poco más complejo es el concepto del coeficiente de energía turbulenta K, que depende de la velocidad adimensionalizada mencionada antes y el TIL o intensidad de turbulencia. El coeficiente TIL suele tener un valor del 0,30% en el caso de submarinos o puede calcularse en tuberías con un flujo totalmente desarrollado con la fórmula siguiente:

$$TIL = 0,30\% \quad \text{ó} \quad TIL = 0,16 \cdot V^{-0,125}$$

V = velocidad (m/s)

Tabla 38: Cálculo del TIL

Para estos cálculos se ha considerado más apropiado utilizar la primera opción. Puesto que tanto la velocidad adimensionalizada en la pared como la longitud de escala turbulenta dependen del estado de la turbulencia, los diferentes modelos de turbulencia utilizarán estos coeficientes para calcular las características del flujo.

2. PARÁMETROS DE LA PARED

Cuando el flujo está cerca de la pared, las fluctuaciones turbulentas de la pared se suprimen y los efectos viscosos adquieren una importancia mayor en la zona conocida como subcapa viscosa. Es fundamental conocer el comportamiento del flujo en las zonas donde existe la transición entre la capa límite entre la zona laminar y la turbulenta.

Esto implica que el comportamiento del flujo que calculan muchos modelos de turbulencia no es válido en el flujo que discurre cerca de la pared, circunstancia que se debe tener en cuenta aplicando en la pared unas condiciones diferentes a las utilizadas en el resto del flujo.

En la siguiente imagen se representa la evolución de la capa límite en función de la velocidad:

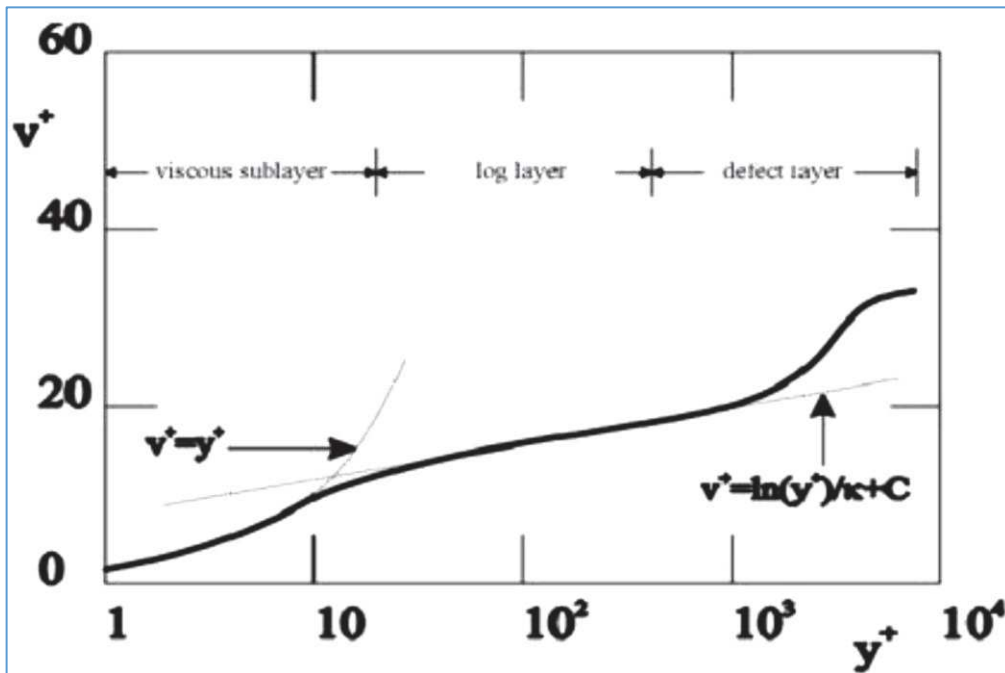


Imagen 94: Desarrollo de la capa límite (Fuente: HB Tdyn turbulence www.compassis.com)

Para desarrollar las condiciones cerca de la pared, se utilizan una serie de parámetros adimensionales en los que se define la relación entre la velocidad de fricción v_τ vista en la Tabla 37 y la tensión de cizallamiento provocada como consecuencia de esta fricción contra la pared. El cálculo del parámetro adimensional y^+ se calcula según la formulación en la tabla siguiente:

$$\text{Espesor de la capa límite } \delta \text{ (m)} = 5 \cdot \frac{L}{\sqrt{Re}}$$

Parámetro adimensional $\gamma = 0,1 \cdot \delta$, suele ser 10% de δ

$$\text{Parámetro adimensional } \gamma^+ = \gamma \cdot \rho \cdot \frac{v_\tau}{\mu}$$

L = eslora (m), μ = viscosidad dinámica en Pa · s, ρ = densidad en kg/m³

v_τ = velocidad adimensionalizada en la pared

Tabla 39: Cálculo del espesor δ y del parámetro adimensional γ^+

El parámetro δ calcula el espesor de la capa límite en función de la eslora del vehículo, que en este caso se ha supuesto que es laminar (puesto que se encuentra cerca de la zona de transición entre un flujo laminar y turbulento). Con este parámetro se puede calcular el parámetro γ , cuyo valor suele ser del orden del 10% de δ .

Con el parámetro γ se obtiene γ^+ mediante la densidad, la viscosidad dinámica y la velocidad de fricción. La implementación del uso de γ^+ se realiza mediante la llamada ley de Reichardt descrita a continuación. La formulación de la ley de Reichardt se considera válida dentro del rango $0 \leq \gamma^+ \leq 300$, es decir dentro del rango de espesores de la capa límite:

$$U^+ = 2,5 \cdot \ln(1 + k \cdot \gamma^+) + 7,8 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\gamma^+}{11}} - \frac{\gamma^+}{11} \cdot e^{-0,33 \cdot \gamma^+} \right)$$

γ^+ = parámetro adimensional

Tabla 40: Cálculo del espesor δ y del parámetro adimensional U^+

Se han seleccionado dos modelos de pared aplicables para las condiciones de contorno representadas en el caso de estos vehículos submarinos, dentro del rango de velocidades de estudio: el V_fixWall y el YplusWall. 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 cálculo como tiene que calcular la interacción del fluido con la superficie del elemento, que como se ha indicado depende del modelo de pared seleccionado.

El V_fixWall impone una condición de velocidad nula en la pared, para resolver de forma explícita la región más cercana a la pared con el modelo numérico. Este modelo de pared solamente se utiliza en análisis con un régimen de flujo con un número de Reynolds bajo, por lo que no es de aplicación con las velocidades objetivo vistas en los logs.

El YplusWall es una simplificación lineal de la condición de la pared y está basada en la ley de Reichardt. Para su aplicación se recomienda que el valor de γ^+ se encuentre entre 20 y 30 para tener una aproximación fina, circunstancia que se tendrá en cuenta una vez se obtengan sus valores para los casos de estudio. Una vez se obtiene el valor para el cuerpo principal, se validará su uso para todos los apéndices.

El valor de γ^* se calcula para cada uno de los elementos que conforman el vehículo de estudio, es decir un valor para el cuerpo principal, otro para las aletas, otro para el USBL / módem acústico, la Sonda Multihaz... puesto que cada uno tiene una eslora y por tanto un número de Reynolds diferente para la misma velocidad de avance del fluido.

3. PARÁMETROS DEL ENSAYO

Para finalizar el conjunto de parámetro a introducir en Tdyn relativos al comportamiento del flujo alrededor del vehículo, es necesario fijar unos valores de referencia que permitan realizar la simulación, teniendo en cuenta como primera aproximación tanto el tamaño de malla mínimo necesario como del tiempo de simulación que debe cumplirse para asegurar que el flujo se desarrolle completamente.

Esto suele implicar un número de pasos iniciales en función del valor de los pasos de ensayo, que como se ha descrito anteriormente, se realizarán en condición Both (Time + Speed), para asegurar que se está desarrollando el flujo unas condiciones estables como paso a las iteraciones del cálculo en CFD:

$$\text{Número de Courant} = \frac{h}{2 \cdot V}, \text{ coeficiente } C = \alpha \cdot Cr$$

$$\delta tm = \frac{V}{h}, \text{ e incremento de tiempo } \delta t = \frac{C \cdot L}{V} \text{ debe cumplirse que } \delta t \leq 20 \cdot \delta tm$$

$$\text{Número de pasos NOS} = \frac{1.000 \cdot \delta t \cdot V}{L},$$

$$\text{Número de pasos iniciales } NOS_i = 30\% \text{ aprox. de NOS}$$

$$\text{Tiempo de simulación } Tsim = \delta t \cdot NOS$$

h = tamaño de malla (mm), α = factor entre 1 y 10, L = eslora del vehículo (m), V = velocidad (m/s)

Tabla 41: Cálculo del número de Courant, espesor δt , NOS, NOS_i y $Tsim$

Con el número de Courant se puede calcular el incremento de tiempo δt , que corresponde con el incremento de tiempo real que se utiliza entre pasos (es decir, la división del tiempo de ensayo entre el número de pasos). En función del tamaño de mallado se modifica el tiempo del ensayo, aunque como se ha comentado, éstos valores son los mínimos para asegurar el buen inicio de la simulación.

Este aspecto es importante puesto que el tamaño de malla, el incremento de tiempo, los pasos y los pasos iniciales definen el grado de confianza en los resultados del ensayo e influyen en la estabilidad de las iteraciones en cada paso.

Una vez el programa está ya calculando, hay dos elementos que permiten evaluar si los resultados están convergiendo (es decir si se están calculando correctamente), y que son el

número de iteraciones necesarias en cada paso (definidas entre 1 y 10 como máximo) y la curva de fuerzas / tiempo (Forces graph), como se verá en detalle en el próximo apartado.

El tamaño de malla es un valor que debe modificarse de forma iterativa hasta obtener una buena relación entre resultados obtenidos (estables) y el tiempo de cálculo. El tamaño de malla utilizado para los análisis es de 0,003 m, es decir de 3 mm.

6.4.2. Variables vehículo sin modificaciones (V_{Ysi})

En la siguiente tabla se muestran las variables calculadas para introducir en el programa, que son la velocidad de avance, el coeficiente K (energía cinética turbulenta) y L (longitud de escala turbulenta). También se calculan el incremento de tiempo δt , los NOS y NOSi (y por tanto el tiempo de simulación), aunque en este caso estos valores cambiarán para cumplir con las condiciones de estabilidad mencionadas en el apartado anterior. En el caso del cuerpo principal del vehículo:

Velocidad (m/s)	k	L	Y+	δt	NOS	NOSi	T simulación
0,00	0,000E+00	0,00E+00	0,000	0,0000	0,000	0,000	0,000
0,25	1,845E-09	1,885E-05	15,115	0,6304	100,00	33,33	63,04
0,50	6,289E-09	9,425E-06	19,736	0,1576	50,00	16,67	7,88
0,75	1,296E-08	6,283E-06	23,133	0,0700	33,33	11,11	2,33
1,00	2,170E-08	4,713E-06	25,921	0,0394	25,00	8,33	0,99
1,25	3,240E-08	3,770E-06	28,331	0,0252	20,00	6,67	0,50
1,50	4,499E-08	3,142E-06	30,476	0,0175	16,67	5,56	0,29
1,75	5,942E-08	2,693E-06	32,425	0,0129	14,29	4,76	0,18
2,00	7,563E-08	2,356E-06	34,219	0,0099	12,50	4,17	0,12
2,25	9,359E-08	2,094E-06	35,889	0,0078	11,11	3,70	0,09
2,50	1,133E-07	1,885E-06	37,456	0,0063	10,00	3,33	0,06
1,541	4,723E-08	3,058E-06	30,080	0,0166	16,22	5,41	0,27
1,355	3,746E-08	3,478E-06	29,259	0,0215	18,45	6,15	0,40

Tabla 42: Valores para las distintas velocidades del vehículo

Para la velocidad de ensayo de 1,541 m/s, los datos para los apéndices del vehículo son los siguientes:

	Eslora (m)	Área (m ²)	Fn	Rn	Cf ITTC - 57	Rf (N)	Pot (W)
Aletas	0,12	0,02	1,44	1,91E+05	6,97E-03	0,16	0,25
Antena	0,08	0,04	1,74	1,31E+05	7,72E-03	0,34	0,53
Tobera	0,06	0,05	2,01	9,81E+04	8,38E-03	0,55	0,84
Modem	0,07	0,03	1,81	1,21E+05	7,89E-03	0,29	0,44
USBL	0,07	0,03	1,81	1,21E+05	7,89E-03	0,29	0,44

Tabla 43: Valores para los apéndices

Elemento	τ_w (N)	δ (m)	y+	Tipo de pared
Aletas	0,165	0,018	24,134	y+ wall
Antena	0,343	0,022	42,037	y+ wall
Tobera	0,547	0,025	61,298	y+ wall
Modem	0,286	0,023	39,894	y+ wall
USBL	0,286	0,023	39,894	y+ wall

Tabla 44: Valores para los apéndices

Variación Operacional de un AUV

Para la velocidad de ensayo de 1,355 m/s, los datos para los apéndices del vehículo son los siguientes:

	Eslora (m)	Área (m ²)	Fn	Rn	Cf ITTC - 57	Rf (N)	Pot (W)
Aletas	0,12	0,02	1,27	1,68E+05	7,21E-03	0,13	0,18
Antena	0,08	0,04	1,53	1,15E+05	8,01E-03	0,27	0,37
Tobera	0,06	0,05	1,77	8,63E+04	8,70E-03	0,44	0,59
Modem	0,07	0,03	1,59	1,07E+05	8,18E-03	0,23	0,31
USBL	0,07	0,03	1,59	1,07E+05	8,18E-03	0,23	0,31

Tabla 45: Valores para los apéndices

Elemento	τ_w (N)	δ (m)	y^+	Tipo de pared
Aletas	0,132	0,019	23,022	y+ wall
Antena	0,275	0,023	40,138	y+ wall
Tobera	0,439	0,027	58,574	y+ wall
Modem	0,230	0,024	38,099	y+ wall
USBL	0,230	0,024	38,099	y+ wall

Tabla 46: Valores para los apéndices

6.4.3. Variables vehículo con sonda la Sonda Multihaz

En la siguiente tabla se muestran las variables calculadas para introducir en el programa, que son la velocidad de avance, el coeficiente K (energía cinética turbulenta) y L (longitud de escala turbulenta). También se calculan el incremento de tiempo δt , los NOS y NOSi (y por tanto el tiempo de simulación), aunque en este caso estos valores cambiarán para cumplir con las condiciones de estabilidad mencionadas en el apartado anterior. En el caso del parámetro adimensional y^+ se aplica solamente sobre el cuerpo principal del vehículo:

Velocidad (m/s)	k	L	y^+	δt	NOS	NOSi	T simulación
0,00	0,000E+00	0,00E+00	0,000	0,0000	0,000	0,000	0,000
0,25	1,845E-09	1,885E-05	15,115	0,6304	100,00	33,33	63,04
0,50	6,289E-09	9,425E-06	19,736	0,1576	50,00	16,67	7,88
0,75	1,296E-08	6,283E-06	23,133	0,0700	33,33	11,11	2,33
1,00	2,170E-08	4,713E-06	25,921	0,0394	25,00	8,33	0,99
1,25	3,240E-08	3,770E-06	28,331	0,0252	20,00	6,67	0,50
1,50	4,499E-08	3,142E-06	30,476	0,0175	16,67	5,56	0,29
1,75	5,942E-08	2,693E-06	32,425	0,0129	14,29	4,76	0,18
2,00	7,563E-08	2,356E-06	34,219	0,0099	12,50	4,17	0,12
2,25	9,359E-08	2,094E-06	35,889	0,0078	11,11	3,70	0,09
2,50	1,133E-07	1,885E-06	37,456	0,0063	10,00	3,33	0,06
1,355	3,746E-08	3,478E-06	29,259	0,0215	18,45	6,15	0,40
1,155	2,789E-08	4,098E-06	27,404	0,0298	21,74	7,25	0,65

Tabla 47: Valores para las distintas velocidades del vehículo

Variación Operacional de un AUV

Para la velocidad de ensayo de 1,155 m/s, los datos para los apéndices del vehículo son los siguientes:

	Eslora (m)	Área (m²)	Fn	Rn	Cf ITTC - 57	Rf (N)	Pot (W)
Aletas	0,12	0,02	1,08	1,42E+05	7,54E-03	0,10	0,13
Antena	0,08	0,04	1,30	9,76E+04	8,39E-03	0,21	0,28
Tobera	0,06	0,05	1,50	7,32E+04	9,14E-03	0,33	0,45
Modem	0,07	0,03	1,59	9,05E+04	8,58E-03	0,24	0,33
USBL	0,07	0,03	1,59	9,05E+04	8,58E-03	0,24	0,33
Multihaz	0,27	0,26	0,71	3,28E+05	6,07E-03	1,08	1,24

Tabla 48: Valores para los apéndices

Elemento	τ_w (N)	δ (m)	y+	Tipo de pared
Aletas	0,099	0,021	21,689	y+ wall
Antena	0,208	0,025	37,858	y+ wall
Tobera	0,332	0,029	55,303	y+ wall
Modem	0,241	0,026	42,352	y+ wall
USBL	0,241	0,026	42,352	y+ wall
Multihaz	1,075	0,014	46,993	y+ wall

Tabla 49: Valores para los apéndices

7. Resultados del análisis CFD

Finalizado el modelado y los cálculos del apartado anterior se procede a realizar las simulaciones CFD para la obtención de la resistencia al avance de los siguientes supuestos:

- ✓ Vehículo sin modificaciones: es el vehículo del que se tienen datos reales de consumo, velocidad, rumbo, profundidad, autonomía, etc. extraídos directamente de los logs. A este vehículo que tiene la instrumentación del YSI, se le han incorporado un USBL y un modem acústico por este motivo se le realizaran dos simulaciones a dos velocidades diferentes; la primera, es a la máxima velocidad que está registrada en los logs y con la cual se obtendrá el aumento de resistencia debido a la inserción de estos dos elementos. Y la segunda, será la velocidad a la que se igualen las potencias de ambos vehículos (suponiendo rendimientos propulsivos iguales), por lo que se requiere un proceso iterativo hasta conseguir igualarlas.
- ✓ Vehículo con la sonda Multihaz: para este vehículo se realizarán tres ensayos de forma similar a lo descrito en el párrafo anterior. La primera velocidad será la misma que en el caso anterior obteniendo el incremento de resistencia en este caso por la introducción de la Sonda Multihaz con respecto al vehículo V_{YSI} original, la segunda será la velocidad con respecto al vehículo actual V_{YSI} y la tercera la resultante de igualar de nuevo las potencias.

En primer lugar se introducen las condiciones de contorno en el programa, ajustando los parámetros que sean necesarios a fin de obtener resultados estables.

7.1. Vehículo sin modificaciones (V_{YSI})

En este apartado se realiza el análisis CFD para el vehículo sin modificaciones para las dos velocidades descritas. En ambas simulaciones se ha reducido el incremento de tiempo δt a 0,01 segundos para conseguir que el cálculo fuera estable una vez pasados los cálculos iniciales por lo que se ha alargado el tiempo del ensayo hasta los diez segundos, (el número de pasos total es de 1.000, que con un $\delta t = 0,01$ equivale a un ensayo de 10 segundos de duración):

```

--> ***** RUNNING TDYN 3D *****
--> ***** VER. 13, 7, 5, 0 *****
--> OutPut Units for Tdyn are: [m], [s], [kg], [Gt]
--> Geometry Units for Tdyn are: [cm]
--> Running NODAL Integration Algorithm in Fluid Domain
--> **** Using Incompressible Solver ****
--> Fluid Domain: Using Implicit Monolithic solver (Max_Iterations == 10)
--> INITIAL PHASE: 1 of 300
--> INITIAL PHASE: 2 of 300
--> INITIAL PHASE: 3 of 300
--> INITIAL PHASE: 4 of 300
--> INITIAL PHASE: 5 of 300
--> INITIAL PHASE: 6 of 300
--> INITIAL PHASE: 7 of 300
--> INITIAL PHASE: 8 of 300
    
```

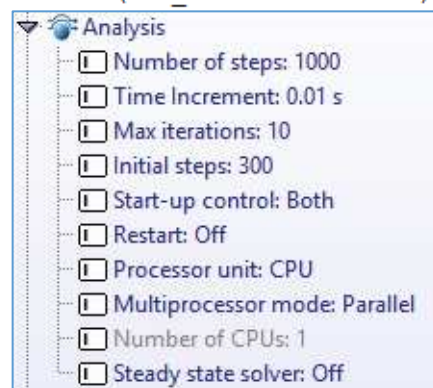


Imagen 95. Interfaz del programa con las condiciones de contorno

El tamaño de malla es de 3 mm con un tamaño máximo de mallado de 50 cm, por lo que se han generado un total de 143.331 nodos y 533.238 elementos (lo que implica unas dos horas por ensayo realizado). Elementos demasiado grandes pueden conducir a resultados de mala calidad, mientras que los elementos demasiado pequeños pueden aumentar drásticamente el tiempo computacional sin mejorar la calidad de los resultados.

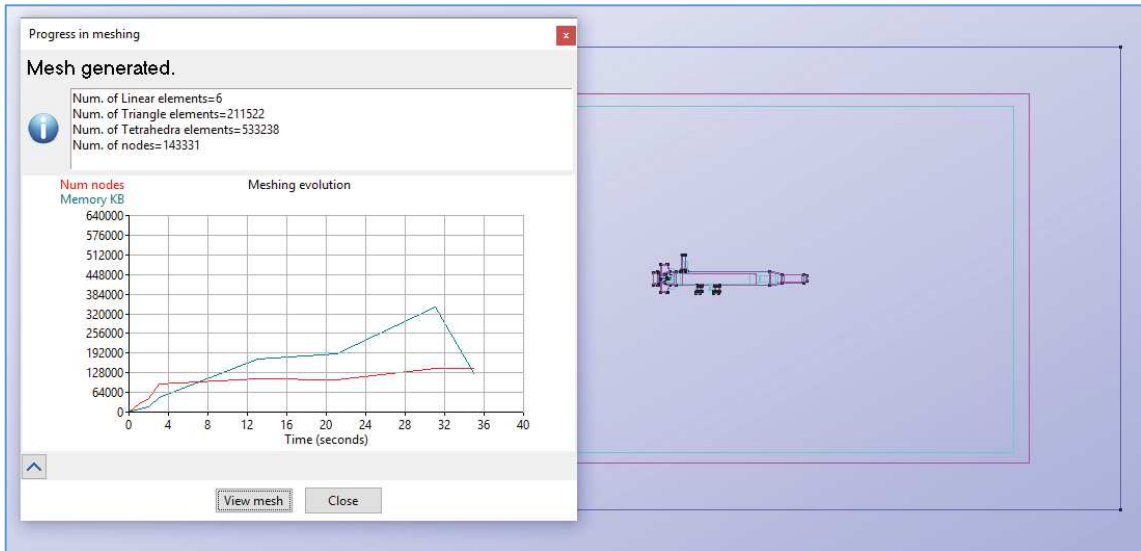


Imagen 96. Número de elementos de malla creados

Un ejemplo del detalle del mallado del vehículo se muestra a continuación:

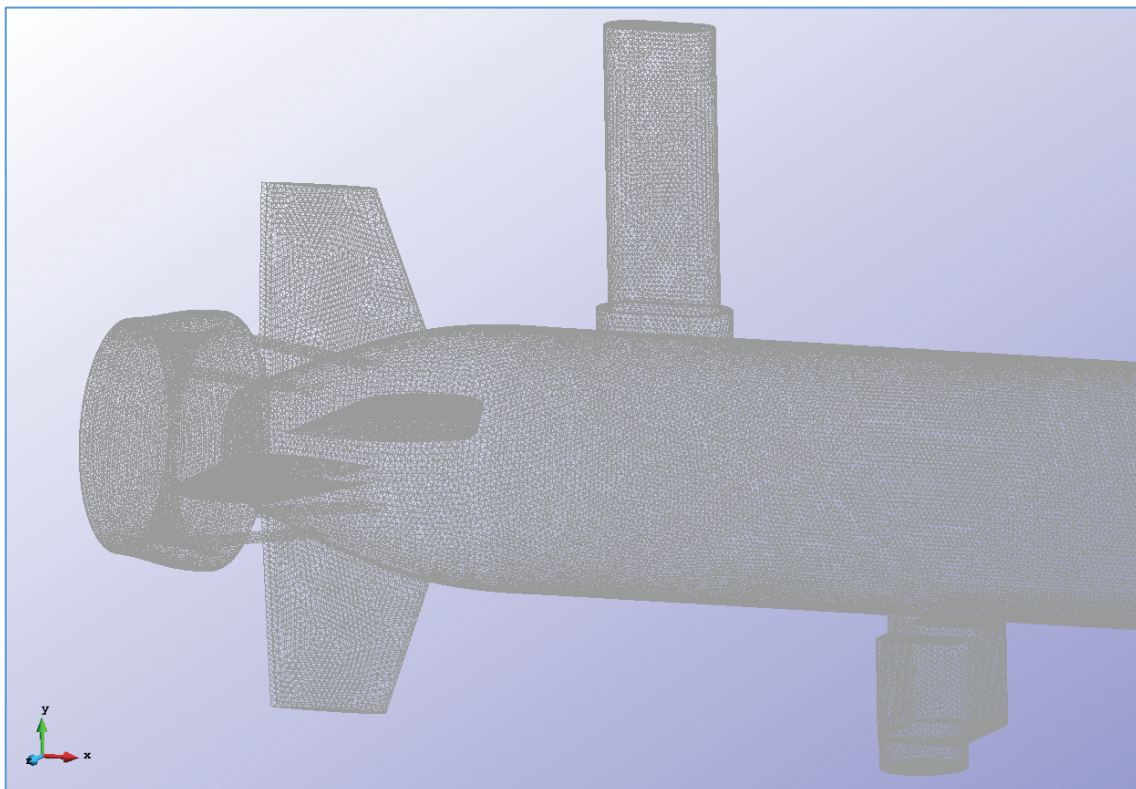
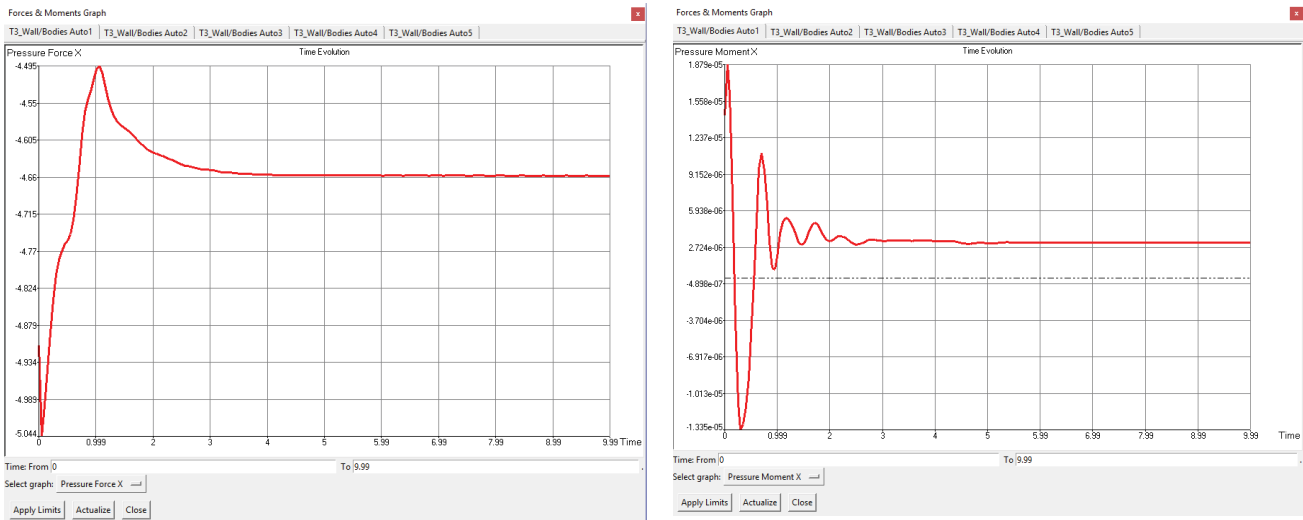


Imagen 97. Detalle de la malla del vehículo sin modificaciones

Variación Operacional de un AUV

Además es importante que los resultados obtenidos se mantengan estables una vez pasados los cálculos iniciales, como se puede ver en las gráficas siguientes:



output info for 'current' Tue Nov 15 12:50:03

```
--> STEP = 978, TIME = 9.78: Converged after 1 iterations.  
--> STEP = 979, TIME = 9.79: Converged after 1 iterations.  
--> STEP = 980, TIME = 9.8: Converged after 1 iterations.  
--> STEP = 981, TIME = 9.81: Converged after 1 iterations.  
--> STEP = 982, TIME = 9.82: Converged after 1 iterations.  
--> STEP = 983, TIME = 9.83: Converged after 1 iterations.  
--> STEP = 984, TIME = 9.84: Converged after 1 iterations.  
--> STEP = 985, TIME = 9.85: Converged after 1 iterations.  
--> STEP = 986, TIME = 9.86: Converged after 1 iterations.  
--> STEP = 987, TIME = 9.87: Converged after 1 iterations.  
--> STEP = 988, TIME = 9.88: Converged after 1 iterations.  
--> STEP = 989, TIME = 9.89: Converged after 1 iterations.  
--> STEP = 990, TIME = 9.9: Converged after 1 iterations.  
--> STEP = 991, TIME = 9.91: Converged after 1 iterations.  
--> STEP = 992, TIME = 9.92: Converged after 1 iterations.  
--> STEP = 993, TIME = 9.93: Converged after 1 iterations.  
--> STEP = 994, TIME = 9.94: Converged after 1 iterations.  
--> STEP = 995, TIME = 9.95: Converged after 1 iterations.  
--> STEP = 996, TIME = 9.96: Converged after 1 iterations.  
--> STEP = 997, TIME = 9.97: Converged after 1 iterations.  
--> STEP = 998, TIME = 9.98: Converged after 1 iterations.  
--> STEP = 999, TIME = 9.99: Converged after 1 iterations.  
--> STEP = 1000, TIME = 10: Converged after 1 iterations.  
--> Results written successfully !
```

Close

Imagen 98: Estabilidad de resultados en la curva de fuerzas

El primer ensayo se realiza a la velocidad de 1.541 m/s ya que es la máxima velocidad alcanzada por el vehículo V_{YSI} original en los logs, con una resistencia de aproximadamente 15 N. Los resultados revelan el aumento de resistencia con los cambios introducidos en el vehículo. A continuación se muestran dos capturas, donde se puede ver el flujo de velocidades y de presiones en el vehículo tras el ensayo:

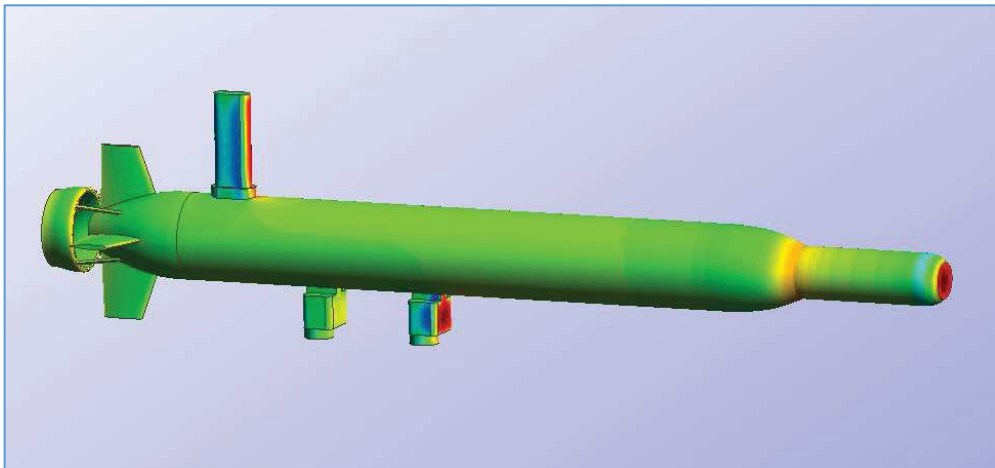


Imagen 99: Presiones actuantes en el vehículo

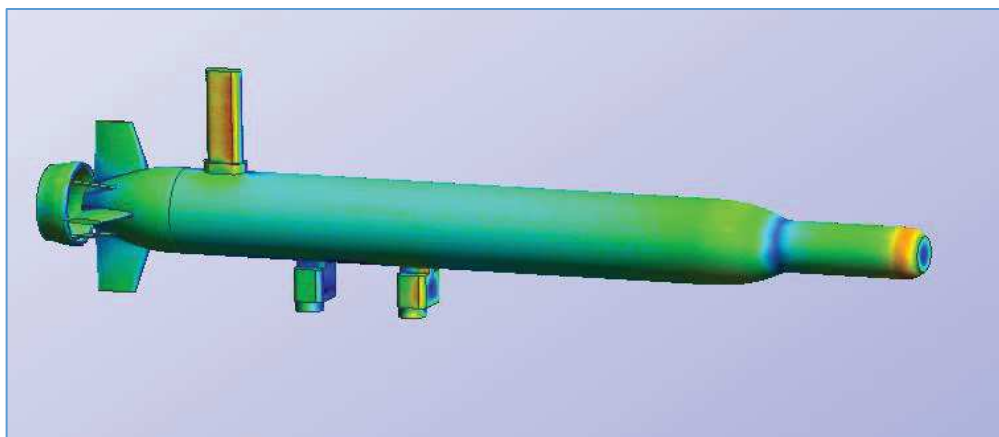


Imagen 100: Flujo de velocidades sobre el vehículo

Los resultados de la resistencia en las tres direcciones ofrecen los siguientes valores:

Elemento	Fx	Fy	Fz
Cuerpo	-38,922	0,118	234,270
Aletas	29,021	-0,073	3,724
Antena	-5,501	0,311	-65,498
Tobera	0,442	-0,171	1,963
USBL y modem	-7,471	-0,163	77,531
Total (N)	-22,431	0,021	251,990
Potencia (W)	34,565	0,033	-
Potencia resultante (W)	34,566	-	-

Tabla 50. Resumen de los resultados de la resistencia para cada uno de los elementos

A continuación, con el fin de igualar la potencia del V_{YSI} original con el V_{YSI} , se asume que el rendimiento propulsivo de ambos vehículos se mantiene constante y la potencia al freno también ya que el motor es el mismo en todos los casos estudiados y se estudia entregando la máxima potencia.

Por tanto, se realizan ensayos hasta igualar las potencias, para lo cual conforme se va reduciendo la velocidad del V_{YSI} , se reduce la potencia necesaria para propulsarlo hasta alcanzar la potencia del V_{YSI} original, que en este caso es de 23,034 W.

$$EHP = R * V \qquad \eta_p = \frac{EHP}{BHP}$$

En los ensayos se mantienen constantes las condiciones en cuanto al mallado (3 mm) y las relativas al análisis como el tiempo de ensayo (10 sg), etc. No obstante, las condiciones en la pared (k, L, etc.) y los parámetros de turbulencia (y^+) deben ser ajustados para cada velocidad.

Finalmente, la velocidad con la que se igualan ambas potencias es de 1,355 m/s, por lo que el vehículo ha visto reducida la velocidad en 0,186 m/s debido a la instalación del USBL y el modem acústico. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

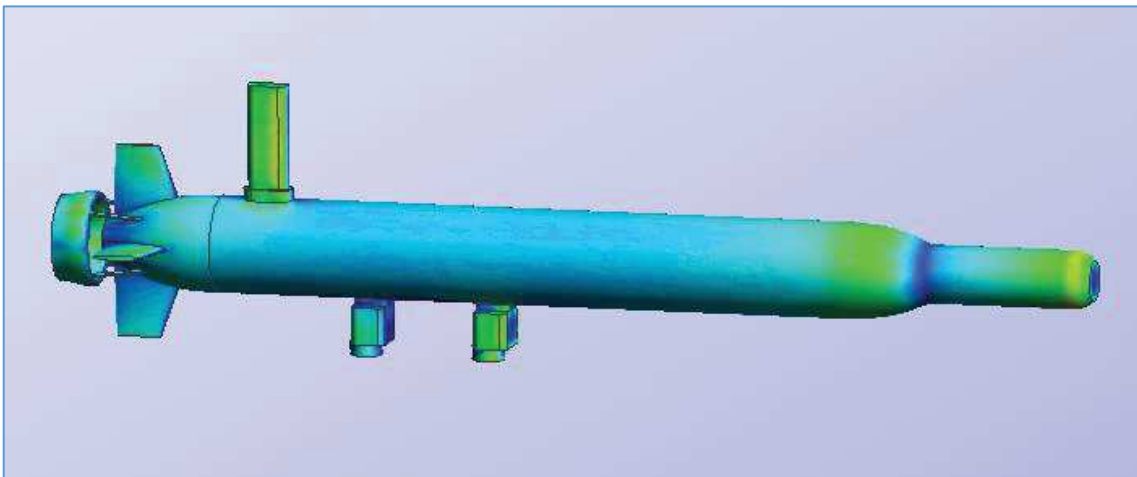


Imagen 101: Flujo de velocidades sobre el vehículo

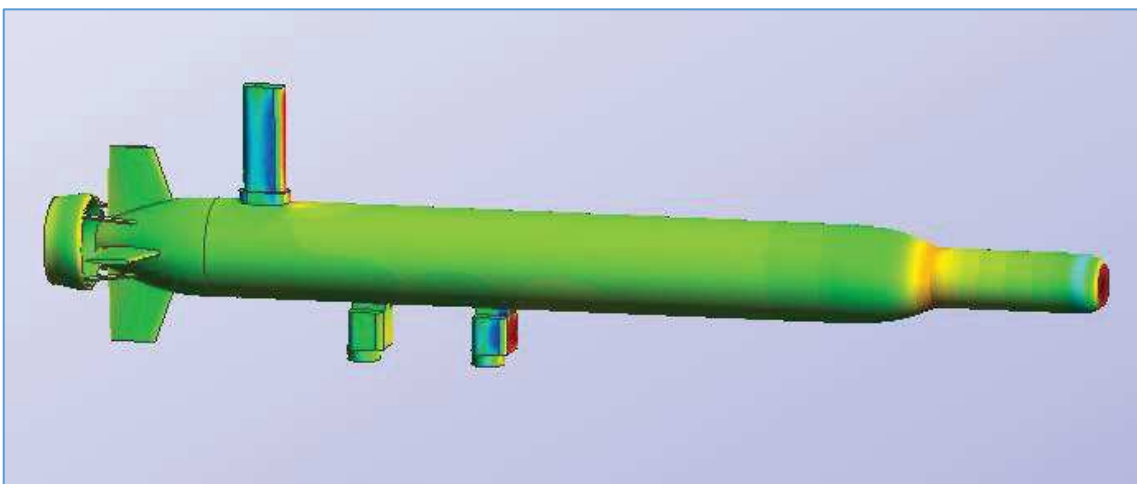


Imagen 102: Presiones actuantes en el vehículo

Y los resultados de la resistencia en las tres direcciones y de la potencia necesaria son:

Elemento	Fx	Fy	Fz
Cuerpo	-37,034	0,058	234,280
Aletas	29,171	-0,059	3,695
Antena	-4,154	0,218	-65,731
Tobera	0,685	-0,117	2,043
USBL y modem	-5,721	-0,139	77,552
Total (N)	-17,053	-0,038	251,839
Potencia (W)	23,107	0,052	-
Potencia resultante (W)	23,107	-	-

Tabla 51. Resumen de los resultados de la resistencia para cada uno de los elementos

7.2. Vehículo con sonda la Sonda Multihaz

Se presentan a continuación los resultados obtenidos en el análisis CFD del vehículo con la sonda Multihaz, que como ya se ha explicado en la introducción se realizarán de forma similar que para el vehículo V_{YSI} .

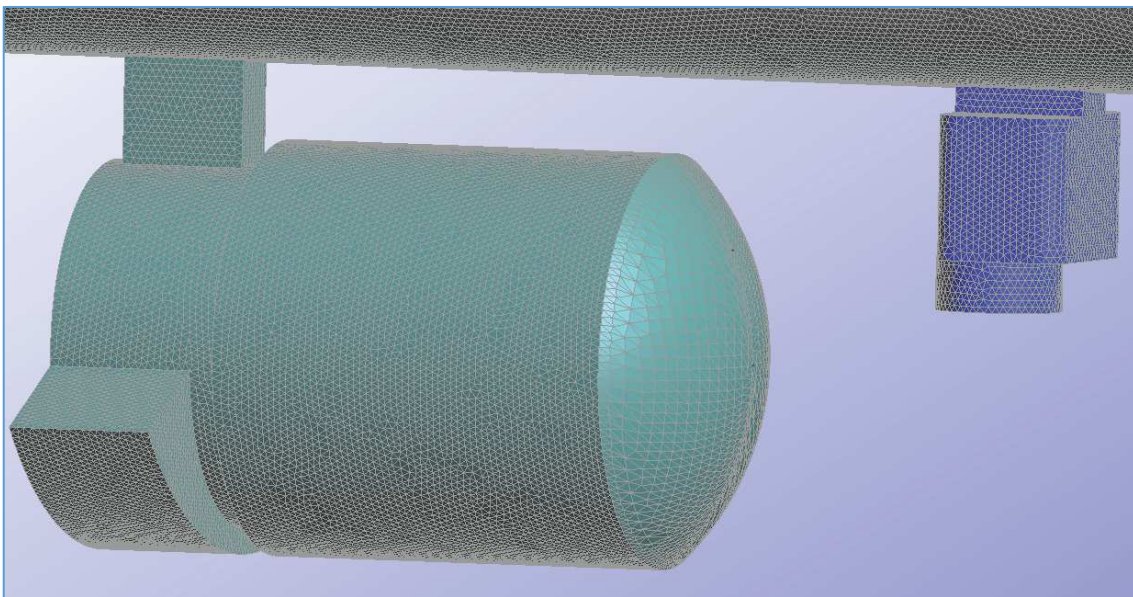


Imagen 103. Mallado de la sonda y el modem acústico

La primera velocidad de simulación será de 1,541 m/s, la misma que en el caso anterior obteniendo el incremento de resistencia en este caso por la introducción de la Sonda Multihaz. Por tanto, una vez introducidas las condiciones de contorno en el programa y ajustados los parámetros para que los resultados sean estables, los resultados obtenidos para la primera velocidad son los siguientes:

Variación Operacional de un AUV

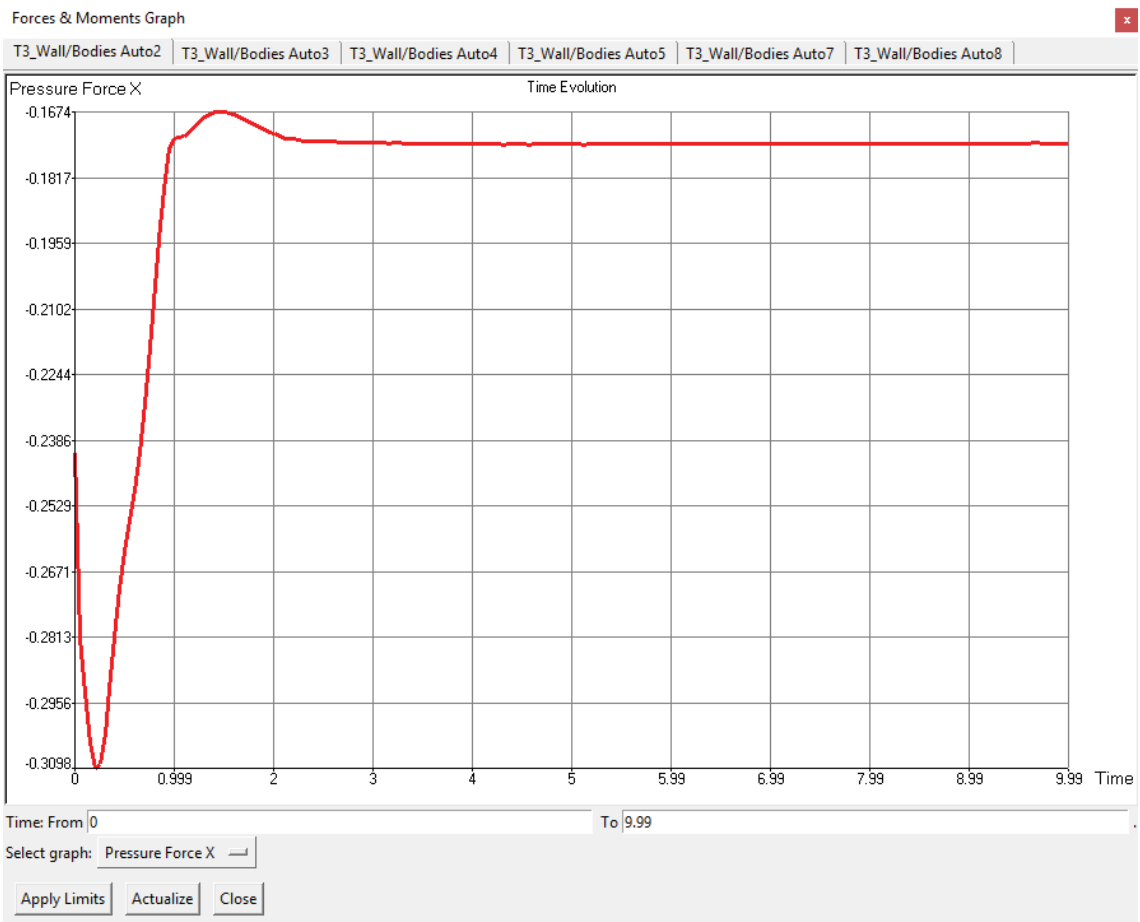


Imagen 104. Estabilidad de resultados en la curva de fuerzas

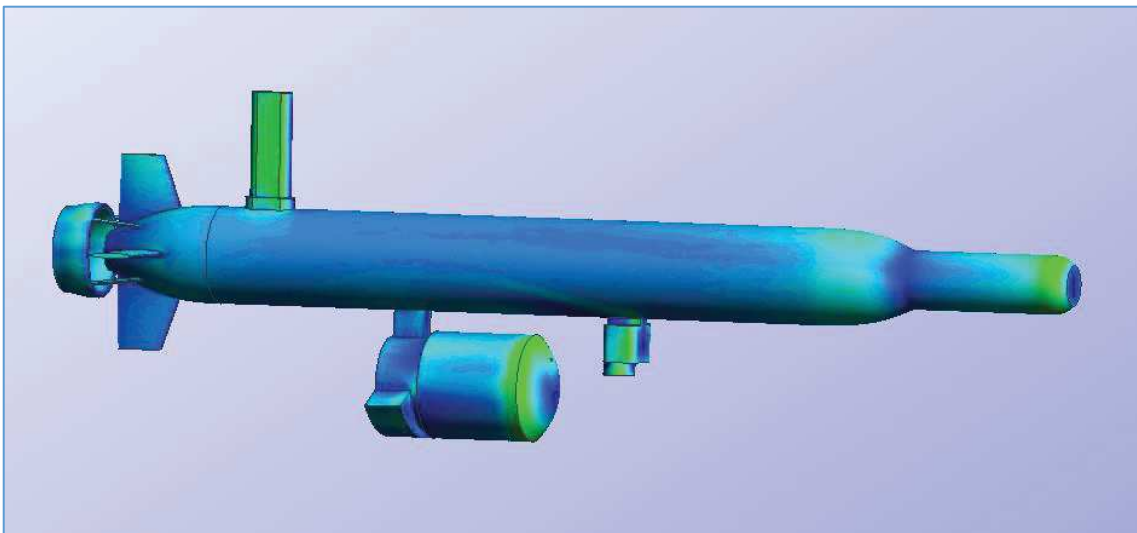


Imagen 105. Flujo de velocidades sobre el vehículo

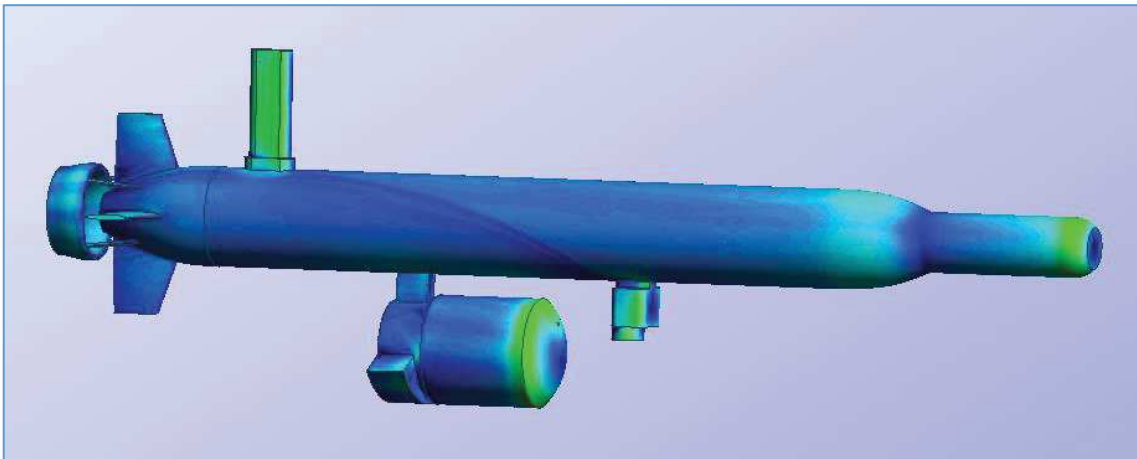


Imagen 106. Flujo de velocidades máximas y mínimas sobre el vehículo

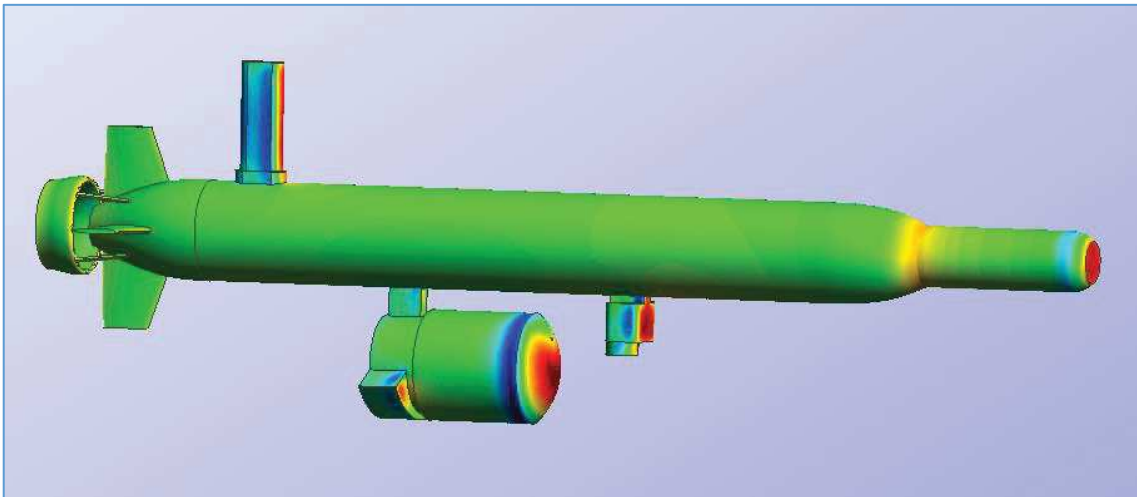


Imagen 107. Presiones actuantes en el vehículo

Elemento	Fx	Fy	Fz
Cuerpo	-38,541	-0,279	237,060
Aletas	29,086	-0,013	3,566
Antena	-5,429	-0,203	-65,503
Tobera	0,442	0,086	2,068
Modem acústico	-4,175	0,135	38,793
Multihaz	-18,57	-0,08	89,01
Total (N)	-37,19	-0,350	304,998
Potencia (W)	57,303	0,539	-
Potencia resultante (W)	57,303	-	-

Tabla 52. Resumen de los resultados de la resistencia para cada uno de los elementos

En vista de los resultados, el vehículo sufre un aumento de resistencia de más del doble de su valor inicial, con respecto al vehículo V_{YSI} original.

La segunda velocidad de ensayo corresponde a 1,355 m/s que es la máxima velocidad a que se supone que va a ir el vehículo actual, resultante del análisis del apartado anterior. Los resultados son los siguientes:

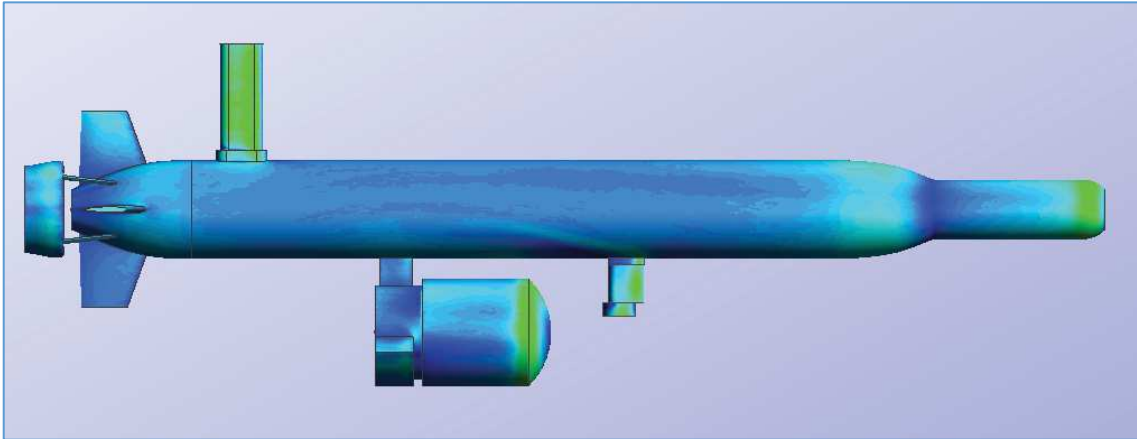


Imagen 108. Flujo de velocidades sobre el vehículo

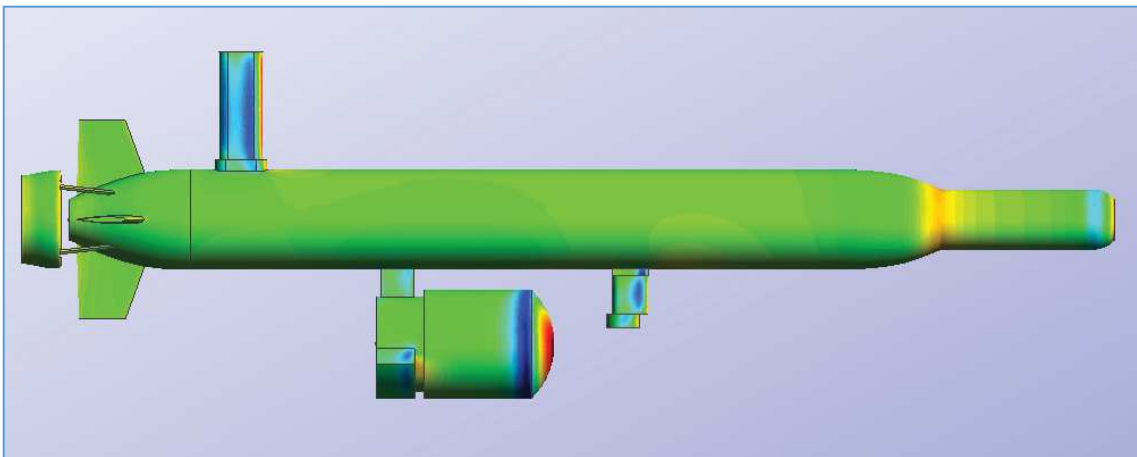


Imagen 109. Presiones actuantes en el vehículo

Elemento	Fx	Fy	Fz
Cuerpo	-36,777	-0,233	236,960
Aletas	29,219	-0,006	3,559
Antena	-4,127	-0,161	-65,732
Tobera	0,674	0,077	2,135
Modem acústico	-3,185	0,094	38,812
Multihaz	-14,11	-0,11	88,82
Total (N)	-28,30	-0,335	304,554
Potencia (W)	38,347	0,454	-
Potencia resultante (W)	38,350	-	-

Tabla 53. Resumen de los resultados de la resistencia para cada uno de los elementos

En este caso el vehículo ha sufrido un aumento de resistencia con respecto al vehículo V_{YSI} , ensayado en el apartado anterior por la instalación de la Sonda Multihaz del 66.52%.

A continuación, asumiendo que el rendimiento propulsivo de ambos vehículos se mantiene constante, se realizan ensayos con las mismas condiciones, incluyendo en este caso el valor del y^+ de la Sonda Multihaz. Finalmente se consiguen igualar las potencias, para la velocidad de 1,155 m/s.

Del mismo modo, se ha ido reduciendo la velocidad del V_{MB} , reduciendo con ello la potencia necesaria para propulsarlo hasta alcanzar la potencia del V_{YSI} , que igual que en el caso anterior es de 23,034 W.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

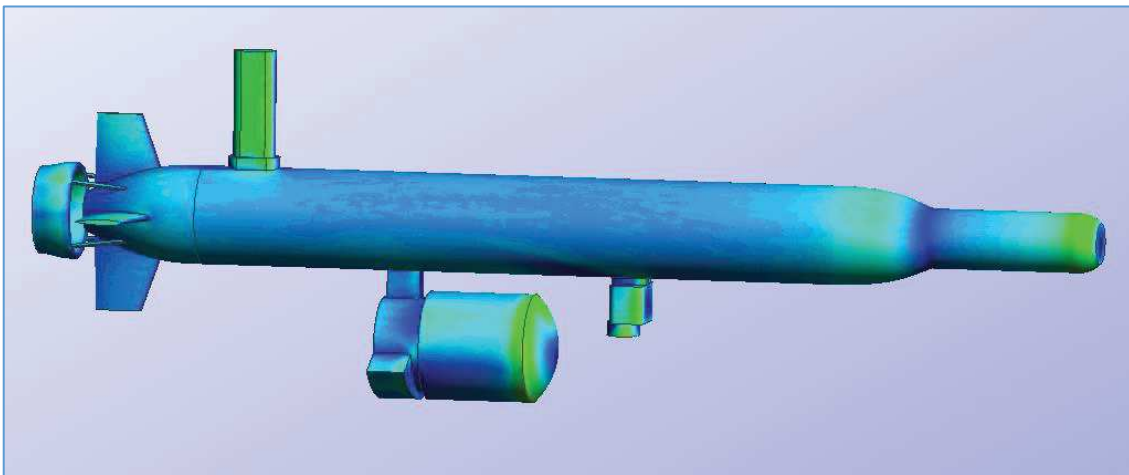


Imagen 110. Flujo de velocidades sobre el vehículo

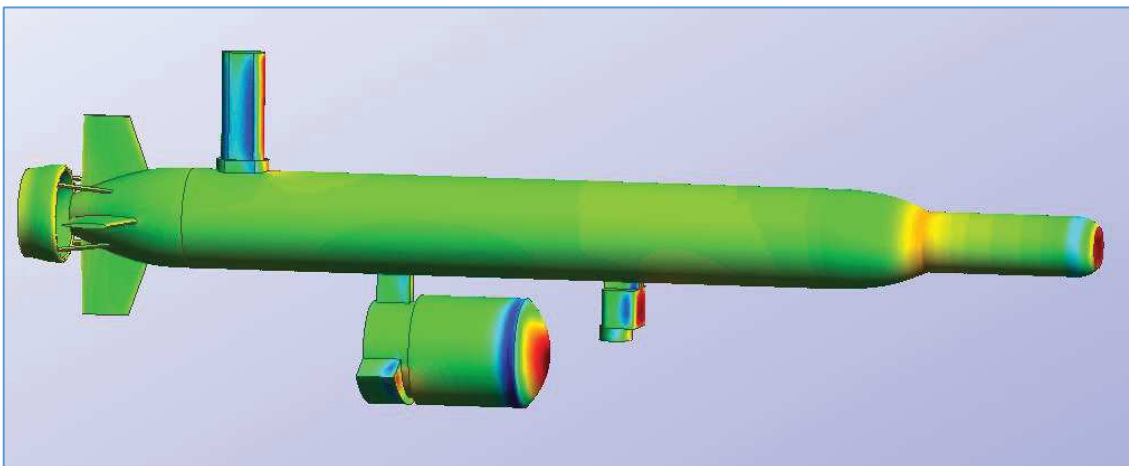


Imagen 111. Presiones actuantes en el vehículo

Como puede verse en la siguiente tabla que resume los resultados del análisis CFD, el vehículo ha sufrido una pérdida de velocidad de 0,386 m/s debido a la instalación de la Sonda Multihaz:

Elemento	Fx	Fy	Fz
Cuerpo	-35,215	-0,105	236,930
Aletas	29,342	-0,109	3,583
Antena	-2,807	0,062	-65,960
Tobera	0,905	-0,071	0,003
Modem acústico	-2,296	0,003	38,787
Multihaz	-9,85	-0,18	88,71
Total (N)	-19,92	-0,399	302,051
Potencia (W)	23,011	0,461	-
Potencia resultante (W)	23,016	-	-

Tabla 54. Resumen de los resultados de la resistencia para cada uno de los elementos

8. Conclusiones

Los objetivos iniciales de este proyecto eran analizar el AUV del Departamento de Química y Ambiental de la Universidad Politécnica de Cartagena para realizar una variación operacional que ha consistido en:

- ✓ Una introducción al estado del arte de los levantamientos batimétricos.
- ✓ Una descripción del vehículo, sus elementos iniciales y su posible ampliación.
- ✓ Un análisis detallado del balance de pesos y el balance eléctrico. Se ha determinado la posición del centro de gravedad, el centro de carena y la curva de cargas y momentos para cada configuración. También se colaboró en la realización de varias pruebas en tanque y en mar abierto para determinar el comportamiento del vehículo.
- ✓ Se ha realizado una búsqueda de sondas similares en el mercado buscando alternativas de diseño.
- ✓ Se ha realizado un análisis de la resistencia a presión de la carcasa de la Sonda Multihaz que garantiza la flotabilidad del vehículo mediante elementos finitos.
- ✓ Se ha estudiado mediante CFD la resistencia al avance de varias configuraciones, y diferentes velocidades.

En este apartado final se resumen y analizan los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas de los vehículos. Con este fin se han asignado las condiciones de contorno y realizado un mallado satisfactorio, así como las iteraciones necesarias para conseguir la estabilidad adecuada de resultados.

Se presentan a continuación los resultados obtenidos en los ensayos CFD resumidos en una tabla para cada una de las alternativas operativas y de diseño de los vehículos. Se presentan en la tabla los valores de velocidad, resistencia, autonomía y potencia.

Se ha incrementado la resistencia en todas las configuraciones un 10 % para compensar las simplificaciones realizadas durante el modelado y la simulación, como por ejemplo la ausencia de hélice, el asa, etc. La autonomía no puede ser calculada para los casos en que no se igualan las potencias entre vehículos puesto que estos supuestos no son alcanzables en la realidad, ya que el vehículo no llegará nunca a esa velocidad, puesto que a menos que se cambie el motor, la máxima potencia que entrega corresponde a los casos en los que se han igualado las potencias (es decir, para 1,355 m/s y para 1,155 m/s):

Vehículo	Velocidad (m/s)	Resistencia (N)	Potencia EHP (W)	Autonomía (h)
V_{YSI} original	1,541	14,91	25,33	6,11
V_{YSI}	1,541	22,43	38,01	-
	1,355	17,05	25,33	5,41
V_{MB}	1,541	37,19	63,03	-
	1,355	28,30	42,18	-
	1,155	19,92	25,33	4,26

Tabla 55. Resumen de los resultados obtenidos en las simulaciones

Por tanto las conclusiones a extraer tras la comparativa del V_{YSI} original y el V_{YSI} son las siguientes:

- ✓ Se ha determinado que el vehículo actual ha sufrido una pérdida de velocidad de 0,34 nudos y alrededor de 40 minutos de autonomía con las modificaciones realizadas por el Departamento en cuanto a la instalación de un USBL, un modem acústico y la instalación de nueva electrónica.
- ✓ Partiendo del consumo inicial del vehículo, se ha determinado que el consumo eléctrico aumenta en 12,42 W debido a los nuevos componentes instalados, suponiendo que el consumo del motor eléctrico es constante.
- ✓ Tras el análisis de la resistencia al avance, el vehículo actual tiene un aumento de resistencia de 0,86 N para la misma potencia.

Con la instalación de la Sonda Multihaz el vehículo navega más lento, circunstancia que no tiene porqué ir en perjuicio del funcionamiento de la sonda y del fin al que se destina el vehículo, ya que para hacer una batimetría es necesario realizar perfiles de velocidad del sonido que en este caso serán más precisos al tener más datos en menos espacio. Además, a menor tasa de avance del vehículo mejora la detección de accidentes geográficos. A continuación se presentan algunas imágenes comparativas donde se puede ver el flujo de velocidades de los vehículos V_{YSI} y V_{MB} :

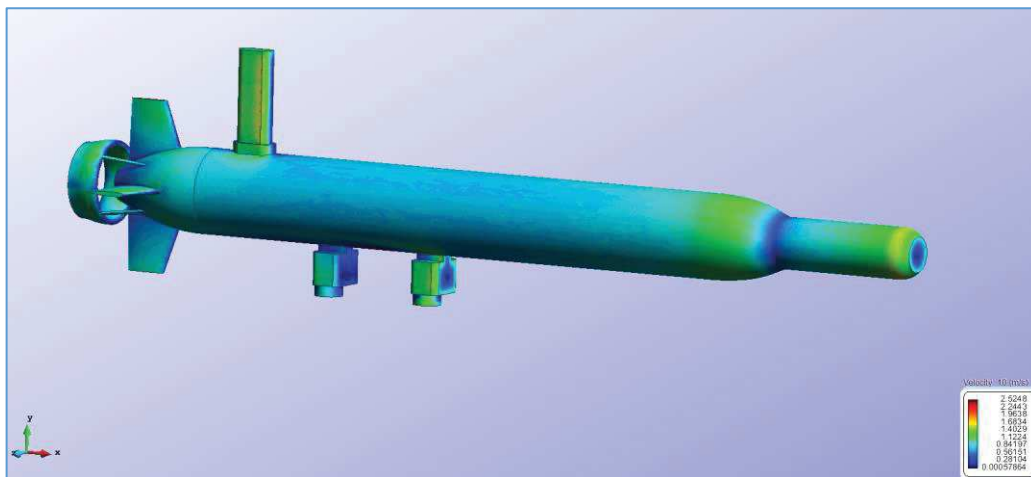


Imagen 112. Flujo de velocidades en V_{YSI}

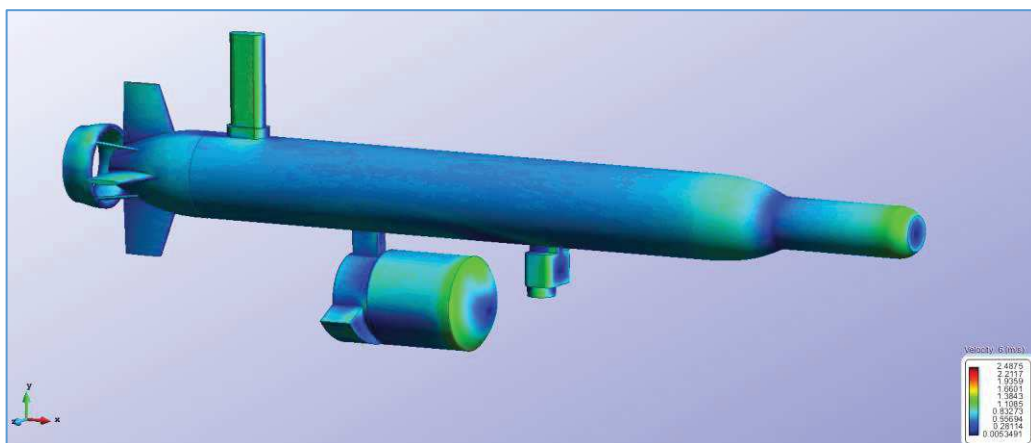


Imagen 113. Flujo de velocidades en V_{MB}

Como consecuencia, el tiempo necesario para realizar una batimetría en una zona se verá incrementado. Por ejemplo, para cubrir una zona equivalente a la superficie del Mar Menor (de unos 135 km²), a 4,158 km/hora (1,115 m/s) se tardaría aproximadamente 80 días en realizar todas las pasadas necesarias (espaciadas cada 100 m, aproximadamente a una profundidad de 20 m, con solape de 10 metros), teniendo en cuenta la pérdida de autonomía del vehículo y realizando una misión diaria. Si el vehículo mantuviera las condiciones actuales se tardarían 60 días, por lo que debe valorarse si la pérdida de 20 días de trabajo puede ser razón suficiente para plantear la instalación de nuevas baterías.

Para finalizar estas conclusiones, se presentan a continuación los resultados de interés agrupados extraídos del estudio CFD, añadiendo el rendimiento propulsivo (el mismo para ambos vehículos), la potencia al freno (BHP) y el consumo instantáneo obtenido en cada caso:

$$\eta_p = \frac{\text{Resistencia efectiva del ensayo} \cdot \text{Velocidad}}{\text{Potencia efectiva al freno}} = \frac{\text{EHP}}{\text{BHP}} = 35,35\%$$

Tabla 56: Fórmula del rendimiento propulsivo igual para ambos casos

Vehículo	Velocidad (m/s)	Consumo instantáneo (W)	Potencia al freno BHP (W)	Resistencia (N)	Potencia EHP (W)	Autonomía (h)
V _{YSI}	1,355	105,67	71,65	17,05	25,33	5,41
V _{MB}	1,155	133,67	71,65	19,92	25,33	4,26

Tabla 57. Resumen de resultados de los vehículos de interés.

En este segundo análisis donde se comparan los vehículos V_{YSI} y el V_{MB}, las conclusiones son:

- ✓ Tras el análisis de la resistencia al avance del vehículo con la Sonda Multihaz instalada, se detecta para la misma potencia un aumento de resistencia de 2,87 N y una disminución de velocidad de 0,39 nudos.
- ✓ Así mismo el consumo eléctrico se incrementa en 28 W como consecuencia de la instalación de la Sonda Multihaz por lo que a la misma potencia se reduce la autonomía en aproximadamente una hora.
- ✓ Por tanto, con respecto al vehículo original y debido a la instalación de todos estos elementos el vehículo estaría perdiendo dos horas de autonomía y casi un nudo de velocidad.

9. Agradecimientos

Finalizado este proyecto con el que se termina esta etapa en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Naval y Oceánica quiero agradecer;

Al director del proyecto, Sr. Javier Gilabert por su propuesta y siempre disposición. En especial, por la motivación brindada y su paciencia, puesto que ha sido fundamental para su elaboración.

A Gabriel Carrasco, con el que se ha realizado este trabajo junto con el proyecto de "Evaluación y análisis de un AUV mediante CFD" de los que se comparten aspectos como parte la introducción, el análisis de la electrónica y parte del estudio CFD, realizados de forma conjunta durante el año 2015 en colaboración con los miembros del Departamento de tecnología naval.

Por parte del departamento a Dionisio Tudela, Francisco López y Juan Carlos por el apoyo y los recursos proporcionados. Así como la ayuda de José Enrique Gutiérrez y el aprendizaje recibido de numerosos profesores de la Escuela.

A mi familia, por su apoyo y recomendaciones, estando siempre dispuestos a discutir los temas que me preocupan.

Y a mis compañeros que me han acompañado a lo largo de estos años, y de los cuales siempre he aprendido grandes cosas.

A todos y todas, muchas gracias.

10. Bibliografía y referencias web

10.1. Proyectos

- ✓ Ashley Abreu, Sahivy Gonzalez, Gabriel Martos, A B.S. *Thesis Remotely Operated Underwater Vehicle (ROV) 100% Report*. Florida International University, 2013.
- ✓ Jordi Bartrons i Casademont, *PFC Estudio hidrodinámico por CFD del casco de una lancha motora*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2014.
- ✓ Julián Bermúdez Ortega, *PFC Flotador de calado autoregurable/constante: Electrónica*. Universidad Politécnica de Cartagena, 2013.
- ✓ Roberto Javier Font Ruiz, *PFC Mejora de la maniobrabilidad de submarinos tripulados mediante control óptimo de tanques de lastre*. Universidad Politécnica de Cartagena, 2013.
- ✓ Jorge Juan García García, *PFC Desarrollo de una herramienta informática para la simulación dinámica de vehículos submarinos no tripulados*. Universidad Politécnica de Cartagena, 2013.
- ✓ Antonio Garrido Pellicer, *PFC Estimación de los coeficientes hidrodinámicos de vehículos autónomos submarinos mediante CFD*. Universidad Politécnica de Cartagena, 2014.
- ✓ Julián González Agudelo, *PFC Contribution to the model and navigation control of an Autonomous Underwater Vehicle*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2015.
- ✓ Joan Francesc de León Botella, *PFC Control de navegación con Arduino de un modelo de barco*. Universitat Politècnica de València, 2013.
- ✓ Alejandro Macanás Vidal, *PFC Flotador de calado autoregurable/constante: Estructura*. Universidad Politécnica de Cartagena, 2013.
- ✓ David Mira Megías, *PFC Regeneración de atmósfera en un sumergible hiperbárico. Aplicación a vehículo tripulado para trabajos submarinos*. Universidad Politécnica de Cartagena, 2003.
- ✓ Gabriel Riera Navarro, *PFC Diseño y construcción de minisubmarino autónomo de inspección de tuberías sumergidas*. Universidad Politécnica de Cartagena, 2012.
- ✓ Antonio Galo Ruiz Ortega, *PFC Diseño de un sistema de control autónomo para un vehículo submarino AUV*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2009.
- ✓ Jordi Tolsà García, *PFC Estudio y optimización de una carena mediante CFD*. Universidad Politécnica de Cartagena, 2012.
- ✓ Pablo Rodríguez Fornes, *TFM Software de Control y generación de informes para vehículos Autónomos Submarinos*. Universitat Oberta de Catalunya, 2012.
- ✓ Cristián Rodrigo Ramírez, *La Tecnología de Sonares de "Multihaz" en la Armada de Chile*. Anuario Hidrográfico y oceanográfico de la armada de Chile.
- ✓ Juan Acosta Yepes, *Cartografía Submarina. El Programa Estudio Hidrográfico y Oceanográfico de la Zona Económica Exclusiva Española*. Instituto Español de Oceanografía.
- ✓ Pedro Andrés Fernández Jiménez y José Manuel Navarro Ruiz. *Sistema de posicionamiento global GPS*. Servicio de Medio Natural Albacete.
- ✓ Juan Antonio Caballero Sánchez. *Cartografía submarina*. Universidad Politécnica de Madrid.

- ✓ Sgto. Al. José David León Martín. *Del Escandallo a los Sondadores Multihaz*. Escuela de Hidrografía
- ✓ Laura Ballester Mora y Daniel Garcia Sala. *Estudio batimétrico con ecosonda multihaz y clasificación de fondos*. Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona.
- ✓ Robet E. Randall. *Underwater Acoustics*. College Station, USA.

10.2. Documentos

La siguiente documentación se ha consultado en un periodo que comprende desde Septiembre de 2014 a Noviembre de 2016:

- ✓ Javier Gilabert Cervera, *Apuntes de la asignatura Oceanología*. Universidad Politécnica de Cartagena
- ✓ Bienvenido Alonso Pardo, José Enrique Gutiérrez, *Apuntes de la asignatura Hidrodinámica, Resistencia y Propulsión*. Universidad Politécnica de Cartagena
- ✓ Joaquín Fernández Perles. *Apuntes de la asignatura Acústica submarina*. Universidad Politécnica de Cartagena
- ✓ *Apuntes de Pedro Sosa, Capítulo 6*.
- ✓ Bob Anderson, Jon Crowell, *Workhorse AUV – A cost-sensible new Autonomous Underwater Vehicle for Surveys/Soundings, Search & Rescue, and Research* <http://www.elsevier.es>
- ✓ *EcoMapper User – Guide, YSI*. www.ysisystems.com
- ✓ *EcoMapper AUV specifications, Xylem* www.xylem.com
- ✓ F. Baralli, E. Bovio, D. Cecchi, *Autonomous underwater vehicles for scientific and naval operations*. Elsevier <http://www.elsevier.es>
- ✓ Daniel L. Rudnick, Russ E. Davis, Charles C. Eriksen, David M. Fratantoni, Mary Jane Perry, *Underwater Gliders for Ocean Research*. Seaglider Ocean center <http://seaglider.washington.edu>
- ✓ Hunter C. Brown, Ayoung Kim, Ryan M. Eustice, *An overview of Autonomous Underwater Vehicle research and Testbed at PeRL*. University of Michigan <http://www.iver-auv.com>
- ✓ *Iver3 – AUV Brochure. Affordable Work Class. Autonomous Underwater Vehicle (AUV)*. OceanServer <http://www.iver-auv.com>
- ✓ *Tdyn Tutorials. Compass Ingeniería y Sistemas*, www.compassis.com
- ✓ *Tdyn Fluid Dynamics & Multi-physics Reference. Compass Ingeniería y Sistemas*, www.compassis.com
- ✓ Paul Newman, *Unmanned vehicles for shallow and coastal waters*, Douglas – Westwood <http://www.ths.org.uk>
- ✓ Dr. Russell Wynn, Dr. Elizabeth Linley, Dr. James Hunt, *Global Inventory of AUV and Glider Technology available for Routine Marine Surveying*. www.nerc.ac.uk
- ✓ *Smart Li Ion Battery – User Notes*. Inspired Energy, www.inspiredenergy.com
- ✓ *NL2044 Smart Standard Battery For Immediate Release*. Inspired Energy, www.inspiredenergy.com
- ✓ *NL2044HD22 Battery Specification*. Inspired Energy, www.inspiredenergy.com
- ✓ *SM23165DT Specifications*. Animatics Corporation www.animatics.com
- ✓ W.H. Wang, R.C. Engelaar, X.Q. Chen, J.G. Chase, *The State-of-Art of Underwater Vehicles – Theories and Applications*. University of Canterbury (New Zealand), University of Technology (Netherlands), <http://www.intechopen.com>

- ✓ *Sea technology, Development and Operation. Of an AUV-Based Water Sample collector.* <https://epic.awi.de>
- ✓ M. Mackay, *The standard submarine model: A survey of static hydrodynamic experiments and semiempirical predictions.* Defence R&D Canada <http://esrdc.mit.edu>
- ✓ *Integrated synoptic surveys using an Autonomous Underwater Vehicle and Manned Boats.* USGS, <http://www.usgs.gov>
- ✓ A. B. Phillips, S. R. Turnock, M. Furlong, "The use of CFD to aid cost-effective hydrodynamic design of AUV". National Oceanography Centre (NOC, Southampton, UK) <http://pim.sagepub.com>
- ✓ T. Joung, *A study on the design optimization of an AUV by using CFD Analysis.* The International Society of Offshore and Polar Engineers <http://www.isopec.org>
- ✓ J. González, I. Masmitja, G. Masmitja, J. Prat, S. Gomáriz, *Desarrollo de un vehículo de observación oceanográfica autónomo.* Universitat Politècnica de Catalunya <http://upcommons.upc.edu>
- ✓ Rao Yarrapragada K.S.S, R.Krishna Mohan, B.Vijay Kiran, *Composite pressure vessels.* IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology <http://ijret.org/>
- ✓ *APL-UW High-Frequency Ocean Environmental Acoustic Models Handbook.* Applied Physics Laboratory University of Washington
- ✓ *Hydrographic quality assurance instructions for admiralty surveys.* UK Hydrographic Office Admiralty Way. <http://www.ukho.gov.uk>
- ✓ *Teoría acústica de las ecosondas Multihaz.* Hydroacustics S.L. <http://www.hydroacoustics.com/>
- ✓ *Manual de Hidrografía.* Capítulos 1 -7. Organización Hidrográfica Internacional (IHO). <https://www.iho.int/>
- ✓ *Reglamento de la OHI para cartas internacionales y especificaciones cartográficas de la OHI.* <https://www.iho.int/>
- ✓ *Normas de la OHI para los levantamientos hidrográficos. 5ª Edición, Febrero 2008.* <https://www.iho.int/>
- ✓ Russell B.Wynn, Veerle A.I. Huvenne, Timothy P. Le Bas [...]. *Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience.* <http://www.elsevier.es>
- ✓ Keir Colbo, Tetjana Ross, Craig Brownb, Tom Weber. *Review of oceanographic applications of water column data from multibeam echosounders.* <http://www.elsevier.es>
- ✓ Wen-Miin Tian. *Integrated method for the detection and location of underwater pipelines.* <http://www.elsevier.es>
- ✓ *Experiences with compact tightly coupled GNSS/INS Multibeam echosounders.* Second Mexican Hydrography CONVENTION. <https://norbit.com/>
- ✓ Alexandre C. G. Schimel, Jonathan Beaudoin, Arnaud Gaillot [...]. *Processing backscatter data: from datagrams to angular responses and mosaics.* www.archimer.ifremer.fr
- ✓ François Michaud, Gueorgui Ratzov, Valentí Sallarès [...]. *Métodos e Instrumentación acústica para la exploración en Geofísica Marina.* <http://horizon.documentation.ird.fr>
- ✓ *Norbit WIDEBAND MULTIBEAM SONAR brochure.* <https://norbit.com/>
- ✓ *Kongsberg M3 – 500 brochure.* <https://www.km.kongsberg.com>
- ✓ *Kongsberg GEOSWATH brochure.* <https://www.km.kongsberg.com>
- ✓ *Edgetech 6205 brochure.* <http://www.edgetech.com/>

- ✓ *SeaBat 7125 brochure.* <http://www.teledyne-reson.com>
- ✓ *SeaBat T20-P brochure.* <http://www.teledyne-reson.com>
- ✓ *Side Scan Sonar (Sonar de Barrido Lateral).* www.geosoluciones.cl
- ✓ *Sonar de Barrido Lateral (SSS).* Bentos. www.bentos.cl
- ✓ *Micro Data Modem brochure.* www.tritech.co.uk
- ✓ *MicronNav System brochure.* www.tritech.co.uk
- ✓ *Norma ISO 19115-2 Normas sobre metadatos.*
- ✓ *Geología y geofísica marina y terrestre del Ecuador.* IRD, INOCAR, Azur.
- ✓ *Robert D Christ and Robert L Wernli. Sonar, the ROV Manual.*

10.3. Páginas web

- ✓ <http://www.aet.org.es>
- ✓ <http://www.animatics.com>
- ✓ <http://archive.defense.gov/>
- ✓ <http://auvac.org>
- ✓ <http://cirs.udg.edu>
- ✓ <http://www.compassis.com>
- ✓ <http://www.evologics.com>
- ✓ <http://www.festo.com>
- ✓ <http://www.qoogle.com>
- ✓ <http://www.inspired-energy.com>
- ✓ <http://www.ise.bc.ca>
- ✓ <http://www.iver-auv.com>
- ✓ <http://www.levantamientosbatimericos.blogspot.com.es>
- ✓ <https://www.lpi.tel.uva.es>
- ✓ <http://www.noaa.gov>
- ✓ <http://www.oceanografialitoral.com>
- ✓ <http://raspi.tv/>
- ✓ <http://www.tbaep.org>
- ✓ <http://www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es>
- ✓ <http://www.textoscientificos.com>
- ✓ <http://www.thinkdefence.co.uk>
- ✓ <http://www.upcommons.upc.edu>
- ✓ <http://www.upct.es>
- ✓ <http://www.whoj.edu>
- ✓ <http://www.wikipedia.org>
- ✓ <http://woodshole.er.usgs.gov>
- ✓ <http://www.wordpress.com>
- ✓ <http://www.wtec.org>

11. Anexos



DATA SHEET - PS-120005-15

WIDEBAND MULTIBEAM SONAR

For High Resolution Bathymetry

Introducing the all-new, extremely compact and high-resolution multibeam sonar from NORBIT.

The WBMS-series are ultra compact sonars designed specifically for use on all platforms. With low power consumption, the system may be operated for a full day on a single battery. NORBIT's wideband multibeam technology allows long range real-time data collection, whilst simultaneously achieving high range resolution.

The WBMS-series are based on a flexible sonar platform that utilizes the latest in analog and digital signal processing. With broad R&D expertise NORBIT has developed, from the ground-up, exciting new technology that allows existing and new applications to benefit from the advantages offered by a compact wideband curved-array multibeam sonar.

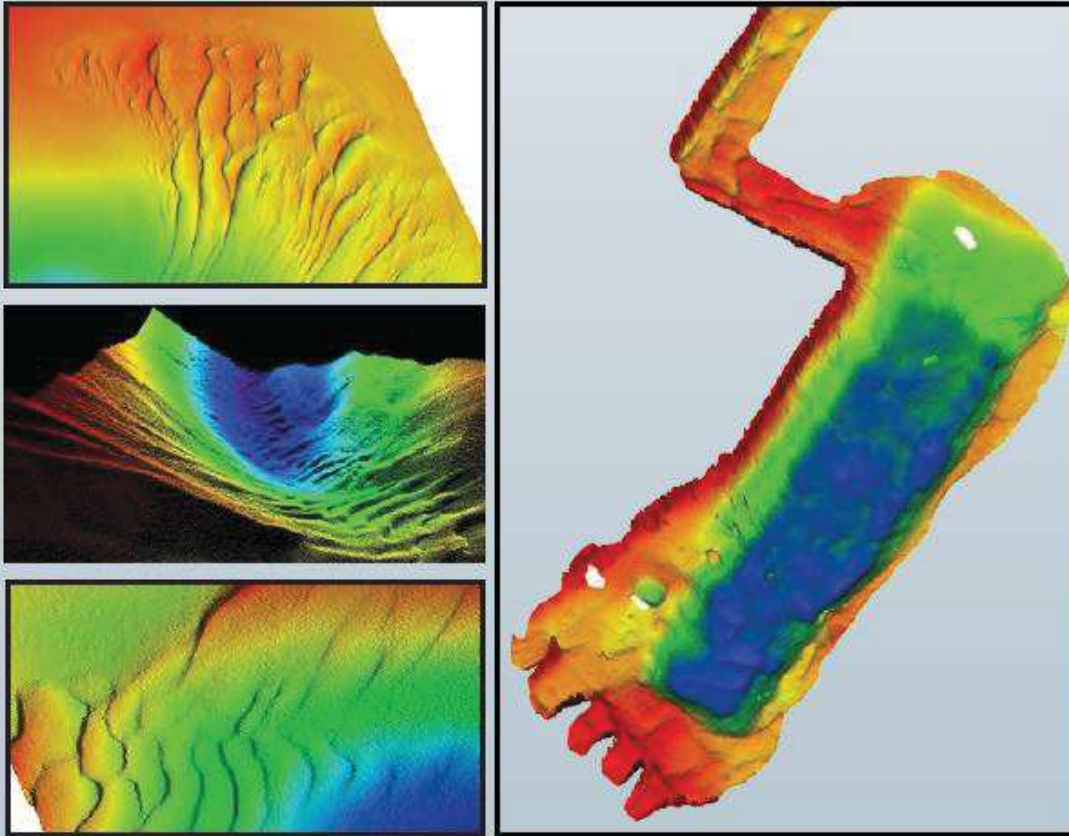


Features	Applications	Options
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sub-centimeter Range Resolution ✓ FM & CW Processing ✓ 80kHz Broadband ✓ Flexible Power Source (10-28 VDC, 100-240 VAC) ✓ Simple Ethernet Interface ✓ Side-scan, Water Column, Backscatter ✓ Integrated Sound Speed Probe ✓ Integrated Initial Navigation Solution ✓ Exceeds IHO Special Order, CHS Exclusive Order & USACE New Work 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Shallow Water Bathymetry ✓ Pipeline Surveys ✓ River, Estuary, Channel and Pond Surveys ✓ Harbor and Coastline Surveys ✓ USV, UUV, AUV & ROV Surveys ✓ MCM & Littoral Combat Zone Surveys 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 6000M Depth Rating ✓ Mounting Bracket ✓ Motion Sensor ✓ Data Acquisition Software ✓ On-Site Senior Hydrographer Support ✓ Turn-Key Survey Platform ✓ AUV Version ✓ VDSL Data Link ✓ Permanent Hull Mount Option ✓ Pole Mount and Travel Option ✓ 200kHz version ✓ Narrow beam along track 0.9°

EXPERTS in sensor equipment providing telemetry and communication solutions for harsh environments.
 NORBIT develops and delivers innovative products - allowing you to explore more.

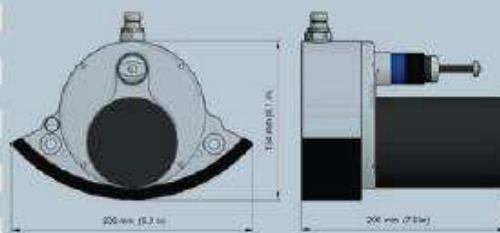
www.norbit.com

NORBIT Wideband Multibeam Sonar For High Resolution Bathymetry

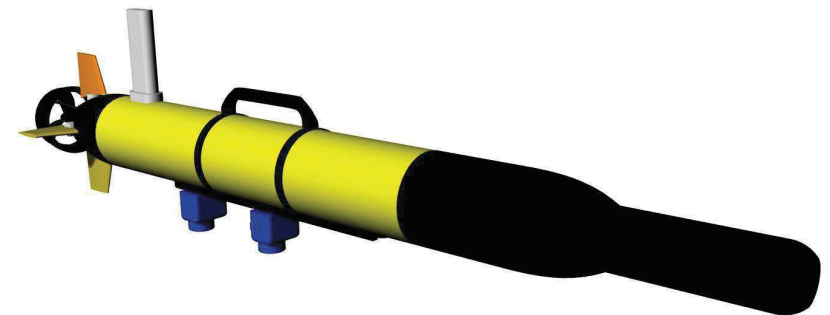
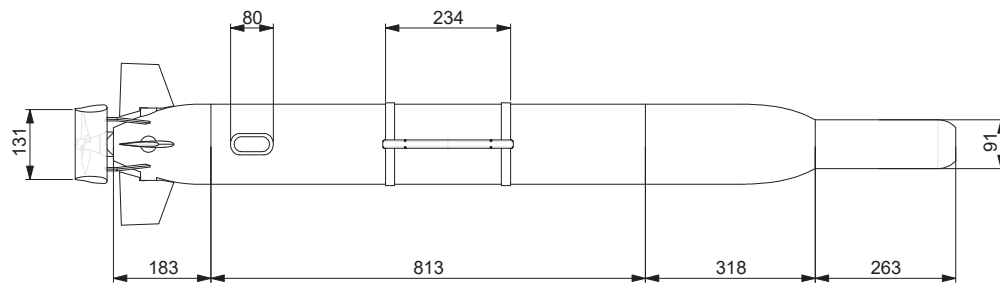
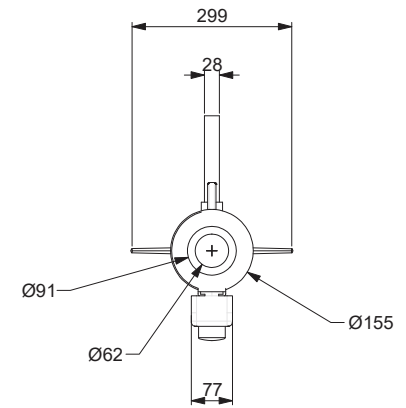
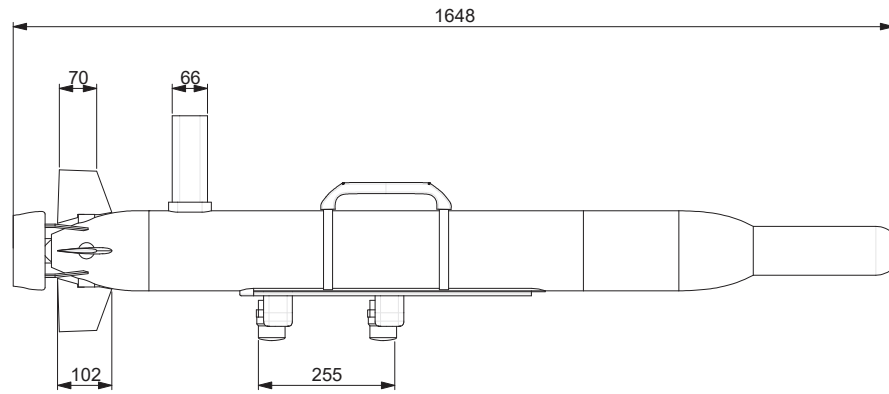



TECHNICAL SPECIFICATIONS

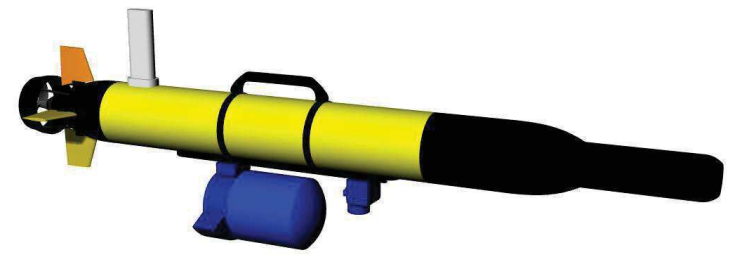
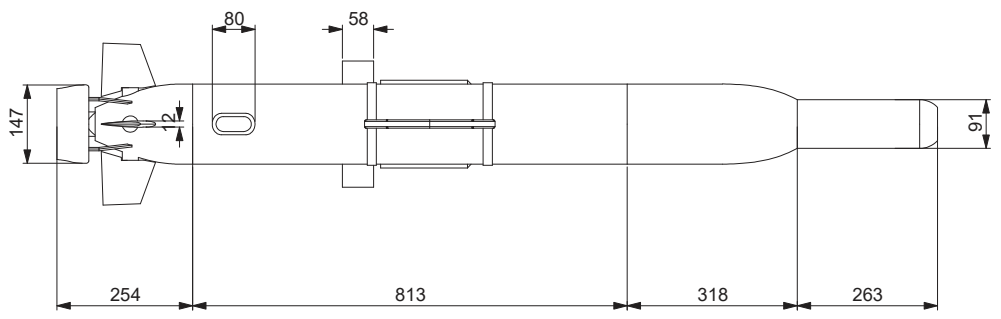
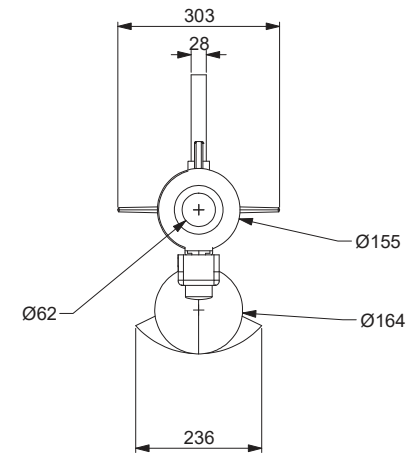
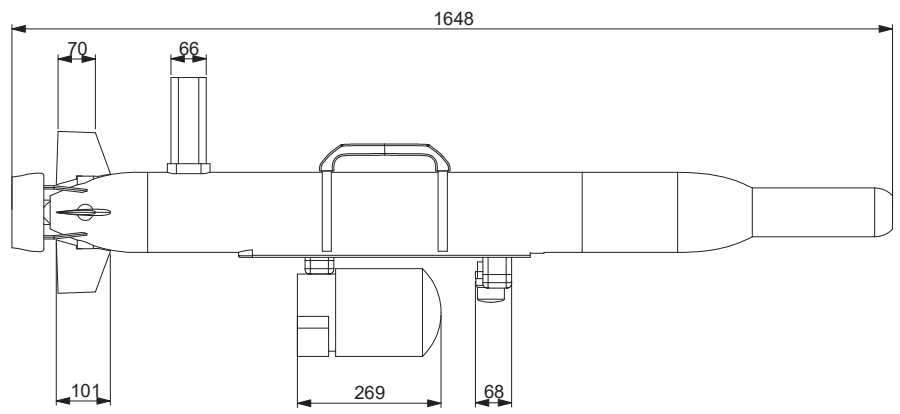
SWATH COVERAGE	7-179° (140° NOMINAL)
RANGE RESOLUTION	<10mm (ACOUSTIC)
NUMBER OF BEAMS	256-512 EA & ED
OPERATING FREQUENCY	400kHz w/ 80kHz BANDWIDTH (200-700kHz POSSIBLE)
PING RATE	UP TO 50Hz, RANGE DEPENDENT
DEPTH RANGE	0.2-275m (160m TYPICAL)
RESOLUTION	0.9° ACROSS TRACK, 1.9° ALONG TRACK @400kHz
WEIGHT	<4.5kg(AIR), 3kg(WATER)
POWER	<28W
VOLTAGE	10-28VDC OR 100-240VAC (ROV DIRECT: 22-29VDC)
INTERFACE	ETHERNET
STANDARD CABLE LENGTH	8m, OPTIONS: 20m, PIGTAIL, MAX 600m VDSL
DEPTH	100m, 6000m OPTIONAL
STORAGE TEMPERATURE	-20°C TO +60°C
OPERATING TEMPERATURE	-4°C TO +40°C (TOPSIDE -25°C TO +40°C)




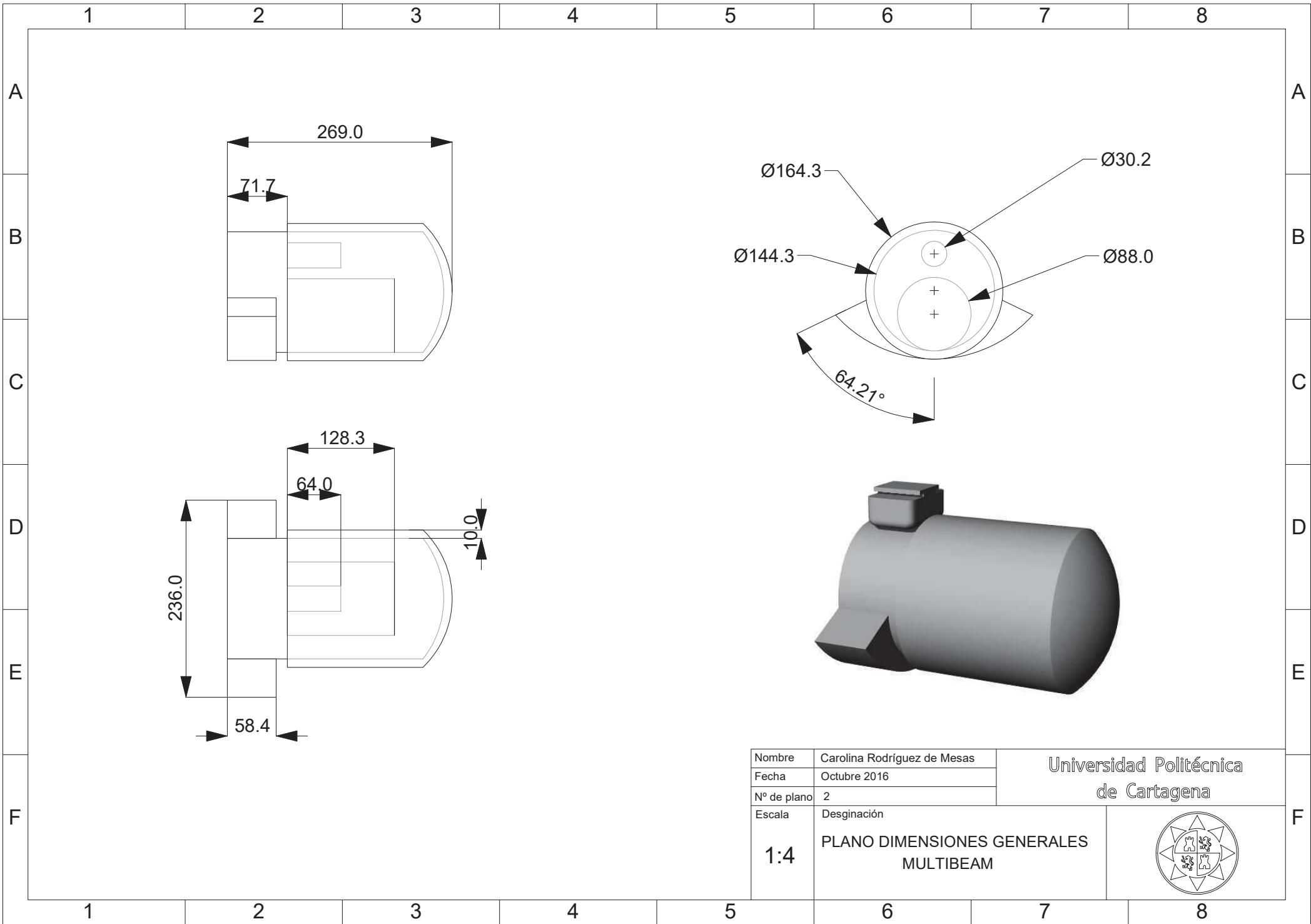
NORBIT SUBSEA | STIKLESTADVÅGEN 11 | N-7041 TRONDHEIM | NORWAY | PHONE +47 73 98 25 50 | subsea@norbit.com
 COPYRIGHT©2010 NORBIT, ALL RIGHTS RESERVED WHILE EVERY EFFORT IS MADE TO ENSURE THE INFORMATION GIVEN IS ACCURATE, NORBIT DOES NOT ACCEPT LIABILITY FOR ANY ERRORS OR OMISSIONS, ALL NON-METRIC WEIGHTS AND MEASURES ARE APPROXIMATE AND OTHER INFORMATION IN THIS DOCUMENT IS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE



Nombre	Carolina Rodríguez de Mesas	Universidad Politécnica de Cartagena
Fecha	Octubre 2016	
Nº de plano	3	
Escala	Designación	
1:10	PLANO DIMENSIONES GENERALES	



Nombre	Carolina Rodríguez de Mesas	Universidad Politécnica de Cartagena
Fecha	Octubre 2016	
Nº de plano	1	
Escala	Designación	
1:10	PLANO DIMENSIONES GENERALES	



Nombre	Carolina Rodríguez de Mesas
Fecha	Octubre 2016
Nº de plano	2
Escala	Designación

Universidad Politécnica
de Cartagena

1:4 PLANO DIMENSIONES GENERALES
MULTIBEAM

