

DISEÑO DE FORMAS Y ANÁLISIS DE RESISTENCIA DE UN VEHÍCULO AUTÓNOMO SUBMARINO



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA NAVAL Y OCEÁNICA
Universidad Politécnica de Cartagena



“A todos aquellos que me han enseñado algo y,
por supuesto, a todos aquellos de los que algo he aprendido”.

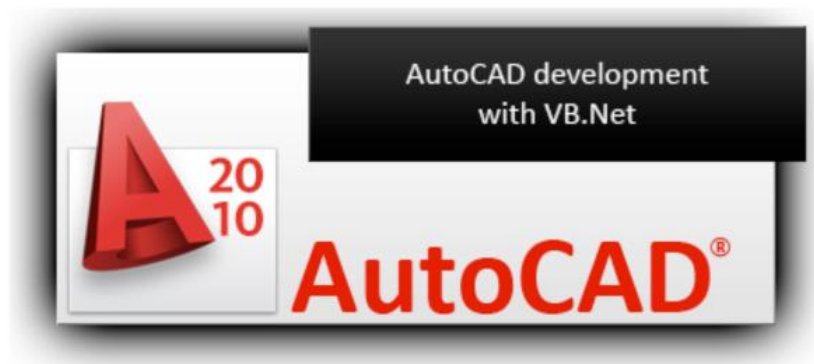
Álvaro Barberá Fernández

CONTENIDO	1
CAPITULO 1. DISPOSICIÓN GENERAL DEL VEHÍCULO	3
1.1 ¿Por qué un AUV?	4
1.2 Casco resistente y equipo oceanográfico	5
CAPÍTULO 2. DISEÑO DEL CASCO HIDRODINÁMICO	10
2.1 Introducción	11
2.2 Las formas de la Serie 58	14
2.3 Modelo Albacore puro	23
2.4 Modelo Albacore modificado	30
CAPÍTULO 3. RESISTENCIA: CÁLCULO ANALÍTICO	34
3.1 Métodos experimentales	35
3.2 Resistencia de fricción y resistencia residual	38
3.3 Resistencia de los apéndices	40
3.4 Resistencia por formación de olas	41
CAPÍTULO 4. RESISTENCIA: CÁLCULO NUMÉRICO	46
4.1 Simulación numérica	47
4.2 Ecuaciones de flujo	48
4.3 Método de los volúmenes finitos	49
4.3 Modelos de turbulencia	50
4.5 Metodología	51
4.6 Pre-proceso	52
4.7 Solver y post-proceso	53
4.8 Resultados de los modelos Albacore	54
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES	62
5.1 Análisis de los resultados numéricos	63
5.2 Estimación de autonomía	65
5.3 Conclusiones	66
ANEXOS	67
BIBLIOGRAFÍA	70

CONTENIDO

La memoria de Proyecto Fin de Carrera aquí escrita presenta el estudio de formas y el análisis de resistencia de un vehículo submarino autónomo para investigación oceanográfica. Se ha dividido en tres partes, una concerniente a la disposición interior del vehículo y al diseño de formas, otra para el análisis de resistencia de los modelos propuestos y por último una referida al análisis de los resultados y las conclusiones obtenidas.

La primera parte, que engloba los dos primeros capítulos, trata sobre la disposición general del vehículo, así como sus componentes y el equipo que albergará, y el proceso de diseño de dos carenados propuestos para las formas del casco y de sus apéndices, haciéndose especial atención a que éstas sean óptimas desde el punto de vista hidrodinámico. Para ello se ha seguido un algoritmo de generación de volúmenes de revolución que parte de un solo polinomio de sexto grado dependiente de una serie de parámetros de entrada deseados, como son la eslora, el puntal y la posición longitudinal de la cuaderna maestra entre otros, para que el dimensionamiento del cuerpo sea el adecuado para el vehículo. Los dos modelos diseñados y sus apéndices, tanto como la disposición interior se han realizado mediante *RHINOCEROS 4.0* y los planos de tales diseños mediante *AUTOCAD 2010*.



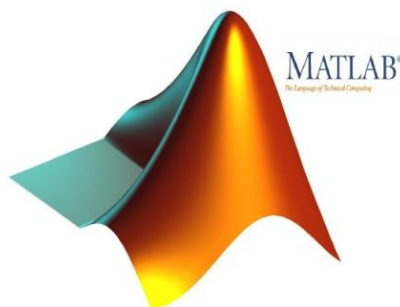
La segunda parte, que comprende los capítulos 3 y 4, se centra en el estudio del análisis de resistencia al avance de los dos modelos de carenas propuestos. En el capítulo 3 se ha realizado una estimación de resistencia basada en una serie de métodos empíricos utilizados normalmente en estudios de resistencia de navíos convencionales, es decir, con carenas destinadas a operar superficialmente, por lo que al aplicarlos en un vehículo submarino los resultados obtenidos son poco fiables, pero útiles para evidenciar algunas tendencias. En el capítulo 4 se han obtenido los resultados de resistencia mediante software de análisis por elementos finitos (CFDs), más concretamente el mallado y pre-proceso se realizará con *GAMBIT 2.4* y el post-proceso con *ANSYS FLUENT 6.3*. Este análisis ha sido realizado sólo en dos

dimensiones debido principalmente a la complejidad que conlleva la utilización de este tipo de programas para cualquier modelo tridimensional.



En el quinto y último capítulo se analizan y comentan los resultados obtenidos en toda la segunda parte de la memoria concerniente a los análisis de la resistencia tanto empírica como computacionalmente y se incluyen las conclusiones y unas recomendaciones para líneas de trabajos futuros.

Para el texto escrito y los gráficos se ha utilizado *iWorks* y *Numbers* respectivamente; todas las imágenes y las presentaciones de página este proyecto han sido procesadas por *Adobe Photoshop CS4* y *Adobe Illustrator CS4*; y finalmente, como editor de fórmulas se ha empleado *MathCast 0.9* y para todos los cálculos realizados en la memoria *MatLab Online*.



CAPÍTULO 1. DISPOSICIÓN GENERAL DEL VEHÍCULO



Vista área del Mar Menor.

En este capítulo se presenta el vehículo submarino autónomo como la mejor alternativa para realizar campañas de muestro oceanográfico y se define el interior del vehículo así como los sistemas equipados y las sondas oceanográficas instaladas a bordo.

1.1. ¿POR QUÉ UN AUV?

La idea de realizar un análisis de resistencia al avance de un AUV como proyecto fin de carrera surge de una de las múltiples actividades docentes propuestas por Javier Busquets Matías, Delegado de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Naval y Oceánica, en este caso, la formación de un grupo de alumnos de navales para la construcción de un prototipo de AUV de investigación oceanográfica. Este grupo de trabajo está integrado por estudiantes de diferentes cursos, tanto de la Ingeniería Técnica como de la Superior, de modo que pueda haber una repartición de tareas adecuada al nivel de estudios cursado por cada uno.

El objetivo de este grupo de trabajo es encargarse del diseño y la construcción del modelo de un AUV capaz de albergar y transportar todo un equipo de investigación oceanográfica del Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, cuyo director Javier Gilabert Cervera, viene investigando el Mar Menor debido al deterioro que ha sufrido esta laguna en los últimos años, prestando especial atención a la relación existente entre la física del medio con su ecología, más concretamente, entre la hidrodinámica de los dos mares y los organismos suspendidos en sus aguas, para así poder saber si el Mar Menor puede revertirse a un estado anterior, lo cual constituiría uno de los principales retos para su conservación y recuperación.

Al ser una laguna abierta, es decir, en contacto con un mar mayor, en este caso el Mar Mediterráneo, el estudio de la mezcla y redistribución de las masas de agua así como las relaciones físico-biológicas son de una importancia trivial a la hora de plantear un estudio detallado de la evolución del medio. Para esto se presta especial atención al análisis hidrodinámico, basado en la toma de datos oceanográficos físicos. Sólo algunos parámetros para el estudio de la laguna como son la concentración de nitratos, el oxígeno disuelto o la clorofila pueden obtenerse de forma continua, hay muchos otros factores en los que no pueden registrarse sus datos en continuo por lo que tienen que ser obtenidos mediante campañas de muestreo. Los modelos de simulación numérica proporcionan una representación espacio-tiempo que en ocasiones puede suplir a las campañas de muestreo de algunos parámetros que son excesivamente costosos de adquirir mediante campañas convencionales

Básicamente se pueden distinguir tres tipos de simulación: simulación hidrodinámica (modelos físicos), simulación de calidad de aguas (modelos biogeoquímicos) y simulación de ecosistemas. Los modelos de simulación hidrodinámica permiten contemplar la capacidad de simulación del transporte de sustancias y sedimentos; los modelos de calidad de aguas puedan predecir la concentración de oxígeno y clorofila en el agua; y los modelos de ecosistemas permiten predecir la abundancia y distribución de ciertos grupos funcionales y de determinadas especies de organismos.

El establecimiento de un sistema de monitorización que comprenda parámetros físicos, químicos y biológicos aparece como una prioridad urgente. Además la implementación de la Directiva Marco del Agua exige la monitorización de la vegetación acuática submarina, los macroinvertebrados y el fitoplancton, tres indicadores biológicos de cambio en la estructura y

funcionamiento de los ecosistemas altamente sensibles al proceso de eutrofización, término que designa el enriquecimiento en nutrientes de un ecosistema.

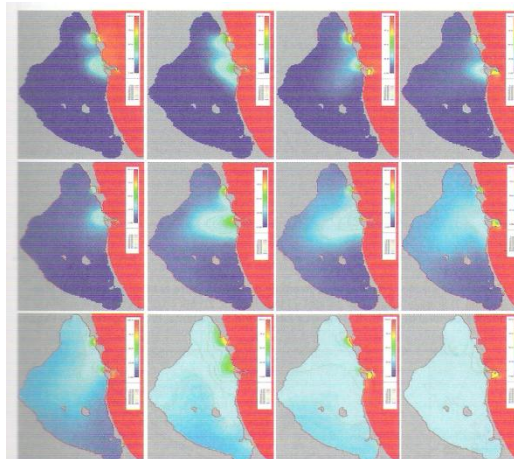


Figura 1.1. Simulación del porcentaje de intercambio de agua entre ambos mares.

Para que las predicciones de estos modelos de simulación sean lo más afinadas posible, se necesita una calibración y validación dada por una serie de constantes iniciales necesarias para construir las ecuaciones de los modelos numéricos. Estas constantes deben ser calculadas para cada ecosistema estudiado, por lo que se tienen que diseñar experimentos y realizar campañas oceanográficas para la obtención de estas constantes específicas del Mar Menor.

De todo esto se deduce que el empleo de un vehículo submarino autónomo como herramienta para la investigación oceanográfica es una muy buena manera (si no la mejor) para la obtención de todos estos datos y la consiguiente construcción de modelos de simulación. Dicho esto el siguiente punto a tratar es la realización del proyecto en sí.

La concepción de un vehículo de este tipo requiere de muchas disciplinas de diferentes departamentos, algunas lejos del ámbito específico de un ingeniero técnico naval, como son las relacionadas con el correcto funcionamiento de los sistemas eléctricos, electrónicos y de telecomunicación, pero la mayor parte del proyecto sí está dentro del campo de actuación de un técnico naval, como son el diseño de las formas, la resistencia de materiales y el análisis de estructuras, los procesos de fabricación y de conformado, los cálculos hidrostáticos y de estabilidad, la hidrodinámica y resistencia, el cálculo de la estructura, el diseño de la hélice, etcétera. En este Proyecto Fin de Carrera se ha escogido estudiar el comportamiento hidrodinámico del vehículo, como parte fundamental para la construcción del mismo, a través del análisis de resistencia al avance de los modelos propuestos con formas de revolución.

1.2. CASCO RESISTENTE Y EQUIPO OCEANOGRÁFICO

El planteamiento que se hace para este vehículo es como el de cualquier submarino convencional, con dos cascos: uno interior o *resistente*, que es en el que se dispondrán todos los

sistemas para el correcto funcionamiento del vehículo, así como todo el aparato eléctrico y electrónico; y otro casco exterior o *hidrodinámico*, a modo de carenado para reducir la resistencia que produce el avance y mejorar así el rendimiento propulsivo.

Definimos *casco resistente* como la parte interior del submarino, capaz de proporcionar estanqueidad en su interior y soportar la presión hidrostática a la que se verá sometido el vehículo cuando esté sumergido. A fin de conseguir esto se usará un tubo de polietileno para el transporte submarino de gas, que debido a su geometría y al material que lo compone se adapta perfectamente a las necesidades de este vehículo. Además se pueden obtener distintas longitudes y diámetros, por lo que multiplican las posibilidades constructivas para este efecto.

A este tubo se le procurarán una serie de modificaciones para poder dejar de llamarlo *tubo* y poder denominarlo *casco*. Para empezar se garantizará la estanqueidad cerrando el tubo por medio de unas semiesferas colocadas en sus extremos a modo de tapaderas, los llamados *domos*; de seguido se reforzará la resistencia estructural transversal del tubo gracias a una pequeña estructura compuesta de anillos dispuestos como cuerdas, y como refuerzo longitudinal se colocará un plancha que a su vez hará las veces de fondo del casco.

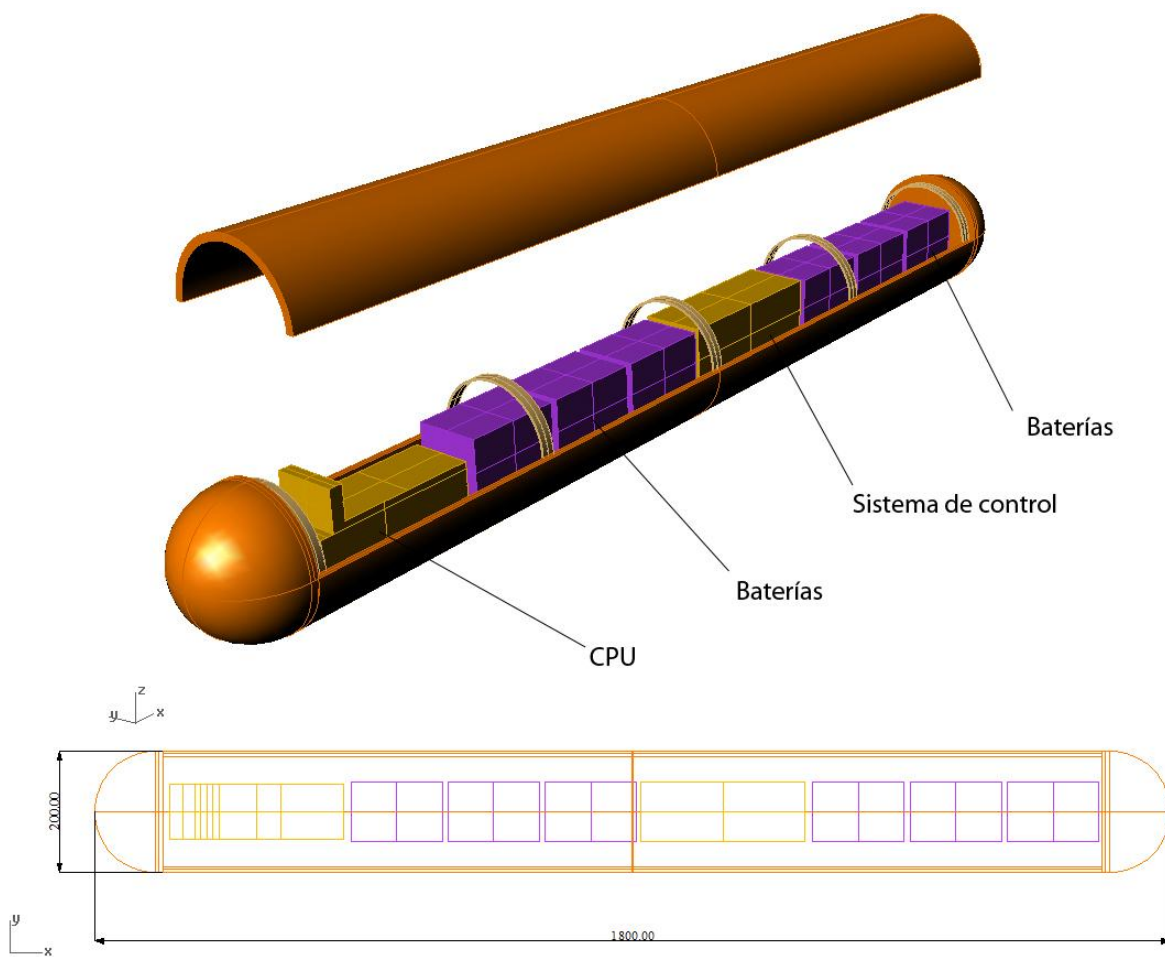


Figura 1.2. Croquis del casco resistente y elementos albergados.

La figura 1.2 muestra un croquis esquemático de la disposición de todos estos elementos en el casco resistente. En el interior del casco estructural se colocarán seis baterías longitudinalmente, de dimensiones 150 x 100 x 100 mm, que alimentarán todo el componente eléctrico y electrónico. También se dispondrá de dos cajas negras, una primera para alojar una CPU, de 285 x 90 x 120 mm, y por último una segunda caja negra para albergar todos los sistemas de control, de 270 x 97 x 100 mm.

El equipo oceanográfico que se instalará en el AUV, adosado al casco resistente, se compone de un analizador de nitratos *SUNA* (Sumersible Ultraviolet Nitrate Analyzer) marca *Satlantic*, un *ADCP* (Accoustic Dropler Current Profiles) marca *Nortek* y una sonda multiparamétrica con cuatro puertos, marca *YSI*. Las especificaciones que interesa conocer las dimensiones de las mismas. La *SUNA* tiene una longitud de 533 mm y un diámetro de 57 mm, la *ADCP* 628 mm y 75 mm respectivamente y, por último, 549 mm y 89 mm la multiparamétrica. Hay que apuntar además que estas sondas poseen baterías propias, por lo que son completamente autónomas, mucho más de lo que se conseguirá que lo sea el propio vehículo, si no fuese así este proyecto carecería de sentido. Así, por ejemplo, la *ADCP* tiene una autonomía aproximada de 80 días trabajando a 2 MHz, y trabajando a 1 MHz es de 50 días. Fotografías de estas sondas se muestran en la figura 1.3. Este tipo de sondas pueden trabajar de diferentes maneras, lo más usual es que sean remolcadas desde embarcaciones o ancladas en vehículos submarinos, pero esto conlleva movilizar vehículos muy grandes y una tripulación para el gobierno, por lo que las tomas de datos se hacen muy costosas.



Figura 1.3. De izquierda a derecha: *SUNA*, *ADCP* y multiparamétrica.

Un vehículo submarino autónomo solventa de la manera más eficiente varios de los inconvenientes que plantea el uso de estos equipos de investigación oceanográficas, por esta vía se minimizan las salidas a la mar con embarcaciones mayores, reduciendo así el consumo de combustible fósil, lo que es tanto un aporte económico como medio-ambiental; no se tiene la necesidad de tener personal *in situ* a la hora de recoger datos, salvo para lanzar y recoger el vehículo; y se protegen las sondas abrigándolas en el interior de éste, evitando posibles daños como los que se podrían ocasionar si simplemente fuesen remolcadas por un cable o ancladas al casco de una embarcación como sucede en ocasiones. Por lo que se llega a la conclusión de que un AUV es el mejor medio para la disposición de estas sondas y para optimizar los recogidas de datos oceanográficos.

Las diferentes sondas se sujetarán al casco resistente, y el casco hidrodinámico albergará el conjunto de las sondas y el casco resistente, es por esto que el proyecto se centrará en diseñar las formas del casco hidrodinámico y en calcular su resistencia al avance, dejando a un lado los cálculos de estabilidad y flotabilidad.

En la figura 1.4 se puede ver el conjunto del casco resistente con las sondas colocadas en diferentes posiciones, ya que, como se verá en los siguientes capítulos la disposición de las sondas puede ser de diferentes maneras dependiendo el modelo de formas que finalmente se emplee.

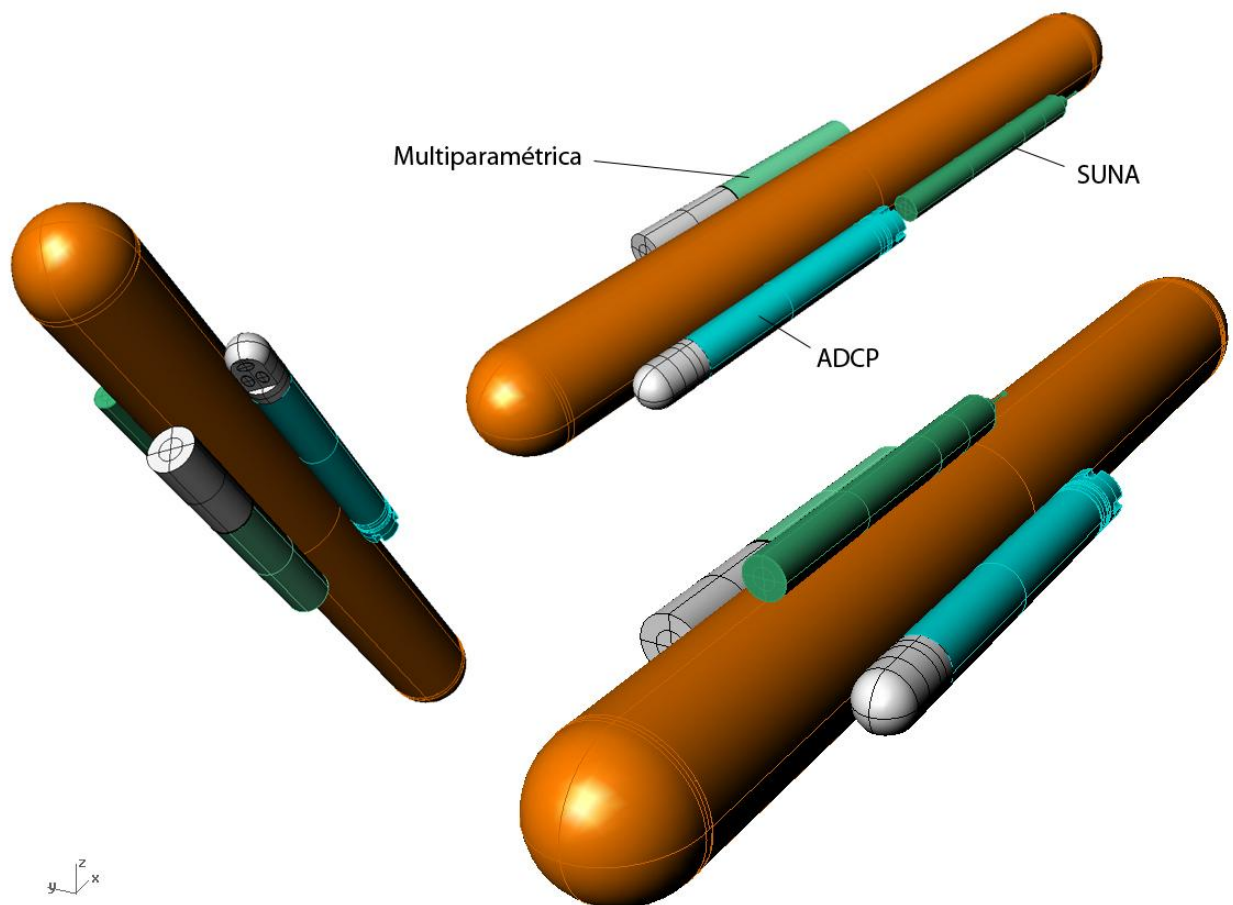


Figura 1.4. Diferentes posicionamientos de las sondas en el casco resistente.

Llegados a este punto hay que hacer una aclaración sobre la concepción del vehículo. El equipo oceanográfico instalado a bordo necesita estar en contacto con el agua para poder analizarla, por lo que en el modelo de AUV que finalmente se construya se harán unas aberturas a proa, a modo de branquias, para permitir la libre entrada de agua, y otras en popa para permitir que salga ayudada por la succión producida por la hélice, consiguiendo así una circulación controlada del agua a través del casco hidrodinámico, asegurando un flujo somero y constante ideal para el correcto funcionamiento de las sondas. Este hecho tiene una consecuencia trivial a la hora de comparar los modelos presentados en este proyecto. Aunque los volúmenes formados

por revolución sean diferentes, el desplazamiento de ambos modelos será prácticamente igual a efectos de flotabilidad, ya que en realidad el desplazamiento estará compuesto por el del conjunto de casco resistente y sondas, más el del material empleado para fabricar casco hidrodinámico (superficie mojada por espesor), y la diferencia de cantidad de material que exista entre los modelos propuestos será mínima.

La circulación interior de agua influye significativamente en el estudio de resistencia, puesto que si se tiene en cuenta en los cálculos, habría que tener en cuenta más superficie mojada, lo que se traduce en más rozamiento (viscosidad) con el consiguiente aumento de resistencia por componente friccional. Como es lógico, este punto complica notablemente el estudio de resistencia por lo que no se tendrá en cuenta en los análisis ya que el propósito último de este estudio es elegir las formas más eficientes hidrodinámicamente y poder hacer una estimación de la potencia absorbida y de la autonomía que proporcionan las baterías en función de las formas que se empleen.

CAPÍTULO 2. DISEÑO DEL CASCO HIDRODINÁMICO



Réplica del submarino *Ictíneo* (1864) por Narcís Monturiol. Museo Marítimo de Barcelona

En este capítulo se presenta el diseño del casco hidrodinámico del vehículo por medio de un polinomio generado a través de estudios de carenas sistemáticas en canales de ensayo siendo su último fin la obtención de las formas más eficientes para un submarino.

2.1. INTRODUCCIÓN

La optimización de la resistencia y del rendimiento propulsivo de un submarino es muy importante para influenciar de manera muy significativa en la velocidad máxima y la autonomía de éste. Como se mencionó anteriormente la velocidad de operaciones que debe mantener el AUV no será muy elevada, aproximadamente 2,5 m/s, para la correcta toma de datos del equipo oceanográfico y puesto que no es objetivo de este proyecto el conseguir un vehículo muy rápido sino más bien uno de gran autonomía, la resistencia al avance debe ser minimizada, y para hacer esto se tiene que hacer especial atención en el diseño de las formas.

Las formas del casco afectan sensiblemente a la resistencia al avance de cualquier navío, por lo que se necesita que sean las más adecuadas para que la potencia propulsora sea lo más reducida posible pero a la vez sea capaz de alcanzar el rango de velocidades deseado. Con esto se consigue que para una misma velocidad, con las formas más adecuadas, se reduzca la energía absorbida por la propulsión y se alargue así la autonomía del vehículo.



Figura 2.1. Submarino *Peral* (1888) por Isaac Peral. Puerto de Cartagena.

Las formas exteriores del casco de un submarino han evolucionado mucho desde aquellos diseñados simplemente para poder pasear por debajo del agua. Algunos de los primeros sumergibles ya disponían de formas bastante aceptables, formas fusiformes, probablemente como consecuencia de la observación directamente de la naturaleza haciendo atención a la forma que tienen los peces. Véase a modo de ejemplo la figura 2.1 o la imagen de portada.

Los primeros intentos destinados a optimizar las formas de los submarinos se hicieron en los últimos años de la II Guerra Mundial por parte de los alemanes, bien es sabido el terror que producían los submarinos alemanes en tiempos de guerra. Perdida la guerra, a partir de 1946 el relevo lo toman los Estados Unidos iniciando un vasto programa de investigación sobre la hidrodinámica de los submarinos en inmersión. El trabajo fue encomendado al *David Taylor Model Basin* (DTMB), fotografías mostradas en la figura 2.2, que dedujo y obtuvo las

modificaciones que habría que introducir en las formas de los submarinos existentes de la flota estadounidense.

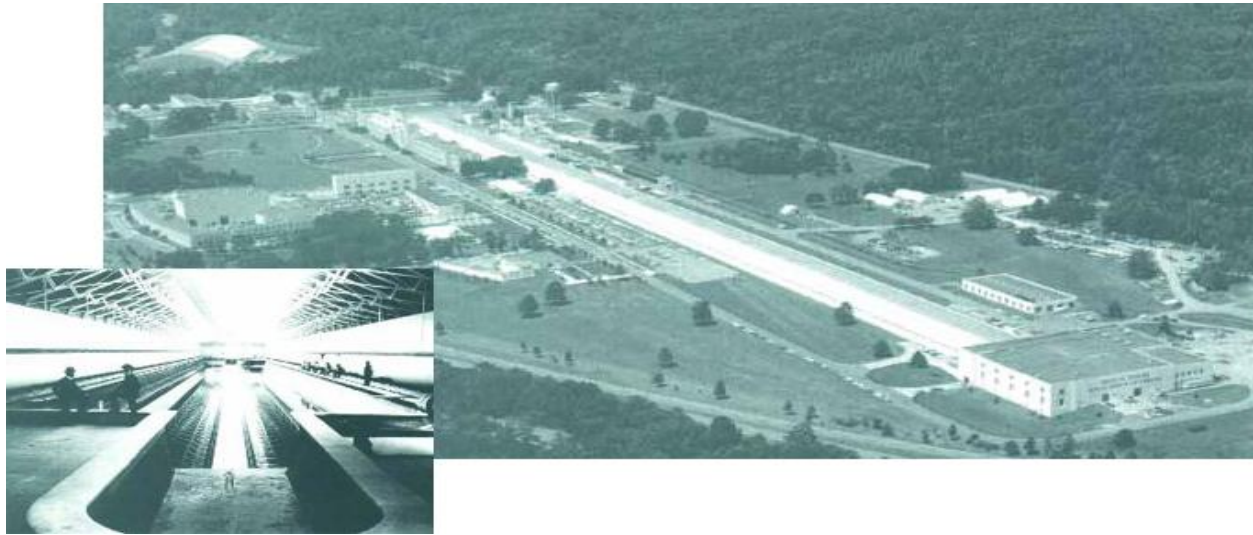


Figura 2.2. David Taylor Model Bassin (1898).

Habiéndose procedido a una serie de ensayos sistemáticos se llega, en 1948, a la conclusión teórica de las formas óptimas para este fin: *la Serie 58*. Éstas eran formas de revolución formadas por un cuerpo de proa relativamente redondeado, poco afilado, y uno de popa más elongado y afinado, intercalando en algunos modelos una parte cilíndrica. Variando los parámetros de entrada se obtenían varias formas de una misma familia, más o menos elongada, reuniendo una serie de condiciones en común como son longitud con respecto de su diámetro, el coeficiente prismático total, la longitud de las formas, la posición en la eslora en la cuaderna maestra, etc. Por ser formas de revolución la propulsión debió ser encomendada preferentemente a una sola línea de ejes, centrada con el eje de revolución.

En 1952 se procedió al lanzamiento del programa *Albacore*, un submarino experimental basado en los cuerpos del la Serie 58, en el que se ensayaron sistemáticamente formas de revolución en diversas situaciones y características geométricas. El objetivo de este programa era optimizar las formas del casco a efectos de poder alcanzar una gran velocidad sin tener que recurrir a potencias propulsoras excesivamente grandes que serían más detectables para los sónares enemigos. En la imagen de la figura 2.3 se muestra la evolución de las formas adoptadas para la construcción de distintos submarinos militares durante los primeros 60 años del siglo XX.

El resultado de este estudio determinó que los factores que influyen las formas de un submarino y en su resistencia al avance son muy diversos, pero el empleo de cuerpos de revolución además de simplificar el modelo, reducirá el número de estos factores a dos parámetros que se harán esenciales a la hora de decantarse por unas formas determinadas. Son el *afinamiento* (relación eslora/manga) y el *coeficiente prismático*. Con ellos se definen asimismo

las proporciones del modelo y su capacidad volumétrica (desplazamiento), de donde se podrán deducir también su superficie mojada y su resistencia de origen viscoso.

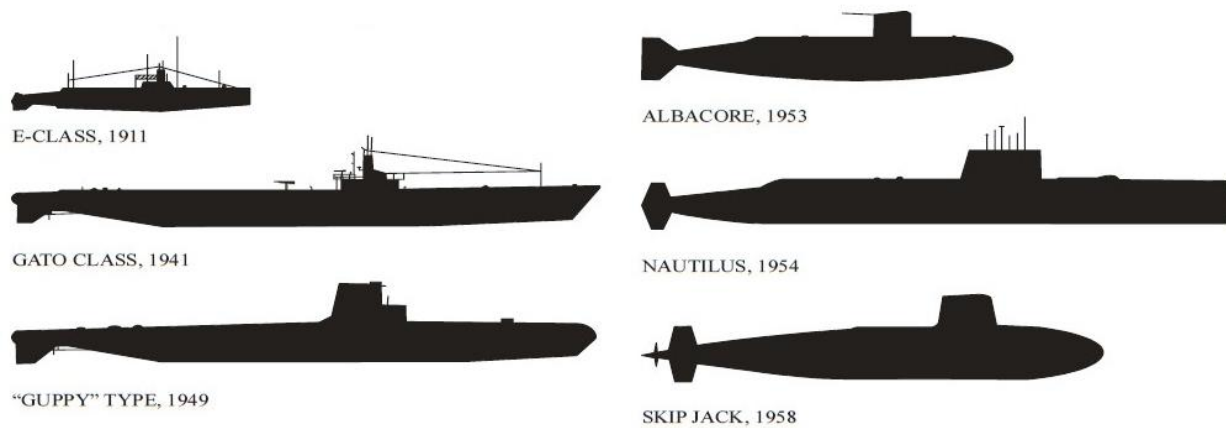


Figura 2.3. Comparación de las formas de distintos submarinos militares hasta 1958.

Las formas Albacore definen un cuerpo de revolución de forma ovalada que tiene de eslora 6 veces su diámetro ($L/D = 6$) con un cuerpo de entrada y otro de salida, sin una cilíndrica intermedia como la que se suele disponer en submarinos convencionales. El cuerpo de entrada es redondeado por su frente, tiene semejanza con un semielipsoide y mide de longitud $2,4 \cdot D$. El cuerpo de salida, de $3,6 \cdot D$ de longitud, tiene formas muy afinadas y afiladas en el extremo.

Como se puede observar en la figura 2.4, la longitud de la popa o forma de salida de aguas es más alargada que la de proa (un 150% más). La meridiana o generatriz de esta forma de popa es una especie de parábola de sexto grado que tiene su vértice en el punto mayor del diámetro y su eje es normal al eje longitudinal.

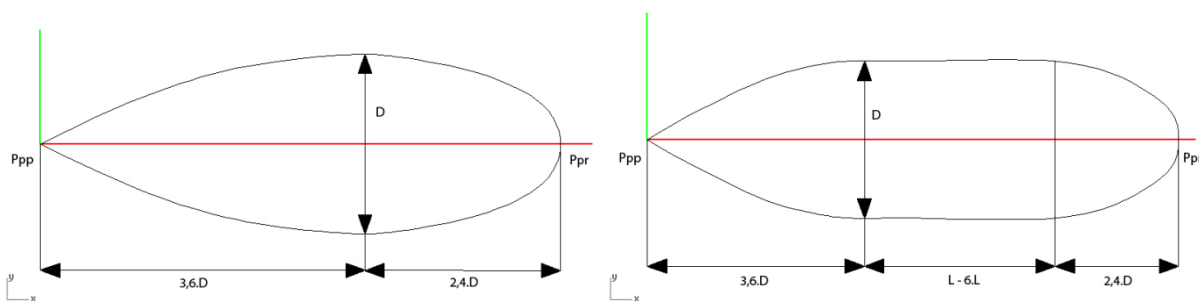


Figura 2.4. Formas Albacore puras y modificadas.

Por lo que de las figuras 2.5 y 2.6 puede deducirse que los coeficientes prismáticos para unas formas Albacore puras son:

$$C_{p_p} = 2,4 C_{p_{pr}} \left(\frac{D}{L} \right) + 3,6 C_{p_{pp}} \left(\frac{D}{L} \right)$$

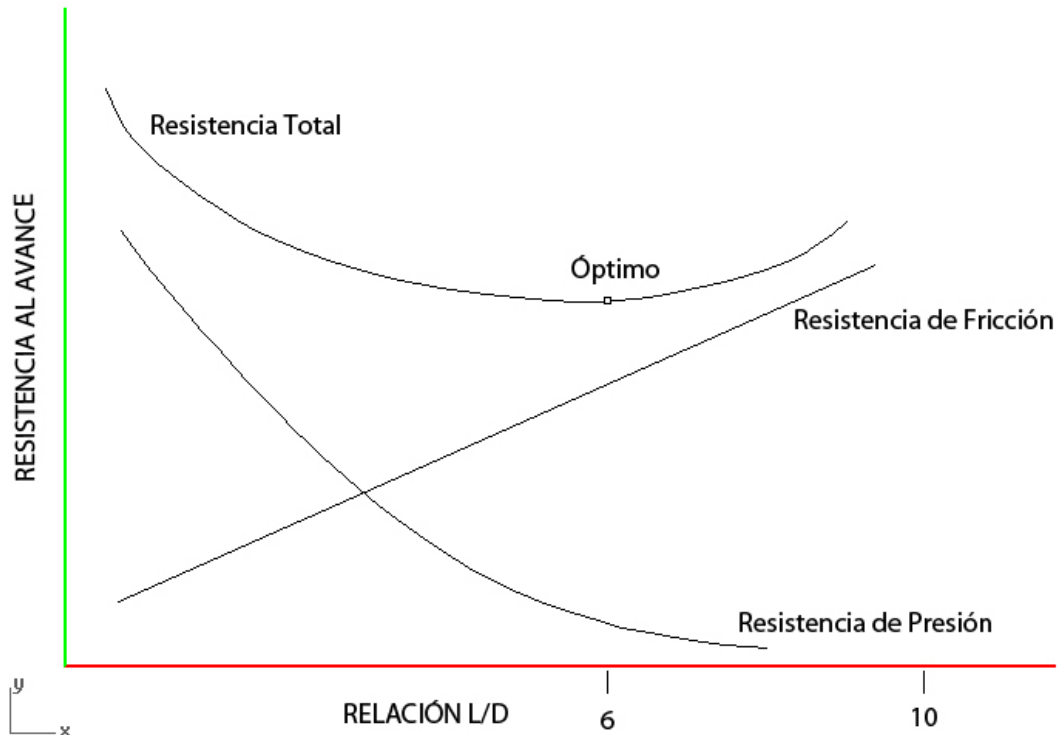


Figura 2.5. Variación de resistencia al avance en función de la relación L/D.

El coeficiente prismático total de este cuerpo es de 0,60. Se han probado formas similares con coeficientes de 0,55 y 0,65, pero los resultados mostraban una mayor componente de resistencia de presión (también llamada de forma o residual). En teoría la relación $L/D = 6$ es la más adecuada a efectos de tener la mínima resistencia al avance, ya que también minimiza la superficie mojada para un desplazamiento constante y con ello la componente de fricción, que es la de mayor transcendencia entre sus componentes. En la práctica, la relación L/D óptima pasa a ser 7,5 debido a la necesidad de incorporar los apéndices y una parte cilíndrica intermedia en el análisis de resistencia. Esta parte cilíndrica intermedia se suele disponer en todos los submarinos militares para así aumentar el espacio hábil de manera significativa sin suponer esto un aumento importante de resistencia. En el AUV que se propone en este proyecto es un submarino de investigación no tripulado, por lo que se va a suprimir esta parte cilíndrica intermedia y se optará por las formas Albacore puras.

2.2. LAS FORMAS DE LA SERIE 58

Como se explica en el apartado anterior las formas de la serie 58 fueron la primera tentativa desarrollada para intentar definir matemáticamente un cuerpo de revolución con parámetros que podían ser modificados a conveniencia y que son la base de las formas Albacore.

La Serie 58 estaba compuesta por 28 modelos, de cuerpo de revolución puro, con sus extremos definidos por una ecuación polinómica de sexto grado del tipo:

$$Y^2 = A_1X + A_2X^2 + A_3X^3 + A_4X^4 + A_5X^5 + A_6X^6$$

De las muchas propiedades geométricas que deberían emplearse para caracterizar las formas de un cuerpo de revolución se han reducido, por razones prácticas a las siguientes: longitud del cuerpo de revolución (L), diámetro máximo (D), distancia desde la parte de proa a la sección de máximo diámetro (X_{cm}), radio de curvatura del extremo de proa (R_0) y radio de curvatura del extremo de popa (R_1).

Para la construcción de este polinomio generatriz es conveniente utilizar esta combinación de propiedades adecuadamente adimensionalizadas, para ello se emplean las siguientes expresiones:

$$\lambda = \frac{L}{D} \qquad r_0 = R_0 \frac{L}{D^2}$$

$$m = \frac{X_{CM}}{L} \qquad r_1 = R_1 \frac{L}{D^2}$$

Otras características como la superficie mojada, la posición del centro de gravedad, la posición del centro de carena o el volumen de desplazamiento son muy interesantes para varios propósitos constructivos pero serán derivadas del polinomio de formas obtenido, por lo que no se utilizan para la construcción del mismo.

Por razones tanto matemáticas como físicas, el desarrollo del polinomio generatriz ha sido basado en una curva construida por secciones transversales, así se demuestra que las pendientes de la curva en los extremos de proa y popa son proporcionales a los radios de curvatura en los extremos, una relación que simplifica la determinación de la ecuación del cuerpo de revolución. La razón física es que la curva construida por secciones transversales es proporcional a una distribución de desdoblamiento axial, la cual genera el cuerpo deseado uniformemente, es decir, alisado.

Las formas de la Serie 58 obtenidas mediante el polinomio de sexto grado, no contemplan la zona intermedia de diámetro central constante. Aunque también se trabaja con formas que incluyen zonas cilíndricas intercaladas entre los casquetes, éste no es el caso, ya que el modelo de AUV que se propone se compone únicamente de dos casquetes de proa y popa, siguiendo las formas de la formas Albacore puras. Véase el Anexo I al final de esta memoria.

La ventaja principal de la Serie 58 es que muchos de los cuerpos definidos por esta formulación, puramente geométrica, fueron realmente probados en ensayos hidrodinámicos sistemáticos, habiéndose llegado a hacer corresponder con unos coeficientes de formas con su resistencia al avance, pudiéndose decidir cuál era el conjunto de parámetros más conveniente para las necesidades y cuál era la tendencia cuando estos se modificaban. Habiéndose efectuado

esta serie de ensayos sistemáticos variando estos factores se puede decidir que formas interesan más. Así por ejemplo, el valor más utilizado de r_0 , radio de curvatura del extremo de proa, en tangencia con la vertical de proa, es 0,50 (adimensional); la posición más idónea para la cuaderna maestra está situada a un 40% del extremo de proa; y se puede comprobar que el coeficiente prismático total más conveniente, es siempre cercano 0,60.

La resistencia de fricción, para una velocidad dada, depende fundamentalmente de la extensión de superficie mojada y del número de Reynolds. La resistencia residual, por presión o de formas, incluye la separación de flujo más la resistencia producida por el choque de agua con objetos sobresalientes, orificios, etc. Se demostró que para una serie de formas del mismo volumen, totalmente lisas, que la resistencia total se minimiza para una relación eslora-manga comprendida entre 6 y 6,2. Resultados mostrados en la figura 2.6.

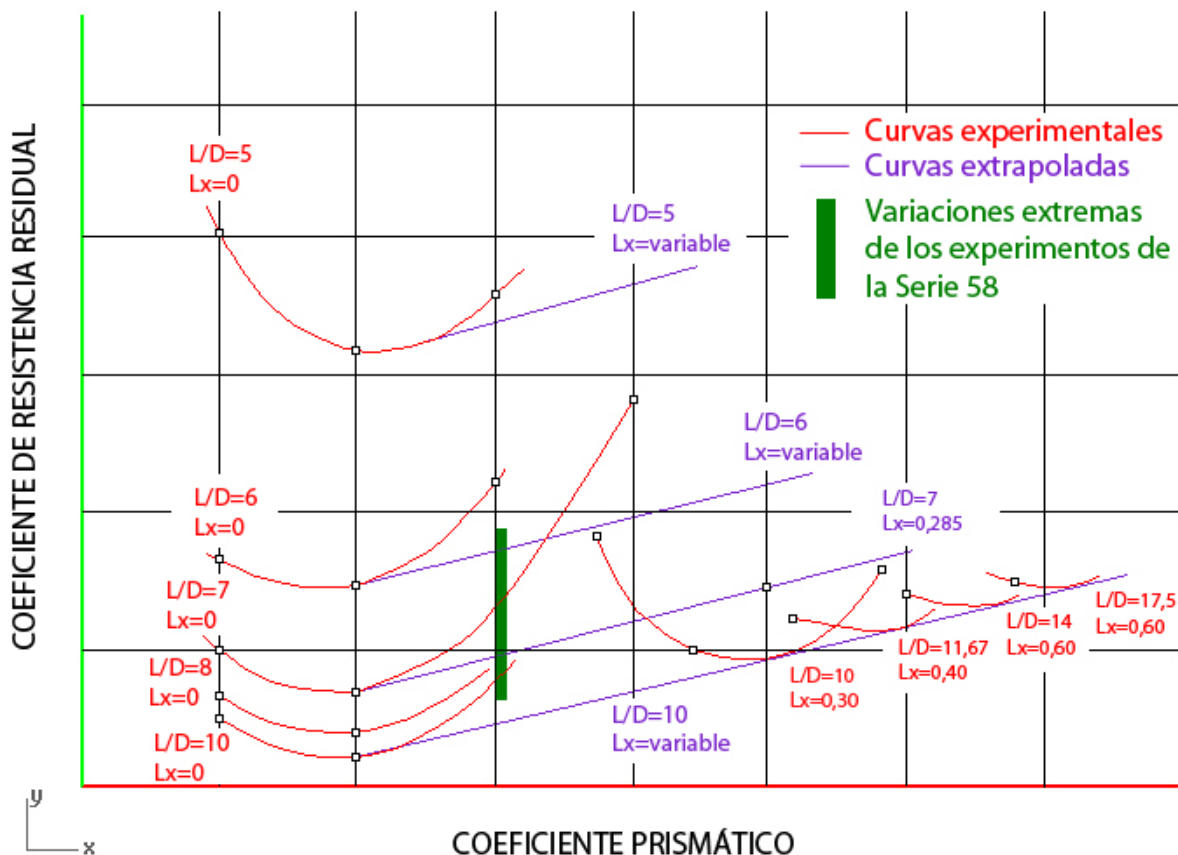


Figura 2.6. Variación del coeficiente de resistencia residual en función del coeficiente prismático.

La ecuación de una sección media de un cuerpo de revolución, se expresa en coordenadas cartesianas (X,Y), con el cuerpo dispuesto longitudinalmente sobre el eje X y el origen coincidiendo con en el extremos del cuerpo de proa. Asumiendo un polinomio para la ecuación de la curva creada por secciones transversales se tiene:

$$\pi Y^2 = A_1 X + A_2 X^2 + \dots + A_n X^n$$

Y adimensionalizando los parámetros X e Y, del modo propuesto anteriormente, la expresión queda como sigue:

$$y^2 = a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n$$

Siendo,

$$a_s = A_s \frac{L^2}{\pi D^2} \quad s = 1, 2, \dots, n$$

En la figura 2.7 se muestran esquemas de una curva por secciones transversales con sus características geométricas adecuadamente adimensionalizadas.

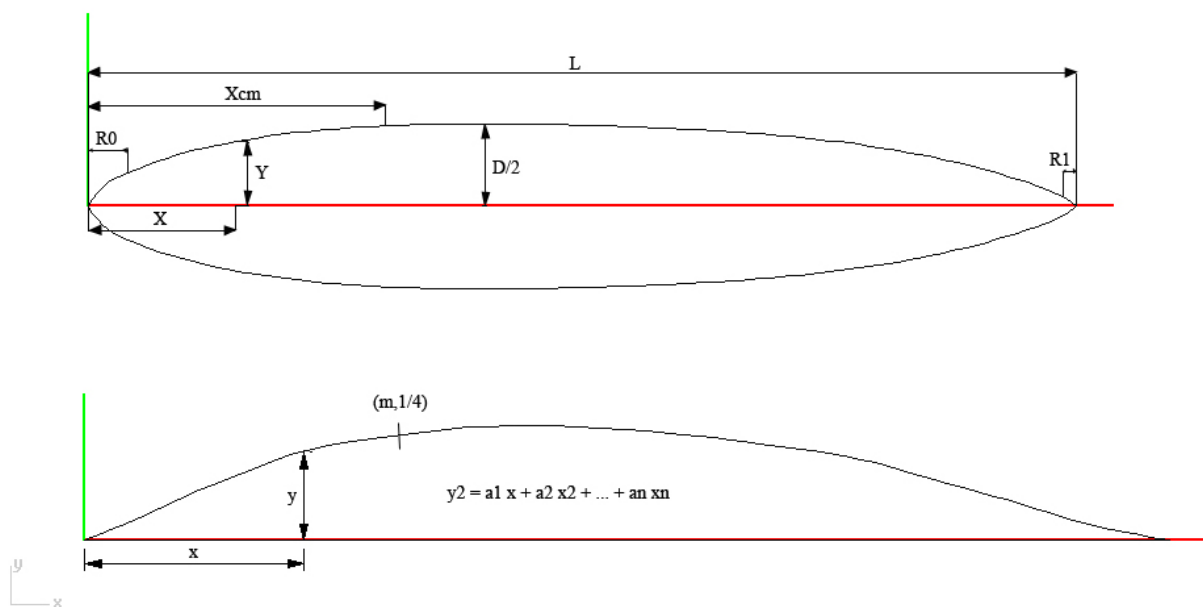


Figura 2.7. Representación dimensional y adimensional de una curva por secciones transversales.

Los coeficientes a_1, a_2, \dots, a_n van a ser determinados en función de los parámetros geométricos m, r_0, r_1 y C_p . En la forma adimensional, la longitud y el diámetro máximo son unitarias, por lo que el término $\lambda = L/D$ es eliminado como parámetro.

Las condiciones de longitud y diámetro son entonces que $y = 0$ cuando $x = 1$, $y = 0,50$ cuando $x = m$, y $dy/dx = 0$ cuando $x = m$. Éstos dan respectivamente las ecuaciones:

$$a_1 + a_2 + \dots + a_n = 0$$

$$a_1 m + a_2 m^2 + \dots + a_n m^n = \frac{1}{4}$$

$$a_1 + 2a_2m + \dots + na_n m^{n-1} = 0$$

Derivando el polinomio de sexto grado (adimensionalizado) sucesivamente respecto de y se obtiene:

$$2y = (a_1 + 2a_2x + \dots + na_n x^{n-1}) \frac{dx}{dy}$$

$$2 = (a_1 + 2a_2x + \dots + na_n x^{n-1}) \frac{d^2x}{dy^2} + (2a_2 + \dots + n^{n-1} a_n x^{n-2}) \left(\frac{d^2x}{dy^2} \right)^2$$

Si $a_1 \neq 0$, se puede ver que, cuando $x = 0$, $dx/dy = 0$ y de ahí que $d^2x/dy^2 = 2/a_1$. Consecuentemente sustituyendo estos valores en la ecuación se tiene que:

$$a_1 = 2r_0$$

Si, por otro lado, $a_1 = 0$, el cuerpo tendrá en el extremo de proa un morro puntiagudo, pero la ecuación $a_1 = 2 \cdot r_0$ sigue siendo válida para ambos casos.

De manera análoga, cuando $x = l$, $y = 0$ y de la ecuación del polinomio derivado, $dx/dy = 0$, a no ser que,

$$a_1 + 2a_2 + \dots + na_n = 0$$

y de las ecuaciones anteriormente citadas se obtiene:

$$a_1 + 2a_2 + \dots + na_n = -2r_1$$

o, sustituyendo por y^2 desde la ecuación anterior,

$$\frac{1}{2}a_1 + \frac{1}{3}a_2 + \dots + \frac{1}{(n+1)}a_n = \frac{1}{4}c_p$$

El signo positivo del radio de curvatura es tomado para la expresión $a_1 = 2 r_0$ y el negativo para la expresión $a_1 + 2 \cdot a_2 + \dots + n \cdot a_n = -2 \cdot r_1$ porque r_0 y r_1 son intrínsecamente positivos. Si se cumple la expresión $a_1 + 2 \cdot a_2 + \dots + n \cdot a_n = 0$, el cuerpo tiene un extremo de popa puntiagudo, así que $a_1 + 2 \cdot a_2 + \dots + n \cdot a_n = -2 \cdot r_1$ es válida para ambos casos.

Los radios de curvatura R_0 , R_1 se definen por medio del radio instantáneo R de curvatura como se explica a continuación, para ambos de igual manera:

$$R_0 = R_1 = R$$

$$R = \frac{\Delta s}{\Delta \theta}$$

$$R = \lim_{(\Delta s \rightarrow 0)} \frac{\Delta s}{\Delta \theta} = \frac{ds}{d\theta}$$

Los radios de curvatura R_0 , R_1 y el centro C de curvatura se determinan trazando la tangente a un punto de la curva y seguido se traza la normal. Se toma un punto de la curva muy próximo al anterior y se traza la tangente y la normal en dicho punto.

Las normales se cortan en el centro de curvatura C , y la distancia entre el centro de curvatura a uno u otro punto, infinitamente próximos, se llama radio de curvatura R_0 , R_1 . Si el ángulo comprendido entre las dos tangentes es $d\theta$, este es el ángulo que forman las dos normales. La longitud del arco entre los dos puntos considerados es $ds = R \cdot d\theta$.

Dada la función $y = f(x)$, se va determinar la fórmula que permite calcular el radio de curvatura R de la curva en la posición de abscisa x .

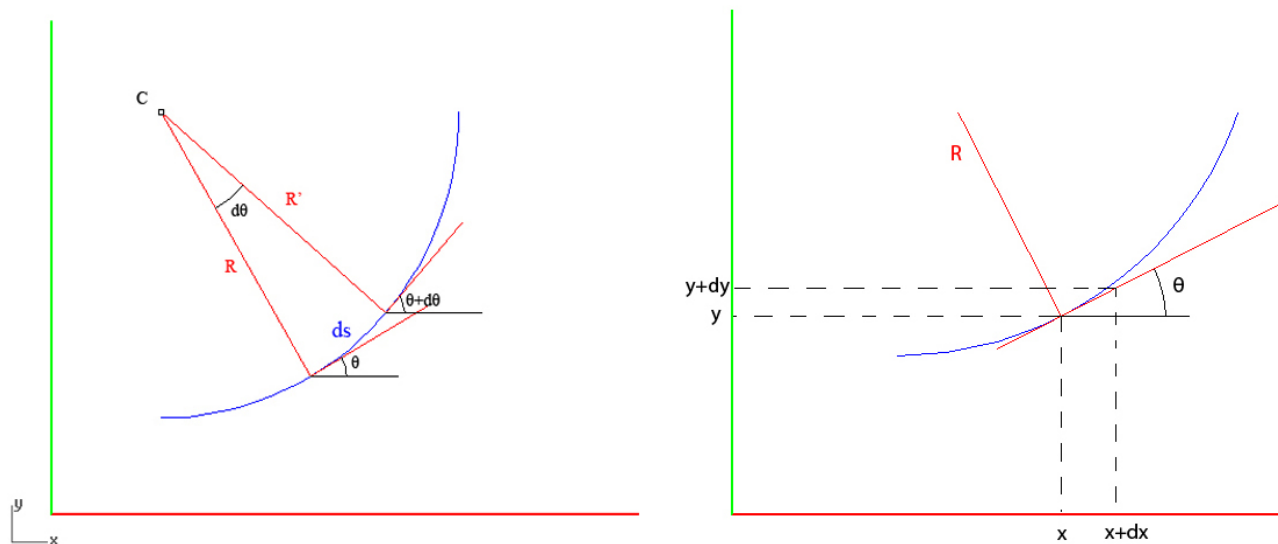


Figura 2.8. Definición geométrica del radio instantáneo de rotación.

De la figura 2.8, concerniente a los radios instantáneos de rotación para la formación de los radios de la entrada en proa y la salida en popa, se establecen las siguientes relaciones aplicando simplemente trigonometría básica:

$$\tan\theta = \frac{dy}{dx} \quad ds = \sqrt{(dx^2 + dy^2)} = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx$$

Por lo que la fórmula para los radios de curvatura es:

$$R = \frac{ds}{d\theta} = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx}{d \arctan\left(\frac{dy}{dx}\right)} = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx}{\frac{\left(\frac{d^2y}{dx^2}\right) dx}{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} = \pm \frac{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)^{\frac{2}{3}}}{\frac{d^2y}{dx^2}}$$

Y adimensionalizando queda como sigue:

$$r = \pm \frac{\left(1 + \frac{L^2}{D^2} \left(\frac{dx}{dy}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}{\frac{d^2x}{dy^2}}$$

Por otro lado, el volumen del cuerpo de revolución puede ser expresado como:

$$V = \int_0^1 \pi y^2 dx = \pi D^2 L \int_0^1 y^2 dx$$

A continuación se enumeran todas las ecuaciones lineales citadas anteriormente para el cálculo de los parámetros a_n :

$$a_1 + a_2 + \dots + a_n = 0$$

$$a_1 m + a_2 m^2 + \dots + a_n m^n = \frac{1}{4}$$

$$a_1 + 2a_2 m + \dots + na_n m^{(n-1)} = 0$$

$$a_1 = 2r_0$$

$$a_1 + 2a_2 m + \dots + na_n = -2r_1$$

$$\frac{1}{2}a_1 + \frac{1}{3}a_2 + \dots + \frac{1}{(n+1)}a_n = \frac{1}{4}C_p$$

Correspondiente a los parámetros m , r_0 , r_1 y C_p están estas seis ecuaciones. Consecuentemente un polinomio generatriz de sexto grado es, en general, determinable a través de éstas, pero la solución de estas ecuaciones por medio de determinantes es muy laboriosa, por lo que se ha desarrollado un procedimiento alternativo.

Se demuestra en la solución por medio de determinantes que los parámetros a_n son función lineal de los radios de curvatura, r_0 y r_1 , y del coeficiente prismático, C_p . De ahí que y^2 sea también función lineal de r_0 , r_1 y C_p , y puede ser escrita en la forma:

$$y^2 = 2r_0 R_0(x) + 2r_1 R_1(x) + C_p P(x) + Q(x)$$

Donde $R_0(x)$, $R_1(x)$, $P(x)$ y $Q(x)$ son polinomios básicos de sexto grado en x . Correspondiendo a las ecuaciones anteriores el polinomio generatriz $y^2(x)$ satisface las siguientes condiciones de igual manera para r_0 , r_1 y C_p :

Condición (a) $y^2(0) = 0$

Condición (b) $\frac{dy^2(0)}{dx} = 2r_0$

Condición (c) $y^2(1) = 0$

Condición (d) $\frac{dy^2(1)}{dx} = 2r_0$

Condición (e) $y^2(m) = \frac{1}{4}$

Condición (f) $\frac{dy^2(m)}{dx} = 0$

Condición (g) $\int_0^1 y^2(x)dx = \frac{1}{4}C_p$

La aplicación en el polinomio generatriz de estas siete condiciones da lugar a las siguientes consecuencias. Como $y^2(0) = 0$, condición (a), independientemente de los valores r_0 , r_1 y C_p , tenemos que:

$$R_0(0) = R_1(0) = P(0) = Q(0) = 0$$

Y de aquí que se obtienen de manera análoga las siguientes ecuaciones:

De la condición (b), $R'_0(0) = 1$

$$R'_1(0) = P'(0) = Q'(0) = 0$$

De la condición (c), $R_0(1) = R_1(1) = P(1) = Q(1) = 0$

De la condición (d), $R'_0(1) = R'_1(1) = P'(1) = Q'(1) = 0$

De la condición (e), $R_0(m) = 1$

$$R_1(m) = P(m) = 0$$

$$Q(m) = \frac{1}{4}$$

De la condición (f), $R'_0(m) = R'_1(m) = P'(m) = Q'(m) = 0$

De la condición (g), $\int_0^1 P(x)dx = \frac{1}{4}$

$$\int_0^1 R_0(x)dx = \int_0^1 R_1(x)dx = \int_0^1 Q(x)dx = 0$$

A continuación se presenta un resumen de todas las ecuaciones para el cálculo de los distintos parámetros evaluados. Se demuestra que un cuerpo de revolución cuyos radios de los

extremos de proa y popa, posición longitudinal de la cuaderna maestra y coeficiente prismático son predeterminados, puede ser representado por un polinomio de sexto grado de la forma:

$$y^2 = 2r_0R_0(x) + 2r_1R_1(x) + C_pP(x) + Q_x$$

Donde,

$$R_0(x) = (\alpha_0 + \alpha_1x)x(x-1)^2(x-m)^2$$

$$R_1(x) = (\beta_0 + \beta_1x)x(x-1)(x-m)^2$$

$$P(x) = yx^2(x-1)^2(x-m)^2$$

$$Q(x) = (\delta_0 + \delta_1x + \delta_2x^2)(x-1)^2$$

y,

$$\alpha_0 = \frac{1}{m^2}$$

$$\alpha_1 = -\frac{7(1-4m+5m^2)}{2m^2(2-7m+7m^2)}$$

$$\beta_0 = -\frac{10-28m+21m^2}{2(1-m)^2(2-7m+7m^2)}$$

$$\beta_1 = -\frac{7(2-6m+5m^2)}{2(1-m)^2(2-7m+7m^2)}$$

$$y = \frac{105}{2(2-7m+7m^2)}$$

$$\delta_0 = \frac{3(7m^2-8m+2)}{4m^2(1-m)^3(7m^2-7m+2)}$$

$$\delta_1 = -\frac{(21m^3+14m^2+4m-2)}{2m^3(1-m)^3(2-7m+7m^2)}$$

$$\delta_2 = \frac{7(5m^2-5m+1)}{4m^3(1-m)^3(7m^2-7m+2)}$$

Por consiguiente los datos de entrada, m , r_0 , r_1 , C_p y L/D , sirven para definir una forma específica para generar un cuerpo de revolución. Variando los datos de entrada se obtiene una

familia de curvas en función de estas variables, con lo que se puede elegir la forma que más interese, dentro de unos límites, ya que hay unas combinaciones que dan resultados imposibles.

En el Anexo II al final de la memoria muestran las tablas para la construcción del polinomio generatriz a través de los polinomios $R_0(x)$, $R_1(x)$, $P(x)$ y $Q(x)$ para valores de x entre 0 y 1, en intervalos de 0,02 y para un valor de $m = 0,40$.

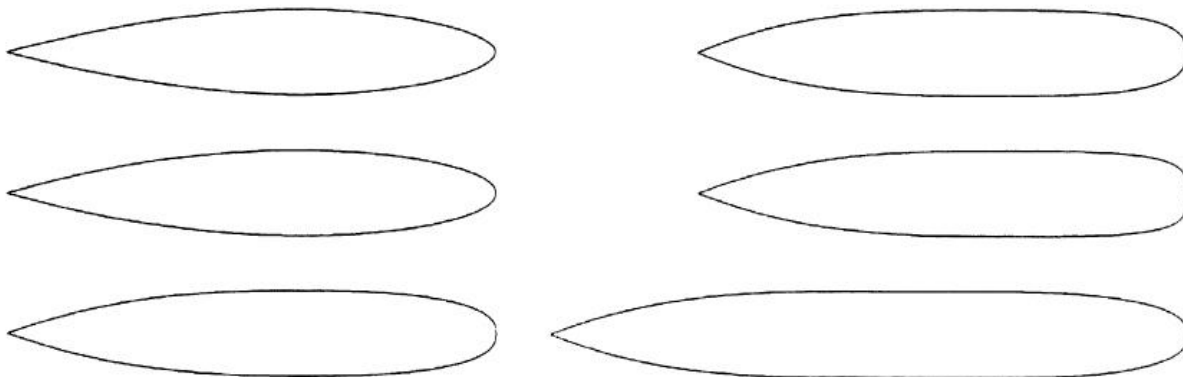


Figura 2.9. Perfiles desarrollados con el polinomio de sexto grado. El primero de ellos es el más aproximado a las formas Albacore puras.

2.3. MODELO ALBACORE PURO

Para ajustar al máximo las dimensiones del casco hidrodinámico, reduciendo así la superficie mojada y con ello la resistencia por componente friccional, se ha procedido a calcular el diámetro que el necesita para poder envolver completamente tanto el casco resistente como las sondas, que en conjunto forman un cuerpo de 1770 y 360 milímetros de longitud y anchura máximas, como se ha visto en el Capítulo 1.

Como se puede observar de la figura 2.5, obtenida de los estudios de la Serie 58 del DTMB, la resistencia al avance mínima se alcanza para el valor $L/D = 6$, con el valor adimensionalizado de la posición longitudinal del diámetro máximo $m = 0,40$; y de la figura 2.4, también obtenida de los estudios de la Serie 58, que para este valor de la relación eslora/manga, el coeficiente prismático con el que menos resistencia residual se genera es $C_p = 0,60$. Para que la envolvente del casco hidrodinámico sea suficiente para albergar el conjunto formado por el casco resistente y las sondas, se ha decidido tomar un diámetro de 400 milímetros y consecuentemente una eslora de 2400.

De los parámetros de entrada que sirven para definir una forma específica para generar un cuerpo de revolución, m , r_0 , r_1 , C_p y L/D , sólo quedarían por elegir los radios de curvatura de los extremos de proa y popa. Para éstos se van a utilizar los valores 0,50 y 0,10 respectivamente, por

ser los más típicos en construcción de submarinos. Por lo que las dimensiones para el modelo Albacore puro quedan como sigue:

	R_0	R_1	C_p	m	L (m)	D (m)
ALBACORE PURO	0,50	0,10	0,60	0,40	2,40	0,40

Una vez definidos todos los parámetros de entrada, se puede proceder a construir el polinomio de sexto grado para la generatriz del cuerpo de revolución.

$$y^2 = 2r_0R_0(x) + 2r_1R_1(x) + C_pP(x) + Q(x)$$

$$y^2 = R_0(x) + 0,2 R_1(x) + 0,6 P(x) + Q(x)$$

Seguidamente se deben calcular los polinomios $R_0(x)$, $R_1(x)$, $P(x)$ y $Q(x)$ ello se comienza calculando los coeficientes α_0 , β_0 , β_1 , γ , δ_0 , δ_1 y δ_2 , sólo dependen de la posición longitudinal del diámetro máximo $m = 0,40$. Según las fórmulas dadas en el apartado anterior:

$$\alpha_0 = \frac{1}{(0,4)^2}$$

$$\alpha_1 = -\frac{7[1 - 4(0,4) + 5(0,4)^2]}{2(0,4)^2[2 - 7(0,4) + 7(0,4)^2]}$$

$$\beta_0 = \frac{10 - 28(0,4) + 21(0,4)^2}{2[1 - (0,4)]^2[2 - 7(0,4) + 7(0,4)^2]}$$

$$\beta_1 = \frac{7[2 - 6(0,4) + 5(0,4)^2]}{2[1 - (0,4)]^2[2 - 7(0,4) + 7(0,4)^2]}$$

$$\gamma = \frac{105}{2[2 - 7(0,4) + 7(0,4)^2]}$$

$$\delta_0 = \frac{3[7(0,4)^2 - 8(0,4) + 2]}{4(0,4)^2[1 - (0,4)]^3[2 - 7(0,4) + 7(0,4)^2]}$$

$$\delta_1 = \frac{[21(0,4)^3 - 14(0,4)^2 + 4(0,4) - 2]}{2(0,4)^3[1 - (0,4)]^3[2 - 7(0,4) + 7(0,4)^2]}$$

$$\delta_2 = \frac{7[5(0,4)^2 - 5(0,4) + 1]}{4(0,4)^3[1 - (0,4)]^3[2 - 7(0,4) + 7(0,4)^2]}$$

Operando estas ecuaciones mediante una hoja de cálculo se obtienen los siguientes resultados de los coeficientes para la construcción de los polinomios básicos:

	α_0	α_1	β_0	β_1	γ	δ_0	δ_1	δ_2
ALBACORE PURO	6,250	-13,672	9,375	-12,153	164,063	-5,425	56,062	-79,120

Con los resultados de estos coeficientes se tabulan los polinomios básicos $R_0(x)$, $R_1(x)$, $P(x)$ y $Q(x)$, valores de x entre 0 y 1, en intervalos de 0,02, según las fórmulas,

$$R_0(x) = (\alpha_0 + \alpha_1 x)x(x - 1)^2(x - m)^2$$

$$R_1(x) = (\beta_0 + \beta_1 x)x^2(x - 1)(x - m)^2$$

$$P(x) = \gamma x^2(x - 1)^2(x - m)^2$$

$$Q(x) = (\delta_0 + \delta_1 x + \delta_2 x^2)(x - 1)^2$$

y sustituyendo los valores de los coeficientes calculados, así como el valor de m , se tiene:

$$R_0(x) = (6,25 - 13,672 x)x(x - 1)^2(x - 0,4)^2$$

$$R_1(x) = (9,375 - 12,153 x)x^2(x - 1)(x - 0,4)^2$$

$$P(x) = 164,063 x^2(x - 1)^2(x - 0,4)^2$$

$$Q(x) = (-5,425 + 56,062 x - 79,12 x^2)(x - 1)^2$$

Ahora sólo queda resolver estos polinomios, en este caso se ha utilizado el procesador online Matlab, de manera que se opera en el segundo miembro de cada uno y el resultado es la obtención de los polinomios básicos, también de sexto grado, que conforman el polinomio generatriz:

$$R_0(x) = -13,672 x^6 + 44,532 x^5 - 55,235 x^4 + 32,563 x^3 - 9,188 x^2 + x$$

$$R_1(x) = -12,153 x^6 + 31,250 x^5 - 28,542 x^4 + 10,945 x^3 - 1,500 x^2$$

$$P(x) = 164,063 x^6 - 459,376 x^5 + 452,813 x^4 - 183,750 x^3 + 26,250 x^2$$

$$Q(x) = -79,120 x^6 + 214,302 x^5 - 196,669 x^4 + 66,912 x^3 - 5,425 x^2$$

Sustituyendo ahora estos polinomios y operando nuevamente se obtiene la fórmula del polinomio generatriz del cuerpo de revolución en sus formas adimensional y dimensional queda:

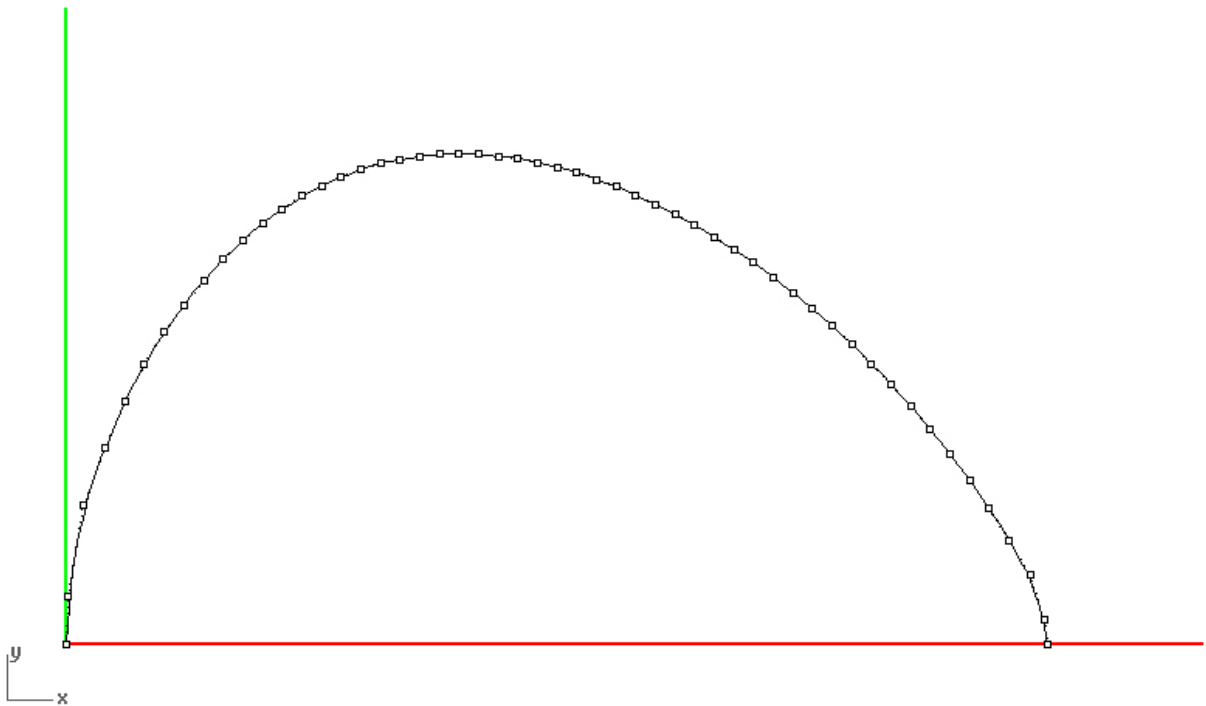
$$y^2 = R_0(x) + 0,2 R_1(x) + 0,6 P(x) + Q(x)$$

$$y^2 = 59,07 x^6 - 169,292 x^5 + 172,368 x^4 - 73,332 x^3 + 10,138 x^2 + x$$

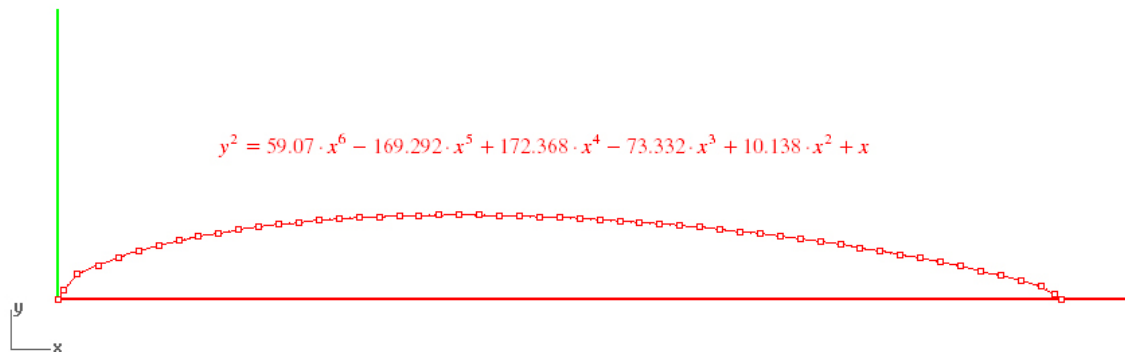
$$y^2 = 0,0125 X^6 - 0,085 X^5 + 0,2078 X^4 - 0,2122 X^3 + 0,0704 X^2 + 0,0167 X$$

En los anexos al final de la memoria se han tabulado los polinomios básicos $R_0(x)$, $R_1(x)$, $P(x)$ y $Q(x)$, para valores de x entre 0 y 1, en intervalos de 0,02, así como el polinomio generatriz adimensional y dimensionalmente, para los mismos valores de x , en iguales intervalos de 0,02. A continuación se muestran los valores de X e Y dimensionalizados según las fórmulas $X = x \cdot L$ e $Y = y \cdot D/2$, para $L = 2,4$ metros y $D = 0,40$ metros.

En las figuras 2.10 y 2.11 se muestran los polinomios generados por este procedimiento, dimensional y adimensionalmente, así como en la figura 2.12 se muestra una representación tridimensional del volumen de revolución generados mediante el empleo del polinomio normalizado.



2.10. Polinomio generatriz adimensionalizado



2.11. Polinomio generatriz dimensionalizado.

Obtenidos ya los valores de los pares dimensionados (X,Y) , se procede a la construcción de la curva generatriz mediante Rhinoceros, utilizando el tipo de curvas B-Splines, para así luego revolucionar la curva y crear el volumen de revolución que conformará el casco hidrodinámico del vehículo. Un procedimiento alternativo sería escribir directamente el polinomio generatriz en Matlab o algún tipo de procesador matemático para generar la curva y el volumen, pero se ha preferido el uso de Rhinoceros por su facilidad en el manejo del interface y por poseer algunas herramientas predefinidas para el análisis de propiedades físicas como son el área de la superficie generada y el volumen contenido en su interior.

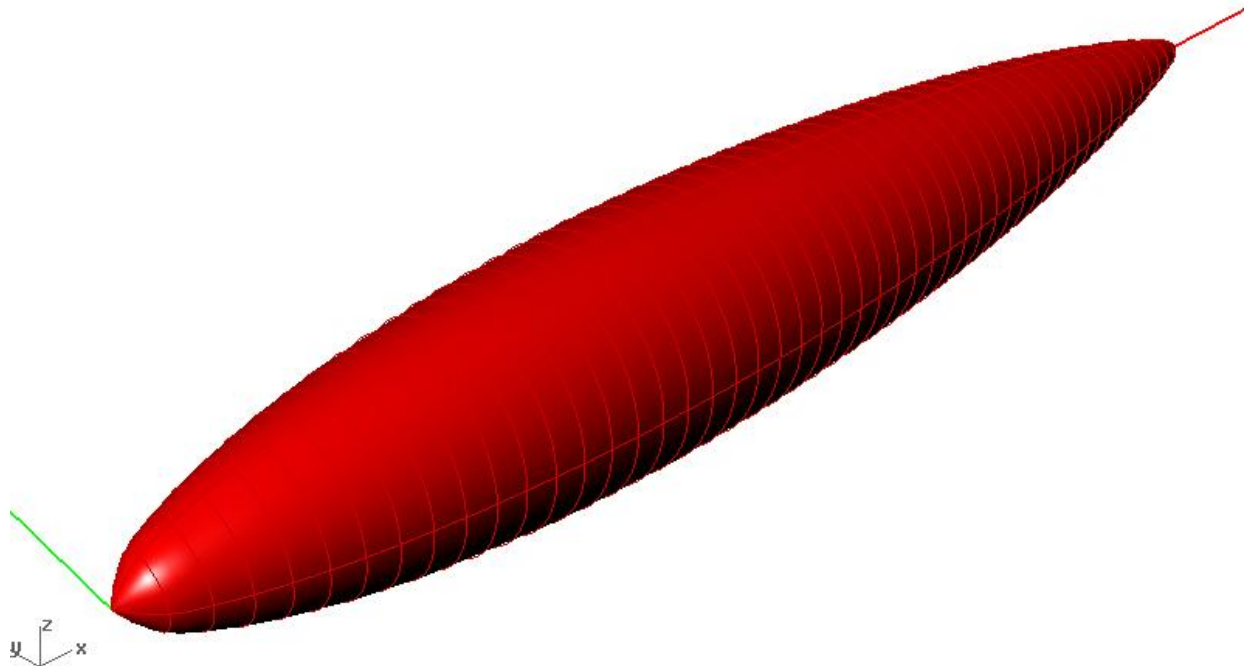


Figura 2.12. Cuerpo de revolución creado por el polinomio generatriz de sexto grado. Longitud máxima 2,40 m.
Diámetro máximo 0,40 m.

En las imágenes que se muestran a continuación, figuras 2.13 y 2.14, se puede comprobar que ni el casco resistente ni las sondas tocan el casco hidrodinámico en ningún punto de su superficie por lo que el carenado generado se ajusta perfectamente al conjunto de casco resistente y sondas.

En la figura 2.16 se amplían las imágenes de las zonas más conflictivas por su aproximación al casco hidrodinámico. En la vista de planta se aprecia fácilmente que la zona de mayor aproximación está en los extremos de las sondas con el casco hidrodinámico.

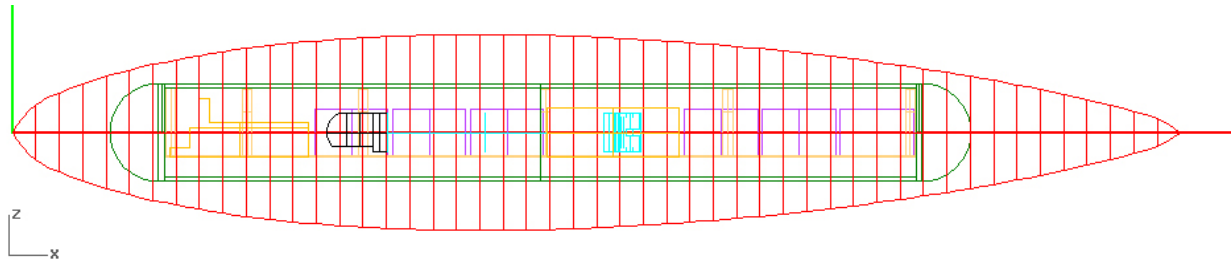


Figura 2.13. Vista de perfil en alámbrico del montaje del vehículo con el modelo Albacore puro.

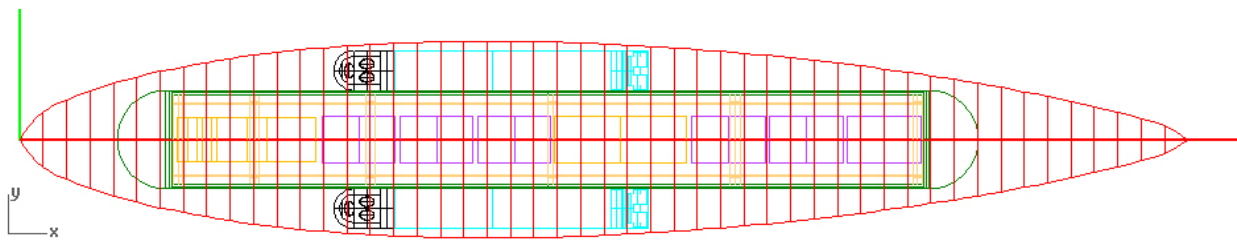


Figura 2.14. Vista superior en alámbrico del montaje del vehículo con el modelo Albacore puro.

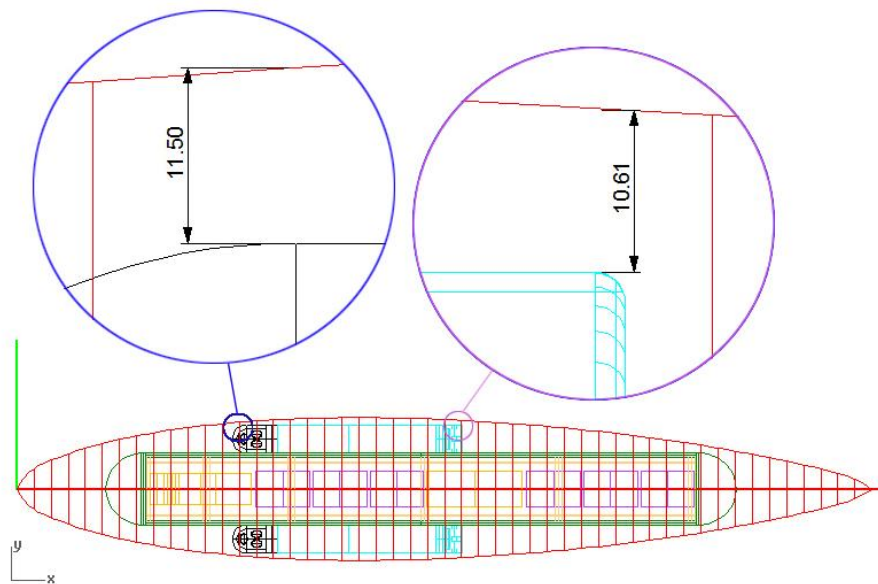


Figura 2.15. Ampliación de las zonas de posible interferencia entre el casco hidrodinámico y las sondas.

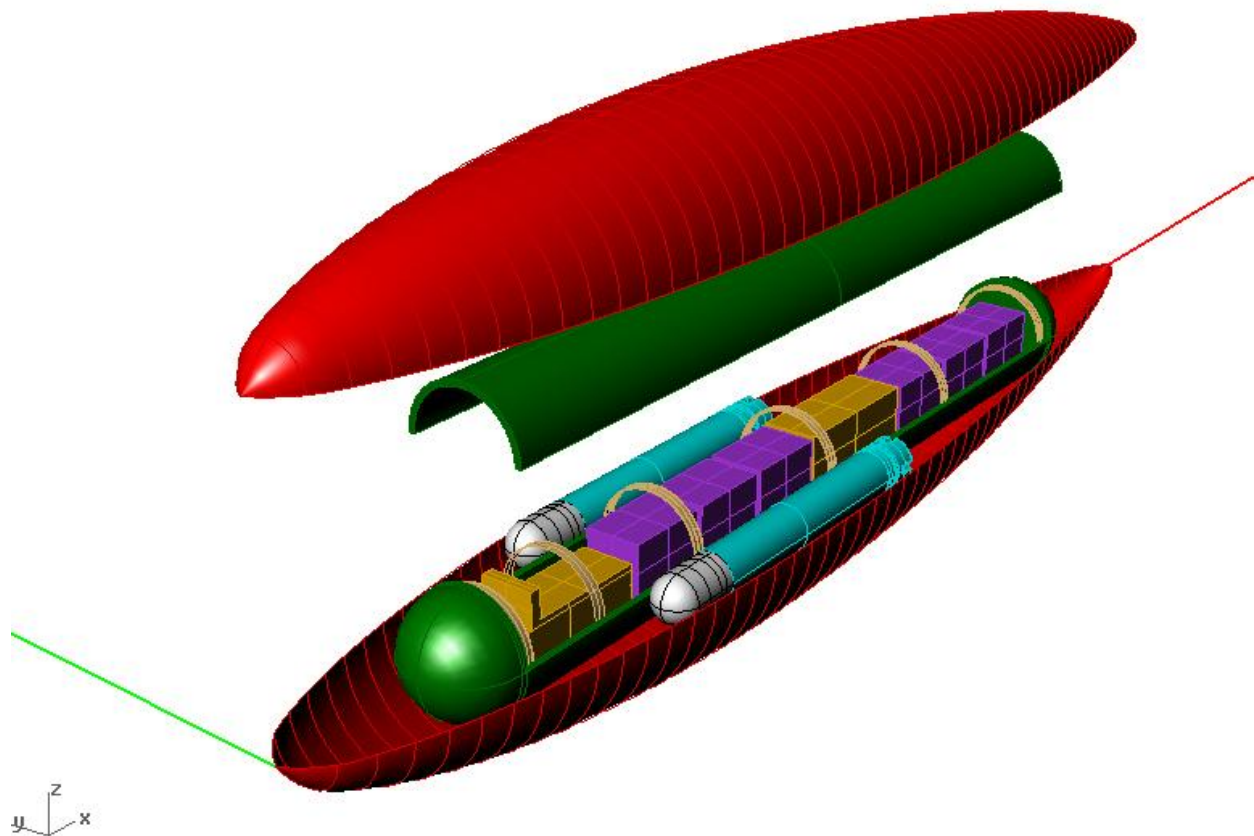
Gracias a las herramientas de análisis de propiedades físicas que posee el programa Rhinoceros, se puede calcular fácilmente el área de la superficie del cuerpo de revolución así como el volumen que envuelve y de esta manera se puede comprobar que el coeficiente

prismático es igual a 0,6, ya que podemos ver también el volumen del cilindro que contiene a este cuerpo de revolución y calcular así el coeficiente prismático.

Superficie mojada (m ²)	Volumen de carena (m ³)	Volumen del cilindro (m ³)	Coficiente prismático
2,2275	0,1809	0,3015	0,5999

El primer modelo generado denominado Albacore Puro, por respetar completamente las formas teóricas sin agregar ninguna sección cilíndrica intermedia, queda listo para el análisis de resistencia que se realiza en los siguientes capítulos, por métodos empíricos utilizados en carenas convencionales en el capítulo 3 seguido del análisis computacional por medio del programa *ANSYS FLUENT 6.3* y el pre-procesador *GAMBIT 2.4* en el capítulo 4.

A continuación se muestra una representación de cómo se podría disponer el casco resistente y dos sondas en el interior del casco hidrodinámico, aunque como se comentó en el primer capítulo estos modelos se podrán adaptar a diferentes configuraciones.



2.16. Representación tridimensional del modelo Albacore Puro.

2.4. MODELO ALBACORE MODIFICADO

Este modelo se basa en el mismo polinomio generatriz de sexto grado de las formas Albacore puras, pero en este caso en vez de crear un cuerpo de revolución de sección circular se propone un cuerpo creado a través de la revolución del polinomio a través de una elipse, ya que de este modo se puede achatar la forma del modelo Albacore Puro hasta obtener un modelo de sección elíptica, reduciendo sensiblemente la resistencia al avance por disminuir tanto la superficie mojada como la superficie frontal del vehículo.

Con la intención de que los dos modelos sean lo más geoméricamente semejantes posible, se han conservado los parámetros de entrada para ambos, es decir, la relación longitud/diámetro L/D , la posición longitudinal del diámetro máximo m y los radios de curvatura r_0 y r_1 , se han mantenido iguales para ambos modelos. El coeficiente prismático C_p no se puede mantener igual puesto que hay una clara reducción de volumen en el modelo Albacore Modificado; otro parámetro añadido es el diámetro menor de la sección elíptica d , pero no influye directamente en la construcción del polinomio generatriz ya que es el diámetro mayor D el utilizado, que es el mismo para ambos modelos por lo que también el polinomio generatriz quedará igual. Las dimensiones del modelo Albacore modificado se indican en el siguiente cuadro:

	R_0	R_1	C_p	m	L (m)	D (m)	d (m)
ALBACORE MODIFICADO	0,50	0,10	0,60	0,40	2,40	0,40	0,16

Para la construcción del nuevo modelo se va a seguir el mismo procedimiento que en el apartado anterior. Primero se calculan los coeficientes $\alpha_0, \beta_0, \beta_1, \gamma, \delta_0, \delta_1$ y δ_2 , que sólo dependen de la posición longitudinal del diámetro máximo m , por lo que, lógicamente, son iguales y generan los mismos polinomios básicos de sexto grado que en el modelo anterior:

	α_0	α_1	β_0	β_1	γ	δ_0	δ_1	δ_2
ALBACORE MODIFICADO	6,250	-13,672	9,375	-12,153	164,063	-5,425	56,062	-79,120

$$R_0(x) = -13,672 x^6 + 44,532 x^5 - 55,235 x^4 + 32,563 x^3 - 9,188 x^2 + x$$

$$R_1(x) = -12,153 x^6 + 31,250 x^5 - 28,542 x^4 + 10,945 x^3 - 1,500 x^2$$

$$P(x) = 164,063 x^6 - 459,376 x^5 + 452,813 x^4 - 183,750 x^3 + 26,250 x^2$$

$$Q(x) = -79,120 x^6 + 214,302 x^5 - 196,669 x^4 + 66,912 x^3 - 5,425 x^2$$

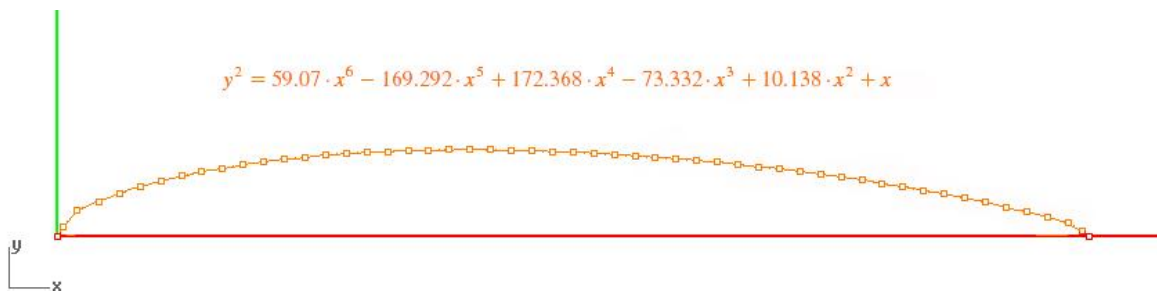
Como no podría ser de otra manera, el polinomio generatriz de sexto grado queda:

$$y^2 = R_0(x) + 0,2 R_1(x) + 0,6 P(x) + Q(x)$$

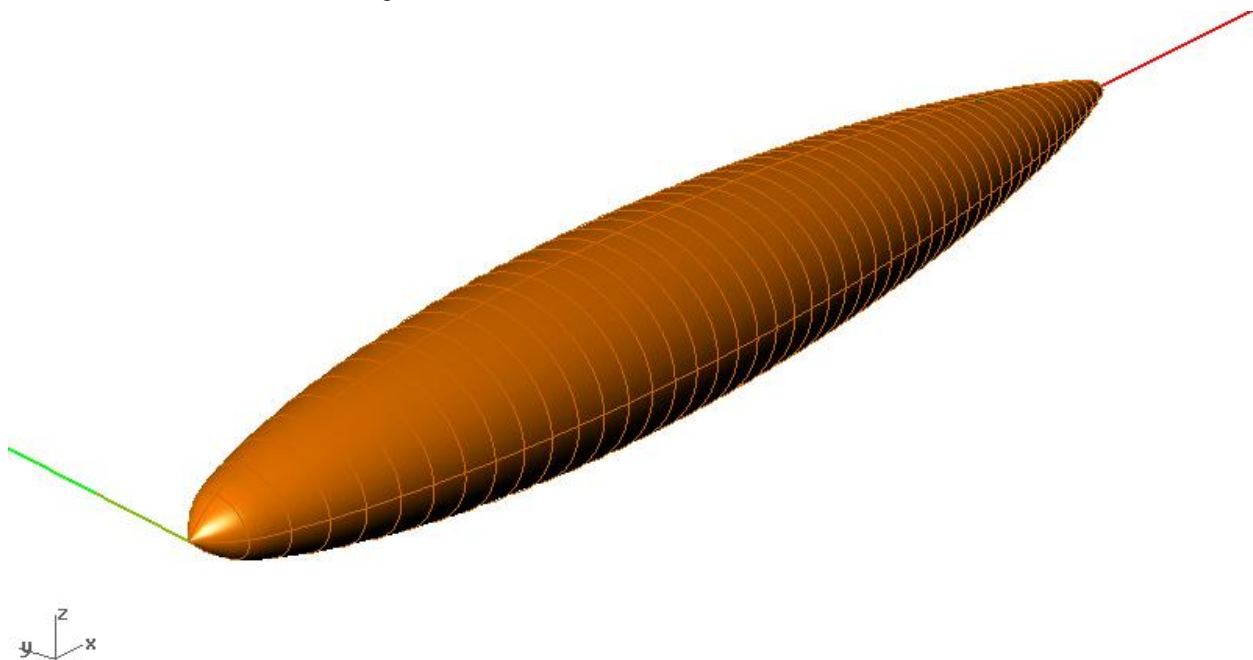
$$y^2 = 59,07 x^6 - 169,292 x^5 + 172,368 x^4 - 73,332 x^3 + 10,138 x^2 + x$$

$$y^2 = 0,0125 X^6 - 0,085 X^5 + 0,2078 X^4 - 0,2122 X^3 + 0,0704 X^2 + 0,0167 X$$

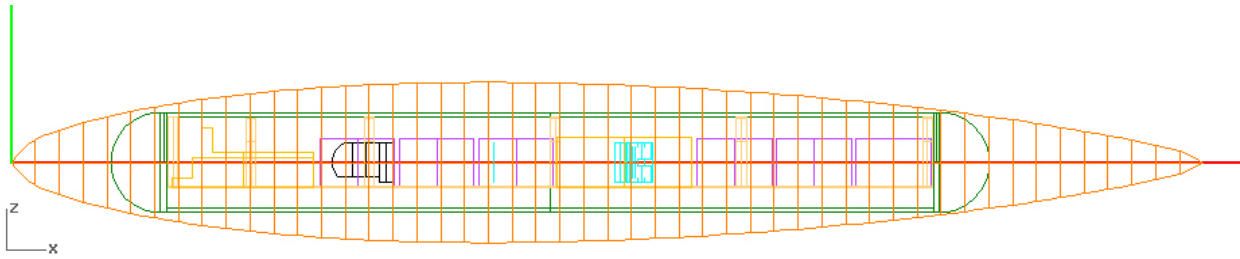
En las figuras 2.17, 2.18, 2.19 y 2.20 se muestra de nuevo el procedimiento de creación del volumen por medio de la revolución del polinomio obtenido, pero esta vez a través de una elipse, de manera que el volumen generado y su superficie sean menores que en el modelo anterior.



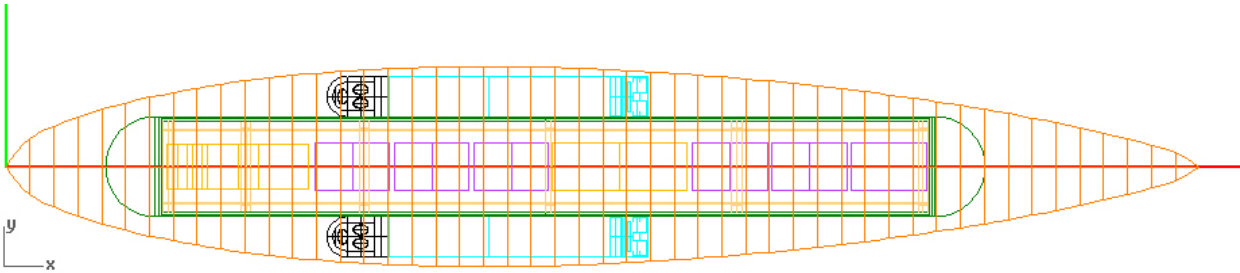
2.17. Polinomio generatriz dimensionalizado del modelo Albacore Modificado.



2.18. Cuerpo de revolución creado por el polinomio generatriz modificado. Longitud máxima 2,40 m. Diámetro mayor 0,40 m. Diámetro menor 0,16 m.



2.19. Vista de perfil en alámbrico del montaje del vehículo con el modelo Albacore modificado.



2.20. Vista superior en alámbrico del montaje del vehículo con el modelo Albacore modificado.

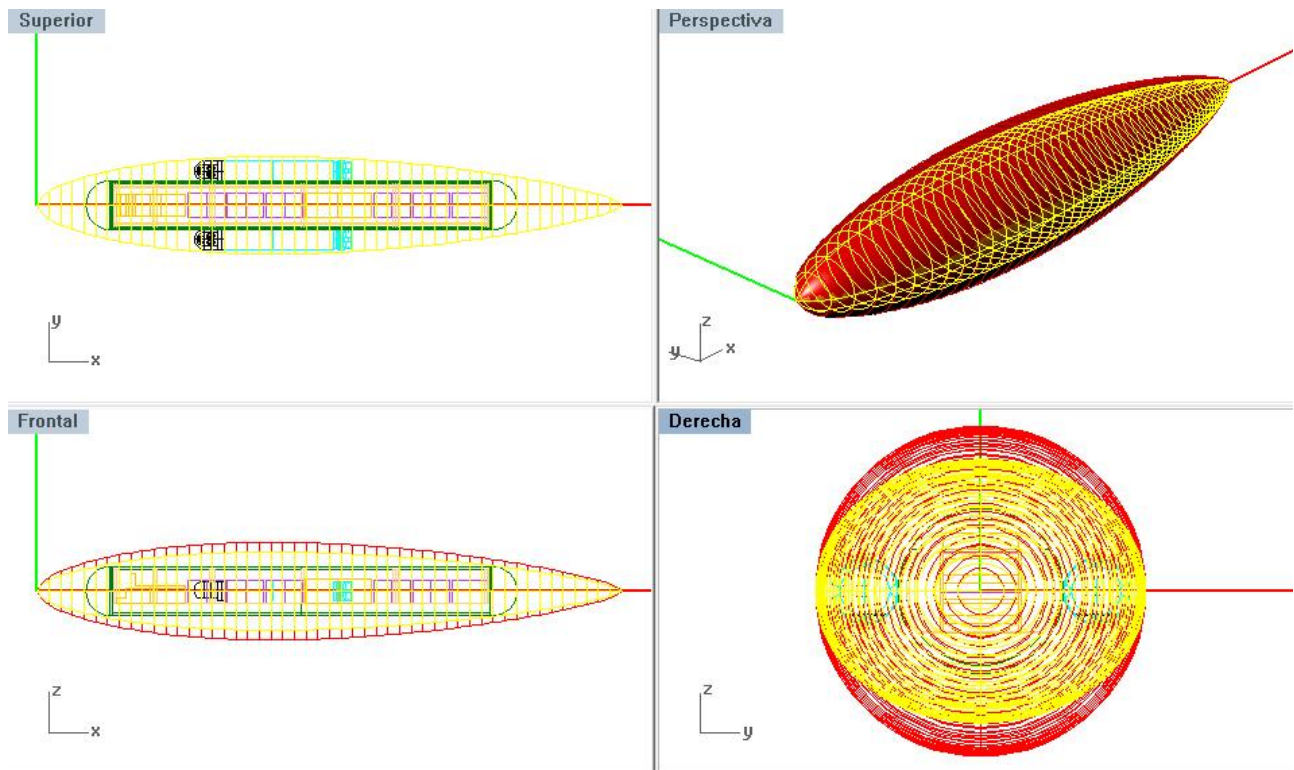
Haciendo uso nuevamente de las herramientas de análisis de propiedades físicas que posee Rhinoceros, se procede a calcular el área de la superficie del cuerpo de revolución, que será la superficie mojada de la carena, así como el volumen generado, que será el volumen de carena. Se puede comprobar que al disminuir el volumen de carena, pero no variar el volumen del cilindro que lo envuelve, el coeficiente prismático también se reduce, lo que supondrá un aumento en la resistencia residual o de presión.

Superficie mojada (m ²)	Volumen de carena (m ³)	Volumen del cilindro (m ³)	Coficiente prismático
2,0062	0,1447	0,3015	0,4799

En el cuadro que se muestra a continuación se comparan los resultados obtenidos de los dos modelos construidos y se calculan los porcentajes de la diferencia entre sus respectivas superficies mojadas y volúmenes de carena así como de sus coeficientes prismáticos.

	Superficie mojada (m ²)	Volumen de carena (m ³)	Coficiente prismático
ALBACORE PURO	2,2275	0,1809	0,5999
ALBACORE MODIFICADO	2,0062	0,1447	0,4799
DIFERENCIA	9,94%	19,96%	19,99%

Como se observa en el cuadro anterior, el coeficiente prismático del modelo modificado se aleja bastante del valor óptimo propuesto por los estudios de la Serie 58 $C_p = 0,60$, como es el del modelo Albacore puro, que es el valor que genera una menor componente de la resistencia por presión o de formas, pero como se verá en los siguientes capítulos sobre el análisis de resistencia, la reducción del volumen de carena, de la superficie mojada y de la superficie frontal que conlleva esta modificación, produce una reducción tal en la componente de la resistencia de origen viscoso que contrarresta sensiblemente con el aumento de resistencia residual obtenido por la modificación del coeficiente prismático, por lo que el modelo modificado generará menos resistencia total. En la figura 2.21 se comparan las formas de ambos modelos.



2.21. Comparación de las cuatro vistas de los dos modelos superpuestos en 3D.

CAPÍTULO 3. RESISTENCIA: CÁLCULO ANALÍTICO



Swan & Raven modelos de ensayo en canal de 1867.

En este capítulo se calcula de manera empírica la resistencia al avance producida por los modelos propuestos para la construcción del casco hidrodinámico del vehículo submarino.

3.1. MÉTODOS EXPERIMENTALES

Parece que la humanidad no se preocupó excesivamente por la resistencia que un buque opone a su marcha hasta finales del siglo XIX. Se han realizado estudios comparando las carabelas de Colón y los Clipper que navegaban hacia 1860, llegando a la conclusión de que no había grandes diferencias en cuanto a la resistencia al avance se refiere. No es de extrañar por tanto que hasta 1775 no se hiciera el primer estudio experimental serio para calcular la resistencia al avance de cuerpos flotantes. Este estudio fue realizado por Bossut, D'Alambert y el marqués de Condoret, construyendo para ello un pequeño canal de 100 pies de largo, 50 de ancho y 7 de profundidad. Las principales conclusiones que obtuvieron en dicho estudio fueron que la resistencia aumentaba cuando disminuía el área relativa del canal, y que la influencia de la viscosidad del agua era muy pequeña sobre todo a velocidades elevadas.

Veinte años después, entre 1796 y 1798, Mark Beaufoy efectuó una serie de experimentos para determinar la resistencia producida por la fricción del agua a lo largo de superficies planas, llegando a la conclusión de que la resistencia era sensiblemente proporcional al área de la superficie y a una potencia de la velocidad comprendida entre 1,60 y 1,90. A pesar de estos estudios, durante muchos años se supuso que la resistencia total de un buque era proporcional a la superficie mojada y a la velocidad al cuadrado, utilizándose varios métodos propuestos por diversos investigadores para obtener valores numéricos, destacando entre la distintas formulaciones usadas, la de Scott Russel, principal opositor a la construcción del canal de Torquay (Gran Bretaña), por apoyar la teoría de que era imposible predecir la resistencia real de un buque a partir de ensayos con modelos. Mientras tanto Ferdinand Reech enunciaba la ley de semejanzas de las fuerzas debidas a la gravedad y William Froude anunciaba su conocido número, utilizando de una manera práctica los resultados de Reech, pues llegó a la conclusión de que la correlación modelo-buque solamente podía obtenerse dividiendo la resistencia en dos componentes, siendo una de ellas la resistencia de fricción.

Concluida ya la construcción del canal de Torquay en 1872, Froude realizó una serie de ensayos con placas planas, de poco grosor (4,76 x 482,6 mm), y distintas longitudes (entre 0,61 y 15,24 m) y diferentes acabados, rugosidades, aplicando luego los resultados obtenidos a la carena para calcular su resistencia de fricción. Por esta aproximación fue muy criticado su método, ya que no se tendrían iguales resultados para un objeto tridimensional que para una superficie plana, pero aun con todo publicó los resultados obtenidos con sus ensayos hechos en 1874, de donde dedujo la fórmula empírica para calcular la resistencia de fricción:

$$R_f = f S_m U^n$$

En esta fórmula el coeficiente f y el exponente n varían con el tipo y longitud de la superficie de la siguiente manera: 1) el coeficiente f disminuye cuando aumenta ella longitud de la placa excepto para placas muy cortas; 2) el exponente n es menor que dos y disminuye cuando aumenta la longitud, menos para superficies rugosas que es constante e igual a 2. Es superior a

dos para placas cortas y lisas; y 3) el grado de rugosidad de la superficie tiene una gran influencia sobre la magnitud de f , aumentado cuando lo hace la rugosidad.

En la conferencia internacional de canales que tuvo lugar en París en 1935, se determinó que los coeficientes a aplicar en la fórmula de Froude debían ser los resultantes de utilizar la expresión:

$$f = 0,1392 + \frac{0,258}{2,68 + L}$$

Al mismo tiempo se adoptó como valor para el exponente n de la velocidad el de 1,825, con lo que la expresión para el cálculo de la resistencia de fricción, utilizada aún en algunos canales, quedaba como sigue:

$$R_f = f S_m U^{1,825}$$

La principal objeción hecha a la fórmula de Froude radica en el hecho de que el coeficiente de resistencia de fricción específica obtenido en ella no es función del número de Reynolds. A pesar de esto la contribución al cálculo de resistencia por parte de Froude fue valiosísima, siendo prueba de ello que sus coeficientes se aplicasen por casi todo el mundo durante décadas.

Una vez se establecieron las leyes de semejanza y la relación del número de Reynolds con la resistencia de fricción, hubo tendencia general a representar ésta en función de Rn . El primero a tal efecto fue Baker en 1915, representando la resistencia de fricción mediante un coeficiente en función de Rn . Después fue el doctor Gebers con sus experiencias en el canal de Viena, que suponía eran erróneos por incluir cierta cantidad de resistencia de componente residual. Posteriormente Telfer recomendó como fórmula para el cálculo una del tipo,

$$C_f = a + b(R_n)^{-\frac{1}{8}}$$

en la que los valores de las constantes a y b deberían obtenerse a partir de experimentos. Debido a esta sugerencia, durante algún tiempo se dudó sobre si la fórmula más correcta era del tipo de la de Gebers, es decir,

$$C_f = c(R_n)^m$$

o de la de Telfer. En la primera experimentación se determinaría la constante c y el exponente m al que está elevado el número de Reynolds, mientras que en la segunda se fija el exponente y se determinan las dos constantes a y b . En cuanto al tipo de fórmula, Schoenherr justificaba la presencia del término constante para incluir los efectos de la rugosidad de la superficie.

$$\frac{0,242}{\sqrt{C_f}} = \text{Log}(R_n C_f)$$

No fue hasta 1948 en la *International Towing Tank Conference* en Londres donde se acometiese decididamente por solventar la cuestión del coeficiente de fricción. En esta conferencia se recomendó que se investigara el problema de la resistencia de fricción en general y en particular se hiciera lo posible para definir la línea de fricción tanto para el buque como para el modelo. Hasta entonces en Europa se utilizaba por casi todos los canales la fórmula de Froude mientras que en América se utilizaba la de Schoenherr. En la reunión de 1954 se tomó el acuerdo de hacer una recomendación definitiva. Finalmente en la ITTC de 1957 en Madrid, después de muchas discusiones, el comité decidió recomendar como fórmula básica de fricción para que fuera utilizada por todos los canales:

$$C_f = \frac{0,075}{(\text{Log}Rn - 2)^2}$$

En su adopción influyó el hecho de tener su línea de fricción, sobre la gráfica del coeficiente de fricción en función del número de Reynolds, mayor pendiente que la de Schoenherr en la zona de número de Reynolds bajos y se ajusta bastante a ella para valores altos. En la siguiente figura se representan varias de las fórmulas propuestas hasta entonces.

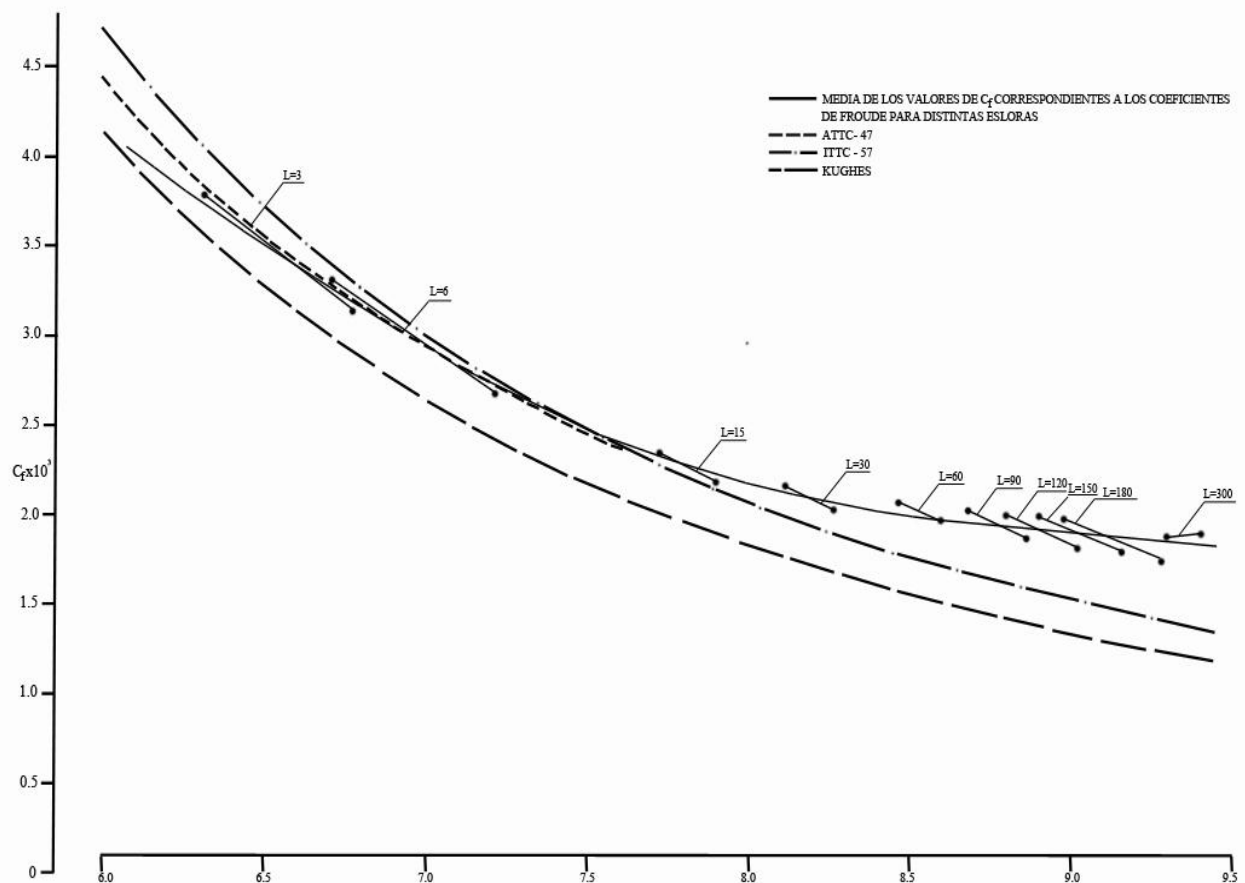


Figura 3.1. Líneas básicas de fricción normalmente utilizadas.

3.2. RESISTENCIA DE FRICCIÓN Y RESISTENCIA RESIDUAL

La resistencia al avance de un cuerpo en inmersión profunda en un fluido ideal es nula (paradoja d'Alambert). Sin embargo en un fluido real se desarrolla una capa límite alrededor del cuerpo que produce en cuerpos de revolución dos efectos principalmente, ambos de origen viscoso: fricción debido al rozamiento entre la superficie del cuerpo y el fluido, y alteración de la distribución del campo de presiones a su alrededor.

El primero de estos efectos es el que genera la componente llamada *resistencia de fricción* o viscosa; el segundo da lugar a la denominada *resistencia residual, de formas o de presión*, dependiendo de la bibliografía empleada.

Como se comenta en el apartado anterior la resistencia de fricción se define por un coeficiente, llamado coeficiente de fricción, que se calcula como el cociente de la fuerza de fricción y la superficie mojada del cuerpo sumergido, afectado por el factor de la presión dinámica. Este coeficiente es función del número de Reynolds y existen varias fórmulas propuestas que nos dan el valor del coeficiente de fricción basadas en una prolongada experimentación en canales con placas planas:

Fórmula de Froude:

$$R_f = \delta f_t S_m U^{1,825}$$

$$f_t = f_{15} [1 + 0,0043(15 - T)]$$

$$f_{15} = 0,1392 + \frac{0,258}{2,68 + L}$$

Fórmula de Hughes:

$$C_f = \frac{0,066}{(\text{Log} Rn - 2,03)^2}$$

Fórmula de Schoenherr:

$$\frac{0,242}{\sqrt{C_f}} = \text{Log}(Rn C_f)$$

Fórmula del ITTC'57:

$$C_f = \frac{0,075}{(\text{Log} Rn - 2)^2}$$

Se ha demostrado que pasar de una placa lisa al modelo en escala real, que tiene una mayor rugosidad y además es curvilíneo, el coeficiente de fricción obtenido se queda corto en los cálculos de resistencia por lo que hay que corregirlo mediante la adición de un sumando, simbolizado como ΔC_f y que en un caso corriente es igual a 0,0004 pero que en algunas ocasiones puede llegar a ser mucho mayor, del orden de 0,0005-0,0010. Este ΔC_f se puede

calcular según la siguiente fórmula como función de la rugosidad de la superficie del casco hidrodinámico y su eslora en el caso de tener los valores de la rugosidad:

$$\Delta C_f = \left[\left(105 \left(\frac{K_s}{L} \right)^{\frac{1}{3}} - 0,64 \right) 10^{-3} \right]$$

Por otro lado, la resistencia residual es la porción de resistencia que queda después de haber descontado la componente de fricción, que es fácilmente calculable y presenta poco error. La resistencia residual está relacionada principalmente con las formas del casco y con la variación de presión dinámica que actúa sobre el cuerpo en inmersión, que se produce fundamentalmente en las zonas del donde se originan depresiones como consecuencia de la disminución del diámetro. Al igual que ocurre con la componente de fricción, la componente residual se define por medio de un coeficiente llamado *coeficiente de resistencia residual*, aunque es también conocido como *coeficiente de presión* o *de formas*, y se contempla como un aditivo o corrección del coeficiente de fricción y, aunque fundamentalmente es función de las medidas transversales del cuerpo, se asocia a la superficie mojada.

$$R_r = C_r q S_m = k (C_f + \Delta C_f) 0,5 \delta U^2 S_m$$

El coeficiente k , denominado *factor de formas*, ha sido deducido de numerosas pruebas de canal utilizando una serie de cuerpos de revolución muy parecidos entre sí en sus características dimensionales. A continuación se presentan algunas fórmulas obtenidas mediante ensayos en canal, diagramas y valores estadísticos referidas al cálculo de fricción por la conferencia del ITTC-57:

Fórmula de Holtrop:

$$k = 0,07 + 0,487 \left(\frac{B}{L} \right)^{1,07} \left(\frac{T}{L} \right)^{0,46} \left(\frac{L_R}{L} \right)^{0,12} \left(\frac{L^3}{\Delta} \right)^{0,36} (1 - C_p)^{-0,60}$$

$$\text{siendo, } L_R = L \left[1 - C_p + 0,006 \left(\frac{C_p X_B}{4 C_p - 1} \right) \right]$$

Fórmula de Tagano:

$$k = -0,051 + 8,91 \frac{C_m}{\left(\frac{L}{B} \sqrt{B} \right) \frac{C_B}{T} \frac{B}{L_p}}$$

Fórmula de Granville:

$$k = 0,036 + 1,7 \left(B \frac{C_B}{L} \right)^2$$

Fórmula de Prohaska:

$$k = -0,65 + 0,077 \left(\frac{B}{T}\right) - 0,024 \left(\frac{B}{T}\right)^2 + 9,87C_B \left(\frac{B}{L}\right) - 24,8C_B \left(\frac{B}{L}\right)^2$$

Fórmula de ITTC-57:

$$k = 18,7 \left(\frac{B C_B}{L}\right)^2$$

Una vez obtenidas la resistencia de fricción y el coeficiente de factor de formas para la resistencia residual, se puede calcular la resistencia al avance del modelo, sin apéndices y en inmersión profunda, como la suma de las dos componentes de origen viscoso:

$$R_{Tcasco} = R_f + R_r = 0,5 \delta U^2 [(1 + k)(C_f + \Delta C_f)] S_m$$

Debido a la dificultad existente a la hora de encontrar referencias por ser este estudio de ámbito normalmente militar, y a que las formulaciones anteriormente citadas hacen referencia a estudios en modelos de carenas de buques, el valor de k para el cálculo del factor de formas se ha obtenido de $k = 1,45(D/L)$, formulación obtenida de un caso práctico de estudio de resistencia al avance en un submarino militar cedido por el profesor Pedro Sosa.

Aplicando la fórmula para la resistencia total y el factor de formas citado se obtienen los resultados de resistencia al avance a carena desnuda, esto es, sin apéndices. Los valores para los modelos puro y modificado se muestran en el siguiente cuadro.

	Superficie mojada (m ²)	Factor de formas	Coficiente de Fricción	Resistencia total (N)
ALBACORE PURO	2,2276	1,242	0,00382	33,924
ALBACORE MODIFICADO	2,0062	1,097	0,00382	26,985

3.3. RESISTENCIA DE LOS APÉNDICES

Los apéndices del casco, en este caso exclusivamente timones, por estar insertados en el casco de manera muy directa y sencilla pueden ser analizados de forma independiente, es decir, pueden ser separados del casco y analizar su resistencia al avance aparte de la del casco, de este modo se descompone la resistencia total en varios sumandos, correspondientes al casco desnudo y a cada uno de los apéndices.

A la resistencia total calculada en el apartado anterior hay que añadirle la generada por los timones. Para ello se realiza el mismo procedimiento que para el casco desnudo, utilizando la mismas fórmula, pero calculando por separado sus correspondientes componente de fricción C_f , incremento de rugosidad ΔC_f y coeficiente k de formas, en función del número de Reynolds de cada timón.

Para el cálculo del coeficiente de fricción se utilizan las fórmulas propuestas en el apartado anterior,

$$R_{T\text{apendices}} = R_f + R_r = 0,5 \delta U^2 [(1 + k)(C_f + \Delta C_f)] S_m$$

pero para el cálculo del factor de formas k se propone la formulación dada por Hoerner (1965), correspondiente a la resistencia de un perfil hidrodinámico bidimensional:

$$k = 2 \left(\frac{t}{c}\right) + 60 \left(\frac{t}{c}\right)^4$$

A este valor hay que añadirle el correspondiente a la resistencia por interferencia con el casco más la resistencia de la superficie de perfil, con lo cual la fórmula completa para el factor de formas de un perfil hidrodinámico es:

$$k = 2 \left(\frac{t}{c}\right) + 60 \left(\frac{t}{c}\right)^4 + 60 \left(\frac{t}{c}\right)^4 = 2 \left(\frac{t}{c}\right) + 120 \left(\frac{t}{c}\right)^4$$

En el apartado para los anexos se muestra el proceso de diseño de unos timones para ambos modelos. Aplicando esta formulación para los valores para los timones propuestos se obtienen los valores de la resistencia para los apéndices de cada modelo.

	Factor de formas	Superficie mojada (m ²)	Resistencia total (N)
ALBACORE PURO	1,212	0,1166	3,616
ALBACORE MODIFICADO	1,212	0,0983	3,064

3.4. RESISTENCIA POR FORMACIÓN DE OLAS

Obtenido ya el valor de la resistencia al avance del casco y de los apéndices, sólo queda anotar que existe una tercera componente de la resistencia en el caso de que el submarino navegue a cota periscópica o superficial, la llamada *resistencia por formación de olas*, que es debida a la estela o formación de olas que se produce cuando el casco y la superficie están en contacto o muy próximos.

En este proyecto no se analiza la resistencia por formación de olas a cota superficial debido a que no será la situación de trabajo habitual del vehículo, pero sí se estudia esta componente en situación de proximidad entre el casco y la superficie. Para un cuerpo de revolución esta componente es función principalmente del número de Froude y de la proximidad del casco a la superficie. La formación de olas es muy sensible al valor del número de Froude, de forma que cuando se mantiene por debajo de 0,25, la formación de olas es muy pequeña, casi despreciable, pero cuando se aproxima a un valor de 0,5 es muy grande. Esta componente también depende sensiblemente de la inmersión relativa del casco, de modo que cuando la cota de inmersión es del orden de 5 veces el diámetro del casco, la resistencia por formación de las se anula.

En la figura siguiente, procedente del estudio de Hoerner, se dan algunos datos sobre este tipo de resistencia para diversas relaciones profundidad/eslora (h/L) denominado por Hoerner como *sumergencia*. La relación eslora/puntal (L/D) de los cuerpos estudiados es igual 8 y el coeficiente de resistencia C_D de la figura está referido al de la superficie frontal.

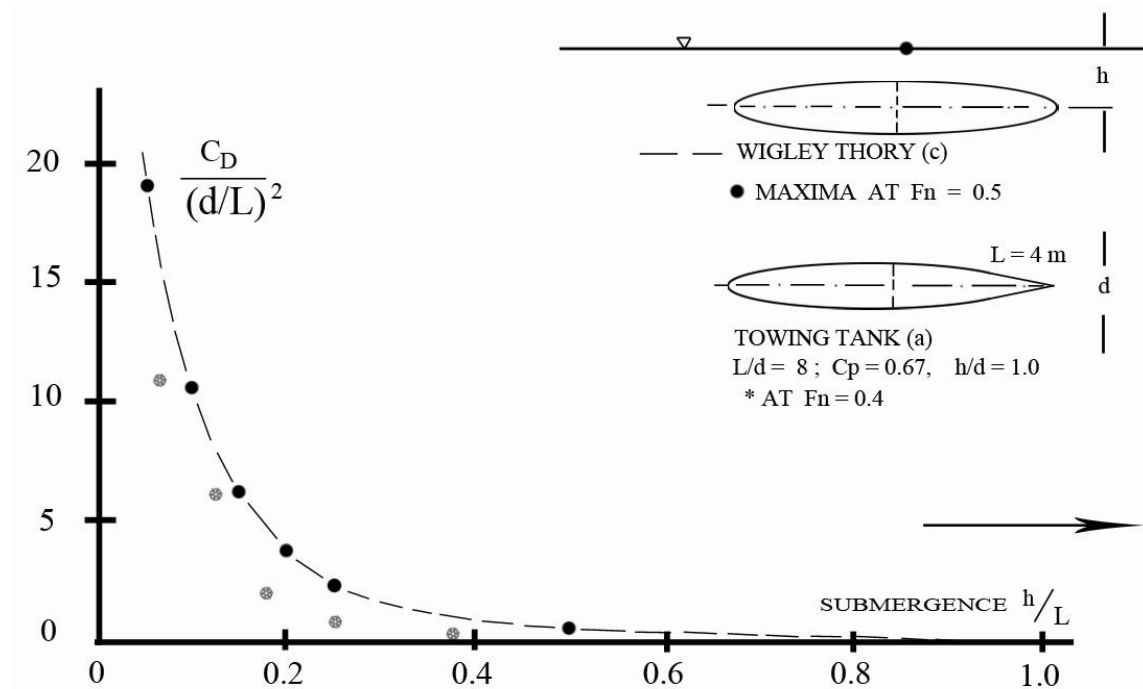


Figura 3.2. Estudio del coeficiente por formación de olas y de la sumergencia del número de Froude.

El croquis interior de la figura estudiada se asemeja mucho con el modelo propuesto en este proyecto, salvo por la eslora que es mayor. Consecuentemente la relación L/D es también superior pero nada significativo a efectos de la interferencia que produce la formación de olas.

De la siguiente gráfica, también de Hoerner, se deduce que para valores bajos del número de Froude (inferiores a 0,25) el coeficiente de resistencia por formación de olas se aproxima mucho al cero por lo que la resistencia por formación de olas se hace muy pequeña. Cosa que también ocurre para valores del parámetro adimensional de la sumergencia h/L , superiores a 0,3, independientemente del valor del número de Froude.

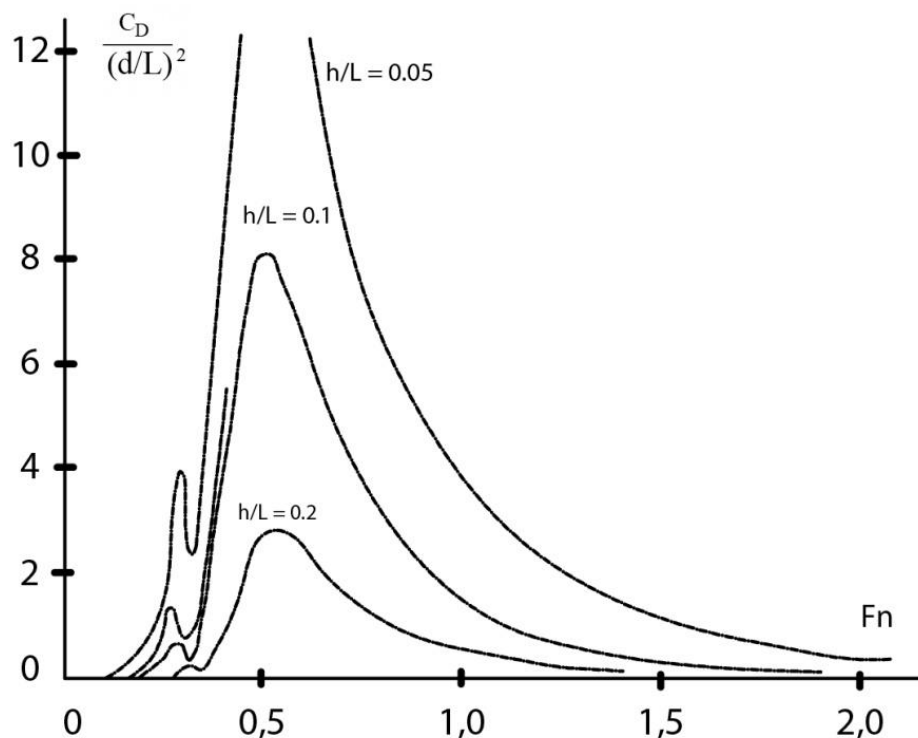


Figura 3.3. Coeficiente por formación de olas en función de la sumergencia y del número de Froude.

La velocidad de operación del vehículo diseñado en este proyecto será muy baja para que el equipo oceanográfico que alberga pueda trabajar correctamente. La velocidad máxima propuesta es de 2,5 m/s, por consiguiente el número de Froude ($L = 2,4$ m) es igual a 0,515, lo que hace que la componente por formación de olas del vehículo se sitúe la zona más conflictiva de la gráfica, no pudiendo despreciar esta componente de la resistencia sólo haciendo atención al rango de velocidades de operación, sino que se debe estudiar en función de la profundidad en la que opere el vehículo, es decir, del parámetro adimensional h/L .

Debido a que en la gráfica original de 1965 no hay curvas para valores del sumergimiento por debajo de 0,2. Para estudiar los modelos Albacore puro y modificado se ha procedido a construir otras gráficas para estimar el coeficiente de resistencia por formación de olas en

función del sumergimiento, para una velocidad de 2,5 m/s ($Fn = 0,515$), las cuales mostrarán a que profundidad se puede despreciar la componente por formación de olas.

MODELO ALBACORE PURO

h (m)	h/L	$C_w/(D/L)^2$	C_w	R_w (N)
0,5	0,2083	2,8	0.0777	31,3068
1,0	0,4166	2,3	0.0638	25,7163
2,0	0,8333	1,6	0.0444	17,8896
3,0	1,25	0,5	0,0138	5,5905
3,2	1,3333	0,3	0.0083	3,3543
3,4	1,4166	0,2	0.0055	2.2362
3,6	1,5	0	0	0

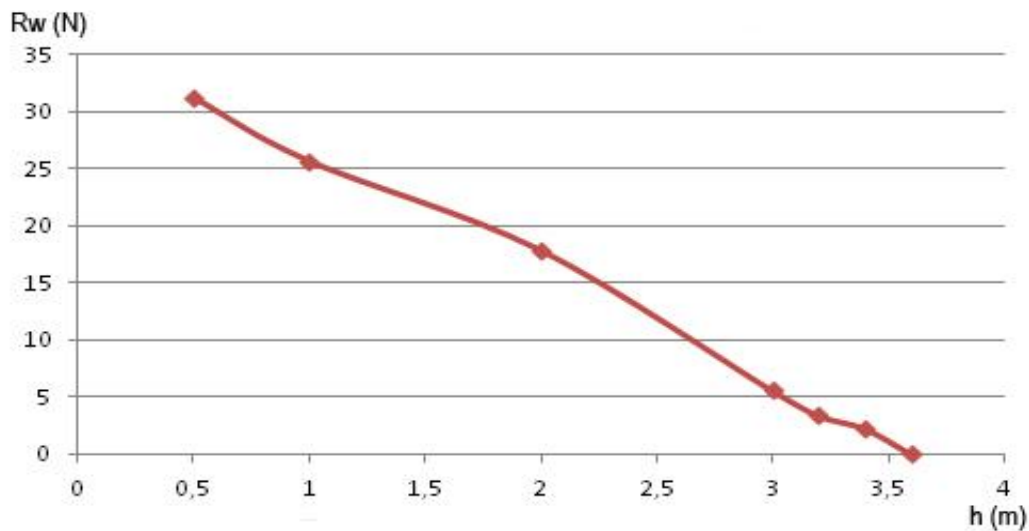


Figura 3.4. Resistencia por formación de olas en función de la inmersión del modelo puro.

De la gráfica y los resultados se observa que hasta los 3,6 metros de inmersión no se anula totalmente la resistencia por formación de olas para el Albacore puro. De la tabla también se observa que la reducción de esta componente es lineal, lo que es lógico ya que en el procedimiento seguido se optado por extrapolar los puntos de la gráfica original de Hoerner.

MODELO ALBACORE MODIFICADO

h (m)	h/L	Cw/(D/L) ²	Cw	Rw (N)
0,5	0,2083	2,8	0.0124	5,0091
1,0	0,4166	2,3	0.0102	4,1146
2,0	0,8333	1,6	0.0071	2,8624
3,0	1,25	0,5	0,0022	0,8945
3,2	1,3333	0,3	0,0013	0,5371
3,4	1,4166	0,2	0,0008	0,3581
3,6	1,5	0	0	0

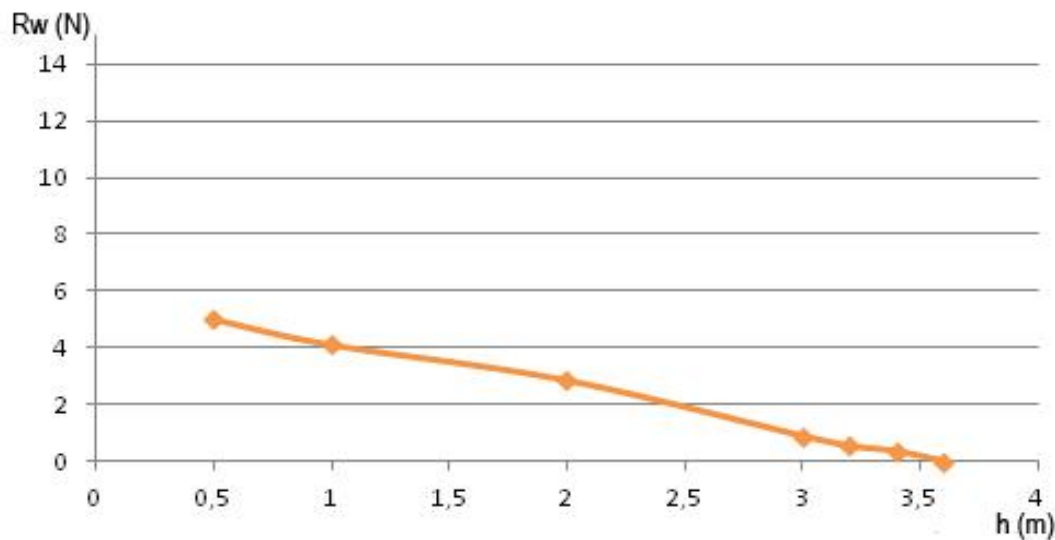
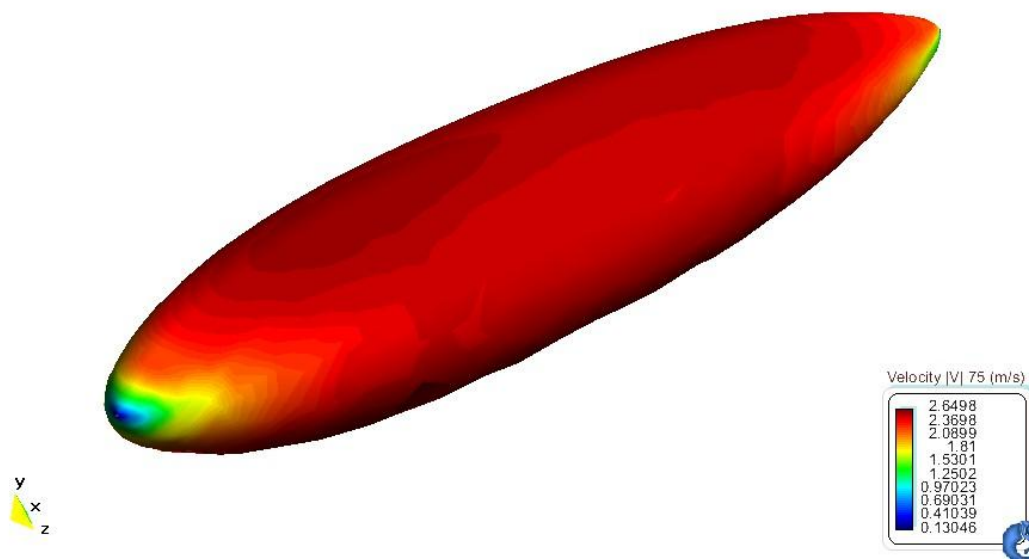


Figura 3.5. Resistencia por formación de olas en función de la inmersión del modelo modificado.

En el modelo modificado se observa que, aun siendo el diámetro menor de la elipse el utilizado para el cálculo del coeficiente de resistencia, éste se anula exactamente a la misma profundidad de inmersión que el modelo Albacore puro. Esto se debe a que en las gráficas realizadas por Hoerner, la profundidad se adimensionaliza sólo en función de la longitud de los modelos estudiados, por lo que las curvas de sumergencia del segundo gráfico no varían para los modelos Albacore puro y modificado, puesto que ambos tienen la misma longitud. Sin embargo se observa que para una misma profundidad la resistencia del modelo modificado es mucho menor que la del puro, como es lógico ya que, para el cálculo del coeficiente de resistencia por formación de olas, el diámetro utilizado es mucho menor.

CAPÍTULO 4. RESISTENCIA: CÁLCULO NUMÉRICO




Representación tridimensional del campo de velocidades sobre el modelo Albacore.

En este capítulo se analiza a través de una simulación numérica por medio de la dinámica de fluidos computacional y del software ANSYS la resistencia al avance de los modelos propuestos para la construcción del casco hidrodinámico del vehículo submarino.

4.1. SIMULACIÓN NUMÉRICA

La dinámica de fluidos computacional (CFD de sus siglas en inglés por Computational Fluids Dinamics) es una ciencia basada en la simulación numérica del movimiento de los fluidos mediante el empleo de software informático. Este tipo de software permite también la simulación de otros fenómenos asociados como pueden ser la transferencia de calor, reacciones químicas, arrastre de sólidos, etc.

Este tipo de programas permiten la utilización de los potentes procesadores de hoy en día para el cálculo detallado del movimiento fluido por medio de la resolución de las ecuaciones matemáticas que expresan las leyes por las que se rigen, las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones son las mismas para cualquier situación de flujo, la particularización a cada caso concreto viene definida por las condiciones de contorno y las condiciones iniciales. La resolución de las ecuaciones del movimiento fluido es tan compleja de resolver analíticamente que para casos complejos ha sido necesaria la utilización de potentes procesadores dando origen a la dinámica de fluidos computacional.



Navier-Stokes Equations

3 - dimensional - unsteady

Glenn
Research
Center

Coordinates: (x,y,z)	Time : t Pressure: p	Heat Flux: q
Velocity Components: (u,v,w)	Density: ρ Stress: τ	Reynolds Number: Re
	Total Energy: Et	Prandtl Number: Pr

Continuity: $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$

X - Momentum: $\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right]$

Y - Momentum: $\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right]$

Z - Momentum: $\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right]$

Energy: $\frac{\partial(E_T)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_T)}{\partial z} = -\frac{\partial(Up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} - \frac{1}{Re_r Pr_r} \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right]$

$$+ \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial}{\partial x} (u \tau_{xx} + v \tau_{xy} + w \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u \tau_{xy} + v \tau_{yy} + w \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u \tau_{xz} + v \tau_{yz} + w \tau_{zz}) \right]$$

Figura 4.1. Ecuaciones de Navier-Stokes.

Para resolver las ecuaciones el software transforma las ecuaciones diferenciales en ecuaciones algebraicas y las resuelve únicamente en un número finito de puntos en el espacio. Para esto, además de las ecuaciones hay que utilizar las condiciones iniciales y de contorno referentes a las variables y las referentes a la superficie sólida. En este proyecto, las condiciones referentes a las variables vienen definidas por la velocidad del vehículo y la presión hidrostática; y las condiciones de las superficies vienen definidas por la forma, expresada matemáticamente en el sistema de coordenadas.

4.2. ECUACIONES DE FLUJO

Las ecuaciones de Navier-Stokes se pueden deducir de la ley de las ecuaciones de conservación de masa y de conservación de movimiento aplicadas a un elemento de fluido. El sistema queda compuesto por ecuaciones en derivadas parciales que sólo en casos con una geometría y unas condiciones de contorno sencillas, condiciones de flujo laminar, pueden ser resueltas de forma analítica. Para poder resolver casos más complejos, flujos turbulentos, estas ecuaciones han de resolverse por medio de la dinámica de fluidos computacional, que son en la práctica los que más interesan a científicos e ingenieros.

Las ecuaciones de Navier-Stokes son una representación matemática adecuada de los flujos fluidos, incluso turbulentos. Sin embargo su resolución requiere de una discretización temporal y de la malla de cálculo tan detallada que en la práctica resulta inviable. En un artículo publicado por P. Moin y J. Kim (Simulación de la turbulencia mediante superordenadores, Investigación y Ciencia, marzo, 1997) se pone el siguiente ejemplo:

La resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes para el flujo alrededor de un avión requiere una malla de cálculo poco espaciada con el fin de discernir los torbellinos más pequeños. Por otra parte, la malla ha de ser lo bastante grande como para abarcar el avión entero y parte de su entorno. La disparidad de escalas de longitud en un flujo turbulento - relación entre los tamaños mayor y menor de los torbellinos- puede calcularse elevando a $3/4$ el número de Reynolds del flujo. Podemos emplear esta relación para estimar el número de puntos de malla exigidos en una simulación razonablemente precisa: debido a la existencia de tres dimensiones, el número es proporcional al cubo de esta relación de escalas de longitud. Por consiguiente, el número de puntos requerido para una simulación numérica será proporcional al número de Reynolds elevado a $9/4$. Con otras palabras, duplicar el número de Reynolds conduce a multiplicar por cinco, aproximadamente, el número de puntos en la malla requeridos para simular el flujo.

Consideremos un avión de transporte con un fuselaje de 50 metros y con alas de unos 5 metros de cuerda (distancia entre los bordes de ataque y de salida). Si la aeronave se encuentra en vuelo de crucero con velocidad de 250 metros por segundo y altitud de 10.000 metros, se necesitan unos 10.000 billones de puntos para simular, con una aproximación razonable, la turbulencia cerca de la superficie.

¿Qué exigencias de cálculo impone tal número de puntos? Una estimación grosera, basada en los actuales algoritmos y software, sugiere que incluso un superordenador capaz de efectuar un billón de operaciones en coma flotante por segundo ¡tardaría varios miles de años en calcular el flujo para un segundo de tiempo de vuelo! Y tal ordenador no existe todavía.

Por suerte no es necesario simular el flujo de esta manera para obtener información útil de la dinámica de fluidos computacional. En la práctica no suelen calcularse el movimiento de

todos los torbellinos, sólo de los más grandes, y se utilizan modelos de turbulencia para estimar los efectos de los torbellinos más pequeños sobre los grandes, dando lugar a un campo fluido promediado y simulado más uniforme que el real, reduciendo enormemente el número de puntos de malla y la discretización temporal para realizar la simulación numérica.

Los modelos de turbulencia varían mucho en complejidad, desde simples coeficientes de viscosidad ajustados hasta sistemas completos de ecuaciones adicionales. Es por esta razón que la validez de una simulación numérica mediante dinámica de fluidos computacional depende fundamentalmente del modelo de turbulencia empleado.

4.3. MÉTODO DE LOS VOLÚMENES FINITOS

El método de volúmenes finitos es el empleado por Fluent para la discretización numérica del caso, que es el proceso de transformación de las ecuaciones diferenciales en su análogo numérico. Existen varios métodos de discretización numérica, dependiendo de los principios en que se basen, las más usadas son el método de diferencias finitas, el de volúmenes finitos y el de elementos finitos.

El método de los volúmenes finitos se basa en la creación de particiones del espacio, volúmenes finitos. En la siguiente figura se muestra un volumen finito, o celda, donde el centro del volumen (P) es el punto de referencia en que se quiere obtener la discretización de las ecuaciones del movimiento fluido.

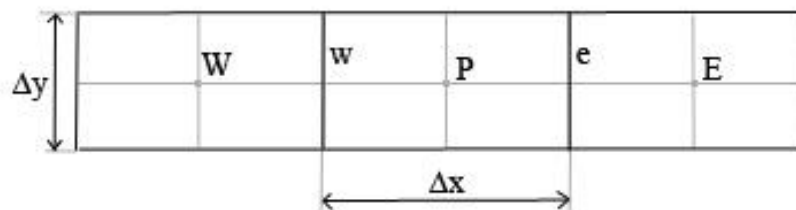


Figura 4.1. Ecuaciones de Navier-Stokes.

Si se denominan W y E a los centros de las celdas contiguas, y w y e a las caras que las separan de la celda central, la discretización de la derivada segunda $\delta^2 U / \delta x^2$ se hace a partir de las derivadas primeras en las caras que limitan la celda:

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right)_P = \frac{\left(\frac{\partial U}{\partial x_e} - \frac{\partial U}{\partial x_w}\right)}{x_e - x_w}$$

Y estas derivadas se calculan a partir de los valores de la variable U en los centros de las celdas vecinas:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_e = \frac{U_E - U_P}{x_E - x_P}$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)_w = \frac{U_P - U_W}{x_P - x_W}$$

De esta manera se pueden hallar los análogos numéricos de las ecuaciones diferenciales para en una malla para cada volumen finito y después resolver el sistema de ecuaciones algebraicas resultante matricialmente. Este sistema se puede resolver directamente o, en el caso de matrices grandes, por iteración.

4.4. MODELOS DE TURBULENCIA

El fenómeno de turbulencia es muy común en casi todos los flujos que interesan estudiar en ingeniería. La turbulencia se podría definir como un fenómeno de inestabilidad intrínseca del flujo que provoca que las partículas fluidas pasen a comportarse de manera aparentemente caótica, debido a la formación de torbellinos alrededor de la dirección media del movimiento al superar la velocidad del fluido un umbral determinado por el número de Reynolds.

El número de Reynolds indica la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas de origen viscoso de la corriente. Cuando las fuerzas inerciales son muy grandes en relación a las viscosas se tiende a que el flujo sea turbulento, por lo que un valor relativamente elevado de la viscosidad favorece el flujo laminar.

El flujo turbulento se caracteriza por la formación de torbellinos, más o menos aleatorios de diferentes tamaños alrededor de la dirección media del flujo. Estos torbellinos, también llamados vórtices, son de muy diversos tamaños, se forman de manera discontinua y se deshacen en torbellinos cada vez más pequeños hasta que se disipan completamente en forma de calor debido a la viscosidad. Lo que realmente interesa de ellos es el efecto sobre los valores medios de las diferentes variables a estudio, por lo que no suele calcularse el movimiento de todos y cada uno de los torbellinos formados en el flujo si no que se promedian sobre las escalas de las fluctuaciones de turbulencia y se utilizan *modelos de turbulencia* para estimar los efectos de los torbellinos pequeños sobre los grandes. Estos métodos dan lugar a un campo de flujo promediado y simulado que es más uniforme que uno real, por lo que el número de puntos de malla se reduce y con esto el tiempo necesario para simular el campo.

Los modelos básicos de turbulencia que se utilizan varían en complejidad desde simples coeficientes de viscosidad ajustados hasta sistemas completos de ecuaciones adicionales. Los modelos básicos de turbulencia más comúnmente empleados son:

- Modelo de longitud de mezcla de Prandtl.
- Modelo K-Épsilon.
- Modelo de esfuerzos cortantes de Reynolds.

Todos ellos incluyen coeficientes que hay que ajustar para cada tipo de flujo y que se obtienen por vía experimental. Las simulaciones de flujos turbulentos promediados poseen sólo la exactitud de los modelos que incorporan por lo que la validez de una simulación numérica depende en gran parte del modelo de turbulencia empleado.

En esta memoria se ha optado por utilizar el modelo K-Épsilon por ser considerado el modelo estándar de la industria. Este modelo está basado en la viscosidad del torbellino. Definiendo la energía cinética turbulenta k como la variación de las fluctuaciones de la velocidad y la disipación de remolino turbulento ϵ como la tasa a la cual se disipan estas fluctuaciones de velocidad, este modelo asume que la viscosidad turbulenta está ligada a la energía cinética turbulenta y a la disipación de los vórtices.

4.5. METODOLOGÍA

En el propio manual de utilización del software empleado suelen venir propuestas una serie de tutoriales a modo de ejercicios prácticos de modo que el usuario pueda desenvolverse en un software tan complejo de una manera cómoda y relativamente simple. En este proyecto se han seguido los pasos marcados en este tipo de manuales, en este caso Fluent:

A. Identificación del tipo de problema y pre-proceso

- 1.- Definir las metas del modelo.
- 2.- Identificar el dominio que se va a modelar.
- 3.- Diseñar y crear la malla.

B. Ejecución del solver

- 4.- Configurar el modelo numérico.
- 5.- Calcular y revisar la solución.

C. Post-proceso

- 6.- Examinar los resultados.
- 7.- Considerar las revisiones del modelo.

4.6. PRE-PROCESO

En esta etapa inicial el primer paso es marcar los objetivos y el entorno. En este caso, obviamente, es el estudio de resistencia de un cuerpo flotante, en concreto, la comparación de la resistencia al avance de los dos modelos diseñados en los capítulos 2 y 3, el Albacore puro y el Albacore modificado. Se recuerda que el fin de estos vehículos es la investigación oceanográfica, por lo que en este estudio se simulará un vehículo en una campaña de muestreo convencional, en un mar tranquilo, a una velocidad de 2,5 m/s y a una profundidad suficiente como para evitar los efectos de la superficie libre, que alargarían demasiado los cálculos y el tiempo necesarios para realizar el análisis, que para ambos modelos se ha estimado en 5 m, de esta forma se consigue evitar la resistencia por formación de olas como se explica en el capítulo anterior referente al estudio de las diversas componentes de la resistencia.

El siguiente paso es la creación de la malla, para hacer esto es necesario introducir al programa la geometría del modelo y especificar el entorno. La geometría del modelo basta con que sea importada desde el pre-procesador, en este caso Gambit 2.4, por medio de un archivo con formato .igs o .stp., pero para especificar el entorno se debe asignar un volumen de control en el cual asignar los contornos, en este caso al tratarse de una simulación en 2D se ha creado una rectángulo de dimensiones suficientes para evitar posibles interferencias y se ha colocado el contorno de los modelos a estudio en el centro del mismo.

La creación del mallado puede ser estructurada o no estructurada, dependiendo de las celdas en las que se van a calcular todas las variables. El mallado estructurado está formado por cuadrángulos o triángulos ordenados que pueden deformarse para adaptarse a las superficies curvas de la geometría. El mallado no estructurado está habitualmente formado por triángulos y tetraedros y no tienen un orden matricial, por lo que aunque se ajuste mejor a las geometrías complejas es mucho más costoso de calcular y se necesita un procesador mucho más potente para el análisis. En esta memoria se ha utilizado una malla estructural, debido a que el análisis de este tipo de malla es suficiente para el propósito del cálculo de la resistencia.

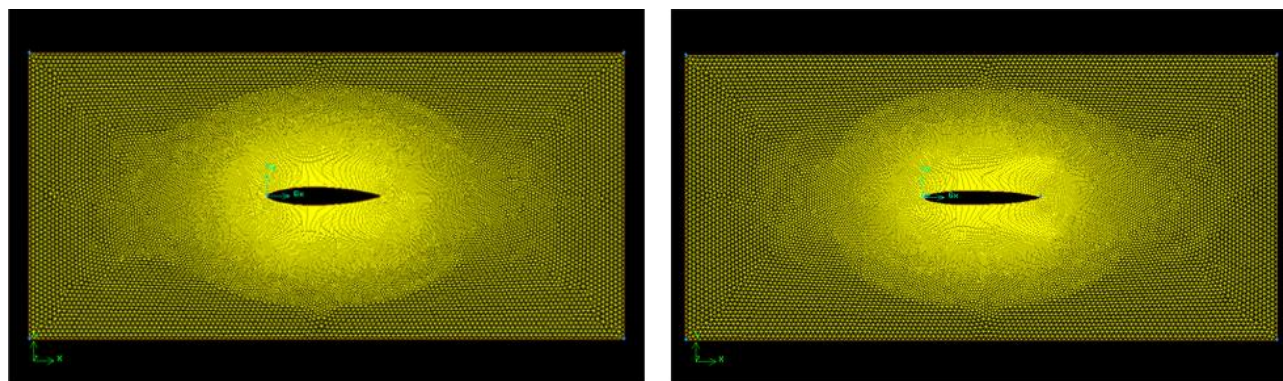


Figura 4.3. Superficie de control y modelos Abacore Puro y Modificado mallados en Gambit.

4.7. SOLVER

El solver (algoritmo de resolución) empleado en este proyecto es Fluent 6.3. En esta etapa del proceso se definen los modelos que se van a utilizar. En este caso de turbulencia, pero para ciertas simulaciones pueden hacer falta modelos de radiación, flujo bifásico, propiedades térmicas, etc. También deben definirse las propiedades de los materiales, fluidos y sólidos, como la densidad y la viscosidad. Así mismo en esta etapa se imponen las condiciones de contorno y las condiciones iniciales.

Las condiciones de contorno, que controlan los valores de ciertas variables en los límites del volumen de control, básicamente se imponen los valores fijos de la presión, la velocidad y la temperatura sobre las diferentes superficies del volumen de control en función del problema a estudio. Las condiciones iniciales, al tratarse de un problema estacionario vienen fijadas por estos valores, desde los cuales el software comienza las iteraciones. Como se ve en la imagen se han tomado los cuatro laterales como superficies de simetría, para simular la inmersión profunda, y se han fijado la velocidad y la presión en las caras de entrada y salida respectivamente.

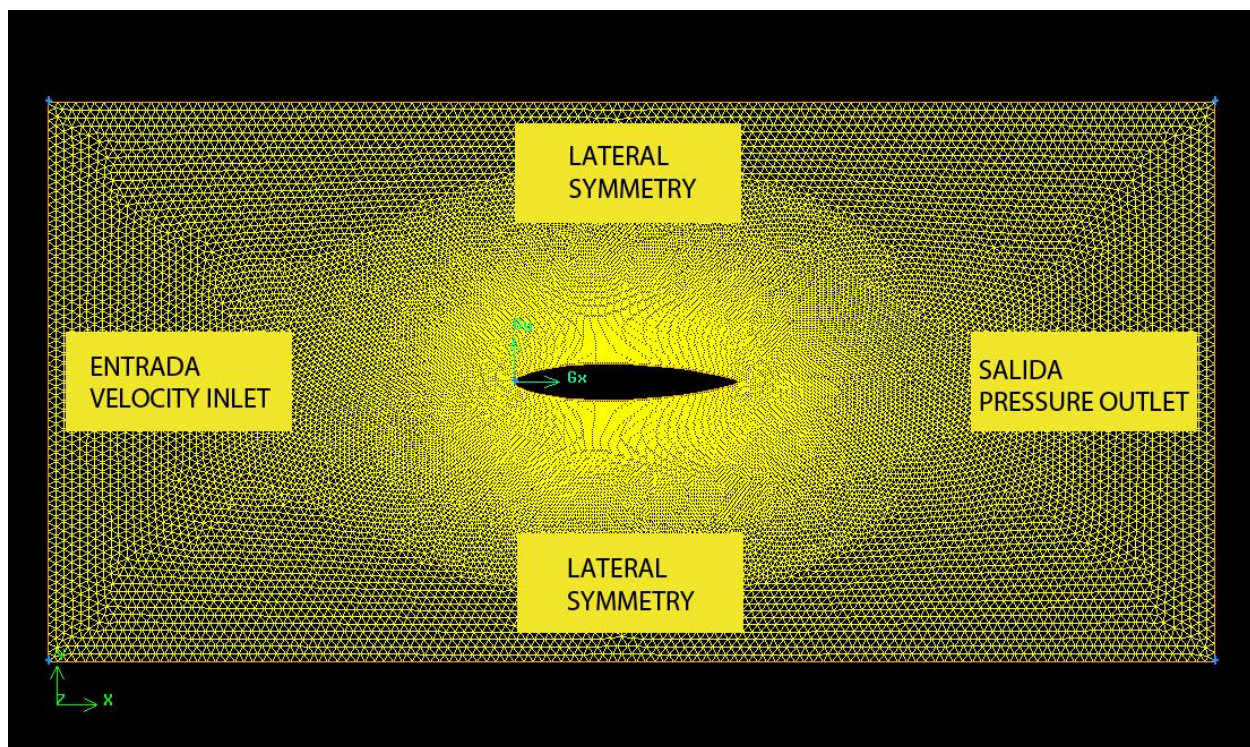


Figura 4.4. Condiciones de contorno propuestas para el estudio de los modelos

Como se explicó en un apartado anterior el método de volúmenes finitos no se resuelve mediante cálculo directo si no por iteraciones por lo que es esta etapa se debe fijar un número de iteraciones y un criterio de convergencia. El criterio de convergencia fijado para ambos modelos es que todos los residuos sean inferiores a $0,001$, utilizando un modelo de turbulencia K-Épsilon.

4.8 POST-PROCESO

El post-proceso comienza cuando se finalizan los cálculos del solver, es decir, cuando se alcanza el número de iteraciones fijadas o se cumple el criterio de convergencia. Debido a la sencillez del modelo en 2D y a la regularidad de las celdas de la malla creada, utilizando para el solver un el modelo de turbulencia sencillo como el K-Épsilon se puede observar en la gráfica que los residuos empiezan a disminuir gradualmente y se alcanza la convergencia fijada en cuestión de unas pocas iteraciones con relativa facilidad para ambos modelos. Debido a la gran cantidad de información que se genera en esta simulación normalmente se representa la mayoría de los resultados en imágenes y gráficos, *visualizaciones*, las cuales se muestran y se comentan a continuación para los dos modelos.

VISUALIZACIONES DEL MODELO ALBACORE PURO

El cálculo concluye para el primer modelo a las 252 iteraciones como se observa de la siguiente gráfica, cumpliendo el criterio de convergencia fijado, en este caso que todos los residuos sean menores de 0,001.

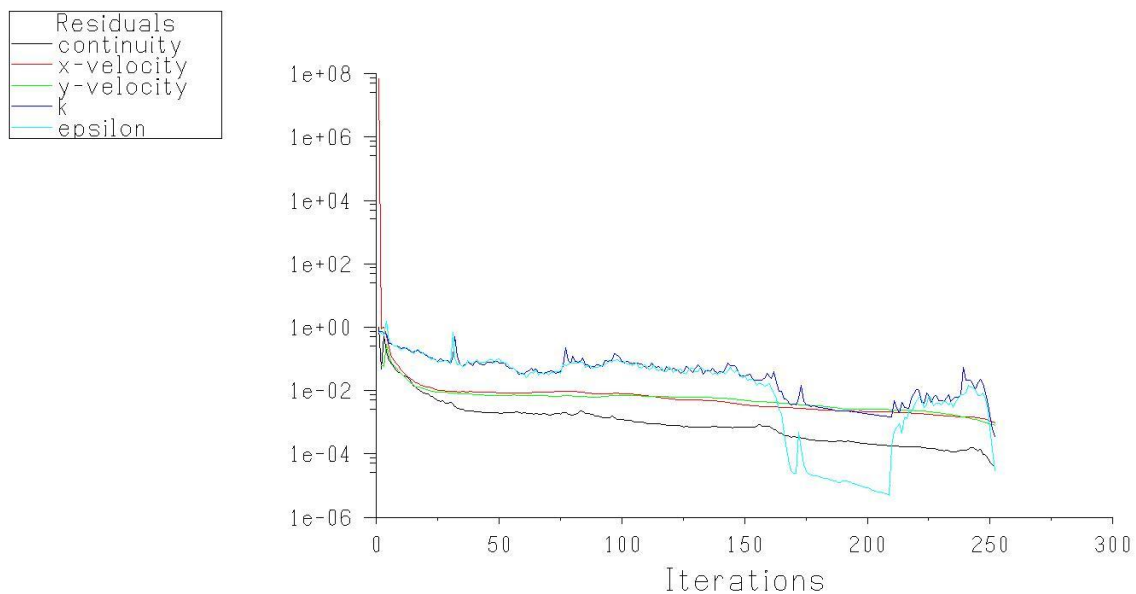


Figura 4.5. Gráfico de residuos para el modelo Albacore Puro.

Las características generales del flujo se definen básicamente mediante la velocidad y la presión. A continuación se muestran las visualizaciones del mapa de contornos para la presión estática y la velocidad del modelo Albacore puro.

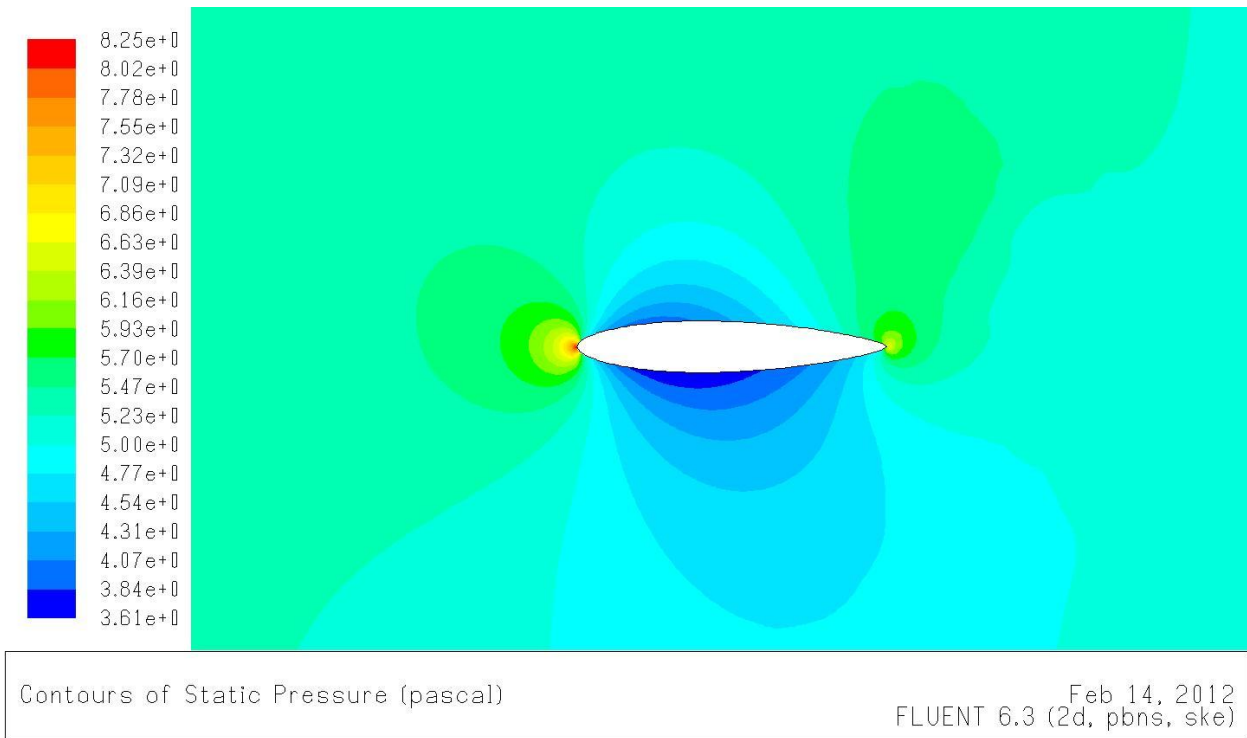


Figura 4.6. Mapa de contornos de la presión estática del modelo Albacore Puro.

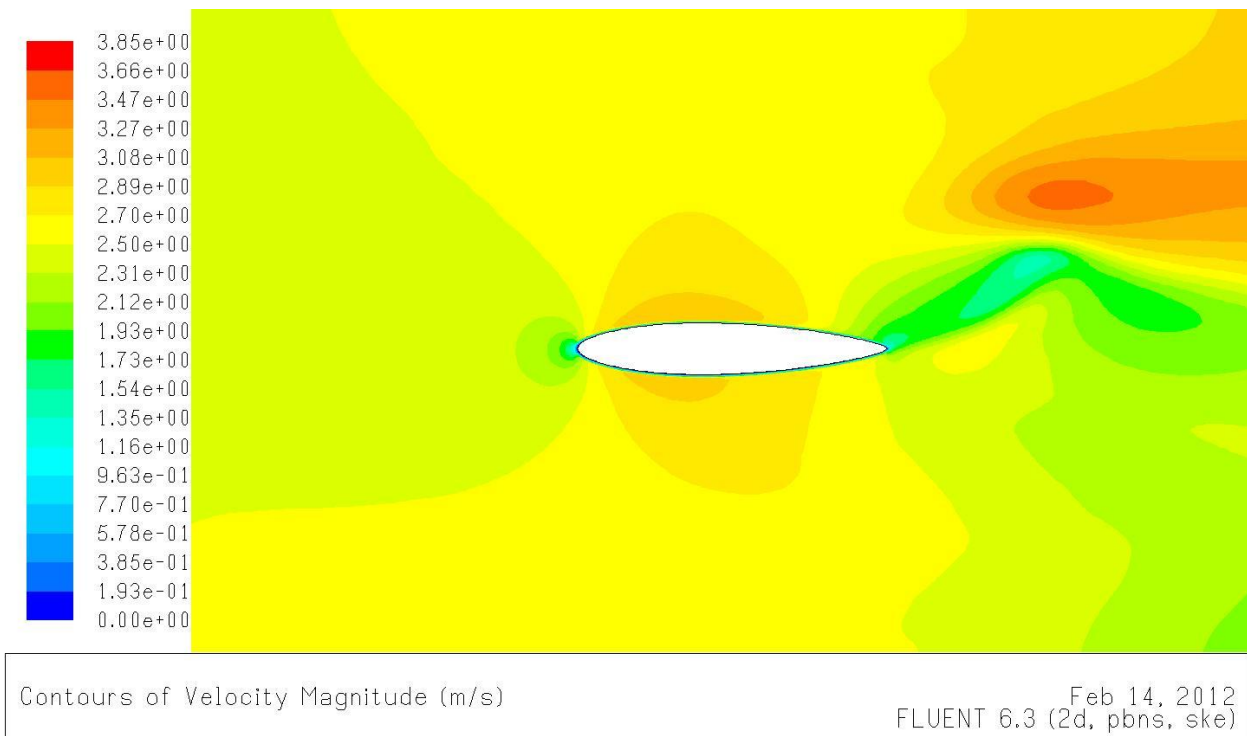


Figura 4.7. Mapa de contornos de la velocidad del modelo Albacore Puro.

En estas imágenes se puede observar la perturbación producida por el vehículo en el fluido. En el extremo de proa se puede ver un estancamiento del flujo en el que se distingue claramente el *punto de remanso* donde la velocidad es nula y la presión máxima.

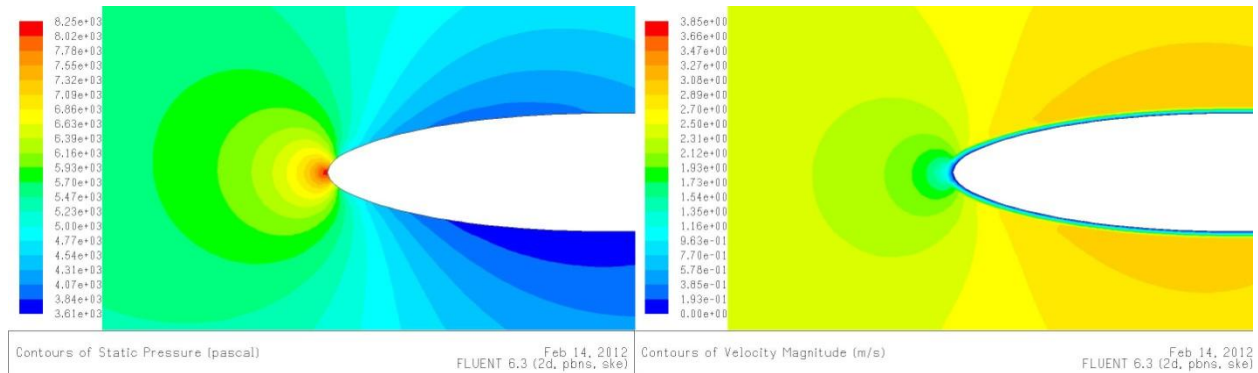


Figura 4.8. Ampliación de la zona de proa del modelo Albacore Puro.

También queda patente la formación de la *capa límite* alrededor del modelo en el que la presión es prácticamente constante y la velocidad es nula en contacto con la superficie aumentando conforme se va alejando de la superficie hasta alcanzar la velocidad de la corriente exterior.

La velocidad de las partículas que se mueven en la capa límite es muy pequeña, por el efecto de la pared, pudiendo ser insuficiente para vencer el efecto decelerador ejercido por la diferencia de presiones, pudiendo el flujo pararse o incluso invertir su sentido. La línea divisoria entre el flujo de avance y el de retroceso es muy inestable, por lo que cuando rompe provoca el desprendimiento de la capa límite, ya casi a la salida del modelo, dando lugar a vórtices que se convierten en el fenómeno conocido como *estela*. Más concretamente, este tipo de estela es conocida como calle de vórtices de Von Karman, en reconocimiento al físico húngaro por ser éste su descubridor. La energía de los vórtices se consume por la viscosidad y los vórtices se dispersan conforme se van alejando del modelo.

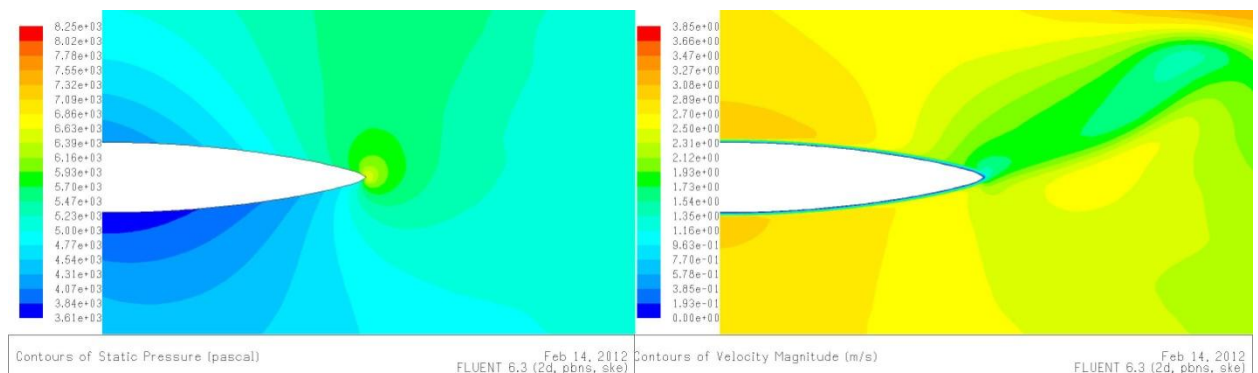


Figura 4.9. Ampliación de la zona de popa del modelo Albacore Puro.

Esta formación de vórtices en la estela que produce el modelo, parece estar localizada solamente en un lado, pudiendo esto formar un patrón de flujo asimétrico cambiando la distribución de la presión y pudiendo provocar fuerzas laterales periódicas sobre el cuerpo, lo

que se traduciría en futuras vibraciones. Debido a que esta memoria se centra en el análisis de resistencia de los modelos a *carena desnuda*, en el modelo no se han diseñado los apéndices típicos que se pueden encontrar en un submarino, como son los timones, antenas o la propia hélice, por lo que en el análisis de la simulación no se debe tener en cuenta la influencia que pueda producir la estela sobre el modelo puesto que no se adapta a la realidad.

El software también brinda la posibilidad de visualizar diferentes gráficos relativos al comportamiento del fluido a lo largo de la superficie del modelo. En la figura a continuación se muestran dos gráficos correspondientes a la presión estática y a la energía cinética turbulenta. Las dos hileras de puntos corresponden a sendas líneas de contacto entre el fluido y la superficie por la zona superior e inferior.

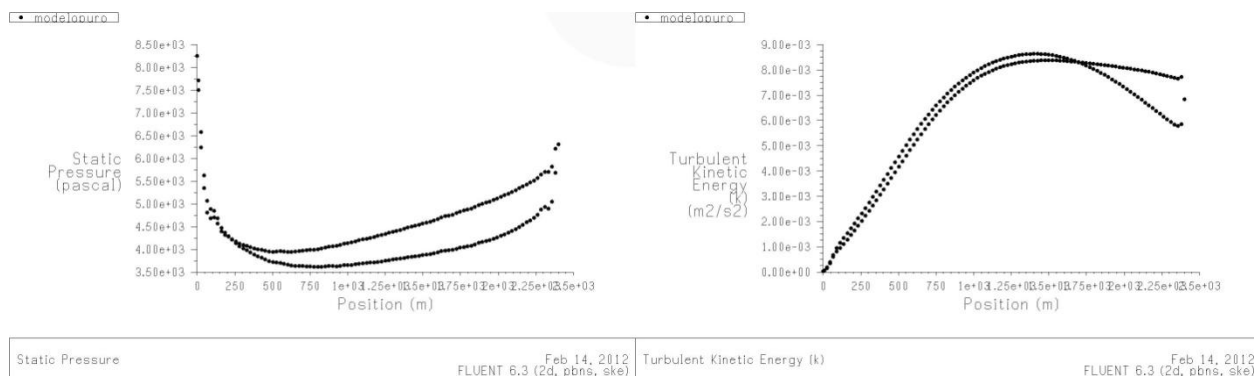


Figura 4.10. Graficas de la presión estática y la energía cinética.

Finalmente se accede a la ventana de resultados numéricos para obtener las fuerzas que realiza el flujo sobre la superficie que ha calculado el programa después de la simulación. Para ello se define un vector de fuerzas que básicamente integra la presión alrededor de la superficie según la dirección del vector definido, en este caso (1,0,0) correspondiente a la fuerza horizontal. En el cuadro aparecen por separado las superficies en filas y la suma de ellas al final *net*, aunque este caso sólo hay una superficie *modelo puro*.

Force vector: (1 0 0)						
zone name	pressure force n	viscous force n	total force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
modelo puro	102.86045	16.095335	118.95579	167.93543	26.278098	194.21353
net	102.86045	16.095335	118.95579	167.93543	26.278098	194.21353

El cuadro de resultados muestra los valores de las fuerzas en Newtons, en la primera columna la fuerza horizontal que realiza la presión, en la segunda la que realizan las fuerzas viscosas y en la tercera la fuerza total, suma de las dos anteriores.

En las tres siguientes columnas aparecen los coeficientes respectivos de estas fuerzas. Se ha de tener en cuenta que al tratarse de un modelo bidimensional, el programa asume que el

modelo tiene un ancho de valor 1 metro. Para calcular el valor real del coeficiente de arrastre como normalmente se utiliza, se debe definir el área frontal real del vehículo, que al ser bidimensional es el diámetro máximo, este caso 0,4 metros para ambos modelos. De este modo se obtienen unos valores para los coeficientes mucho más razonables.

Force vector: (1 0 0)						
zone name	pressure force n	viscous force n	total force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
modelopuro	102.86045	16.095335	118.95579	0.0802813	0,0125622	0.0928435
net	102.86045	16.095335	118.95579	0.0802813	0.0125622	0.0928435

VISUALIZACIONES DEL MODELO ALBACORE MODIFICADO

Para el modelo Albacore Modificado el cálculo concluye para tras 57 iteraciones como se aprecia en la gráfica, cumpliendo el criterio de convergencia fijado, al igual que el modelo Albacore Puro, que todos los residuos sean menores de 0,001, pero a diferencia del cálculo anterior se observa que las curvas de los modelos de turbulencia K-Epsilon van gradualmente descendiendo hasta alcanzar el criterio fijado.

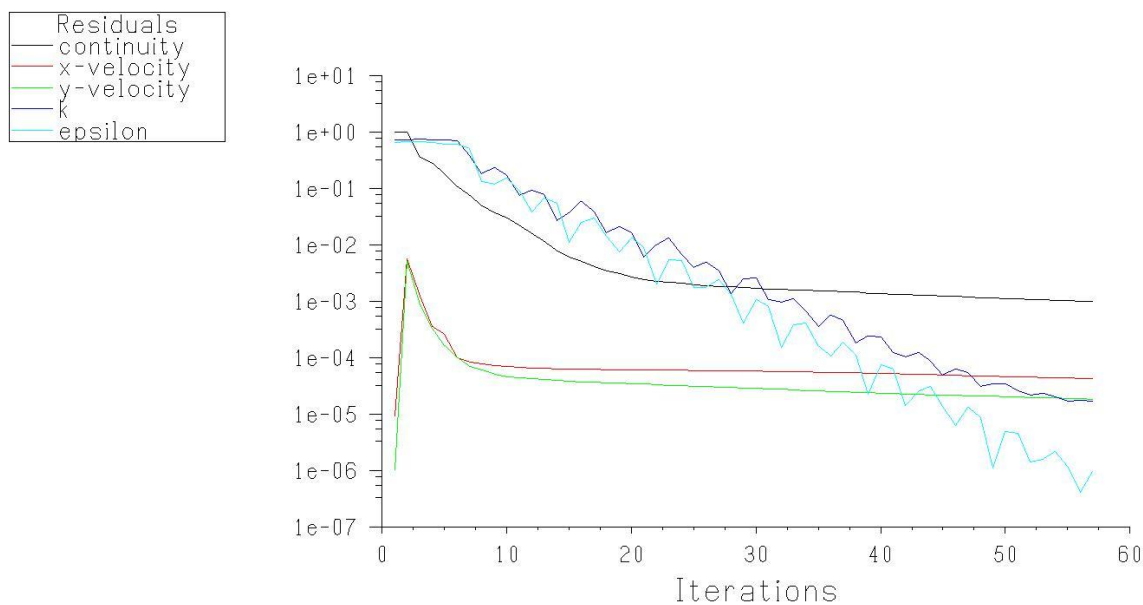


Figura 4.11. Gráfico de residuos para el modelo Albacore Modificado.

En la página siguientes se muestran, como se procedió en apartado anterior, las visualizaciones de los mapas de contornos de la presión estática y de la velocidad para el modelo Albacore Modificado así como ampliaciones de las zonas de proa y popa.

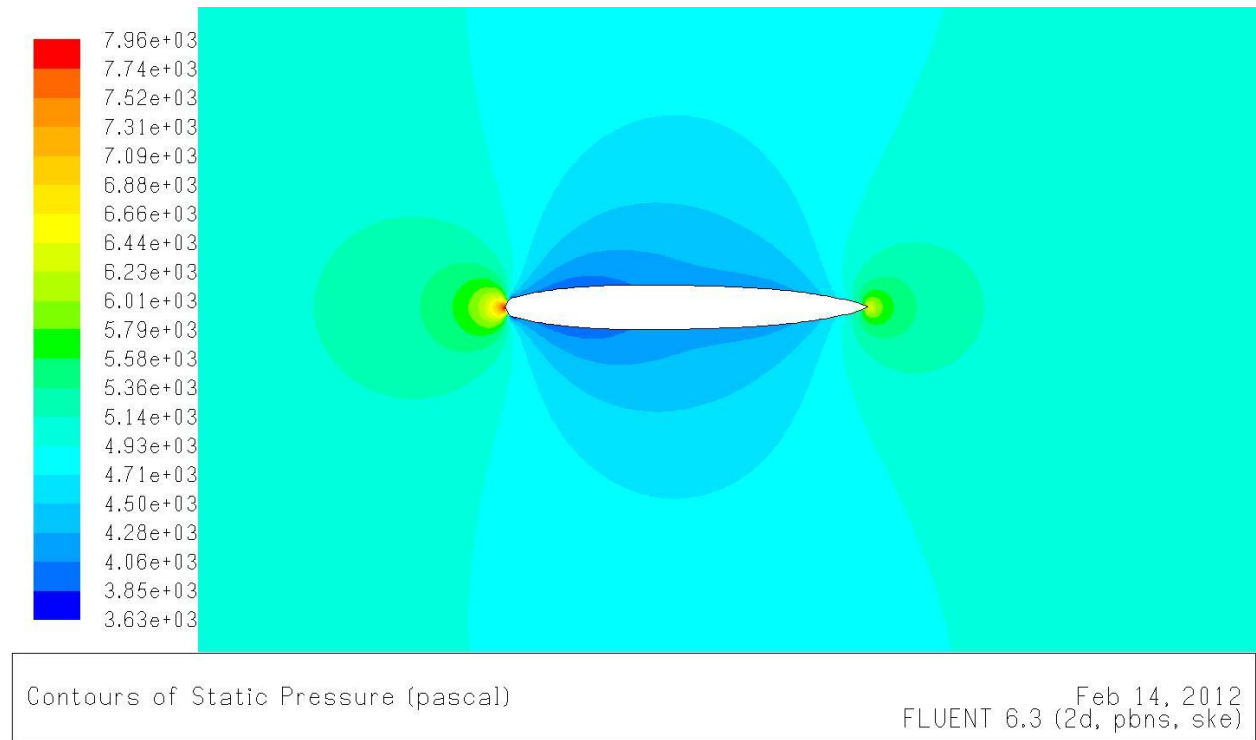


Figura 4.12. Mapa de contornos de la presión estática del modelo Albacore Modificado.

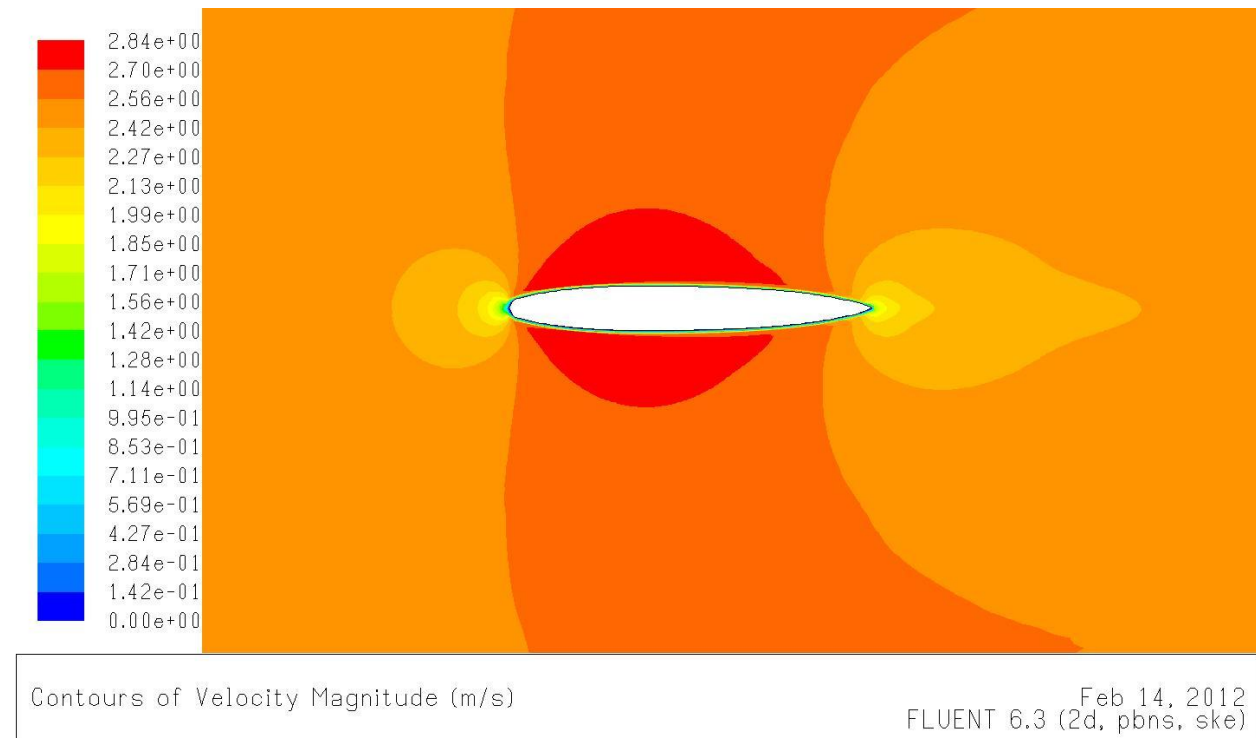


Figura 4.13. Mapa de contornos de la velocidad del modelo Albacore Modificado.

Al igual que en el modelo Puro, en estas ampliaciones se puede apreciar el estancamiento del flujo en el extremo de proa, en el que se distingue claramente el punto de remanso donde la velocidad es nula y la presión máxima.

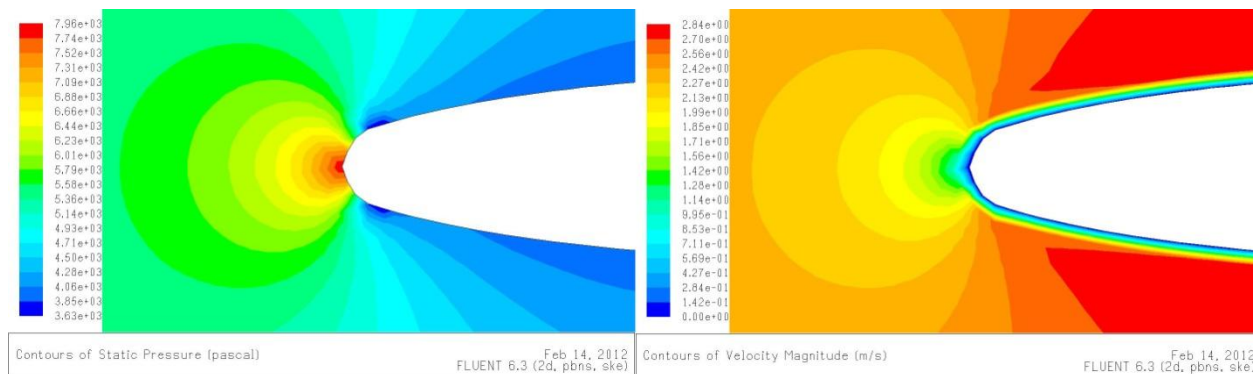


Figura 4.14. Ampliación de la zona de proa del modelo Albacore Modificado.

En el extremo de proa se pueden ver dos pequeñas zonas de muy baja presión que no aparecen en el modelo Albacore Puro, muy probablemente producidas por el afinamiento del borde de entrada de modelo Albacore Modificado. Aunque se puede apreciar una ligera alteración en el campo de velocidades en estas zonas de baja presión, no consiguen alterar suficientemente el flujo y la capa límite no se desprende.

En este modelo se observa que la capa límite no llega a desprenderse hasta la salida del mismo, manteniéndose pegada a la superficie del cuerpo durante toda su longitud hasta que llega a atravesarlo completamente. En este modelo no se aprecia que se haya creado una calle de vórtices en la estela como sucedía en el modelo Albacore Puro, sino que la capa límite a la salida del modelo se mantiene estable creando con ello una estela muy delgada en la que no se aprecia la formación de grandes torbellinos.

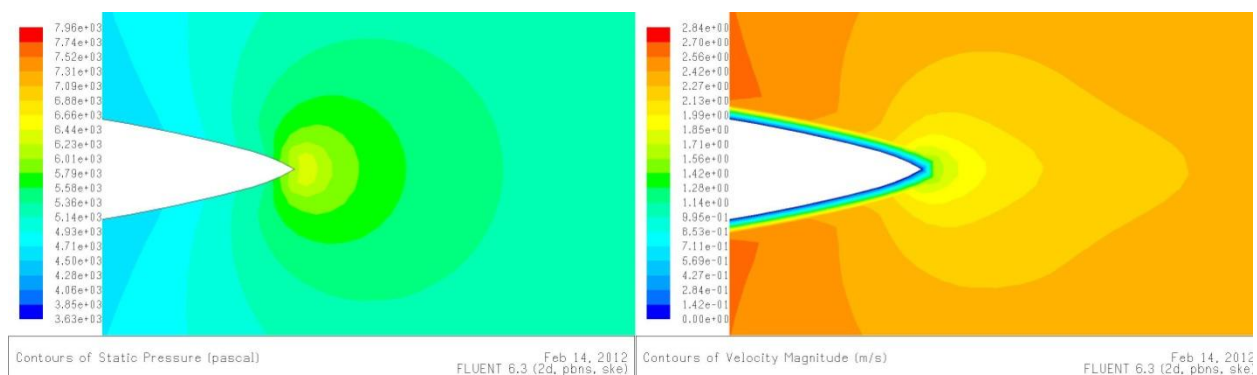


Figura 4.15. Ampliación de la zona de popa del modelo Albacore Modificado.

En la ampliación de la zona de popa del modelo Albacore Modificado se ve que hay una disminución de velocidad que corresponde a un aumento de presión en la misma zona en el mapa de contornos de la presión, efecto también observado en el modelo Albacore Puro. Aunque puede parecer un efecto contradictorio, ya que en esta zona se juntan las líneas de corriente de ambos lados del modelo y por ende las partículas fluidas deberían acelerarse en vez de frenarse,

se ha de tener en cuenta que el contorno de velocidades representado en la imagen corresponde solamente a las partículas en la dirección del flujo, por lo que se deduce que esta disminución de velocidad es consecuencia de la estela, en donde las partículas fluidas se mueven en vórtices en diferentes direcciones por lo que el modulo de la velocidad queda ahora dividido sus dos componentes bidimensionales.

A continuación se muestran los dos gráficos correspondientes a la presión estática y a la energía cinética turbulenta. Como se puede ver en las gráficas, existe una fuerte simetría de presiones entre ambos lados del contorno, hasta el punto de que las dos hileras de puntos parecen ser la misma línea. En la gráfica de la energía cinética turbulenta no se aprecia tanto esta simetría, pero siguen siendo mucho parecidas entre ellas que en el modelo Albacore Puro. Este efecto quasi-simétrico del flujo a ambos lados del modelo, que también puede apreciarse claramente en los mapas de contorno de presión y velocidad mostrados, es producido por el hecho de no desprenderse la capa límite, siendo mucho menor la perturbación creada por el modelo al atravesar el fluido.

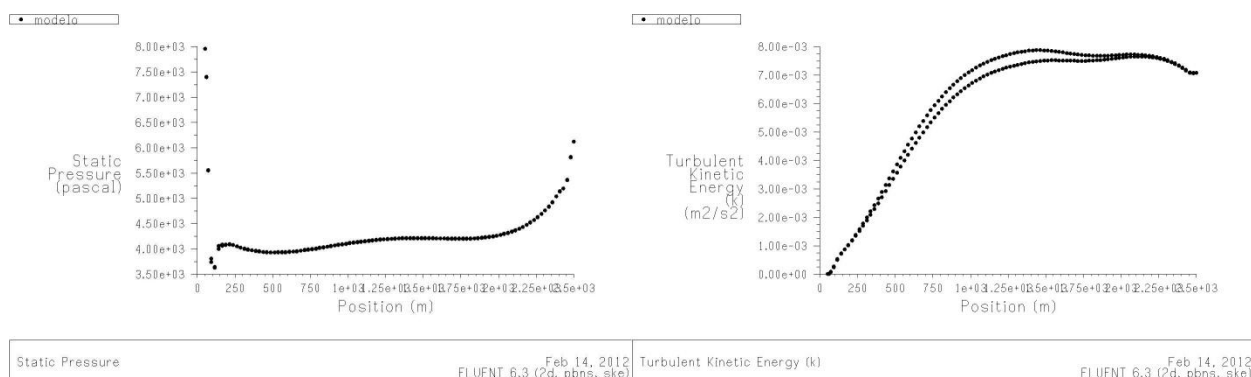
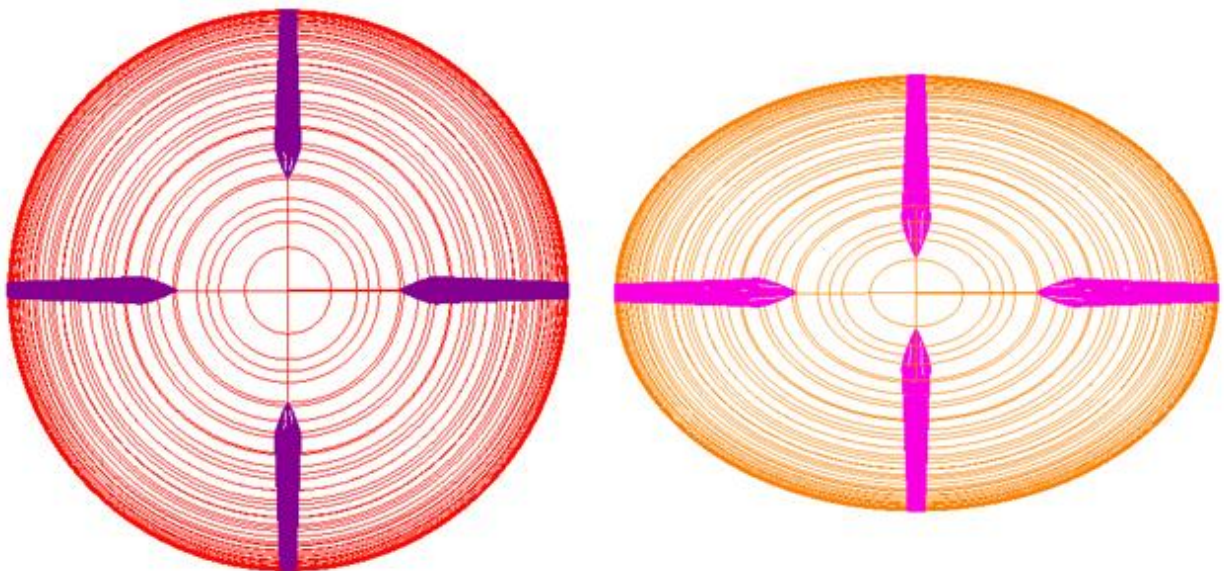


Figura 4.16. Graficas de la presión estática y la energía cinética.

Al igual que se procedió con el modelo anterior, se accede a la ventana de resultados numéricos para obtener las fuerzas. Para ello se vuelve a definir un vector de fuerzas correspondiente a la fuerza horizontal y se obtiene el primer cuadro de resultados en el que el programa asume que el modelo tiene un ancho de valor 1 metro, por tratarse de un modelo bidimensional. Para calcular el valor real del coeficiente de arrastre se debe definir el ancho real del modelo como se realizó para el modelo anterior, se recuerda que es un valor de 0,4 metros, y con esta modificación se obtienen los resultados definitivos para el modelo Albacore Modificado.

zone name	pressure force n	viscous force n	total force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
modelo	86134.891	14884.384	101019.27	0.0672272	0.0116171	0.0788443
net	86134.891	14884.384	101019.27	0.0672272	0.0116171	0.0788443

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y CONCLUSIONES



Representación de las vistas frontales de los modelos Albacore Puro y Modificado.

En este capítulo se analizan los datos obtenidos de los resultados de los cálculos de resistencia por medios empíricos y los de la simulación bidimensional mediante CFDs, así como se exponen las conclusiones y se recomiendan líneas de trabajo futuras.

5.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados de las fuerzas y los coeficientes de resistencia al avance obtenidos en los dos capítulos anteriores para los modelos Albacore Puro y Albacore Modificado son mostrados en los siguientes cuadros y comentados a continuación.

MÉTODOS EMPÍRICOS

	Superficie mojada (m ²)	Factor de formas	Coefficiente de Fricción	Resistencia total (N)
ALBACORE PURO	2,2276	1,242	0,00382	33,924
ALBACORE MODIFICADO	2,0062	1,097	0,00382	26,985

SIMULACIÓN BIDIMENSIONAL

	Fuerza de presión (N)	Fuerza viscosa (N)	Fuerza total (N)	Coefficiente de Resistencia al Avance
ALBACORE PURO	102,8604	16,0953	118,9557	0,0928
ALBACORE MODIFICADO	86,1348	14,8843	101,0191	0,0788

Lo primero que se observa de la comparación de estos resultados es que los valores de la resistencia obtenidos por la simulación mediante CFDs son prácticamente cuatro veces la de los obtenidos mediante métodos empíricos, lo cual es una diferencia bastante significativa.

Esta diferencia puede ser causada por varios factores. Antes de nada aclarar que en la práctica el procedimiento para el cálculo de la resistencia es diferente, e incluso podría decirse que contrario, ya que para el cálculo de resistencia mediante métodos empíricos se trata de hallar primero el coeficiente de fricción mediante el método del ITTC'57, obtenido tras la experimentación con placas planas, y a través de este se obtienen las fuerzas de resistencia. Sin embargo en los resultados obtenidos mediante CFDs se tienen las fuerzas mediante las formulaciones de Navier-Stokes, calculando la fuerza de resistencia total por medio de la suma de las componentes de presión y viscosa, lo que permite calcular a posteriori los coeficientes de las dos componentes por separado.

El hecho de que el coeficiente de fricción calculado empíricamente sea igual para los dos modelos ya es un indicio claro de que el valor de este coeficiente no se ajusta a la realidad y esto es debido a que según la formulación empleada por la ITTC'57 el coeficiente de fricción sólo depende del número de Reynolds, el cual geoméricamente solamente depende de la eslora, que

es de igual longitud en los dos modelos. Debido a esto la reducción de formas en el modelo Albacore Modificado no queda reflejada en el cálculo del coeficiente sino que solamente queda reflejada en el posterior cálculo de resistencia ya que depende directamente de la superficie mojada y del factor de formas, valores que inferiores que en el modelo Albacore Puro.

Con respecto a los valores obtenidos mediante CFDs hay que tener en cuenta que se trata de una simulación bidimensional el cálculo de la resistencia se hace en función del ancho del vehículo, que como se explica en el capítulo 4, se toma el valor del diámetro máximo tanto para el modelo Albacore puro como para el Albacore modificado, lo cual puede provocar un aumento significativo en el valor de la fuerza obtenida por el solver, ya que este no tiene en cuenta el afinamiento en el morro de los modelos, lo cual obviamente se traducirá en un aumento de resistencia debido a que el flujo no sigue la forma real del modelo.

Como era de esperar la mayor parte de las fuerzas que genera el flujo sobre los vehículos son debidas a la presión y sólo un pequeña parte son derivadas de la viscosidad. La resistencia al avance hidrodinámico es generada principalmente por la diferencia de presión de la parte delantera y la trasera, y no tanto a las fuerzas de origen viscoso ya que son muy similares para ambos modelos.

Para confirmar la coherencia de los valores obtenidos mediante ambos métodos, se pueden compararan los valores del coeficiente de resistencia al avance con cuerpos que tienen un coeficiente conocido, como los de las figuras que se muestran en la siguiente imagen.

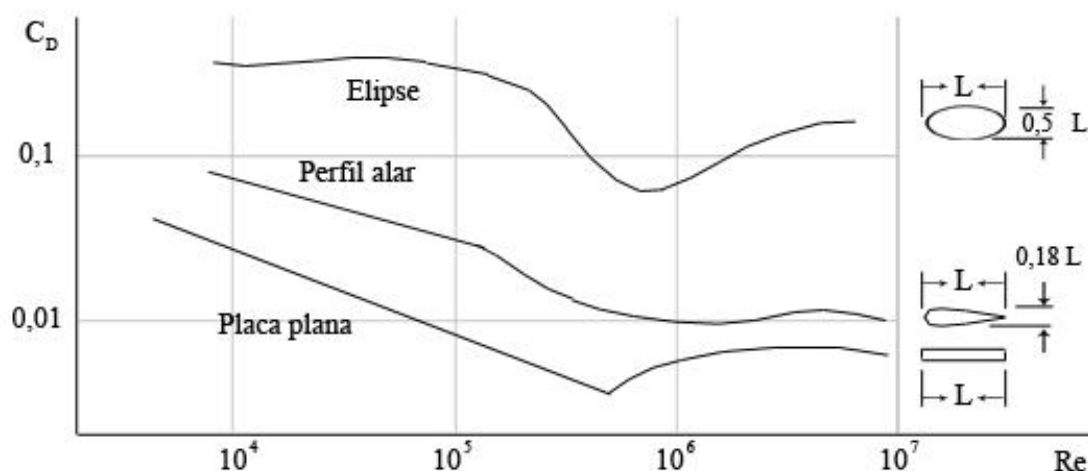


Figura 5.1. Graficas para el coeficiente de resistencia al avance en función del número de Reynolds.

En esta gráfica se muestran los valores del coeficiente de resistencia en función del número de Reynolds de tres figuras que mantienen una alta semejanza en las formas con los modelos Albacore Puro y Modificado. Se recuerda que el valor del número de Reynolds para los modelos es del orden de 10^6 , por lo que las observaciones referidas a continuación hacen

referencia a la zona de la derecha de la gráfica. Los valores de los coeficientes calculados empíricamente están lejos de los valores que se observan en esta gráfica por lo que, como se sospechaba anteriormente, claramente no se ajustan a la realidad y no pueden ser considerados como correctos, aunque el método empleado para calcularlos sí se ajuste en otro tipo de buques. Sin embargo, los valores calculados mediante la simulación bidimensional no difieren mucho de la figura de la elipse mostrada en la gráfica, aun siendo ambos modelos de una forma mucho más afinada y se pudiese esperar que sus valores se acercasen más a los del perfil alar. Este hecho nos confirma que los resultados obtenidos por el solver son más altos de lo que deberían ser, como se ha comentado, puesto que el cuerpo con forma elíptica presenta una superficie frontal mucho mayor, por lo que la resistencia de presión se incrementa y con ello el valor del coeficiente de resistencia al avance. Aún con todo, los resultados obtenidos mediante CFDs se ajustan mucho mejor a la realidad que los obtenidos empíricamente, que aunque no sean exactos en su valor, sí dan unas directrices y aclaran ciertos puntos como se explicó en el capítulo anterior.

5.2 ESTIMACIÓN DE AUTONOMÍA

La autonomía de los vehículos dependerá fundamentalmente de la potencia consumida por el motor, aunque hay que tener en cuenta otros elementos integrados en el casco resistente que consumirán también una parte de la energía de las baterías instaladas, como son el servomotor, la CPU y los sistemas de control y todo el componente electrónico, aunque obviamente sea un porcentaje mucho inferior que el que consumirá el motor.

El vehículo está diseñado para albergar cuatro baterías estándar como se explicaba al principio de la memoria, de las que tres de ellas se reservarán exclusivamente para el funcionamiento del motor y la restante para todos los demás componentes del vehículo que necesiten de energía eléctrica.

La velocidad máxima que alcanzará este vehículo en las campañas de muestreo serán 2,5 m/s, que es la velocidad a la que se ha calculado la resistencia al avance. Se muestra a continuación una tabla con los valores de potencia obtenidos para los dos modelos estudiados, con los datos obtenidos mediante el análisis por CFDs.

SIMULACIÓN BIDIMENSIONAL

	Velocidad (m/s)	Resistencia total (N)	Potencia (w)
ALBACORE PURO	2,5	118,9557	297,39
ALBACORE MODIFICADO	2,5	101,0191	252,54

De los resultados de potencia obtenidos se deduce que la utilización de dos motores eléctricos de 300w para el modelo Albacore Puro y de 250w para el Albacore Modificado bastarían para cumplir con el cometido del AUV, aunque no se alcáncese la velocidad máxima.

Debido a que este vehículo aún se encuentra en fase muy temprana de proyecto, en la que no se ha elegido la hélice, ni el motor, ni cómo será la conexión entre ambos, para la estimación de autonomía se considerará que los motores trabajan a pleno rendimiento, a 24v y alimentados por tres baterías estándar de 12Ah. Con esta se obtienen los resultados que se muestran en el cuadro a continuación.

	Potencia (w)	Autonomía (h)	Autonomía (Km)
ALBACORE PURO	300	2,88	25,92
ALBACORE MODIFICADO	250	3,46	31,16

Con estos resultados se puede concluir que el valor de la autonomía del modelo se incrementa un 16,7% tras la modificación de sus formas iniciales.

5.3 CONCLUSIONES

En este proyecto se ha diseñado un primer modelo del casco hidrodinámico de un vehículo submarino siguiendo las formas *Albacore*, según el estudio de una serie sistemática de carenas de submarinos diseñados en los años 50, denominada de la *Serie 58*, las cuales eran las más eficientes hidrodinámicamente hablando, puesto que ofrecían la menor resistencia al avance. Posteriormente se ha procedido a rediseñar este modelo, achatando el puntal, reduciendo de esta manera tanto la superficie frontal como la superficie mojada del casco, principales factores causantes de la componente viscosa de la resistencia.

Seguidamente se ha procedido a estudiar la resistencia de ambos modelos, con el fin de confirmar que en el modelo modificado se reduce la resistencia al avance. Como se observa de los resultados obtenidos por los análisis de resistencia, ya sea empírica o computacionalmente, se puede afirmar que el modelo modificado es hidrodinámicamente más eficiente ya que reduce sustancialmente la resistencia generada, aunque debido a la poca fiabilidad de los resultados obtenidos empíricamente, por factores ya explicados, en las conclusión que se hace a continuación se hace referencia a los datos obtenidos mediante la simulación bidimensional.

El afinamiento de las formas del modelo Albacore Modificado, redujo en el diseño del modelo casi un 10% la superficie mojada con respecto al modelo Albacore Puro, lo que se ha

traducido en los resultados de la simulación en una reducción del 7,5% en las fuerzas viscosas. Las fuerzas de presión, relacionadas con las diferencias de presión en las distintas zonas del modelo sufren una reducción mucho mayor superando el 16%. Y finalmente la resistencia total al avance se ha reducido en más de un 15%, lo que se traducirá en una reducción de la potencia propulsiva requerida por el vehículo y por ende, un aumento en la autonomía del mismo, estimado en un 16,7%.

LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS

Una labor futura para complementar este proyecto podría ser la comparación de los resultados obtenidos en ambos modelos con los obtenidos en un estudio experimental en un canal de ensayo con maquetas de los modelos construidas a escala.

Otro paso sería el estudio de resistencia del vehículo una vez instaladas las sondas en el interior del casco hidrodinámico y con el sistema de propulsión instalado, provocando un flujo interno de corriente como se explico anteriormente, viendo así como varia la componente de resistencia de fricción.

Además de lo que se refiere a los estudios de resistencia, se podría continuar este estudio de carenas submarinas con la modificación de las geometrías de los modelos, añadiendo cilindros en el centro del modelo de diferentes longitudes donde se podrían albergar más baterías, de este modo se podría ver hasta qué punto sería eficiente alargar los vehículos en función de la pérdida de resistencia que conlleva.

ANEXO I. Características geométricas de la Serie 58

Nº	L/D	Cp	R0'	R1'	Xcm'	Lx'	Cs	Cpe	Le/D
1	4	0,65	0,5	0,1	0,4	0	0,789	0,65	4
2	5	0,55	0,5	0,1	0,4	0	0,701	0,55	5
3	5	0,6	0,5	0,1	0,4	0	0,743	0,6	5
4	5	0,65	0,5	0,1	0,4	0	0,781	0,65	5
5	6	0,55	0,5	0	0,36	0	0,694	0,55	6
6	6	0,65	0,5	0,1	0,4	0	0,777	0,65	6
7	7	0,55	0,5	0	0,36	0	0,692	0,55	7
8	7	0,55	0,5	0,1	0,4	0	0,695	0,55	7
9	7	0,6	0,5	0,1	0,4	0	0,737	0,6	7
10	7	0,65	0,5	0,1	0,52	0	0,775	0,65	7
11	7	0,65	0,5	0,1	0,4	0	0,774	0,65	7
12	7	0,65	0,5	0,3	0,4	0	0,779	0,65	7
13	7	0,65	0	0,1	0,4	0	0,769	0,65	7
14	7	0,65	1	0,1	0,4	0	0,774	0,65	7
15	7	0,7	0,5	0,1	0,4	0	0,809	0,7	7
16	7	0,75	0,5	0,1	0,29-0,57	0,29	0,844	0,65	5
17	8	0,55	0,5	0	0,36	0	0,690	0,55	8
18	8	0,65	0,5	0,1	0,4	0	0,773	0,65	8
19	10	0,65	0,5	0	0,36	0	0,689	0,65	10
20	10	0,6	0,5	0,1	0,4	0	0,730	0,6	10
21	10	0,65	0,5	0,1	0,4	0	0,772	0,65	10
22	10	0,69	0,5	0,1	0,28-0,58	0,3	0,787	0,55	7
23	10	0,72	0,5	0,1	0,28-0,58	0,3	0,816	0,6	7
24	10	0,76	0,5	0,1	0,28-0,58	0,3	0,842	0,65	7
25	10	0,79	0,5	0,1	0,28-0,58	0,3	0,867	0,7	7
26	11,67	0,76	0,5	0,1	0,24-0,64	0,4	0,843	0,6	7
27	14	0,8	0,5	0,1	0,20-0,70	0,5	0,869	0,6	7
28	17,5	0,84	0,5	0,1	0,16-0,76	0,6	0,895	0,6	7

ANEXO II. Cálculo del polinomio generatriz

r0	r1	Cp	m	L	D	α_0	α_1	β_0	β_1	γ	δ_0	δ_1	δ_2
0.50	0.10	0.60	0.40	2.40	0.40	6.250	-13.672	9.375	-12.153	164.063	-5.425	56.062	-79.120

R0(x)	R1(x)	P(x)	Q(x)	x	2r0R0(x)	2r1R1(x)	CpP(x)	Q(x)	y2	y	X=xL	Y=yD/2
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.016577	-0.000517	0.009101	-0.001666	0.02	0.016577	-0.000103	0.005461	-0.001666	0.0203	0.1424	0.0480	0.0569
0.027247	-0.001769	0.031353	-0.004880	0.04	0.027247	-0.000354	0.018812	-0.004880	0.0408	0.2021	0.0960	0.0808
0.033277	-0.003382	0.060329	-0.007464	0.06	0.033277	-0.000676	0.036197	-0.007464	0.0613	0.2477	0.1440	0.0991
0.035752	-0.005066	0.091005	-0.007837	0.08	0.035752	-0.001013	0.054603	-0.007837	0.0815	0.2855	0.1920	0.1142
0.035596	-0.006609	0.119602	-0.004944	0.1	0.035596	-0.001322	0.071761	-0.004944	0.1011	0.3179	0.2400	0.1272
0.033582	-0.007865	0.143434	0.001815	0.12	0.033582	-0.001573	0.086061	0.001815	0.1199	0.3462	0.2880	0.1385
0.030350	-0.008744	0.160771	0.012649	0.14	0.030350	-0.001749	0.096463	0.012649	0.1377	0.3711	0.3360	0.1484
0.026418	-0.009204	0.170699	0.027440	0.16	0.026418	-0.001841	0.102419	0.027440	0.1544	0.3930	0.3840	0.1572
0.022196	-0.009242	0.172993	0.045801	0.18	0.022196	-0.001848	0.103796	0.045801	0.1699	0.4122	0.4320	0.1649
0.018000	-0.008889	0.168000	0.067130	0.2	0.018000	-0.001778	0.100800	0.067130	0.1842	0.4291	0.4800	0.1717
0.014060	-0.008197	0.156527	0.090663	0.22	0.014060	-0.001639	0.093916	0.090663	0.1970	0.4438	0.5280	0.1775
0.010535	-0.007238	0.139733	0.115520	0.24	0.010535	-0.001448	0.083840	0.115520	0.2084	0.4566	0.5760	0.1826
0.007521	-0.006094	0.119035	0.140751	0.26	0.007521	-0.001219	0.071421	0.140751	0.2185	0.4674	0.6240	0.1870
0.005062	-0.004855	0.096018	0.165375	0.28	0.005062	-0.000971	0.057611	0.165375	0.2271	0.4765	0.6720	0.1906
0.003158	-0.003609	0.072352	0.188416	0.3	0.003158	-0.000722	0.043411	0.188416	0.2343	0.4840	0.7200	0.1936
0.001776	-0.002445	0.049717	0.208936	0.32	0.001776	-0.000489	0.029830	0.208936	0.2401	0.4900	0.7680	0.1960
0.000854	-0.001440	0.029741	0.226069	0.34	0.000854	-0.000288	0.017845	0.226069	0.2445	0.4944	0.8160	0.1978
0.000313	-0.000664	0.013935	0.239040	0.36	0.000313	-0.000133	0.008361	0.239040	0.2476	0.4976	0.8640	0.1990
0.000062	-0.000170	0.003643	0.247191	0.38	0.000062	-0.000034	0.002186	0.247191	0.2494	0.4994	0.9120	0.1998
0.000000	0.000000	0.000000	0.250000	0.4	0.000000	0.000000	0.000000	0.250000	0.2500	0.5000	0.9600	0.2000
0.000029	-0.000175	0.003894	0.247093	0.42	0.000029	-0.000035	0.002337	0.247093	0.2494	0.4994	1.0080	0.1998
0.000052	-0.000699	0.015937	0.238258	0.44	0.000052	-0.000140	0.009562	0.238258	0.2477	0.4977	1.0560	0.1991

-0.000019	-0.001557	0.036443	0.223451	0.46	-0.000019	-0.000311	0.021866	0.223451	0.2450	0.4950	1.1040	0.1980
-0.000260	-0.002716	0.065415	0.202800	0.48	-0.000260	-0.000543	0.039249	0.202800	0.2412	0.4912	1.1520	0.1965
-0.000732	-0.004123	0.102539	0.176606	0.5	-0.000732	-0.000825	0.061523	0.176606	0.2366	0.4864	1.2000	0.1946
-0.001483	-0.005711	0.147184	0.145340	0.52	-0.001483	-0.001142	0.088310	0.145340	0.2310	0.4807	1.2480	0.1923
-0.002537	-0.007394	0.198412	0.109633	0.54	-0.002537	-0.001479	0.119047	0.109633	0.2247	0.4740	1.2960	0.1896
-0.003903	-0.009076	0.254994	0.070270	0.56	-0.003903	-0.001815	0.152997	0.070270	0.2175	0.4664	1.3440	0.1866
-0.005568	-0.010650	0.315434	0.028170	0.58	-0.005568	-0.002130	0.189261	0.028170	0.2097	0.4580	1.3920	0.1832
-0.007500	-0.012000	0.378000	-0.015625	0.6	-0.007500	-0.002400	0.226800	-0.015625	0.2013	0.4486	1.4400	0.1795
-0.009648	-0.013011	0.440763	-0.059978	0.62	-0.009648	-0.002602	0.264458	-0.059978	0.1922	0.4384	1.4880	0.1754
-0.011944	-0.013566	0.501645	-0.103680	0.64	-0.011944	-0.002713	0.300987	-0.103680	0.1827	0.4274	1.5360	0.1710
-0.014304	-0.013558	0.558472	-0.145477	0.66	-0.014304	-0.002712	0.335083	-0.145477	0.1726	0.4154	1.5840	0.1662
-0.016633	-0.012890	0.609036	-0.184104	0.68	-0.016633	-0.002578	0.365422	-0.184104	0.1621	0.4026	1.6320	0.1610
-0.018826	-0.011484	0.651164	-0.218323	0.7	-0.018826	-0.002297	0.390698	-0.218323	0.1513	0.3889	1.6800	0.1556
-0.020773	-0.009290	0.682795	-0.246960	0.72	-0.020773	-0.001858	0.409677	-0.246960	0.1401	0.3743	1.7280	0.1497
-0.022363	-0.006286	0.702065	-0.268950	0.74	-0.022363	-0.001257	0.421239	-0.268950	0.1287	0.3587	1.7760	0.1435
-0.023491	-0.002495	0.707398	-0.283385	0.76	-0.023491	-0.000499	0.424439	-0.283385	0.1171	0.3421	1.8240	0.1369
-0.024063	0.002013	0.697607	-0.289561	0.78	-0.024063	0.000403	0.418564	-0.289561	0.1053	0.3246	1.8720	0.1298
-0.024000	0.007111	0.672000	-0.287037	0.8	-0.024000	0.001422	0.403200	-0.287037	0.0936	0.3059	1.9200	0.1224
-0.023250	0.012602	0.630494	-0.275691	0.82	-0.023250	0.002520	0.378296	-0.275691	0.0819	0.2861	1.9680	0.1145
-0.021792	0.018214	0.573737	-0.255780	0.84	-0.021792	0.003643	0.344242	-0.255780	0.0703	0.2652	2.0160	0.1061
-0.019645	0.023584	0.503243	-0.228010	0.86	-0.019645	0.004717	0.301946	-0.228010	0.0590	0.2429	2.0640	0.0972
-0.016879	0.028250	0.421521	-0.193600	0.88	-0.016879	0.005650	0.252913	-0.193600	0.0481	0.2193	2.1120	0.0877
-0.013623	0.031641	0.332227	-0.154358	0.9	-0.013623	0.006328	0.199336	-0.154358	0.0377	0.1941	2.1600	0.0776
-0.010075	0.033059	0.240310	-0.112755	0.92	-0.010075	0.006612	0.144186	-0.112755	0.0280	0.1672	2.2080	0.0669
-0.006514	0.031670	0.152179	-0.072008	0.94	-0.006514	0.006334	0.091307	-0.072008	0.0191	0.1383	2.2560	0.0553
-0.003312	0.026493	0.075866	-0.036160	0.96	-0.003312	0.005299	0.045520	-0.036160	0.0113	0.1065	2.3040	0.0426
-0.000943	0.016378	0.021202	-0.010169	0.98	-0.000943	0.003276	0.012721	-0.010169	0.0049	0.0699	2.3520	0.0280
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.0000	0.0000	2.4000	0.0000

BIBLIOGRAFÍA

- [1] “*Mathematical formulation of bodies of revolution*” (1950) por L. LANDWEBER y M. GERTLER, Navy Department, The David W. Taylor Model Basin, Washington.
- [2] “*Hydrodynamics in Ship Design*” (1957) por HAROLD E. SAUNDERS, Captain, U. S. Navy, The Society Naval Architects and Marine Engineers.
- [3] “*Fluid-Dynamic Drag: theoretical, experimental and statistical information*” (1965) por SIGHARD F. HOERNER, Doctor Ingeniero.
- [4] “*Resistencia Viscosa de Buques*” (1972) por JOSÉ ANTONIO ALÁEZ ZAZURCA, Doctor Ingeniero Naval, Canal de Experiencias de El Pardo.
- [5] Tesis “*Estimación de la Velocidad del Buque en Aguas tranquilas a partir de ensayos con modelos, y análisis de pruebas*” (1971) por HONORIO SIERRA CANO, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, Madrid.
- [6] “*Manned submersibles*” (1976) por R. FRANK BUSBY, Office of the Oceanographer of the Navy, Arlington, Virginia.
- [7] “*Proceedings of the Workshop on Ship Wave-Resistance Computations. Volume I*” (1979) por el David W. Taylor Naval Ship Research and Development Centre, Bethesda, Maryland.
- [8] “*Submarine Design and Development*” (1984) por NORMAN FRIEDMAN.
- [9] “*Principios de Teoría del Buque. Dinámica*” (1993) por JOSÉ M. DE JUAN-GARCÍA AGUADO, Profesor Titular Escuela Universitaria de Ferrol.
- [10] “*Mechanics of Fluids*” (2002) por MERLE C. POTTER y David C. Wiggert.
- [11] “*Ship Hydrostatics and Stability*” (2003) por ADRIAN BIRAN, Faculty of Mechanical Engineering of the Technion-Israel Institute of Technology.
- [12] “*Some Aspects of Submarine Design. Part 1. Hydrodynamics*” (2004) por PROF. P. N. JOUBERT, Maritime Platforms Division. Platforms Sciences Laboratory. University of Melbourne.
- [13] Tesis “*Comparative Naval Architecture Analysis of Diesel Submarines*” (2005) por KAI OSCAR TORKELOSON, Massachusetts Institute of Technology.
- [14] “*Some Aspects of Submarine Design. Part 2. Shape of a Submarine*” (2006) por PROF. P. N. JOUBERT, Maritime Platforms Division. Platforms Sciences Laboratory. University of Melbourne.

- [15] “*Density as a Cost-driver in Naval Submarine. Design and Procurement*” (2008) por BENJAMIN P. GRANT, Defence Acquisition Research, Naval School of Monterey, California.
- [16] “*Mecánica de Fluidos General*” (2009) por MANUEL M. SÁNCHEZ NIETO, Profesor Titular de Mecánica de Fluidos, Universidad Politécnica de Cartagena.
- [17] Artículo “*Modelling and Control of a Variable-Length AUV*” (2006) por ROB MCEWEN, Monterey Bay Aquarium Research Institute.
- [18] Artículo “*Modelado hidrodinámico y de ecosistemas en el Mar Menor*” por Javier Gilabert Cervera integrado en el libro “*El Mar Menor. Estado actual del conocimiento científico*” (2009) por la FUNDACIÓN INSTITUTO EUROMEDITERRÁNEO DEL AGUA.
- [19] “*La Arquitectura Naval en el EXAMEN MARÍTIMO*” (2010) por FRANCISCO FERNÁNDEZ GONZÁLEZ, contribución al homenaje a Jorge Juan y Santacilia. Real Academia de Ingeniería.

