



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Trabajo Fin de Grado

Implementación de una interfaz gráfica en MatLab para el cálculo de potencia en Catamaranes mediante la estimación y análisis paramétricos a través de diferentes métodos numéricos

Bajo la dirección de:

**Sonia Busquier Sáez
Juan Ruiz Álvarez**

Alumno:

**Germán Lozano Oliva
2019/2020**

Agradecimientos:

Quiero dedicar todos mis agradecimientos a todas las personas que siempre han estado apoyándome durante todos estos momentos, malos y buenos, ayudándome a no abandonar nunca. Especialmente a mi familia y compañeros que han sufrido conmigo y me han ayudado en los tiempos difíciles.

También agradecer tanto a Sonia como a Juan por la dedicación y ayuda prestada para la realización de este proyecto.

Índice

1.	Motivación	6
2.	Prefacio	7
3.	Introducción	8
4.	Historia del Arte	9
4.1	Historia del Catamarán.....	9
4.2	Descripción del Catamarán	11
4.3	Beneficios e Inconvenientes del catamarán frente al monocasco	11
4.4	Resistencia en catamaranes	13
4.5	Cálculo de la resistencia en catamaranes	15
4.6	Tipos de catamaranes.....	15
4.6.1	Clasificación básica de buques	15
4.6.2	Clasificación básica de buques tipo catamarán	16
a.	Catamarán.....	16
b.	Trimarán	17
c.	S.W.A.T.H (Small Waterplane Area Twin Hulls)	17
d.	S.E.S (Surface Effect Ship)	18
e.	Wave Piercer	19
4.6.3	Segunda clasificación de catamaranes.....	20
a.	Catamaranes de propulsión a vela	20
b.	Catamaranes de propulsión a motor.....	21
5.	Conceptos previos.....	23
5.1	Arquitectura y Construcción Naval	23
5.2	Conceptos hidrodinámicos	31
6.	Métodos de análisis y estimación de potencia	37
6.1	Introducción	37
6.2	Introducción histórica de los métodos analíticos	38
6.3	Series Sistemáticas	40
6.4	Métodos numéricos	41
6.5	Componentes de la resistencia para catamaranes	44
6.5.1	Cálculo del factor de forma por el método de Armstrong	45
6.5.2	Cálculo del factor de forma según Molland et al.	46

6.5.3	Serie sistemática del método de Sahoo, Browne y Salas.....	47
6.5.4	Cálculo del coeficiente por formación de olas a través del método de Molland et al para catamaranes	49
6.5.5	Método de Ping-Zong	50
6.5.6	Método de la serie De Groot	53
7.	Herramientas matemáticas empleadas	55
7.1	Método iterativo de Newton-Raphson	55
7.2	Herramienta de Cubic B-Splines.....	57
8.	Funcionalidad de la interfaz gráfica	62
9.	Bibliografía.....	89

1. Motivación

Mi motivación a la hora de realizar este proyecto tiene su origen hará unos tres años, fue la primera vez que experimenté lo que es navegar en un catamarán, ahí me di cuenta de que era el catamarán el tipo de buque que más interés suscitaba en mí. El catamarán es un tipo de buque que tiene distintas posibilidades de uso, esto ofrece una gran variedad de estudio. Concretamente los catamaranes diseñados para competición deben tener una resistencia al avance muy inferior respecto a cualquier otro tipo de catamarán o buque. Por lo que también es interesante desde este punto de vista realizar este proyecto.

Otra razón que me motivó a realizar este proyecto y basarlo en estimación de la resistencia al avance para catamaranes es principalmente debido a la asignatura cursada en el grado llamada: Hidrodinámica, Resistencia y propulsión. Es en esta asignatura cuando comenzamos a conocer los conceptos generales para la estimación de la resistencia que deberá superar un buque para lograr su avance, así como la predicción necesaria de potencia para la propulsión de éste.

Una de las motivaciones que he tenido para realizar este proyecto es debida a la asignatura cursada en primero de grado: Informática. Donde comenzamos de manera básica a manejar el lenguaje de programación MatLab, que veo de una gran utilidad para simplificar el estudio y estimación de la resistencia al avance en catamaranes.

Por esa razón veo de gran utilidad realizar este proyecto, para poder facilitar y mejorar el estudio en catamaranes.

2. Prefacio

En nuestro proyecto realizaremos un estudio para el cálculo y estimación de la resistencia ejercida al avance en embarcaciones de tipo catamarán a través de métodos numéricos de predicción de resistencia. No todos los métodos conocidos pueden ser aplicados a este tipo de embarcaciones, para encontrar el método óptimo debemos comparar más de un método.

Una vez que sabemos aquellos métodos numéricos que pueden ser interesantes para la predicción de resistencia en catamaranes, se implementarán en una interfaz gráfica que vamos a programar con el objetivo de facilitar los cálculos al usuario a través de MatLab.

3. Introducción

El ser humano desde la antigüedad ha estudiado y perfeccionado la construcción de los barcos, motivado principalmente por dos razones: el deseo de emigrar, es decir, la búsqueda de tierras mejores para instalarse y vivir, y la necesidad de encontrar las condiciones y productos adecuadas para el comercio. Antes de la invención del ferrocarril y el avión, el barco era el medio de transporte más utilizado, ya que en esos tiempos era el medio más veloz y con mayor capacidad.

Debido a estas actividades, comenzaron a surgir conflictos entre las gentes, lo que provocó que se comenzara a combatir en la mar, por tanto, derivó en un tercer tipo de barco, si realizamos una clasificación muy básica de los barcos:

- Barcos de transporte de personas.
- Barcos de transporte de mercancías.
- Barcos de guerra.

Actualmente, debido a los avances tecnológicos, se ha visto como el barco como medio de transporte de personas ha sido casi en su totalidad remplazado por los automóviles, aviones y trenes ya que estos son capaces de alcanzar unas velocidades muy superiores a las alcanzadas por los barcos.

Sin embargo, si hablamos del transporte de mercancías, el barco sigue siendo el medio de transporte más utilizado, sobre todo para el transporte de mercancías a gran escala, donde la capacidad de buques como portacontenedores, buques graneleros y de transporte de minerales o petróleo crudo, es mucho mayor que la capacidad de cualquier otro medio de transporte.

Como se mencionaba anteriormente, en los barcos ha sido posible un avance tan significativo en cuanto a la velocidad que estos pueden alcanzar. Y esto es debido a que los barcos al navegar en el agua sufren una resistencia de fricción en la obra viva del barco sea muy superior a la que pueda sufrir otro vehículo o medio de transporte.

Pero no solo se ve afectada la velocidad de un barco por la resistencia de fricción al navegar en agua, además al estar el barco en contacto con el agua y el aire comienzan a producirse olas en la superficie libre entre el agua y el aire. Estas olas provocan una resistencia al avance que será llamada la resistencia por formación de olas, esta resistencia se ve aumentada al aumentar la velocidad. Entonces se llega a un punto donde para conseguir aumentos de velocidad, se necesitan grandes aumentos de la potencia de propulsión que son realmente costosos.

También se debe tener en cuenta que el estado del mar es un factor importante en cuanto a la velocidad que un barco puede llegar a alcanzar, ya que, en tiempos de mala mar, el barco se ve sometido a movimientos que aparte de aumentar la resistencia al avance de él mismo, provoca en los tripulantes y pasajeros una incomodidad, además de una disminución de la seguridad a bordo, que obliga al capitán a navegar a una velocidad menor de la deseada.

Existen actualmente un tipo de barcos conocidos como barcos de navegación rápida, donde se consiguen unas velocidades superiores a las que se pueden alcanzar en los barcos convencionales, pero los costes de producción y construcción son mucho mayores que los empleados para construir los barcos convencionales, es por ello que este tipo de embarcaciones veloces tienen misiones distintas a las comerciales, como barcos de salvamento, barcos de guerra o embarcaciones dedicadas a la competición.

4. Historia del Arte

4.1 Historia del Catamarán

La propia palabra catamarán viene del inglés catamaran, que a su vez viene del tamil, uno de los idiomas más antiguos hablados actualmente y aunque su origen específico es desconocido se sabe que se desarrolló en la zona sur de la India. Kattumaram en tamil, donde kattu significa atar o bloque y maram significa madera o árbol.

Se dice que la tribu de los paravas fue la pionera en la construcción y uso de este tipo de embarcaciones, sin embargo, se ha descubierto que fueron los pueblos austronesios quienes hace tres mil o cuatro mil años, usaron este tipo de embarcaciones para colonizar lo que actualmente conocemos como Polinesia.

Siempre se ha dicho que fue el pirata y aventurero británico William Dampier quien descubrió los catamaranes mientras navegaba por la región de Tamil Nadu en la India en el año 1697. Sin embargo, los primeros dibujos y descripciones sobre embarcaciones de doble casco se datan del año 1618 y 1622, debido a las anotaciones de los exploradores y cartógrafos holandeses.

Pero no fue hasta el año 1662 cuando William Petty reclamó la invención de una embarcación de doble casco como propia, siendo esta afirmación no del todo cierta, ya que en una de sus travesías por el Pacífico tuvo contacto con este tipo de embarcaciones tripuladas por las tribus de las islas del Pacífico. La descripción que Petty hizo en uno de sus escritos tras una de sus travesías sobre este tipo de embarcaciones fue, “se trataba de una embarcación con una canoa auxiliar a bordo, la cual navegaba mejor que cualquiera de nuestras embarcaciones”.

También se tienen dibujos sobre catamaranes antes de que Petty en el 1662 reclamara la invención del catamarán, esto es gracias al explorador holandés Abel Janszoon Tasman que en una de sus expediciones se encontró con una embarcación de este tipo, y en el diario de expedición junto a un dibujo de la embarcación anotó una breve descripción de esta misma, en la que decía que se trataba de una embarcación de vela formada por dos cascos uno situado al lado del otro y unidos por una cubierta que los tapaba. Pero estos descubrimientos no se supieron hasta la publicación de sus diarios dos siglos y medio más tarde.

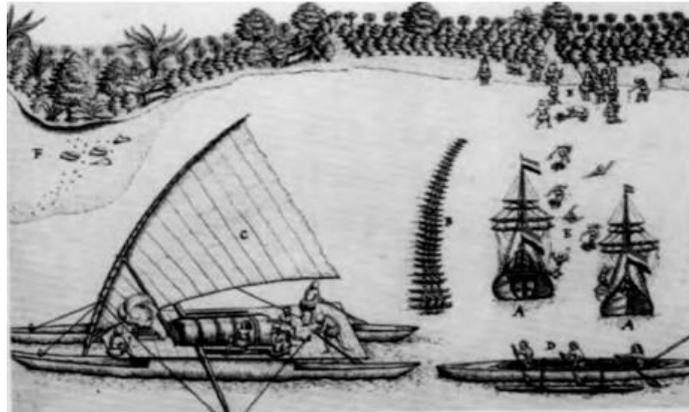


Figura 4.1 Dibujo de un catamarán realizado por el holandés Abel Janszoon Tasman

William Froude siempre fue el pionero en el estudio en tanques sobre las formas más eficientes que puede tener un casco en cuanto a reducir la resistencia al avance de una embarcación. Aunque doscientos años antes Petty ya experimentase en tanques para ese mismo fin.

Para mover sus modelos en los canales de experimentación, se valía de una cuerda que pasaba por una polea de la que hacía descender en agua un peso que tenía colgado de ella, hasta que alcanzase una velocidad uniforme deseada. Se podría decir que Petty fue el primero en plantear la necesidad de aplicar teoremas mecánicos, junto con pruebas con modelos para posteriormente estudiar cómo trasladar los resultados a casos reales.

Finalmente fue en 1682 cuando se botó el primero de sus cuatro embarcaciones de doble casco más importantes, el Simon and Jude, el cual estaba preparado para albergar hasta 40 tripulantes.

También se tiene constancia de un cierto grupo de embarcaciones cañoneras de doble casco construidas en el siglo XVIII y así tener una mejor tolerancia del peso de estos cañones y tener una mejor estabilidad.

En el siglo XIX las embarcaciones de doble casco vieron una impulsión de los diseños de estos tipos tanto de recreo, cañoneros e incluso de propulsión mecánica. Fue en 1814 cuando Robert Fulton diseñó el primer buque de doble casco a propulsión para la USNavy.

Finalmente, El diseño naval, tras la Segunda Guerra Mundial, tuvo un gran desarrollo con el apogeo de las embarcaciones de recreo y el tráfico marítimo. Hacia el final del siglo XX las embarcaciones de configuración multicasco se han ido extendiendo para todo tipo de uso, especialmente las de doble casco y normalmente como embarcaciones de recreo, pero también se ha usado esta configuración en buques militares, sobre todo para misiones rápidas de transporte de carga, así como para la entrada a zonas de menor calado. En los últimos años también se ha visto un aumento de la construcción de catamaranes para embarcaciones de regata y competición.

4.2 Descripción del Catamarán

Se define al catamarán como una embarcación multicasco, es decir, que está formada por dos cascos paralelos del mismo tamaño. Se trata de una embarcación por lo general muy utilizada para el transporte de pasajeros, debido a que, en aguas tranquilas, tiene una estabilidad mayor a la de un buque monocasco convencional.

Esto es debido a que dispones de 2 quillas en lugar de una sola quilla y bulbo, como en las embarcaciones de un solo casco convencionales. Este tipo de embarcaciones tienen un calado por lo general menor que el de los buques monocasco, por lo que la resistencia al avance será menor en un catamarán o buque multicasco que en una embarcación monocasco de tamaño similar. Esto hace que la propulsión necesaria para un catamarán sea menor que para un buque monocasco.

4.3 Beneficios e Inconvenientes del catamarán frente al monocasco

El catamarán o las embarcaciones con configuración de doble casco basan su virtud frente a las embarcaciones monocasco en la división del desplazamiento del buque en más de un cuerpo, en nuestro caso serán dos, paralelos entre sí y unidos mediante una estructura. Esto nos proporciona una serie de ventajas:

- Nuestra relación entre el desplazamiento y la eslora de los cuerpos en catamaranes será menor que en embarcaciones monocasco a igual eslora, lo que nos proporciona la posibilidad de reducir en gran medida la resistencia a altas velocidades sin tener en cuenta la pérdida de estabilidad que sufriría una embarcación monocasco, ya que esta debería tener unas formas finas para conseguir la misma velocidad que las embarcaciones de doble casco.
- Al tener un momento de inercia de flotación grande provoca que la estabilidad transversal sea mayor que para embarcaciones monocasco de igual eslora o desplazamiento.

- Los catamaranes cuentan con una mayor área útil de cubierta que un monocasco de misma eslora o desplazamiento.
- Se tiene un mejor momento de giro cuando se maniobra con las hélices, debido a que, al estar posicionadas en la popa de cada uno de los cuerpos, estas estarán bastante separadas transversalmente.
- Además, al tener una mejor estabilidad y una mayor superficie de cubierta, se tiene una mayor libertad de configuración de la disposición general que la que se tendría en una embarcación monocasco.

Los inconvenientes que puede presentar una embarcación de doble casco serían:

- Los catamaranes tienen un peor comportamiento a bajas velocidades debido a que la superficie mojada por los dos cascos es el doble que la de un buque monocasco de misma eslora y/o mismo desplazamiento. Y por tanto la resistencia de fricción a baja velocidad es muy superior.
- Tener una relación carga útil/peso baja de la estructura de los catamaranes por el peso adicional que supone la superestructura que unirá los dos cascos. Pero con la evolución y descubrimientos de los materiales ligeros como la fibra de carbono o las resinas especiales esto ha cambiado y provocado que sea factible el aprovechamiento de los beneficios y ventajas de los buques de tipo doble casco sin que nos provoque un incremento del peso mayor.
- Otro inconveniente son las cargas hidrodinámicas que soporta la parte inferior de la estructura que une los dos cuerpos originadas por el impacto de las olas cuando navegamos en mala mar. Esto se puede evitar manteniendo una distancia suficiente entre la estructura de unión y el mar. Debido a esto, en una embarcación de doble casco, no se pueden permitir grandes variaciones de calado cuando nos encontramos dos situaciones de carga distintas. Por esta razón los catamaranes soportan pocos cambios en la carga que deba transportar.

Estas virtudes y problemas nos ofrecen una idea de las posibles aplicaciones de una embarcación de doble casco. Probablemente tendrá que moverse a altas velocidades donde predomine la resistencia por formación de olas por encima de la resistencia de fricción. Será necesario contar con gran cantidad de área útil de cubierta y el peso muerto no deberá sobrepasar el diez por ciento del desplazamiento del barco cuando este se encuentra en situación de plena carga. Aunque la aplicación de los catamaranes sea como embarcaciones veloces, se sabe de casos en los que se han utilizado como embarcaciones lentas, aprovechando sus otras cualidades.

La gran mayoría de las embarcaciones de doble casco de reciente construcción son transbordadores o ferris para travesías cortas y que navegan por zonas de semiplano con excelente estabilidad y maniobrabilidad. Suelen tener una eslora entre 25 y 50 metros y la cantidad de pasajeros que pueden llevar varía entre la centena y los mil.

En la actualidad el uso más común del catamarán es como embarcación de recreo de vela. Normalmente, un yate a vela de una embarcación monocasco debe llevar lastre para corregir el par escorante que produce la vela, esto provoca que aumente el desplazamiento de la embarcación por lo que será necesaria más vela, para mantener la velocidad deseada, con lo que conlleva más tamaño y peso de aparejos y palos, esto nos lleva a una espiral difícil de la que salir, ya que una arboladura más pesada hará aumentar el desplazamiento de la embarcación y será más difícil llegar a la velocidad que se desea.

A demás, los barcos de doble casco no es necesario que lleven lastre, gracias a la separación que se cuenta entre los dos cuerpos, le confiere de una estabilidad suficiente para poder tener una mayor cantidad de superficie velica en comparación con un buque monocasco, sin que peligre la seguridad de la embarcación de doble casco.

4.4 Resistencia en catamaranes

Normalmente en zonas donde el valor del número de Froude es bajo, la resistencia al avance en catamaranes será superior que en embarcaciones monocasco de igual desplazamiento o eslora ya que predomina en esas zonas la resistencia de fricción, esto es debido en gran medida a que la superficie mojada de los dos cuerpos del catamarán será mayor que la de una embarcación monocasco. Cuando nos encontramos a velocidades más elevadas la resistencia por formación de olas tiene un papel más importante, ya que en catamaranes cuando se navega a altas velocidades la resistencia por formación de olas es menor que en embarcaciones monocascos, esto se debe a que normalmente los cascos de los catamaranes suelen tener unas formas más esbeltas.

Sin embargo, la característica principal en cuanto a la resistencia al avance en embarcaciones multicasco, y la que más inconvenientes y complejidad representa es la que se debe a la interferencia de los flujos que rodean los cuerpos del catamarán. Esta interferencia sería de dos tipos, la que es debida a los sistemas de olas generados por los dos cuerpos del catamarán y la que surge como consecuencia de un cambio en el flujo que rodee un casco por la presencia del otro casco.

Interesa remarcar que la resistencia de una embarcación monocasco varía en función de su geometría y la resistencia en un catamarán dependerá de la separación entre sus cuerpos. Es por esta razón que no existen unas series sistemáticas para catamaranes, ya que los resultados cambiarían según la separación de los cuerpos. La resistencia es mayor cuanto más cerca están los cuerpos en sentido transversal e irá disminuyendo según vayan alejándose los cuerpos del catamarán, hasta que llega un punto donde la resistencia no disminuye por más que se vayan separando los cuerpos. Es importante saber que una mayor separación entre los cuerpos conlleva un aumento del peso de la estructura de unión, ya que esta debe ser más resistente.

La interferencia que se debe a las olas surge a la superposición de diferentes sistemas de olas originados por los cascos del catamarán haciendo que la cuantía de la resistencia por formación de olas del catamarán se pueda ver modificada, afectando sobre todo cuando navegamos a altas velocidades que es cuando mayor es este valor de resistencia. Cuando las crestas o los senos del sistema de olas generado por un cuerpo coinciden con el generado por el otro cuerpo el catamarán en un lugar en concreto, esto provoca que la amplitud del sistema de olas resultante sea mayor, de mismo modo ocurre con el nivel de la resistencia por formación de olas ya que es función del cuadrado de la amplitud de la ola.

Una manera de solucionar esto sería instalando más potencia propulsora, lo que en embarcaciones con propulsión a vela supone un aumento del peso de la arboladura y superficie velica, en embarcaciones monocasco esto muchas veces no es posible debido a limitaciones de estabilidad y resistencia mecánica. La ventaja de los catamaranes en este aspecto reside en que, al tener más estabilidad transversal, puede soportar mayor superficie velica con seguridad. Y al tener más área de cubierta las velas pueden extenderse más en sentido horizontal que vertical, por lo que el par escorante disminuye.

Hay distintas posibilidades para hacer que haya una buena interferencia entre los distintos sistemas de olas, sin embargo, una de ellas es imposible de realizar ya que se trataría de separar longitudinalmente los cuerpos del catamarán para que las proas no coincidan. Otra posibilidad sería que la eslora de los cuerpos del catamarán no sea la misma, pero esta solución sólo tiene utilidad en embarcaciones deportivas o de recreo.

Otro tipo de interferencia que afecta a la resistencia al avance en catamaranes es la que surge por el cambio de flujo que rodea cada cuerpo del catamarán, debido a la presencia del otro. El cálculo de la resistencia generada de este modo es muy complicado, ya que depende de la geometría de los cuerpos del catamarán y de la separación de estos en sentido transversal.

Existe otro tipo de interferencia que únicamente se da cuando se superan velocidades por encima de un valor de 0,5 de Froude, esta se da cuando dos cascos planean paralelamente.

La principal y fundamental característica de la forma de los cascos del catamarán es porque sus formas son más finas y esbeltas que los de una embarcación monocasco con misma eslora y/o desplazamiento. La esbeltez, si hablamos de formas en cascos, se trata de la cantidad de desplazamiento que lleva una determinada eslora, viene representado por la relación entre la eslora y la raíz cúbica del desplazamiento. Esta finura en los cascos de los catamaranes previene que la resistencia por formación de olas no aumente demasiado cuando se está navegando a altas velocidades. En monocascos, debido a los criterios de estabilidad no se tiene la misma libertad de configuración de las dimensiones como en catamaranes. Por ejemplo, en monocascos su relación eslora-manga no será superior de cinco a seis, mientras que en catamaranes la relación será siempre superior siete a uno.

4.5 Cálculo de la resistencia en catamaranes

El cálculo para la resistencia al avance en catamaranes es bastante complejo si antes no se han realizado ensayos con modelos a escala reducida. Esta dificultad se debe en primer lugar, a que las formas de los cascos de los catamaranes son muy diferentes a las de las series sistemáticas para embarcaciones monocasco. Incluso para casos de catamaranes con cascos simétricos los resultados solo serían aplicables a series sistemáticas muy especiales. Además la resistencia en el avance para catamaranes depende también de la separación de los cascos, ya que la variación de esta separación cambia los valores de la resistencia al avance.

Por esa razón, el mejor método para calcular y estimar la resistencia al avance en catamaranes es con el ensayo con modelos, así podemos determinar la separación adecuada para unas formas concretas. El inconveniente de este procedimiento es que es muy costoso y en ocasiones, no merezca la pena realizarlo, sobre todo en fases iniciales del proyecto.

El único modo de calcular la resistencia al avance de un catamarán, aunque sea de un modo muy aproximativo, es calculando la resistencia al avance de un casco y posteriormente aplicar algún factor de interferencia de los mencionados anteriormente.

Habitualmente se sigue la línea de la ITTC 1975 junto con un factor de forma, el factor de forma se usa para obtener una estimación del valor de la componente viscosa en la resistencia al avance. En catamaranes, el factor de forma abarca los efectos producidos por las distintas interacciones de los cascos del catamarán, que ya hemos mencionado anteriormente. El objetivo es obtener un factor de forma con una magnitud apropiada a su sujeción con el casco y los diferentes parámetros de operación.

4.6 Tipos de catamaranes

Para un mejor entendimiento de las aplicaciones de los catamaranes, vamos a ubicar al catamarán entre los distintos tipos de embarcaciones, así como una distinción de los distintos tipos de catamaranes que podemos encontrar.

4.6.1 Clasificación básica de buques

Tenemos diferentes maneras para clasificar los buques, según su procedimiento de diseño o según su dimensión de mayor importancia, se puede realizar una clasificación como la siguiente:

- Buques de peso muerto: Buques como los petroleros o bulkcarriers, donde su dimensión crítica es el peso muerto, lo que es capaz de modificar las demás características de diseño.
- Buques de volumen: Donde su característica principal es el volumen de bodegas y suele llevar cargas de poco peso pero que cuentan con un factor de estiba de dos metros cúbicos por tonelada.

- Buques de dimensiones lineales: Aquellos en los que una dimensión lineal como la eslora, la manga, el puntal..., es limitada por condiciones que provengan del exterior o limitada por su capacidad de carga. Estas limitaciones normalmente vienen impuestas por los canales de paso requeridos por las rutas en las que vaya a navegar el buque.
- Buques de cargas modulares: Buques que transportan cargas de tamaño estandarizado, las dimensiones de estos buques varían poco según las medidas de la carga normalizada. El buque característico es el portacontenedor.
- Buques de servicio: Su característica crítica para su dimensionamiento es la estabilidad y serían los remolcadores los buques tipos.
- Buques para propósitos especiales: Se trata de buques que no se pueden clasificar siguiendo los criterios anteriores descritos, ya que basan su dimensionamiento en las operaciones que van a realizar y las condiciones en las que se van a encontrar. Como pueden ser los barcos rompehielos o los barcos hospitales.

Como podemos ver, las embarcaciones multicasco también serían embarcaciones de propósitos especiales, pues su diseño depende de la velocidad, el tipo específico y el tamaño.

4.6.2 Clasificación básica de buques tipo catamarán.

a. Catamarán

Un catamarán es una embarcación compuesta por dos cascos, separados entre sí transversalmente una distancia y unidos mediante una estructura resistente. Suelen navegar a velocidades medias o elevadas, e incluso pueden planear o hacerlo de manera parcial. A partir del diseño principal de catamarán han ido surgiendo distintos tipos de catamaranes que vamos a describir a continuación.

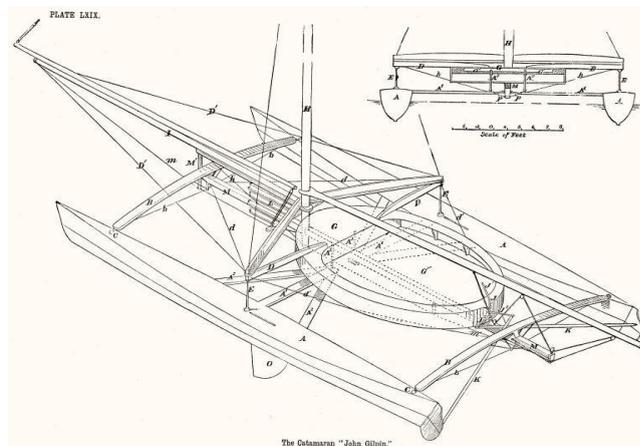


Figura 4.2 diseño catamarán de John Gilpin 1891

b. Trimarán

El trimarán es una embarcación multicasco que consta de un casco principal y dos cascos secundarios a los costados del principal, separados de este en sentido transversal una distancia equivalente.

Suelen ser embarcaciones utilizadas para recreo o competición a vela, aunque en el año 2005 se construyó el primer trimarán para transporte de pasajeros, el trimarán Benchijigua Express. Actualmente en España se utilizan trimaranes para el transporte de pasajeros entre las Islas Canarias.

Este diseño concreto de embarcación ha servido para inspirar el diseño de otros tipos de buques modernos de guerra, como el RV Triton.

Los trimaranes son embarcaciones más adecuadas para navegar en mares turbulentos, además como el adrizado es producido por los cascos laterales y no por una quilla pesada que se encuentra sumergida, los trimaranes son más ligeros y rápidos que las embarcaciones monocasco. Tienen el gran inconveniente de que no son capaces de virar repentinamente. En cuanto a la seguridad, se considera que los trimaranes son embarcaciones de mayor seguridad que los monocascos ya que son más difíciles de volcar debido a su gran estabilidad.



Figura 4.3 Trimarán Maserati Ulti 70.

c. S.W.A.T.H (Small Waterplane Area Twin Hulls)

Es una embarcación de tipo catamarán, pero con una leve superficie de flotación. Tiene una propulsión a motor en la que los dos cascos forman la embarcación están hundidos a mayor profundidad que en un catamarán o trimarán, y donde la estructura de unión de los dos cuerpos está unida a los cuerpos por unas juntas al nivel de flotación, lo que hace parecer que la estructura superior esté apoyada sobre dos submarinos.

Esta configuración tan concreta le brinda una serie de características respecto a los catamaranes o trimaranes que le hace ser diferenciado, como son:

- Tiene una mejor estabilidad navegando en mala mar, gracias a que los cuerpos están sumergidos a más profundidad, tiene menos superficie en la línea de flotación lo que hace que el barco sufra menos los efectos desestabilizadores del oleaje y el viento.
- Tiene una menor resistencia por formación de olas.
- Al tener mayor superficie sumergida se ve incrementada la resistencia de fricción, lo que a su vez supone una mayor demanda de capacidad propulsora.
- Cuentan con una mayor área de cubierta.
- No tiene una gran capacidad de carga, ya que los cambios importantes de peso suponen grandes cambios de calado lo cual afecta a la cercanía de la estructura de unión con el agua.



Figura 4.4 MCS Sirocco.

d. S.E.S (Surface Effect Ship)

Se trata de una embarcación que se podría definir como un híbrido entre un aerodeslizador y un catamarán, ya que cuenta con un colchón de aire y a su vez está formado por dos cascos iguales.

Si el colchón de aire está funcionando, solo se encuentra sumergida una parte de los cascos, sin embargo, cuando no está trabajando el colchón de aire los cascos se encuentran sumergidos completamente y soportan toda la estructura.

Se pueden diferenciar dos ventajas principales, tiene mayor resistencia cuando actúa por aire o mar y puede utilizar propulsión a chorro ya que las boquillas de entrada siempre se encuentran sumergidas. En la actualidad su aplicación es básicamente como trasbordador.



Figura 4.5 Surface Effect Ship SES 200. Armada de Estados Unidos

e. Wave Piercer

Se trata de una embarcación diseñada con una proa muy fina y de flotación reducida, de manera que el casco de la embarcación atraviesa las olas, por lo tanto, en catamaranes o trimaranes, cada casco atravesará las olas en lugar de navegar sobre ellas. Esto le proporciona la capacidad de alcanzar elevadas velocidades y navegar en situaciones de mala mar más fácilmente.

En comparación con diseños de cascos convencionales, se consigue un viaje más suave y un menor estrés mecánico, además de una menor resistencia por formación de olas. Su cubierta tendrá una configuración entre cascos suele de una forma similar a una V así se verá favorecida la penetración del casco en las olas.

En la práctica esta configuración se recomienda para catamaranes y trimaranes, ya que para su diseño se necesitan embarcaciones de cascos largos y delgados. Tienen su aplicación en barcos trsbordadores y militares.



Figura 4.6 Condor Express. Catamarán Wave Piercing de pasajeros.

4.6.3 Segunda clasificación de catamaranes.

Actualmente los catamaranes están enfocados en ser usados para operaciones que requieran grandes velocidades. En esta clasificación nos disponemos a diferenciar entre los medios de propulsión más usados en catamaranes, propulsión a vela y propulsión a motor.

a. Catamaranes de propulsión a vela

La propulsión a vela en los yates catamarán es de las más utilizadas, esto a sido posible gracias a mejora y utilización de materiales ligeros y las resinas, que nos han permitido provechar las ventajas de las embarcaciones multicasco sin que eso conlleve un gran aumento de peso que nos sería perjudicial. Podemos diferenciar dos tipos de catamaranes propulsados a vela:

- Catamarán de regata o deportivo: Están diseñados para ser tripulados por un pequeño número de personas, la mayoría disponen de una tela elástica como estructura de unión entre los cascos y tienen un solo mástil para una vela. Están construidos con los materiales más ligeros conocidos ya que se busca aprovechar al máximo las ventajas de los catamaranes para alcanzar grandes velocidades.



Figura 4.7 Catamarán de regata GC32.

- Catamarán de crucero: Aunque cuenten con una vela como medio propulsor, estos catamaranes suelen contar a la vez con propulsión a motor, lo cual es una desventaja comparado con los buques monocasco, ya que necesita dos motores y dos timones, uno para cada casco. También se tiene una menor capacidad de carga en comparación con los monocascos.

Las ventajas de contar con una configuración de doble casco nos permiten navegar a mayores velocidades y en zonas de menor profundidad, debido a su menor calados



Figura 4.8 Tag 60 XR. Catamarán de propulsión a vela de lujo.

b. Catamaranes de propulsión a motor

Los catamaranes que utilizan únicamente esta forma de propulsión son porque necesitan alcanzar grandes velocidades a la vez que deben tener una gran área de cubierta y capacidad de carga. La mayoría de estas embarcaciones suelen ser de tipo militar o ferry para el transporte de carga y/o personas.

- Catamarán crucero propulsado a motor: Con esta propulsión se busca alcanzar esas grandes velocidades, junto con una gran estabilidad que permite minimizar los movimientos del buque en el mar. También se consigue tener una mayor área de cubierta para alojamientos y acomodaciones.



Figura 4.9 Catamarán de lujo Flash Cat 70.

- Catamarán de pasaje o ferry: Esta configuración de catamarán propulsado a motor es la más utilizada para el transporte de pasajeros, ya que se provechan

las dos ventajas de los catamaranes, la gran estabilidad y las grandes velocidades, junto con un área de cubierta.



Figura 4.10 Ferry catamarán Molslinjen.

- Catamaranes militares: Las aplicaciones de catamaranes como embarcaciones militares son básicamente para trasbordo de carga y tropas y como entrada y salida en puertos de poco calado.



Figura 4.11 Catamarán Carson City de la armada de Estados Unidos en Gibraltar.

5. Conceptos previos

Previamente a profundizar en los varios métodos de estimación de resistencia al avance y potencia en catamaranes que usaremos, así como el diseño y programación en MATLAB, será necesario la definición de diferentes conceptos y nociones comunes del mundo naval, que pueden ser de diversos ámbitos navales.

5.1 Arquitectura y Construcción Naval

Los conceptos que explicaremos a continuación estarán relacionados con la Arquitectura y la Construcción Naval, nos ayudamos de la asignatura impartida por el profesor Dr. José Alfonso Martínez García, “*Fundamentos de la Construcción Naval*”, y de dónde sacaremos toda la información necesaria para explicar estos conceptos.

- **Casco:** Se trata del forro exterior que cubre y hará estanco al buque, de manera que ayude y favorezca las cualidades hidrodinámicas del mismo.
- **Forro:** Es la superficie que cierra el casco del barco por su exterior del mismo material de construcción que el de todo el casco.

En la construcción naval nos solemos ayudar de una serie de planos imaginarios que sirven para cortar el casco y que serán perpendiculares a ellos mismos.

- **Plano de flotación:** Se trata del plano normal al plano de crujía resultante del plano de la superficie del agua en un mar calmo. Los planos que corten el casco del buque y sean paralelos a este corresponden a los planos de cada flotación del buque, llamadas líneas de agua, de los cuales uno de ellos será el plano de flotación de trazado o proyecto, correspondiente al de trazado del buque.
- **Plano de crujía:** Se trata del plano en sentido longitudinal de simetría, cuya intersección con el casco recibe el nombre de línea de crujía. Los planos longitudinales son los paralelos a este, y las líneas provocadas por el corte del barco con los planos recibirán el nombre de longitudinales.

- Plano transversal:** Se trata del plano perpendicular a los otros dos, donde las intersecciones de estos planos con el casco del buque formarían las distintas cuadernas de trazado o secciones. A través de las cuadernas de trazado podremos construir nuestra caja de cuadernas.

Todos estos conjuntos de planos y líneas que formarían el casco del buque suelen ser representados en planos, que representarán los planos y líneas recientemente explicados, forman el plano de formas del buque.

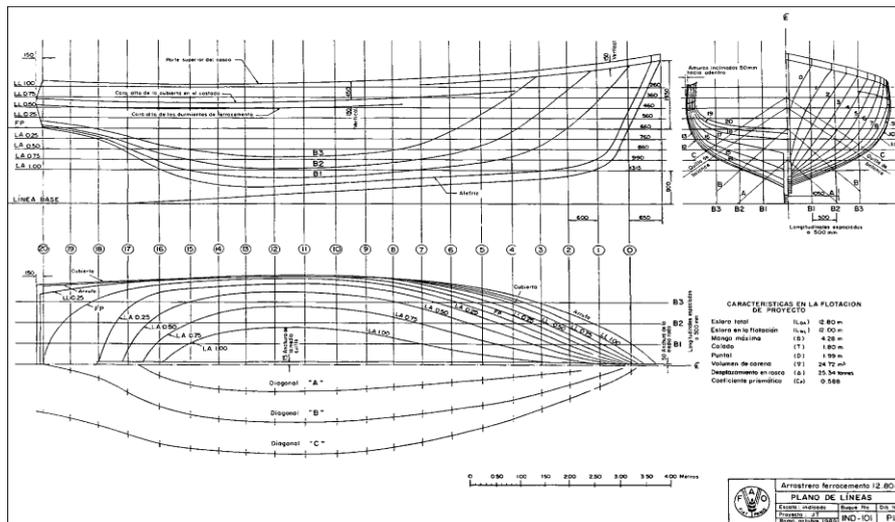


Figura 5.1. Plano de formas de un barco. <http://www.fao.org/3/v9468s/v9468s0r.gif>

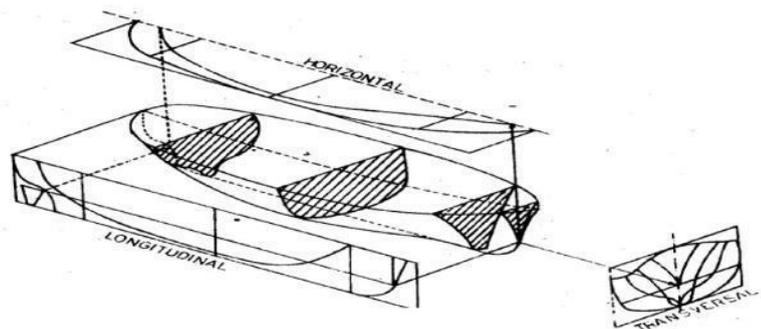
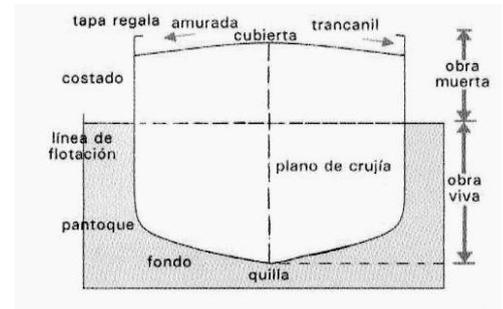
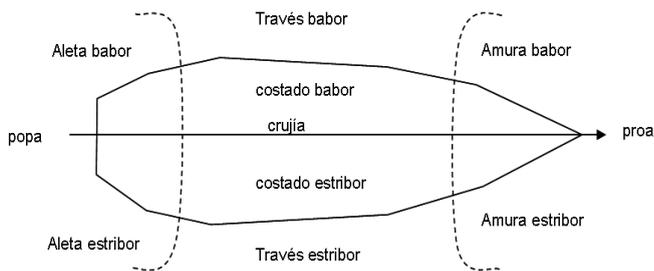


Figura 5.2 Planos de referencia de un barco.

Es necesario diferenciar entre el trazado fuera forros y el trazado fuera miembros. El trazado fuera de miembros se suele utilizar en buques construidos con materiales metálicos, en los que se excluyen las magnitudes de las líneas de trazado al espesor del forro exterior del casco. En cambio, el segundo tipo se suele usar en buques construidos con madera o fibra en las que sí tendríamos en cuenta el espesor del forro exterior.

También deberemos conocer las zonas de referencia de un buque:

- **Proa:** Es la parte delantera en el buque donde se unen las amuras en sentido normal al movimiento de este.
- **Popa:** Es la terminación posterior de la estructura del buque en sentido normal al movimiento de este.
- **Estribor (Er):** Se trata del costado que quedaría a la derecha en una embarcación si se observa de popa a proa.
- **Babor (Br):** Se trataría de la banda izquierda de un buque si el observador se sitúa de popa a proa.
- **Costados:** Se trata de los laterales que constituyen el buque a babor y a estribor y que unen la proa con la popa.
- **Roda:** Es la parte situada en el extremo más a proa del casco del buque donde se unen los costados.
- **Codaste:** Es el elemento de la estructura del barco más a popa del casco, sirve de unión de los costados por debajo de la línea de flotación.
- **Quilla:** Se puede definir como la continuación de la roda por toda la línea de crujía hasta que se une con el codaste.
- **Carena u obra viva:** Es la parte del casco que quedaría bajo la línea de flotación mayor.
- **Obra muerta:** Es la parte del casco que quedaría por encima de la línea de flotación mayor.
- **Superficie mojada (Sm):** Se trata de la superficie exterior de la obra viva o la parte que queda sumergida del casco expresada en m^2 .
- **Cuaderna maestra:** Se trata de la cuaderna o sección principal de la embarcación que tendrá la máxima manga y área por debajo de la línea de flotación de mi embarcación. Estará siempre situada en la parte central del buque, aunque puede no coincidir con la sección media del buque. La sección que corresponde a la cuaderna maestra es llamada sección maestra, que, como a su vez se suele encontrar aproximadamente en la mitad de la eslora, suele llamarse sección media.
- **Área de la maestra (Am):** Se trata del área correspondiente a la sección maestra por debajo de la línea de flotación medida en m^2 .



Figuras 5.3 y 5.4 Representación de las referencias principales del buque.

Las dimensiones principales del buque serán:

- **Eslora (L):** Se trata de la dimensión del barco a lo largo del eje de proa a popa, en la que se pueden diferenciar diferentes medidas de la eslora, de las cuales las más importantes son:
 1. **Eslora entre perpendiculares (Lpp):** Se trata de la distancia medida entre la perpendicular de proa y la perpendicular de popa.
 - (1) **Perpendicular de proa:** Se trata de una línea trazada verticalmente desde la intersección de la flotación de proyecto o trazado con la roda de un barco.
 - (2) **Perpendicular de popa:** Se trata de una línea trazada verticalmente que puede pasar por el eje del timón, si este es compensado o por la cara de popa del codaste popel si el timón y la hélice están en el plano de crujía.
 2. **Eslora de flotación (Lf):** Es la máxima longitud del buque según la flotación en la que nos encontremos.
 3. **Eslora total (Lt):** Se trata de la longitud máxima de nuestro buque, desde el punto más a popa al punto de proa más alejado.

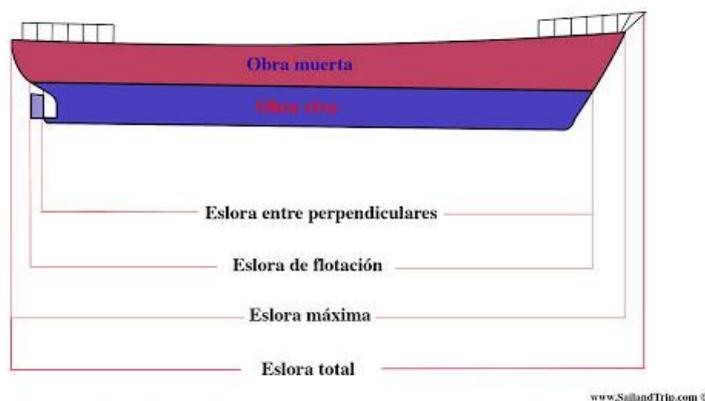


Figura 5.5 Representación de las distintas esloras del buque.

- **Manga (B):** Se trata de la distancia del buque en sentido transversal, de una banda a otra. De entre todas las distintas medidas de la manga que podemos encontrarnos, sólo usaremos la **manga de trazado**, representada por B y que será la dimensión máxima del barco en sentido transversal de babor a estribor.
- **Puntal (D):** Se trata de la distancia en sentido vertical del buque. Podemos tener diferentes medidas del puntal, pero nosotros usaremos el **puntal de trazado** para nuestro proyecto, que será la distancia máxima en sentido vertical de nuestra embarcación, será medida en el costado de la sección media.
- **Calado (T):** Se trata de la distancia medida verticalmente que hace referencia a la parte de la sumergida del buque, entre las que podemos definir distintos tipos de calados:
 - 1) **Calado de trazado:** Se trata de la distancia vertical de la parte sumergida del buque hasta la línea imaginaria de la flotación de trazado o proyecto, de la sección media del buque y representada con la letra T.
 - 2) **Calado en proa (Tpr):** Se trata de la dimensión en sentido vertical en la parte sumergida del buque en la vertical de proa.
 - 3) **Calado en popa (Tpp):** Se trata de la magnitud en sentido vertical de la parte sumergida del buque en la vertical de popa.

Los dos últimos tipos de calado serán tomados en cuenta únicamente si nuestro buque está bajo el efecto del **trimado** o **asiento**.

- **Asiento o trimado (t):** Se trata de la inclinación que asume el buque en sentido longitudinal respecto al agua, el ángulo de tal inclinación con la línea de flotación recibe el nombre de **ángulo de trimado (ϕ)**. Se calcula por la diferencia de calado entre Tpr y Tpp. Si el resultado nos da un valor positivo significa que tenemos un trimado hacia proa, si el resultado nos da un valor negativo, significa que tenemos un trimado hacia popa.



Figura 5.6 Esquema de manga, puntal y calado del buque.

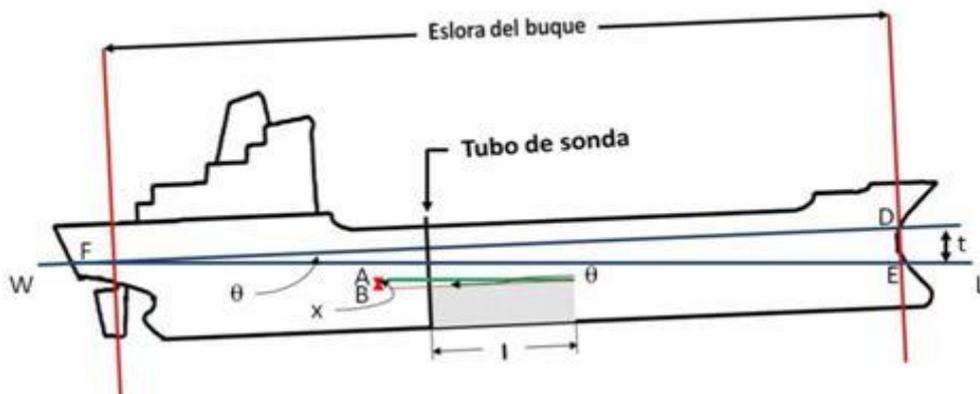


Figura 5.7 Esquema de trimado del buque.

Con la variación de estas dimensiones del buque tendremos una variación del peso de nuestro buque. Este peso recibirá el nombre de **desplazamiento (Δ)**.

- **Desplazamiento (Δ):** Se trata del peso del buque en toneladas cualquiera que sea la condición de carga. Donde el desplazamiento en plena carga será el desplazamiento cuando tenemos nuestro buque cargado en su máxima capacidad. Este depende de dos pesos:
 - 1) **Peso en rosca (PR):** Se trata del peso completo del buque, teniendo en cuenta la estructura, maquinaria, equipos, servicios y fluidos que circulen por sistemas de tuberías.
 - 2) **Peso muerto (PM):** Se trata del peso máximo de carga que se podrá transportar, junto con el combustible, aceite lubricante, agua dulce, víveres y pertrechos y la tripulación y sus efectos. En otras palabras, **todos los pesos que sean variables**.

Por lo que podemos decir que el desplazamiento a plena carga del buque será igual a su peso en rosca más el peso muerto del buque.

Si el buque no lleva carga útil, al desplazamiento se le llamará **desplazamiento en lastre**, que será el desplazamiento del buque teniendo en cuenta únicamente al agua salada en los tanques para el sistema de lastrado. Esta agua es utilizada para conseguir la estabilidad necesaria en el buque durante la navegación.

Ahora podemos deducir que el peso del barco dependerá de la condición de carga en la que se encuentre. Según el *Principio de Arquímedes* el peso es función del peso del agua que desplaza. Sabiendo el valor de la **densidad (ρ)** del agua en la que se encuentra el buque, podremos encontrar el volumen del agua que se desplaza. A este volumen se le da el nombre de **volumen de carena (∇) (m^3)**. $\nabla = \Delta / \rho$ (m^3).

También realizamos una distinción entre las distintas **formas del buque**, éstas formas influyen de una manera u otra en la resistencia al avance del buque, que se trata del objeto de estudio de este proyecto. Las formas del buque se pueden evaluar a través de los **coeficientes de formas**, cuyos valores se encuentran entre 0 y 1 y nos permiten definir las formas de nuestro buque, entre los que se pueden distinguir:

- **Coefficiente de bloque (Cb):** Se trata de la relación entre los volúmenes de la carena de un casco y el del paralelepípedo que lo contiene, cuya ecuación es la siguiente: $\frac{\nabla}{L_{pp}BT} = C_b$

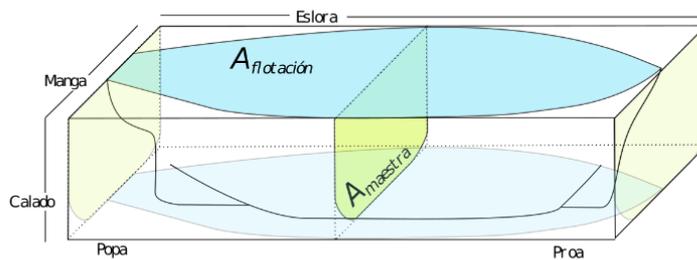


Figura 5.8 Coeficiente de bloque del buque.

- **Coefficiente de la maestra (Cm):** Se trata de la relación resultado de la división del área de la cuaderna maestra y el área del rectángulo que lo limita con los valores manga y puntal de trazado, por debajo de la línea de flotación de proyecto. $C_m = \frac{A_m}{BT}$

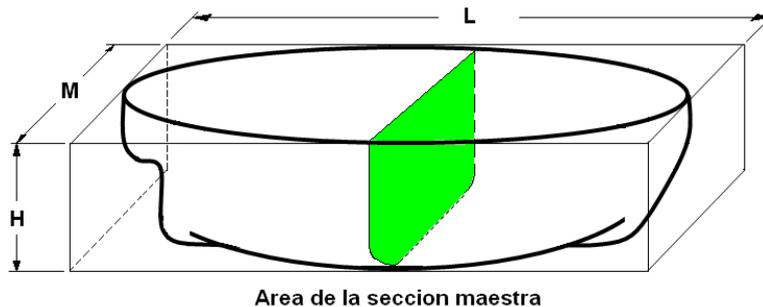


Figura 5.9 Coeficiente de la maestra.

- **Coefficiente prismático (Cp):** Se trata de la relación entre el volumen de carena y el volumen de un prisma cuya base tiene igual área que la sección maestra y de longitud su eslora.

$$C_p = \frac{\nabla}{A_m L_{pp}} = \frac{C_b}{C_m}$$

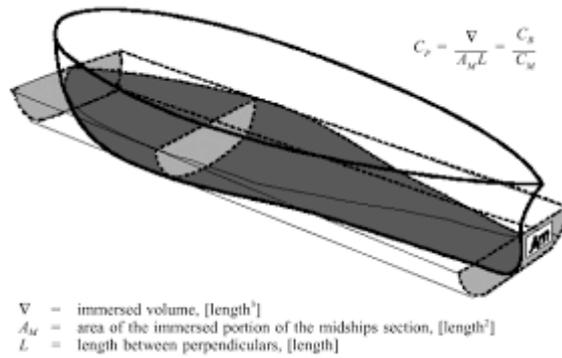


Figura 5.10 Coeficiente prismático del buque

- **Coeficiente de la flotación (Cf):** Se trata de la relación resultante de la división del área de flotación del buque (Af) en el calado de proyecto y el área del rectángulo que la circunscribe, cuyas dimensiones serán la eslora entre sus perpendiculares y la manga de proyecto.

$$C_f = \frac{A_f}{L_{pp} B}$$

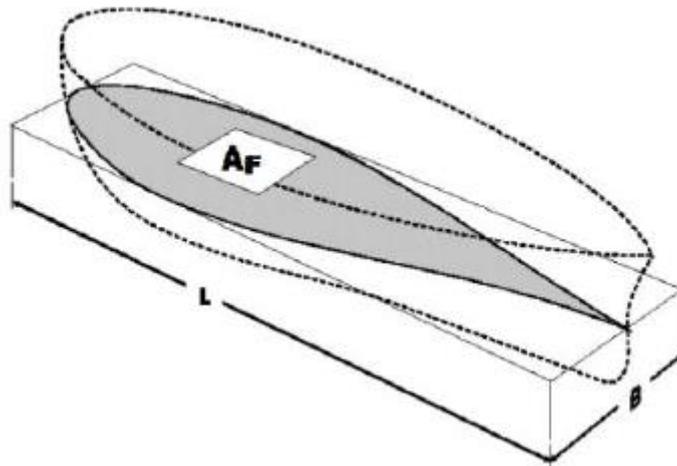


Figura 5.11 Coeficiente de la flotación del buque

- **Coeficiente prismático vertical (Cpv):** Este coeficiente se define como la razón de volumen desplazado por la embarcación al volumen de un cilindro sólido con una profundidad igual a la del calado de la embarcación y una sección transversal horizontal uniforme (vista desde el plano de líneas de agua) igual al área del plano del agua a ese calado.

$$C_{pv} = \frac{\nabla}{A_f T} = \frac{C_b}{C_f}$$

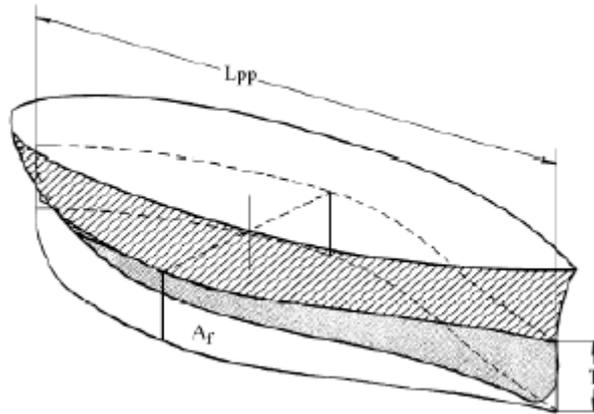


Figura 5.12 Coeficiente prismático vertical

5.2 Conceptos hidrodinámicos

Ahora definiremos una serie de conceptos de resistencia al avance básicos que serán necesarios para una mejor comprensión del objetivo de este proyecto.

- **Resistencia al avance:** Se trata de la fuerza necesaria para vencer la resistencia que se opone al remolque de un buque navegando a una cierta velocidad y en aguas tranquilas. La potencia que se necesita para vencer tal resistencia recibe el nombre de potencia de remolque o efectiva.

$$EHP = \frac{R_T * V}{75}$$

Donde la resistencia al avance total (R_T) será dada en Kg, la velocidad a la que navegue el buque (V) será dada en m/s y EHP será la potencia de remolque resultante en C.V.

Se trata de una variable que varía con la relación entre las dimensiones del buque $\frac{B}{T}$ y $\frac{L}{B}$, su distribución del volumen de carena a lo largo de la eslora y las formas propias del buque. Al valor de la resistencia al avance se le aplicarán una serie de correcciones debido a la rugosidad del casco, resistencia aerodinámica debido a la forma de la obra muerta del buque, la resistencia hidrodinámica por los apéndices, ...

Esta resistencia al avance se puede descomponer a su vez en diversas formas:

- 1) **Resistencia por fricción (Rf):** Esta resistencia será la supuesta a la equivalente de una placa plana. En esta resistencia las partículas de agua de alrededor del casco del buque se ven aceleradas tangencialmente, por el movimiento del casco en el medio de un fluido viscoso como el agua.
- 2) **Resistencia por formación de olas (Rw):** Esta resistencia es debida a que en la superficie del agua se crea un sistema de olas por el movimiento a través del agua del casco del buque. Este sistema de olas cuenta con una energía que supone una resistencia al avance del buque, ya que acelerará las partículas de agua en sentido vertical en oposición a la fuerza actuante de la gravedad.
- 3) **Resistencia de forma**, que está compuesta a su vez por:
 - La resistencia originada por que el buque no es una superficie plana, sino que se trata de una superficie con curvatura transversal y longitudinal. Esto produce una aceleración lateral de las partículas de agua que rodean el casco y aumentan la resistencia al avance del buque.
 - La resistencia de presión de origen viscoso producida por una alteración en el campo de presiones de la capa límite y al desplazamiento de ésta, por lo que se genera una resistencia al avance del buque.

La suma de todas estas da como resultado el valor de la **resistencia total Rt**.

Otro método bastante empleado para la descomposición de la resistencia total se basa en la división de la resistencia total dependiendo de las fuerzas que se ejercen sobre el casco del buque, podrán ser en sentido tangencial o normal. Las producidas en sentido tangencial son debidas a la resistencia de fricción y las que son producidas en sentido normal causarán la resistencia de presión.

Por lo que podemos descomponer la resistencia total en dos resistencias distintas:

- **Resistencia de presión:** Será la resistencia resultante al integrar sus componentes en sentido normal
- **Resistencia de fricción:** Será la resistencia resultante al integrar los componentes en sentido tangencial, que no es la misma que la explicada anteriormente, ya que en esta resistencia tendremos en cuenta el efecto que producirá la curvatura que tenga el casco.

El valor final de la resistencia total al avance dependerá así mismo de otros parámetros:

- **Número de Reynolds:** Gracias a los experimentos realizados por Osborne Reynolds en los que observó, al hacer pasar un chorro fino de agua por de un tubo de vidrio que, cuando la velocidad del chorro era pequeña, esta obtenía una forma paralela al eje del tubo de vidrio. Sin embargo, al aumentar la velocidad el chorro de agua se alcanza un valor, al que Reynolds llamó crítico, el cual el chorro empezaba a ondularse y llegando al punto de llenar la totalidad el tubo. En el buque se toma que el fluido ejerce en régimen turbulento sobre una placa plana, que será aquel en el que se supere el valor crítico del número de Reynolds, cuya expresión será:

$$Rn = \frac{V * L}{\nu}$$

El parámetro V será la velocidad del buque dada en m/s, L es la eslora máxima del buque en m y donde ν será la viscosidad cinemática respectiva al fluido en el que se mueve el buque, expresada en m^2/s .

- **Número de Froude:** Se trata de un número sin dimensión física asociada que relaciona el impacto de las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitatorias que se ejercen sobre un fluido. La expresión del número de Froude para buques y por ende para catamaranes es:

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{g * L}}$$

Donde V y L serán los parámetros descritos anteriormente y g será la gravedad representada en m^2/s .

Como hemos comentado antes, uno de los parámetros que se estudiará será la potencia efectiva o de remolque.

- **Potencia efectiva o de remolque :** Será la potencia mínima requerida para sobreponerse a la resistencia al avance del buque, se expresará de la siguiente forma:

$$EHP = \frac{Rt * V}{75}$$

Donde Rt será la resistencia al avance de la embarcación, dada en Kg, V será la velocidad de nuestro buque en $\frac{m}{s}$ y EHP será el valor de la potencia en dada en C.V.

Por tanto, la resistencia al avance y la potencia de remolque serán los valores que estudiaremos en este proyecto, a través de un programa realizado con la herramienta *Matlab*.

Será necesario definir los diferentes apéndices de tipos hidrodinámicos que un buque catamarán puede llevar, y también sus diferentes parámetros geométricos, que puedan afectar al estudio de la resistencia al avance y la potencia de remolque, haciendo que estos valores aumenten o disminuyan, según si contamos con estos tipos de apéndices o no.

- **Bulbo de proa:** Se trata de un engrosamiento de la proa del buque, en la zona de la roda y que suele ser sobresaliente, implementada en la forma de los barcos para reducir el valor de la resistencia al avance del buque. En catamaranes no es muy común el uso de bulbos de proa ya que suelen usar formas más finas y estilizadas para aprovechar las ventajas que estas ofrecen. Cuyos parámetros más importantes son:
 - 1) Área transversal del bulbo en la Ppr (A_{tb}).
 - 2) Distancia vertical del bulbo (h_b).
 - 3) Longitud del bulbo (L_b).
- **Hélice:** Se trata del conjunto de dos o más palas helicoidales acopladas al eje, que giran en el mismo sentido que él y que producen una fuerza a la que se le llama **empuje (T)** que provoca el movimiento del buque. Es constituido por palas o álabes unidos al núcleo de la hélice. Tanto el número de palas, así como el número de hélices dependen según el buque, que en nuestro caso al ser un catamarán normalmente contará con dos hélices.
- **Tobera de la hélice:** Se trata de una cavidad concéntrica en la que se le sitúa dentro la hélice, dejando una separación muy pequeña entre la tobera y la hélice. La tobera envuelve completamente a la hélice dejando únicamente los espacios por donde el flujo de agua atraviesa la hélice y es empujada por ésta. Este tipo de apéndice es utilizado para aumentar el rendimiento y la fuerza de empuje de la hélice. La tobera puede ser una propia extensión del casco del buque o estar unida al codaste del buque.

- **Eje del timón:** Es del elemento al cual se le acoplará la hélice y al cual se le transmitirá su propio giro. El eje en realidad será parte de un sistema compuesto por varios ejes que unirán el motor principal del buque con la hélice. El eje convertirá el movimiento rotacional del motor principal y maquinaria del buque en la potencia requerida para mover el buque. Este sistema de ejes se dividirá en el eje del motor, el eje de cola y el eje intermedio.

El eje de la cola será donde se une la hélice, atravesará la popa del buque a través de la bocina por el **codaste**, consiguiendo gracias a él su estanqueidad. En caso de que alguna sección del eje de cola quede expuesta fuera del casco, será sujeta al casco mediante arbotantes. El uso de los arbotantes se ve facilitado gracias a unas aberturas realizadas en el casco para facilitar la salida de los arbotantes, estas aberturas reciben el nombre de henchimientos.

- **Timón:** Se trata de una pala cuyo espesor será inferior a las otras dos dimensiones, su sección será hidrodinámica o plana para favorecer el paso del flujo a través de la hélice. El timón es capaz de girar sobre un eje al que se le da el nombre de **mecha**, así la pala puede modificar su orientación respecto al plano de crujía del buque, para así producir un giro en el buque.

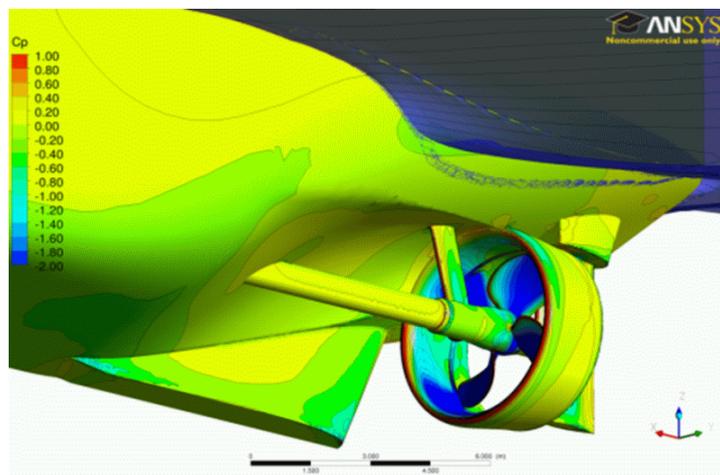


Figura 5.13 Timón y mecha de un buque. *Flap rudder CFD.*

- **Quillas de balance:** Se tratan de piezas planas orientadas en sentido longitudinal y colocadas en los pantoques del buque, que será la zona curvada que unirá los costados con la quilla, el objetivo de las quillas de balance es limitar el balanceo que tenga el buque.



Figura 5.14 Ejemplo de una quilla de balance.

- **Aletas estabilizadoras:** Se tratan de aletas situadas de igual manera que las quillas de balance, tiene una función y forma distintas, pero comparten el mismo objetivo, reducir el movimiento de balance.
- **Quillote:** Se trata de una extensión de la quilla que se utiliza para alojar lastre y mejorar la estabilidad del catamarán.

6. Métodos de análisis y estimación de potencia

6.1 Introducción

A lo largo de la historia de la construcción naval la predicción de la potencia propulsora necesaria en un buque para que navegue a la velocidad que se desea ha sido uno de los problemas que más preocupación ha suscitado. Para poder realizar esta estimación, es necesario tener un conocimiento previo de la resistencia al avance de nuestro buque cuando navega a la velocidad que estamos buscando.

Hoy en día, y a pesar de los avances que se han ido dando en el campo de la hidrodinámica, podemos decir que no se puede llegar a realizar un correcto cálculo de la resistencia al avance de un buque únicamente mediante el uso de métodos teóricos y estadísticos. Sin embargo, con la experimentación con modelos se puede conseguir una mejor estimación de la resistencia por el avance de la carena de un buque en construcción.

En la experimentación con modelos consiste en realizar una serie de ensayos y pruebas de remolque a un modelo a escala del buque en unos tanques o piscinas preparados para esos experimentos, llamados canales de experimentación. Con este método se consigue de manera más exacta saber el comportamiento que tendrá navegando la carena de nuestro buque, y así, podremos estimar con mayor exactitud el valor de la resistencia al avance que tendrá la carena de nuestro buque a la velocidad que deseamos. Una vez obtenidos los valores de los ensayos y pruebas con el modelo, pasamos a extrapolar estos al buque real, a este paso se le denomina correlación modelo-buque, y es de vital importancia que los valores conseguidos sean correctos y favorables. Aunque no podemos decir que existan métodos de correlación que nos permitan conseguir una predicción de la potencia completamente exacta.

Sin embargo, cuando nos encontramos en las etapas primarias de proyecto donde solo conocemos unas pocas características fundamentales de nuestro buque, estos métodos realizados con modelos resultarían demasiado caros y además serían aún imposible de realizar, ya que no dispondríamos si quiera de plano de formas aproximado de nuestro buque para realizar un modelo.

Es entonces cuando nos ayudamos de los métodos analíticos para hacer una estimación de la resistencia al avance, con estos métodos analíticos conseguiremos unos valores de resistencia que nos servirán como base para realizar unas predicciones de potencia que nos permitan empezar a trabajar con unas formas del buque para poder realizar un modelo de ellas y así posteriormente conseguir, mediante ensayos y pruebas en canales, los valores deseados. Estos métodos se dividirán en los métodos numéricos y las series sistemáticas.

6.2 Introducción histórica de los métodos analíticos

No fue hasta 1959 cuando Doust pudo aplicar el análisis estadístico para el pronóstico de la resistencia en el avance, gracias al método de aproximación por mínimos cuadrados de Gauss, a sus experimentos con buques arrastreros. Debido a la complejidad de cálculo del método de Gauss, este no pudo ser adoptado para la arquitectura naval hasta más de 200 años después gracias a la investigación de Doust. Debido a esto, los ensayos y observaciones en canales de experimentación y el análisis de los datos obtenidos en ellos era el método más común y realizado, tanto que casi se le podría considerar como un inicio de análisis estadístico.

En 1871 siguiendo los consejos de William Froude se realizaron los primeros ensayos sistemáticos en el canal de experiencia de Torquay, Devon, después de seis años desde que el ministro de la Marina Británica ordenara su construcción a petición de William Froude. A partir de ese momento fue cuando en todo el mundo comenzaron a realizar ensayos, tanto con modelos cuyas carenas diferían entre sí como modelos de series sistemáticas, en los canales experimentales y por tanto comienzan a desarrollarse los métodos analíticos y numéricos que actualmente conocemos y más adelante explicaremos.

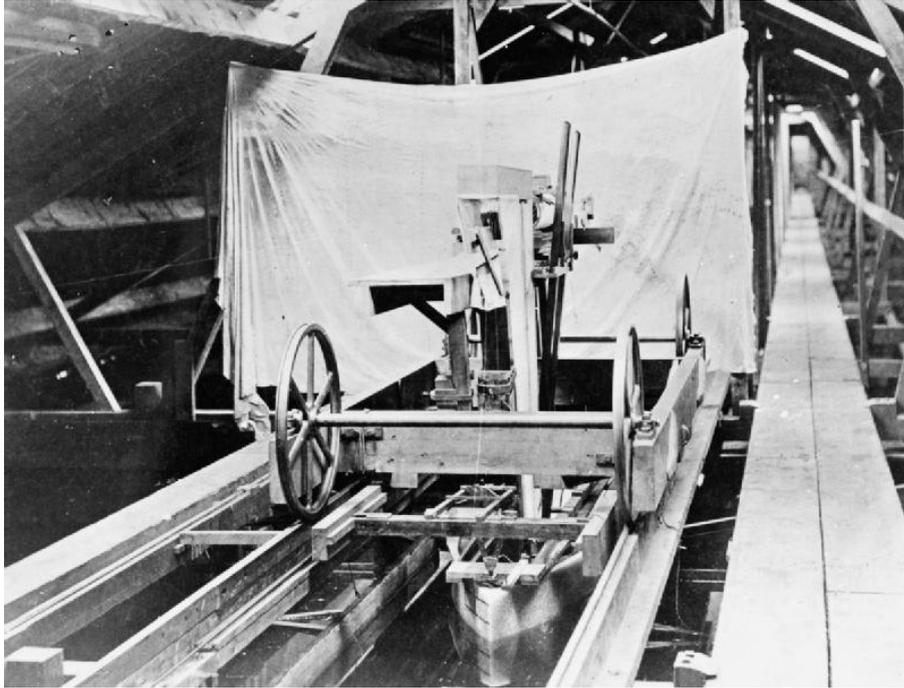


Figura 6.1 Carro de remolque de los modelos de los buques durante los de William Froude en el primer canal de experiencia. Torquay, Devon, Reino Unido.

El usar las series sistemáticas de formas para el análisis de la resistencia nos proporciona una ventaja a la hora del desarrollo de la forma del casco, ya que algunos parámetros de la forma se seleccionan concretamente para obtener relaciones que sean lineales con otros valores o también para lograr resultados que no cambien. Este método se usa con para disminuir las variaciones de los parámetros y así poder simplificar los impactos de las variaciones de los parámetros de estudio de tal manera que sean directas o incluso solucionarse al ser simplemente observadas. Se pueden considerar a los gráficos de predicción de resistencia que se hayan basado en los ensayos de modelos como la original promoción de análisis estadísticos de resistencia con series sistemáticas. Las primeras series en aplicar esta práctica son las famosas Series Estándar de Taylor y desde entonces ha ido surgiendo un gran número de métodos para la cunfificación de la resistencia al avance que se basaron en las series sistemáticas de formas.

Sin embargo, la gran desventaja de este método es que no tienen una gran variedad de aplicación. Es más, salvo algunas de las series de mayor importancia, la mayor parte fueron creadas con un número de modelos limitado.

Otro factor negativo es que varias de las series más importantes omitieron los impactos de ciertos parámetros en las formas de los cascos estudiados, lo que reduce todavía más su abanico de aplicación, por eso es necesario tomar las precauciones necesarias a la hora de aplicar uno de estos métodos para estimar la resistencia al avance.

A la vez, también se usan métodos numéricos para evaluar y comparar los resultados obtenidos mediante las series sistemáticas. Antiguamente era frecuente que el uso de estos métodos numéricos dependía de experiencia individual del arquitecto naval encargado del proyecto, esto cambió por completo con la introducción de los ordenadores de gran capacidad. Gracias a este avance, no solo se aumentó el uso de los métodos numéricos, sino que además se avanzó en la creación de series sistemáticas de formas. Uno de los métodos numéricos más implementados en los últimos años ha sido el de ajuste por mínimos cuadrados para el trato de los resultados en experimentos, sin embargo, el uso de ecuaciones para la predicción de la resistencia al avance suele ser criticado por ser poco fiable. Ese posible error a la hora de utilizar ecuaciones de regresión para la predicción de resistencia es debido usualmente a una equivocada utilización de las mediciones estadísticas o a un entendimiento inadecuado de la utilidad y técnicas de extrapolación de los datos obtenidos previamente durante los ensayos en canales o de series sistemáticas. Es por eso por lo que para usar uno de estos métodos habrá que realizar una elección entre los datos disponibles, centrándose en que el buque estudiado cuente con unas características parecidas a las de las embarcaciones de donde se creó el método escogido en concreto.

6.3 Series Sistemáticas

Las llamadas series sistemáticas se crearon para mejorar las siluetas de las carenas para una clase concreta de embarcación. Se escogen unas figuras “patrón” y a raíz de estas se efectuarán alteraciones de manera sistemática de sus principales magnitudes y coeficientes geométricos no dimensionales. A su vez, debemos escoger entre dos a cinco coeficientes para la carena, o coeficientes de nos proporcionen el valor de las diferentes relaciones en sus magnitudes que tengan una gran influencia en la resistencia al movimiento. A continuación, se forman un conjunto de modelos de esa serie y se efectúan las pruebas para la medición de la resistencia al avance y que podrán complementarse con ensayos en lo que se realizan diversas modificaciones en los canales. Después, los resultados se publicarán de tal forma que la aplicación e interpretación de los resultados sean cómodos para los usuarios.

La precisión y fiabilidad de los resultados obtenidos de las series sistemáticas dependen en gran medida de las características de nuestro buque de proyecto. Si estas se encuentran en los rangos de aplicación de la serie, la predicción será equiparable en cuanto a su fiabilidad a la que se puede obtener al realizar un ensayo específico con un modelo de la carena que se quiere proyectar. De tal modo se consigue una mejora tanto en tiempo como en dinero que servirá para amortizar los gastos que hayan podido aparecer al crear la serie, que suelen ser elevados. Sin embargo, si se presenta el caso en el que una de las características principales de la carena a proyectar se encuentre fuera de los rangos que cubre la serie sistemática, se correría el riesgo de que la predicción de resistencia no sea suficientemente correcta.

6.4 Métodos numéricos

Los métodos numéricos empleados en la predicción de resistencia al avance contarán con una base estadística. A raíz de aplicar conceptos fundamentales físicos en estos métodos, se crean diferentes expresiones para las distintas clases de resistencias que se pueden dar en el buque.

Se utilizará la estadística para conseguir mediante regresión varios de esos coeficientes que pueden aparecer en esas expresiones. En la mayoría de los casos más usuales la base estadística está formada en gran manera por resultados de pruebas, sin embargo, en ocasiones, a las últimas estimaciones se les suelen aplicar coeficientes de corrección obtenidos de pruebas de mar reales de manera estadística.

Por lo tanto, podemos decir que todo método numérico se origina a partir de una selección de una base de datos que dependerá de la aplicación que vaya a tener esa regresión. Si los buques seleccionados presentan grandes diferencias entre sí, mayores son los rangos de aplicabilidad, pero a su vez peor será la fiabilidad del método. Hay que prestar especial atención para evitar que aparezcan puntos dispares que pueden ser originados por buques de formas inusuales o ensayos en condiciones de carga que no se consideran comunes.

Suele introducirse en ocasiones la información de bases de datos provenientes de series sistemáticas completas, sin embargo, esto debe hacerse con precaución ya que se pueden

ver alteradas los resultados de la regresión ya que es posible que estos resultados tiendan a los valores de los resultados de las series sistemáticas introducidas.

A su vez, una menor base de datos, pero que no contiene puntos dispares y que esté distribuida uniformemente para las distintas variables que se van a analizar nos dará una mayor garantía en los resultados obtenidos que una base de datos más extensa, pero sin ningún tipo de criba en los datos a utilizar. Por lo tanto, podemos decir que la regresión será tan segura como la base de datos en la que se base. Es también, de gran importancia conocer el error medio que proporcionan estos métodos, para así tener un control más exacto del grado de precisión en las predicciones a realizar, estos errores en etapas finales del proyecto no son admisibles, es por eso por lo que se acude en esos momentos a los ensayos con modelos, ya que proporcionan valores con un error menor del dos o tres por ciento.

Suele seguirse el siguiente proceso para aplicar un método numérico:

- Se selecciona una base de datos que no cuente con casos muy dispares o información distinta entre sí.
- Se seleccionan las variables libres que más influyan en la resistencia.
- Se escoge la expresión de sujeción que relacione la resistencia con las variables libres escogidas anteriormente.
- Se ajustarán de las curvas para la consecución de los coeficientes de las funciones a través de métodos adecuados para cada clase de función.

Por lo tanto, previamente a utilizar los resultados de las pruebas realizadas en el tiempo y en diferentes canales, se debe realizar una uniformización de la base de datos, los métodos de ensayo, los distintos modelos o la manera en la que se presenten los resultados de un canal a otro, es por eso por lo que la información deberá ser lo más uniforme posible al introducirla en la base de datos con la que se vaya a trabajar.

No hay un método único que sea lo suficiente efectivo para ser utilizado en la estimación de la resistencia al avance para un rango de velocidades muy amplio. Las variables más empleadas en los métodos para la estimación de resistencia serán el peso, la eslora, la velocidad, la manga, la posición longitudinal del centro de gravedad y el ángulo de ataque de la astilla muerta. Dichas variables nos permiten definir las condiciones de carga y dimensiones básicas de nuestro buque, pero no son suficientes para determinar con precisión las formas de nuestro casco.

La forma del casco tiene una gran importancia en la predicción de la resistencia al avance del buque, ya que las variables que especifican su forma son de difícil descripción matemática. Es por eso por lo que el método escogido será aquel que represente lo mejor posible las formas del casco de nuestro buque y comprobando de esa forma que se encuentra dentro de los rangos de aplicación dimensional y adimensional. La elección del método a utilizar se ve simplificada si se consigue situar el buque de estudio dentro de una categoría específica, por esta razón es de gran importancia tener bien definido el tipo de embarcación a proyectar y sus límites de aplicación.

Concretamente para catamaranes los métodos de predicción de resistencia tuvieron un gran desarrollo entre los años noventa y los principios del siglo XXI. A continuación, vamos a decir una serie de métodos utilizados en los últimos años, tanto series sistemáticas como regresiones estadísticas.

Método	Tipo de método	Rango de aplicación
Método de Insel y Molland (1992)	Serie sistemática	
Método de Millward (1992)	Serie sistemática	$0,2 < F_n < 1,0$
Método de Molland et Al (1994)	Serie sistemática	$0,2 < F_n < 1,0$
Método VWS (1995)	Regresión estadística	$0,8 < F_n < 1,4$
Método de Hanhirova (1995)	Regresión estadística	
Método de Armstrong (2000)	Regresión estadística	$0,5 < F_n < 1,0$
Método de Pham (2001)	Regresión estadística	$0,2 < F_n < 1,0$
Método de Sahoo (2002)	Regresión estadística y serie sistemática	$0,4 < F_n < 1,4$
Método de Sahoo (2004)	Regresión estadística y serie sistemática	$0,2 < F_n < 1,0$
Método de Sahoo (2007)	Regresión estadística	$0,2 < F_n < 1,0$

Tabla 1.1 Métodos para calcular de la resistencia al avance.

De esta tabla no aplicaremos todos los métodos mencionados en ella, ya que para nuestro caso de estudio no todos los métodos tienen una aplicación correcta para nuestro catamarán. Estos métodos en su mayoría realizan una división de la resistencia en dos componentes, como ya hemos explicado anteriormente, resistencia debido a la fricción y la resistencia por formación de olas.

A través de la fórmula de la ITTC-57 conseguimos la resistencia de fricción, donde el coeficiente de fricción tiene esta expresión: $C_F = \frac{0.075}{(\log Rn-2)^2}$, donde Rn es el valor del número de Reynolds.

La resistencia por formación quedará determinada a través de expresiones que dependerán de la forma del casco. A su vez establecerán distintos coeficientes de corrección para el factor de forma en el resultado del coeficiente de resistencia total.

6.5 Componentes de la resistencia para catamaranes

En varios estudios, en su gran mayoría, se establece para la resistencia total un coeficiente para catamaranes cuya expresión es la siguiente: $C_T = (1 + \gamma k)C_F + \tau C_{WMONO}$, donde τ es el valor resultante de la división del coeficiente de la resistencia por formación de olas de una embarcación catamarán y una embarcación monocasco, y cuya expresión será: $\tau = \frac{C_{WCAT}}{C_{WMONO}}$. Y γ representa un parámetro que depende de la relación L/B del buque. Por tanto, podemos decir que el coeficiente total de resistencia vendrá determinado según distintas expresiones que dependerán del método usado y de la clase de embarcación estudiada.

Hay diversos métodos en la resistencia al avance para su estimación, donde la resolución para buques monocasco de la resistencia al avance, C_{WMONO} , no será obtenida por ninguna ecuación. Será en este tipo de métodos donde únicamente se utilizará el coeficiente de la resistencia por formación de olas en catamaranes, C_{WCAT} , donde:

$$\tau C_{WMONO} = C_{WCAT}$$

$$C_T = (1 + \gamma k)C_F + C_{WCAT}$$

Una vez tenemos C_T , lo que haremos será calcular el valor de la resistencia total al avance: $R_T = C_T \frac{1}{2} \rho S V^2$, donde: ρ es la densidad del agua donde navegamos, S es la superficie mojada del buque en m^2 y V es la velocidad a la que navega el buque en m/s.

6.5.1 Cálculo del factor de forma por el método de Armstrong

En los estudios de Armstrong se examinaron los diferentes métodos para la cuantificación de la resistencia en el avance en casos de catamaranes rápidos, diseñados en los últimos tiempos. Armstrong propone distintos factores de forma de cada monocasco del catamarán en la siguiente tabla.

Parámetro	Ecuación	Validez
$(1 + k)$	$0,65 + 350(Fn)^{-0,67} \left(\frac{B}{T}\right)^{0,15} \left(\frac{L}{B}\right)^{-1,5} \left(\frac{L}{\sqrt[3]{\Delta}}\right)^{-1,5}$	$0,5 < Fn < 1,0$
$(1 + k)_{modelo}$	$1,45 - 0,139 \left(\frac{L}{\sqrt[3]{\Delta}}\right)^{0,6} \left(\frac{B}{T}\right)^{-0,1}$	$6 < \frac{L}{\sqrt[3]{\Delta}} < 8$ $12 < \frac{L}{B} < 15$ $1,5 < \frac{B}{T} < 2,5$ $3 \cdot 10^6 < Rn < 5 \cdot 10^6$
$(1 + k)_{buque}$	$1,72 - f \left(\frac{L}{\sqrt[3]{\Delta}}\right)^g \left(\frac{B}{T}\right)^{-0,1}$	$6,5 < \frac{L}{\sqrt[3]{\Delta}} < 9,5$ $1,5 < \frac{B}{T} < 2,5$ $0,6 < Fn < 1,0$ $10^9 < Rn < 2 \cdot 10^9$
f	$-2,25Fn^2 + 4,47Fn - 1,61$	$Fn < 1,0$
f	0,61	$Fn > 1,0$
g	$0,76 - 1,09f$	

Tabla 1.2. Resultados obtenidos en los estudios de Armstrong.

6.5.2 Cálculo del factor de forma según Molland et al.

Como no contamos con una ecuación para catamaranes del factor de forma $(1 + \gamma k)$, es primordial realizar un modelo regresivo a través de los valores de la siguiente tabla.

$L/\nabla^{1/3}$	B/T	$s/L = 0,2$	$s/L = 0,3$	$s/L = 0,4$	$s/L = 0,5$
		$1 + \gamma \cdot k$			
8,5	1,5	1,44	1,43	1,44	1,47
8,5	2,0	1,41	1,45	1,4	1,38
8,5	2,5	1,41	1,43	1,42	1,44
Promedio	-	1,42	1,44	1,42	1,43
9,5	1,5	1,48	1,44	1,46	1,48
9,5	2,0	1,42	1,40	1,47	1,44
9,5	2,5	1,40	1,40	1,45	1,44
Promedio	-	1,41	1,41	1,46	1,45

Tabla 1.3 Resultados para el factor de forma por el método de Molland et Al (1994).

Se comprobó que el valor final del factor de forma en catamaranes $(1 + \gamma k)$ variará de las distintas formas geométricas, del valor del factor de forma de cada monocasco del catamarán $(1 + k)$ y del rango del número de Froude en los que se realiza el estudio. Gracias a realizar varios análisis lineales de regresión se consiguió una expresión general, y una serie de coeficientes.

$$(1 + \gamma k) = f\left(\frac{B}{T}; \frac{L}{\nabla^{1/3}}; \frac{s}{L}; (1 + k)\right)$$

$$\begin{aligned} (1 + \gamma k) = & a_0 + a_1 \frac{B}{T} + a_2 \frac{L}{\nabla^{1/3}} + a_3 \frac{s}{L} + a_4(1 + k) + a_5 \frac{B}{T} \frac{L}{\nabla^{1/3}} + a_6 \frac{B}{T} \frac{s}{L} + a_7 \frac{L}{\nabla^{1/3}} \frac{s}{L} \\ & + a_8 \frac{B}{T} (1 + k) + a_9 \frac{L}{\nabla^{1/3}} (1 + k) + a_{10} \frac{s}{L} (1 + k) + a_{11} \frac{B}{T} \frac{L}{\nabla^{1/3}} \frac{s}{L} \\ & + a_{12} \frac{B}{T} \frac{L}{\nabla^{1/3}} (1 + k) + a_{13} \frac{B}{T} \frac{s}{L} (1 + k) + a_{14} \frac{L}{\nabla^{1/3}} \frac{s}{L} (1 + k) \end{aligned}$$

a_0	0	a_8	-2,506
a_1	0,258	a_9	-2,432
a_2	2,505	a_{10}	100,173
a_3	-150,791	a_{11}	-1,636
a_4	4,932	a_{12}	1,417
a_5	-1,446	a_{13}	-43,355
a_6	68,628	a_{14}	-2,927

a_7	6,549		
-------	-------	--	--

Tabla 1.4 Coeficientes de regresión para ecuación.

6.5.3 Serie sistemática del método de Sahoo, Browne y Salas.

Se trata de una ampliación del estudio realizado anteriormente por Sahoo y Scwetz (2002), en el que de manera más profunda se estudian los resultados obtenidos por una serie sistemática y se comparan con los resultados conseguidos a través de CFD.

Esta serie sistemática que usaremos en este estudio se basará en las formas básicas del casco de los buques de transporte típicas de alta velocidad en Australia. A través de una transformación paramétrica conseguiremos la serie sistemática para cada monocasco del catamarán. La siguiente tabla muestra los parámetros geométricos de la serie sistemática para monocascos y a continuación. También se presentan los valores de las características hidrostáticas, junto con los valores de diferentes parámetros que son de relevancia en el estudio.

Modelo	1	2	3	4	5	6	7
L/B	15,00	15,00	15,00	15,00	12,50	12,50	10,00
B/T	1,50	1,50	2,50	2,50	1,50	2,50	2,50
C_B	0,40	0,45	0,50	0,40	0,45	0,45	0,45
$L/V^{1/3}$	9,45	9,08	10,40	11,20	8,04	9,54	8,22

Tabla 1.5. Valores de la serie sistemática por el método de Sahoo.

M	Δ max (t)	i_E (deg)	L (m)	T (m)	B (m)	β (deg)	WSA (m ²)	LCB(m)	LCF(m)
1	151,93	5,43	50,00	2,22	3,33	42,99	246,10	22,30	20,27
2	170,91	7,18	50,00	2,22	3,33	44,32	256,20	22,27	21,54
3	113,90	7,03	50,00	1,33	3,33	24,94	195,89	22,29	21,41
4	91,08	4,00	50,00	1,33	3,33	23,32	181,97	22,27	19,99
5	246,10	8,60	50,00	2,67	4,00	44,11	307,57	22,27	21,54
6	147,69	8,60	50,00	1,60	4,00	30,37	231,71	22,27	21,54
7	230,77	10,71	50,00	2,00	5,00	30,37	289,80	22,27	21,54

Tabla 1.6. Valores hidrostáticos de la serie sistemática del método de Sahoo.

En cuanto a los valores de LCF y LCB serán las posiciones de éstos respectivamente al espejo. Por lo que esta serie sistemática englobará valores entre 0,2 y 0,4 para relaciones de s/L y valores de entre 0,2 y 1,0 de número de Froude para su rango de aplicación.

De la regresión analítica obtendremos una serie de ecuaciones para el cálculo del coeficiente por formación de olas, tanto para el catamarán y el monocasco, así como de los coeficientes de regresión respectivos.

$$C_{WMONO} = e^{C1} \left(\frac{L}{B}\right)^{C2} (C_B)^{C3} \left(\frac{L}{\sqrt[3]{1}}\right)^{C4} (i_E)^{C5} (\beta)^{C6}$$

$$C_{WCAT} = e^{C1} \left(\frac{L}{B}\right)^{C2} (C_B)^{C3} \left(\frac{L}{\sqrt[3]{1}}\right)^{C4} (i_E)^{C5} (\beta)^{C6} \left(\frac{S}{B}\right)^{C8}$$

Fn	C1	C2	C3	C4	C5	C6	R²
0,2	3,001	-0,159	0,515	-3,666	-0,194	0,000	0,967
0,3	1,221	0,000	0,815	-3,445	0,218	0,000	0,985
0,4	3,180	-0,702	0,377	-3,114	0,390	0,000	1,000
0,5	2,519	0,396	-0,775	-4,175	0,000	-0,41	0,999
0,6	2,031	-0,239	0,000	-3,402	-0,138	-0,091	0,999
0,7	1,130	-0,22	0,000	-3,221	-0,043	-0,081	0,999
0,8	0,600	-0,272	0,000	-3,079	0,000	-0,063	0,999
0,9	-0,216	0,000	-0,228	-3,158	0,173	-0,178	0,999
1,0	-1,086	0,000	-0,396	-2,965	0,300	-0,203	0,998

Tabla 1.7 Coeficientes de regresión y valor de R^2 para el cálculo de C_{WMONO}

Fn	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	R²
0,2	2,571	0,436	0,000	0,000	-4,124	-0,039	-0,199	0,037	0,995
0,3	0,585	0,000	0,000	0,945	-3,282	0,246	0,087	-0,089	0,989
0,4	3,324	0,000	-0,471	-0,963	-3,523	0,000	-0,688	-0,035	0,984
0,5	2,439	0,379	0,000	-0,600	-4,262	0,000	-0,337	-0,368	0,999
0,6	1,809	-0,110	0,000	0,000	-3,625	-0,061	-0,095	-0,314	0,997
0,7	1,055	0,000	0,082	-0,025	-3,617	0,000	-0,064	-0,181	0,997
0,8	0,603	0,222	0,266	0,000	-3,869	0,000	0,000	-0,069	0,998
0,9	-0,466	0,049	0,162	0,000	-3,322	0,128	0,000	-0,006	0,999
1,0	-1,221	0,000	0,117	0,000	-3,046	0,264	0,000	0,075	0,995

Tabla 1.8 Coeficientes de regresión y valor de R^2 para el cálculo de C_{WCAT}

6.5.4 Cálculo del coeficiente por formación de olas a través del método de Molland et al para catamaranes.

En catamaranes, para realizar el cálculo del coeficiente respectivo de la resistencia por formación de olas, nos basamos en los estudios previos de Molland et al, donde establecemos una ecuación para conseguir dicho coeficiente de la resistencia por formación de olas para las características de embarcaciones catamaranes.

$$C_{WCAT} = b_0 + b_1 \frac{L}{B} + b_2 \frac{B}{T} + b_3 \frac{L}{\sqrt[3]{L}} + b_4 \frac{s}{L} + b_5 \frac{L B}{B T} + b_6 \frac{L L}{B \sqrt[3]{L}} + b_7 \frac{B L}{T \sqrt[3]{L}} + b_8 \frac{L s}{B L} \\ + b_9 \frac{B s}{T L} + b_{10} \frac{L s}{\sqrt[3]{L} L} + b_{11} \frac{L B L}{B T \sqrt[3]{L}} + b_{12} \frac{L B s}{B T L} + b_{13} \frac{L L s}{B \sqrt[3]{L} L} + b_{14} \frac{B L s}{T \sqrt[3]{L} L} \\ + b_{15} \frac{L B L s}{B T \sqrt[3]{L} L}$$

Fn	b0	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7
0,20	0,000	-1,010	-3,482	2,936	0,434	-1,782	0,053	1,169
0,25	0,000	-0,624	-1,430	0,911	14,494	-0,576	0,063	0,573
0,30	0,000	-0,135	-1,171	0,928	-21,610	-0,730	0,012	0,487
0,35	0,000	-1,870	-8,177	5,059	4,144	-2,346	0,095	2,106
0,40	0,000	-1,437	-2,620	2,150	32,489	-0,306	0,082	0,413
0,45	0,000	2,504	10,900	-6,979	10,979	4,132	-0,114	-2,901
0,50	0,000	5,921	19,565	-8,431	39,226	1,270	-0,324	-2,430
0,55	0,000	3,149	26,826	-2,589	111,705	-1,619	-0,237	-2,989
0,60	0,000	1,398	29,096	0,614	107,296	-2,655	-0,191	-3,503
0,65	0,000	0,701	17,120	-0,514	65,457	-0,368	-0,092	-2,409
0,70	0,000	1,602	13,789	-2,218	59,031	0,291	-0,122	-2,024
0,75	0,000	2,173	9,941	-2,585	53,376	0,192	-0,151	-1,356
0,80	0,000	1,811	9,833	-2,216	44,561	0,217	-0,139	-1,497
0,85	0,000	1,841	10,540	-1,971	38,833	-0,315	-0,138	-1,409
0,90	0,000	2,148	13,265	-2,749	33,474	0,104	-0,168	-2,080
0,95	0,000	2,448	13,923	-3,472	31,412	0,402	-0,183	-2,266
1,00	0,000	2,882	14,586	-4,781	7,184	0,961	-0,189	-2,480

Tabla 1.9 Coeficientes de regresión para la ecuación

F_n	b8	b9	b10	b11	b12	b13	b14	b15
0,20	2,437	8,242	-6,962	0,041	4,230	-0,137	-2,816	-0,092
0,25	1,051	-3,927	-3,763	-0,004	0,905	-0,043	0,120	-0,021
0,30	3,235	12,628	0,754	0,017	-0,351	-0,328	-1,728	0,119
0,35	4,918	21,604	-12,503	0,012	5,082	-0,270	-5,153	0,021
0,40	2,854	-2,519	-11,615	-0,022	2,830	-0,035	-0,280	-0,075
0,45	-0,970	-7,798	10,730	-0,100	-11,150	-0,046	5,288	0,444
0,50	-11,378	-24,067	13,500	0,076	-6,242	0,614	3,816	0,171
0,55	-13,638	-77,986	-5,439	0,244	3,388	1,254	9,134	-0,586
0,60	-9,326	-83,327	-13,326	0,320	6,584	1,134	10,051	-0,797
0,65	-4,015	-38,325	-7,119	0,120	0,620	0,512	5,253	-0,199
0,70	-5,949	-33,130	-2,283	0,079	-0,876	0,572	4,822	-0,136
0,75	-7,233	-26,712	-1,242	0,067	0,184	0,637	3,380	-0,169
0,80	-6,278	-27,259	-1,141	0,074	0,618	0,591	3,702	-0,230
0,85	-5,976	-28,430	-1,758	0,106	2,476	0,556	3,214	-0,330
0,90	-5,934	-32,675	0,171	0,120	1,401	0,559	4,515	-0,338
0,95	-6,845	-36,448	3,349	0,117	-0,169	0,599	5,638	-0,315
1,00	-5,623	-27,406	9,518	0,100	-2,972	0,363	5,129	-0,140

Tabla 1.9 Coeficientes de regresión para la ecuación.

6.5.5 Método de Ping-Zong.

El método desarrollado por Ping-Zong, es fundamentalmente utilizado en el estudio de buques monocasco en el que se busca de mejorar los resultados obtenidos por Mercier Savitsky, para que puede ser aplicado más fácilmente en catamaranes con pantoque de forma redondeada.

El cálculo de la resistencia al avance en buques de doble casco resulta bastante más complejo que para buques de tipo monocasco debido al hecho de que se aplica un método en el que no se utiliza un factor de forma que tendrá en cuenta el impacto debido a la interacción entre los cascos, por tanto, la aplicación de estos métodos no es del todo correcta y recomendable.

Usaremos entonces este método para poder tener un mayor número de resultados y así poder compararlos con los obtenidos anteriormente, para eso lo que haremos será realizar

el cálculo de la resistencia al avance de un único casco del catamarán a estudiar por el método de Ping-Zong, para posteriormente multiplicar ese valor por el doble. Habrá que tener en cuenta que se conseguirán valores simplemente comparativos.

En el método de Ping-Zong se hará uso de una regresión que dependerá de cinco variables. El coeficiente de la resistencia total se calculará a través de una expresión en la que C_F , el coeficiente de fricción será calculado por el método de la ITTC-57, C_A es el coeficiente de correlación con un valor de $0,4 \cdot 10^{-3}$, y C_R es el coeficiente de resistencia residuo, calculado a través de una ecuación.

Variabes	Fórmulas	Rangos
Coficiente de esbeltez	$C_V = \frac{1000 * \nabla}{L_F^3}$	$1,5 < C_V < 11,0$
Coficiente prismático	$C_P = \frac{\nabla}{A_M L_F}$	$0,573 < C_P < 0,764$
Relación del área del espejo	$F_T = \frac{L_F}{A_M}$	$0,00 < F_T < 0,74$
Posición longitudinal del centro de carena	$F = \frac{100lcb}{L_F}$	$0,0 < F < 6,40$
Semiángulo de entrada	i_E	$7,60 < i_E < 26,6$

Tabla 1.10 Variables del método de Ping-Zong

$$C_T = C_F + C_R + C_A,$$

$$10^3 C_R = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + B_3 X_3 + \dots + B_{53} X_{53}$$

Nº	Xi	Nº	Xi	Nº	Xi	Nº	Xi
0	1	14	F	28	$C_V^2 C_P^2$	42	$F T F$
1	$C_V^{0,25}$	15	F^3	29	$C_V i_E^{0,5}$	43	$F T F^3$
2	$C_V^{0,50}$	16	$i_E^{0,5}$	30	$C_V^{0,5} i_E$	44	$F T C_P^2$
3	$C_V^{0,75}$	17	i_E	31	$C_V i_E$	45	$F T C_P^3$
4	$C_V^{1,00}$	18	$C_V^{0,5} F$	32	$C_V i_E^{1,5}$	46	$F T C_P^{-1}$
5	$C_V^{2,00}$	19	$C_V F$	33	$C_V i_E^3$	47	$F T i_E$
6	$C_V^{2,25}$	20	$C_V F^2$	34	$C_V i_E^4$	48	$F T i_E^{1,5}$
7	$C_V^{3,00}$	21	$C_V F^3$	35	$C_V i_E^5$	49	$F T C_V^3$
8	$C_V^{4,00}$	22	$C_V F^5$	36	$C_V i_E^{0,5}$	50	$C_V F T F$
9	$C_V^{5,00}$	23	$C_V F^6$	37	$C_V F T^{0,5}$	51	$F C_P F T$
10	$C_V^{5,00}$	24	$C_V^{0,5} C_P$	38	$C_V F T$	52	$F^2 C_P^2 F T^2$
11	$F T^2$	25	$C_V C_P^{0,5}$	39	$C_V F T^2$	53	$C_V F T F C_P$
12	$F T^3$	26	$C_V C_P$	40	$C_V F T^{4,5}$	--	--
13	C_P	27	$C_V C_P^2$	41	$C_V F T^5$	--	--

Tabla 1.11 Coeficientes del método.

Las variables X_i , son función de las variables mencionadas anteriormente independientes y de la relación de la eslora del casco con el número de Fn (Froude's number). En la siguiente tabla para un valor del número de Froude entre 0,4 y 1,0, se recogerán los diferentes valores de las constantes B_i .

Fn	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
B0	0,42805	-11,52091	14,52452	-0,1736828	2,78574	-0,35459	-6,71762	-1,994458	1,20146
B1	0	12,05635	0	0	0	0	0	0	0
B2	0	0	-15,14608	0	0	0	0	0	0
B3	0	0	0	0	-8,29346	0	0	0	0
B4	0	0	0	0	0	0	-0,751494	0	0
B5	0	0	0	0	0	-0,177265	0	0	-1,080677
B6	0	0	0	0	-0,031805	0	0	0	0
B7	-0,0113839	0	0	0	0	0	-0,0009476	-0,0009158	0,193216
B8	0	0	-0,0002901	0	0	0	0	0	0
B9	0,0001653	0	0	0	0	0	0	0	0
B10	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,0011667
B11	0	0	0	19,48025	0	11,02738	0	0	0
B12	0	0	17,454218	0	0	0	7,226846	0	-15,69293
B13	0	0	-21,87962	0	0	0	0	5,053618	-17,853539
B14	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,0893517
B15	0	0	0	-0,0032666	0	0	0,0079214	0	0
B16	0	0	0	0	0	0	4,8320759	0	1,6347212
B17	0	0	0	0	0	0	-0,809705	0	0
B18	0	0	0,1199874	0	0	0	0	0	0
B19	0	0	0	0,190309	0,23562	0,185261	0,0446722	0	0
B20	0	0	0,0340045	0	-0,032878	0	0	0,0105693	0
B21	0,0022619	0	-0,005236	0	0	0	-0,0020337	-0,0018758	0
B22	0	0,000362547	0	0	0	0	0	0	0
B23	-1,1915E-05	-0,000058925	0	0	0	0	0	0	0
B24	0	0	23,81034	0	0	0	0	0	12,22024
B25	0	0	0	0	9,7215	0	0	0	0
B26	0	0	0	0	0	2,813155	2,8205227	1,3038071	0
B27	2,76043	0,95357	0	4,2690504	0	0	0	0	0
B28	0	0	0	0	0	0,283344	0	0	0
B29	0	0	0,5344617	0,1262725	0	0	0	0	0
B30	0	0	0	0	0	0	0	0	-0,0837985
B31	0,0286367	0	0	0	0	0	0,0208361	0	0
B32	0	0	0	0	-0,0028312	0	0	0	0

B33	0	5,81294E-05	0	0	0	0	0	0	0
B34	-3,881E-07	0	0	0	0	0	0	0	0
B35	0	-5,94E-08	0	0	7,9E-09	0	0	0	0
B36	0	0	0	0	0	0,0060398	0	0	0
B37	-0,6157	-0,25582	0	0	-0,71001	0	0	0	0
B38	0	0	0	0	-2,27459	0	0	0	0
B39	1,63655	0	0	2,468475	0	2,366091	0	0	0
B40	0	0	0	0	38,129	0	0	0	0
B41	-3,28294	0	0	0	-40,043	0	0	0	0
B42	0	0	0	0	0	0	-0,969916	0	0
B43	0	0	-0,0172769	0	0	0	0	0	0
B44	0	0	0	-13,891417	0	0	0	0	0
B45	0	0	0	0	0	0	0	0	14,15138
B46	0	0	0	0	0	0	-1,0089253	-2,0058359	0
B47	0	0	0	-0,451056	0	-0,325001	0	0	0
B48	0	0	-0,1614093	0	0	0	0	0	0
B49	0	0	0	0	0	0	0	0,0027594	0
B50	0	0	0	-0,610085	0	0	0	0	0
B51	0	0	0	0	0	-2,25472	0	0	0
B52	0	0	0	0	0	0,568792	0	0	0
B53	0	0	0	0	0	-0,8565412	0	0	0

Tabla 1.13 Coeficientes del método de Ping-Zong.

6.5.6 Método de la serie De Groot.

En el año 1951, De Groot publicó sus ensayos realizados a más de 30 modelos de formas redondas de alta velocidad. Estos ensayos dieron como resultado una serie sistemática de gran utilidad. A los resultados de estos ensayos se realizaron unos análisis usando la ecuación de la ATTC-47 para la obtención del coeficiente de fricción.

En este método, De Groot creó un diagrama en el que se representaban distintos valores para el valor de la resistencia residuo en función de los valores del número de Froude según el volumen ($F n_{\nabla}$) y los valores de la relación desplazamiento/eslora $\frac{L}{\nabla^{\frac{1}{3}}}$. El gran hallazgo de De Groot fue la creación de un solo gráfico donde se muestran los coeficientes de resistencia residuo promedio de diferentes cascos modelo, este valor del coeficiente de resistencia residuo dependerá de los valores de $\frac{L}{\nabla^{\frac{1}{3}}}$ y los valores de $F n_{\nabla}$, cuyo rango de aplicación variará entre 0,8 y 2,7.

Para un mejor cálculo del valor de la resistencia residuo, los resultados obtenidos se representarán en la gráfica en forma de $\frac{R_R}{\Delta}$.

El coeficiente total de resistencia tendrá aplicado un coeficiente de corrección llamado C_A , el cual recibirá un valor de $0,4 \cdot 10^{-3}$.

El valor de la superficie mojada vendrá dado por

$$S = 2.75 \cdot \sqrt{\nabla} \cdot L$$

El cálculo del coeficiente de resistencia de fricción se realizará siguiendo la expresión proporcionada por la ATTC-1947:

$$C_F = 0.0586 \cdot [\log_{10}(R_e \cdot C_F)]^2$$

Para una correcta resolución de esta ecuación será necesario aplicar el método de Newton-Raphson.

La resistencia total vendrá dada por la siguiente expresión:

$$R_T = (C_F + C_A) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot \frac{R_R}{\Delta} \cdot \Delta$$

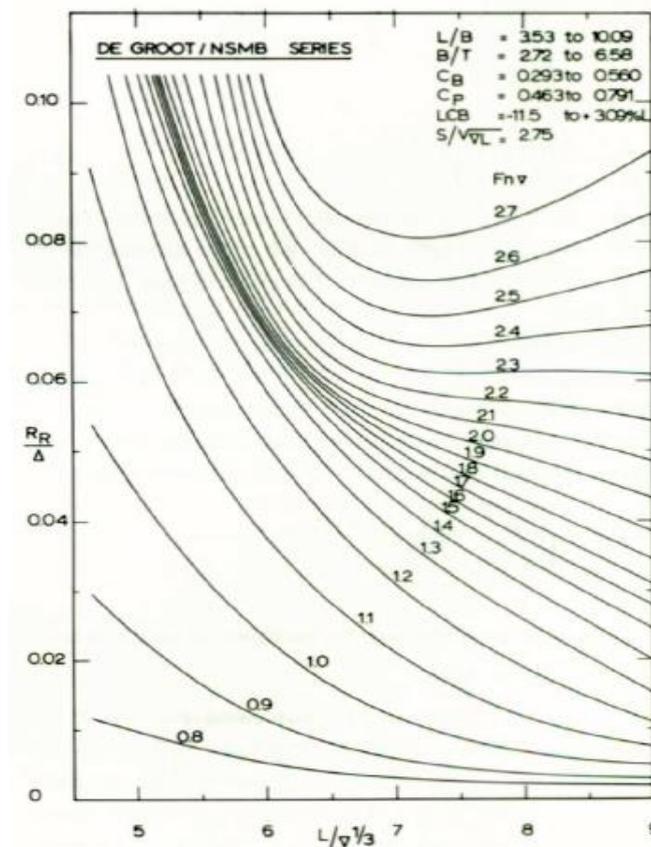


Figura 6.1 Diagrama del método de De Groot.

7. Herramientas matemáticas empleadas.

Hemos necesitado del uso de herramientas matemáticas para poder realizar este proyecto, concretamente hemos empleado los *Cubic B-Splines* y el método de Newton-Raphson.

7.1 Método iterativo de Newton-Raphson

Se trata de un método iterativo específico de ecuaciones no lineales a través del cual podemos conseguir las raíces de una función. $f(x) = 0$

El método de Newton-Raphson tiene una interpretación geométrica sencilla, consiste en una linealización de la función, es decir, f se sustituye por una recta que contiene al punto $(x_0, f(x_0))$ y cuya pendiente coincidirá con la derivada de la función en el punto $f'(x_0)$.

La intersección de la recta tangente $f'(x_0)$ con el eje de coordenadas nos proporcionará un punto nuevo $(x_1, f(x_1))$ por el cual raíz de dicha función se encontrará más próximo. Trazaremos otra vez una recta tangente a $f(x_0)$ que cruce por $(x_1, f(x_1))$, éste, al intersecar al eje de coordenadas nos proporcionará otro punto nuevo $(x_2, f(x_2))$.

Este procedimiento se repetirá de manera iterativa, del que obtendremos una serie de aproximaciones $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ que será convergente con la raíz exacta x . Se trata de un método muy rápido y eficiente ya que la convergencia es de tipo cuadrático.

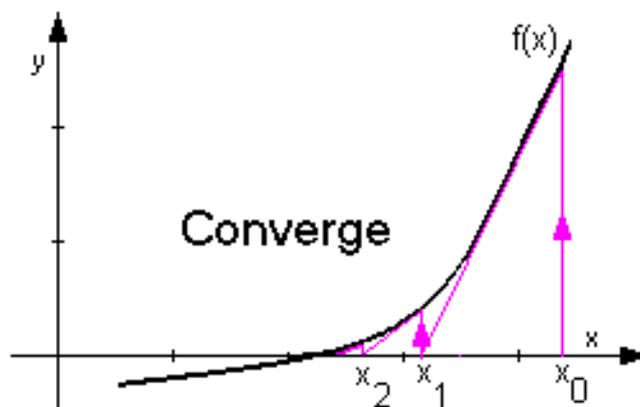


Figura 7.1 Gráfico Método de Newton-Raphson

El procedimiento descrito anteriormente puede ser expresado de la siguiente manera, la recta tangente que pasará por el punto $(x_0, f(x_0))$ a la función $f(x)$ sería:

$$\frac{y - f(x_0)}{x - x_0} = f'(x_0)$$
$$x = x_0 + \frac{y - f(x_0)}{f'(x_0)}$$

Donde el corte con el eje nos proporcionará el punto $(x_1, f(x_1))$.

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$$

Del mismo modo podremos obtener:

$$x_2 = x_1 - \frac{f(x_1)}{f'(x_1)}$$

Por lo que finalmente podemos hallar la siguiente expresión:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

Esta última expresión recibe el nombre de Fórmula de iteración de Newton-Raphson, al tener este método un orden 2 de convergencia, resulta más económica que otros métodos computacionales.

7.2 Cubic B-Splines

El objetivo de esta herramienta es obtener una curva polinomial compuesta por diferentes segmentos y que tiene ciertas propiedades de regularidad (continuidad de las derivadas). Se suele usar cuando el número de datos de la interpolación es muy grande, por lo que la interpolación polinomial no es adecuada. Por lo tanto, se usan segmentos polinomiales cúbicos de manera que se encuentren lo más cercanos a los puntos definidos y que conserven cierta suavidad, se dice que una función es suave, cuando existen derivadas de todos los órdenes.

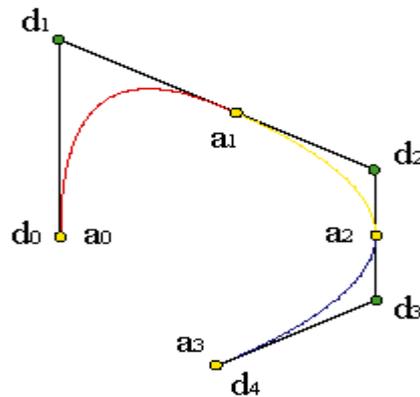


Figura 7.2 Función polinómica a trozos.

A través de esta función y con cada sucesión de puntos, definimos una curva lo más cercana a ellos. Como antes, podemos restringir nuestra atención a una sola coordenada $Y_i(\bar{u})$.

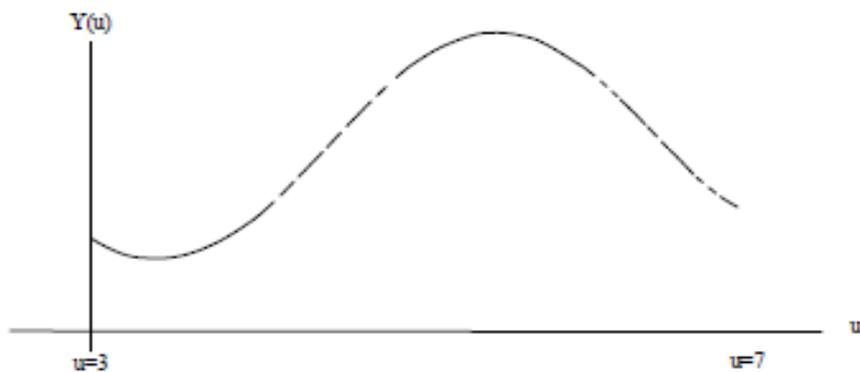


Figura 7.3 $Y_i(\bar{u})$. Componente y de la figura 7.2

Realizaremos el estudio del polinomio cúbico en segmentos, por lo que estará constituido mediante el enlace de los polinomios cúbicos $Y_i(\bar{u})$ que tendrán continuidad tanto en su primera como en su segunda derivada en cada punto de enlace.

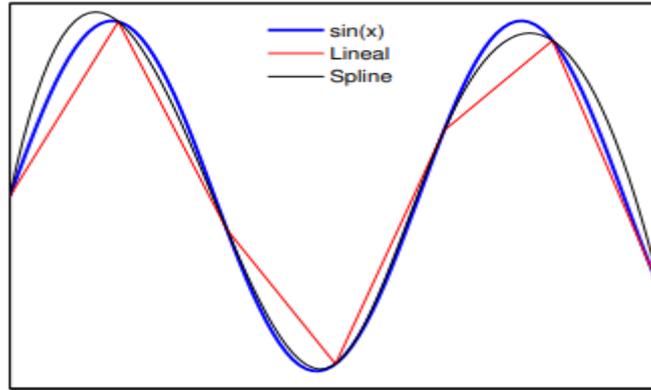


Figura 7.4 Representación gráfica de polinomio cúbico.

Por lo que se cumple el requisito de continuidad en la función:

$$Q_{i-1} = Q_i(\bar{u}_i)$$

$$Q_{i-1}^{(1)} = Q_i^{(1)}(\bar{u}_i)$$

$$Q_{i-1}^{(2)} = Q_i^{(2)}(\bar{u}_i)$$

Y por tanto cumplimos lo siguiente:

$$Y_{i-1} = Y_i(\bar{u}_i)$$

$$Y_{i-1}^{(1)} = Y_i^{(1)}(\bar{u}_i)$$

$$Y_{i-1}^{(2)} = Y_i^{(2)}(\bar{u}_i)$$

Para obtener $Y(\bar{u})$ se usan funciones base que tengan derivadas continuas hasta la segunda derivada, puesto que al combinar linealmente estas funciones nos dará como resultado una función base con derivadas continuas hasta su segunda derivada. $Y(\bar{u})$ se puede representar del siguiente modo, como una unión por partes de funciones base cúbicas, continuas y escaladas.

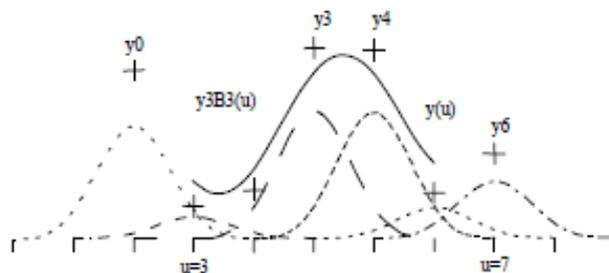


Figura 7.5 Funciones base y escaladas.

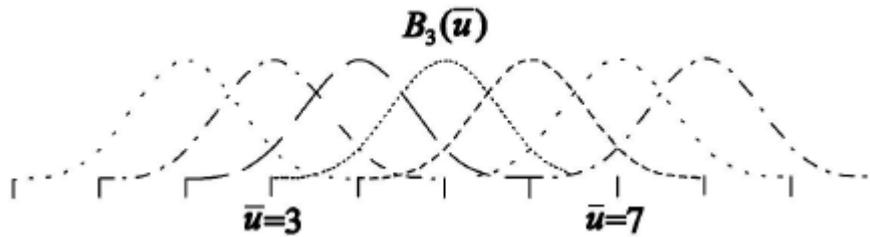


Figura 7.6 Funciones base sin escalar.

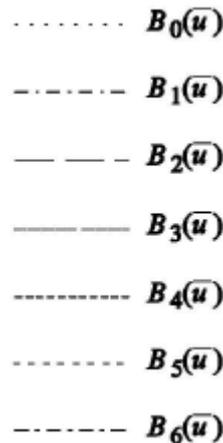


Figura 7.7 Funciones base.

Como se puede ver en la figura 7.7, los nodos de control serán numerados de 0 a n , donde en nuestro caso $n=6$. Para conseguir definir de manera adecuada todos los segmentos del polinomio cúbico, serán necesarias cuatro funciones base. Debido a eso, contamos con tres funciones base más y tres nodos de control más, que segmentos de curva. Así que cada función base será diferente de cero en cuatro intervalos paramétricos.

La función base que se encuentra más a la izquierda se extenderá tres intervalos más hacia la derecha, y viceversa, la función base más a la derecha se extenderá tres intervalos más hacia la izquierda. Debido a esto, tendremos $m+1$ nodos de control, $m+1$ funciones base, $m-2$ segmentos de curva delimitados por $m-1$ nodos, y $m-1+3+3$ nodos en total, que es igual a $m+5$ nodos en total. Entonces, se crea la curva a partir de \bar{u}_3 a \bar{u}_{m+1} para que así \bar{u} pueda tener diferentes valores.

Para poder determinar estas funciones base, suponemos que toda función base será diferente para los siguientes cuatro intervalos, para más facilidad se asume que estos intervalos tendrán una longitud unitaria. Mediante un polinomio cúbico se definirá una función base, como se indica en la siguiente expresión.

$$a_j + b_j u + c_j u^2 + d_j u^3 \quad i - 3 \leq j \leq i$$

Se puede ver en la figura a continuación, que el B-Spline Cúbico uniforme $B_i(\bar{u})$ será una función base cúbica continua, que se encuentra centrada en \bar{u}_{i+2} . El valor de la función será 0 para $\bar{u} \leq \bar{u}_i$ y para $\bar{u} \geq \bar{u}_{i+4}$.

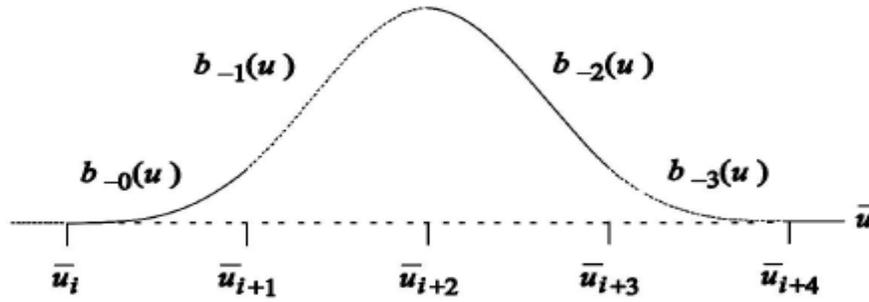


Figura 7.8 Cubic B-Spline

Toma el valor distinto de cero en una zona formada por cuatro segmentos polinómicos $b_{-0}(u)$, $b_{-1}(u)$, $b_{-2}(u)$ y $b_{-3}(u)$. Cada uno de estos segmentos estará compuesto por cuatro coeficientes, por lo que tendremos que determinar dieciséis coeficientes distintos.

Sabemos que el valor de $B_i(\bar{u})$ será cero para $\bar{u} \leq \bar{u}_i$ y para $\bar{u} \geq \bar{u}_{i+4}$, por lo que la primera y la segunda derivada $B_i^1(\bar{u})$ y $B_i^2(\bar{u})$ deberá concordar en cada nodo.

$$\begin{array}{lll}
 0 = b_{-0}(0) & 0 = b_{-0}^{(1)}(0) & 0 = b_{-0}^{(2)}(0) \\
 b_{-0}(1) = b_{-1}(0) & b_{-0}^{(1)}(1) = b_{-1}^{(1)}(0) & b_{-0}^{(2)}(1) = b_{-1}^{(2)}(0) \\
 b_{-1}(1) = b_{-2}(0) & b_{-1}^{(1)}(1) = b_{-2}^{(1)}(0) & b_{-1}^{(2)}(1) = b_{-2}^{(2)}(0) \\
 b_{-2}(1) = b_{-3}(0) & b_{-2}^{(1)}(1) = b_{-3}^{(1)}(0) & b_{-2}^{(2)}(1) = b_{-3}^{(2)}(0) \\
 b_{-3}(1) = 0 & b_{-3}^{(1)}(1) = 0 & b_{-3}^{(2)}(1) = 0
 \end{array}$$

Figura 7.9 Valores de los nodos.

Todo segmento estará parametrizado de modo que $u=0$ se corresponderá al punto posicionado más a la izquierda del intervalo y $u=1$ se corresponderá al punto posicionado más a la derecha del intervalo, por lo que se debe cumplir que:

$$b_{-0}(u) + b_{-1}(u) + b_{-2}(u) + b_{-3}(u) = 1 \quad 0 \leq u \leq 1$$

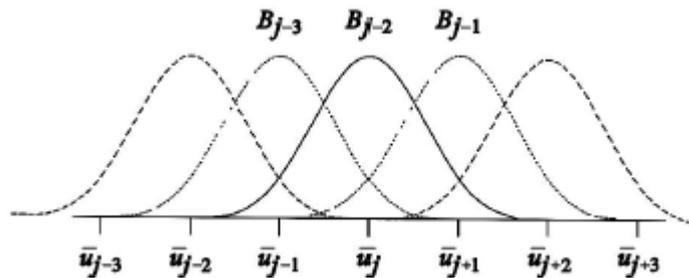


Figura 7.10 Funciones base B_i desplazadas.

Ahora dispondremos de dieciséis ecuaciones con dieciséis incógnitas, ahora los coeficientes a_j , b_j , c_j , d_j podrán ser despejados, para los cuatro segmentos que forman la función, $b_{-0}(u)$, $b_{-1}(u)$, $b_{-2}(u)$, $b_{-3}(u)$ que componen nuestra función base B, esto nos dará como resultado los siguientes polinomios:

$$b_{-0}(u) = \frac{1}{6}u^3$$

$$b_{-1}(u) = \frac{1}{6}(1 + 3u + 3u^2 - 3u^3)$$

$$b_{-2}(u) = \frac{1}{6}(4 - 6u^2 + 3u^3)$$

$$b_{-3}(u) = \frac{1}{6}(1 + 3u + 3u^2 - u^3)$$

Estos cuatro segmentos serán los que definan el B-Spline cúbico uniforme, decimos que es uniforme porque sus segmentos se encuentran equiespaciados y la letra “B” se debe a que hace referencia a que son funciones “Base”.

Para crear la curva, se seleccionará un grupo de nodos V_i y los usaremos para definir dicha curva.

$$Q(\bar{u}) = \sum_i V_i B_i(\bar{u}) = \sum_i (x_i B_i(\bar{u}), y_i B_i(\bar{u}))$$

Cada B_i será una copia desplazada de B, que irá desde \bar{u}_i a $\bar{u}_i + 4$, los nodos de control podrán definir los coeficientes que se encuentren en el sumatorio: $V_i = (x_i, y_i)$.

Las funciones base serán distintas a cero en cuatro intervalos consecutivos, si

$\bar{u}_i \leq u \leq \bar{u}_{i+1}$ tendremos:

$$Q_i(\bar{u}) = \sum_{r=-3}^{r=0} V_{i+r} B_{i+r}(\bar{u}) = V_{i-3} b_{i-3}(\bar{u}) + V_{i-2} b_{i-2}(\bar{u}) + V_{i-1} b_{i-1}(\bar{u}) + V_{i-0} b_{i-0}(\bar{u})$$

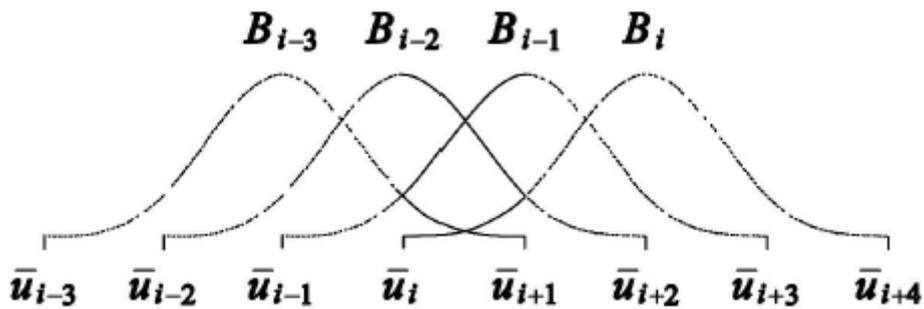


Figura 7.11 Representación gráfica de cuatro B-Splines cúbicos distintos de 0 en el intervalo n-ésimo.

8. Funcionalidad de la interfaz gráfica

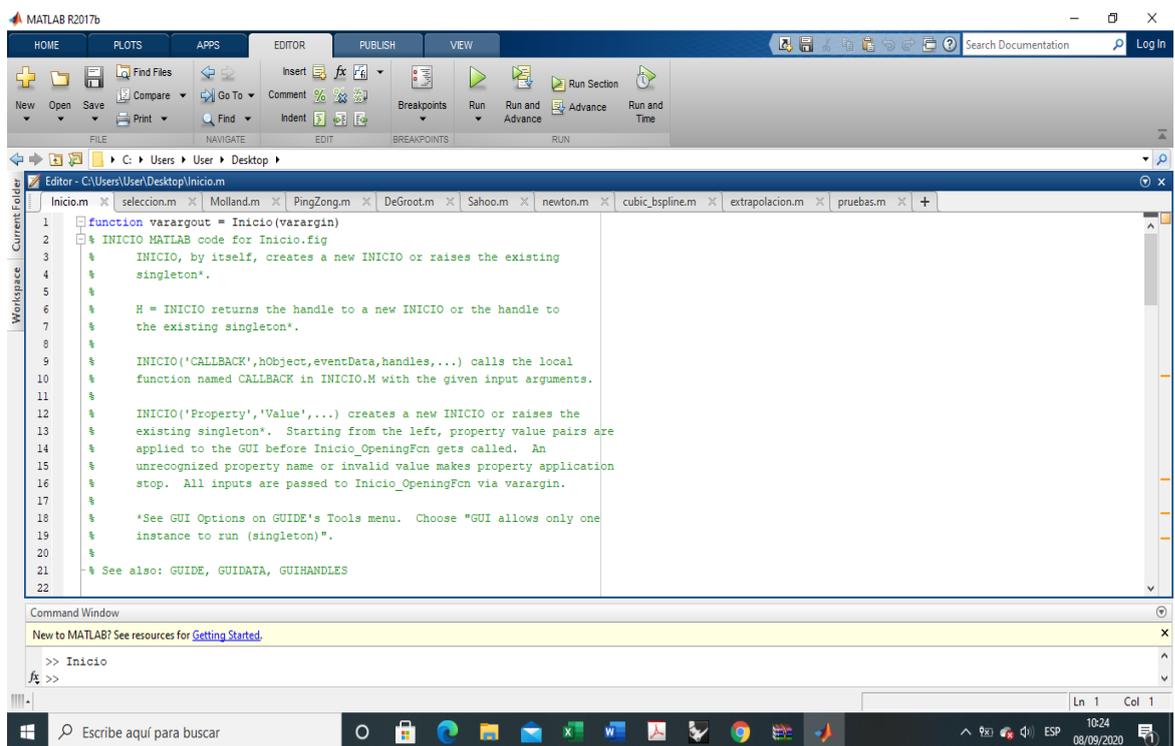
Ahora vamos a ejemplificar el funcionamiento de la interfaz gráfica realizada a través del lenguaje *Matlab*, veremos desde la realización hasta la consecución final de los resultados, para ello haremos uso de capturas de pantalla del interfaz, tanto de sus ventanas como de sus diferentes funciones.

Para una correcta ejecución del programa *Matlab* será recomendable guardar todos los archivos que utilizaremos en el interfaz, tanto los archivos *.m* y *.fig.*, así como las imágenes que usaremos en el interfaz.

8.1 Menú de Inicio

Empezaremos ejecutando el software *Matlab* y seleccionando el directorio donde se encontrarán todos los archivos que necesitaremos para trabajar con el programa.

A continuación, abriremos el archivo “Inicio.m” y ejecutaremos el botón run , una vez se pulsa el botón, se ejecutará el programa y aparecerá en la pantalla la ventana del primer menú, el menú de inicio.



```
function varargout = Inicio(varargin)
% INICIO MATLAB code for Inicio.fig
%
%   INICIO, by itself, creates a new INICIO or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = INICIO returns the handle to a new INICIO or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   INICIO('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in INICIO.M with the given input arguments.
%
%   INICIO('Property','Value',...) creates a new INICIO or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before Inicio_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to Inicio_OpeningFcn via varargin.
%
% *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
% instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
```

Command Window

```
>> Inicio
>>
```

Figura 8.1 Ejecución del programa.



Figura 8.2 Ventana del menú de Inicio.

La finalidad de esta ventana no es otra que la presentación del proyecto y además el comienzo y finalización de éste. En la ventana tenemos dos botones, “Comenzar” y “Salir”, con estos botones daremos comienzo y final al programa.

Cuando pulsemos el botón de “Comenzar” se abrirá a continuación la ventana de selección, que continuará con el programa.

8.2 Menú de Selección

El menú de selección se mostrará a través de la siguiente ventana:

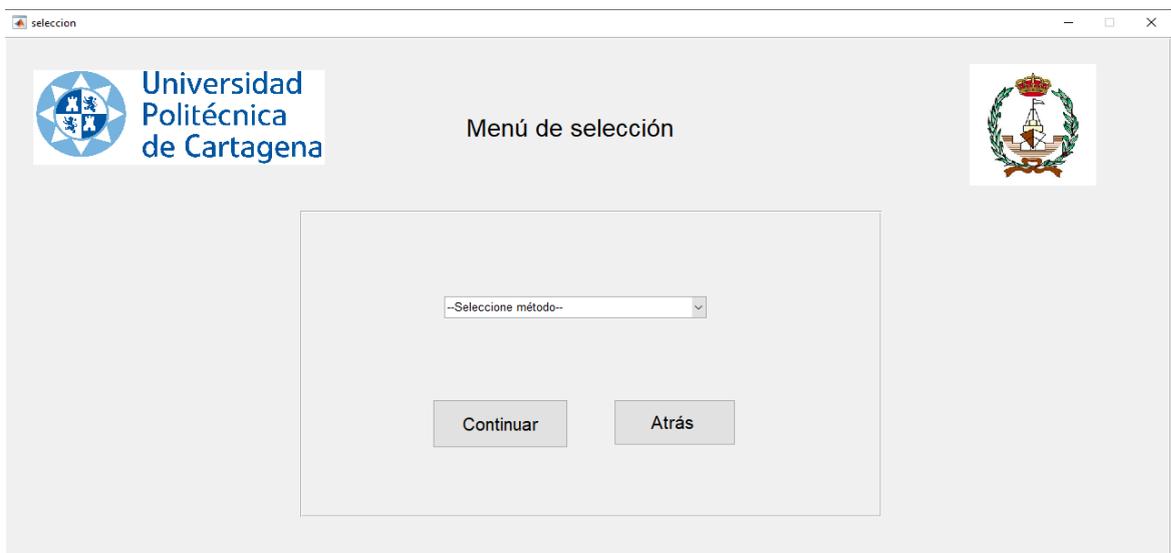


Figura 8.3 Ventana del menú de selección.

En esta ventana del menú de selección contamos con un “popupmenu”, en el que se seleccionará el método que queremos emplear para realizar el estudio de la resistencia al avance del catamarán. Además, contamos con dos botones para poder continuar con el programa o para salir y volver al menú de inicio.



Figura 8.4 Selección del método de cálculo.

Tras la selección del método de cálculo, se nos habilitará el botón “Continuar” y así podremos ejecutar el programa con el método de cálculo seleccionado. Si pulsamos el botón “Atrás”, retrocederemos a la ventana del menú de “Inicio”.

Si se diera el caso en el que no se seleccionase ningún método, el botón de “Continuar” estaría inhabilitado por lo que no será posible realizar la ejecución de manera correcta el programa.

8.3 Método de Sahoo, Browne y Salas.

Una vez seleccionado el método, en este caso emplearemos el método de Sahoo, y tras haber pulsado el botón de “Continuar” se abrirá la siguiente ventana que se representará en la figura 8.5. En esta ventana contamos con diferentes cuadros de texto con sus correspondientes “inputs” que corresponderán con las distintas variables que se deberán introducir en el programa para su ejecución.

The screenshot shows a software window titled "Sahoo" with a logo for "Universidad Politécnica de Cartagena" and a crest. The interface is divided into several sections:

- Variables Serie Sistemática:** A group box containing five input fields labeled L/B, B/T, CB, $L(\nabla^{1/3})$, and s/L.
- Variables Hidrostáticas:** A group box containing eight input fields labeled L, B, T, $\Delta(t)$, $iE(^{\circ})$, $\beta(^{\circ})$, WSA, LCB, and LCF.
- Parameters:** Two input fields for "Fn min" and "Fn max", and a radio button labeled "Río".
- Buttons:** Three buttons labeled "Comprobar", "Calcular", and "Atrás".
- Plots:** Two empty coordinate systems with x and y axes ranging from 0 to 1.

Figura 8.5 Ventana del método de Sahoo

Ahora vamos a explicar cómo introducir los diferentes parámetros para la correcta aplicación del método y como funcionarán las diferentes partes del interfaz. Primero explicaremos la entrada de datos, para ello diferenciaremos entre los datos de entrada que tendremos que comparar y el tipo de agua por el que navegará nuestro catamarán.

En nuestro caso, nos ayudaremos de los datos de un catamarán para poder comparar y validar nuestros resultados. El catamarán escogido será el correspondiente al PFC de María Martín Martínez “*Estimación y análisis paramétrico de la resistencia al avance de embarcaciones catamaranes con pantoque redondeado mediante métodos numéricos*”, del cual sus parámetros se expondrán en la siguiente tabla.

Parámetros	Valor
Eslora de flotación	58,536 m
Manga	18,001 m
Calado	4,1 m
Desplazamiento	1143.9 t
Superficie mojada	1006,189 m ²
iE	17,618 °
β	35,585°
s/L	0,229
L/B	12,736 m
B/T	1,12 m
Coefficiente de Bloque	0,514
L/Vmono ^{1/3}	5,612

Tabla 8.1 Parámetros de entrada del Catamarán para el método de Sahoo

El rango de velocidades que usaremos para el estudio del método será dado en valores del número de Froude y estarán comprendidos en valores de 0.2 y 1.0 de Fn. Una vez conocemos estos datos, los introduciremos en el programa para comprobar que están dentro de los valores correctos para una correcta aplicación del método. Esto quedará reflejado en la ventana de esta manera:

Variables Serie Sistemática

L/B

B/T

CB

L/(∇^{1/3})

s/L

Variables Hidrostáticas

L

B

T

Δ (t)

iE (°)

β (°)

WSA

LCB

LCF

Figuras 8.6 y 8.7 Variables referentes a la serie sistemática y a las variables hidrostáticas del catamarán de estudio.

Tanto para las variables de la Serie Sistemática como las variables Hidrostáticas, contamos con una serie de restricciones en caso de que el usuario introduzca una o más variables que no se encuentren dentro de los límites del método. Para las variables referentes a dimensiones del buque, siempre que el usuario introduzca un valor igual a 0 o menor que 0, saltará un mensaje por pantalla en el que se nos advertirá que el valor introducido no es correcto.

Para poder realizar esa comprobación de las variables, lo conseguiremos pulsando el botón “Comprobar”. Una vez aparece ese mensaje, se bloqueará el botón de “Calcular” y no se podrá continuar con la ejecución del método.



Figura 8.8 Ejemplo de mensaje de error al meter una variable con un valor erróneo.

Como vemos en la figura 8.8, al introducir un valor de “L” menor de 0, aparece el mensaje en el centro de la ventana en el que se nos comunica que ese valor es erróneo.

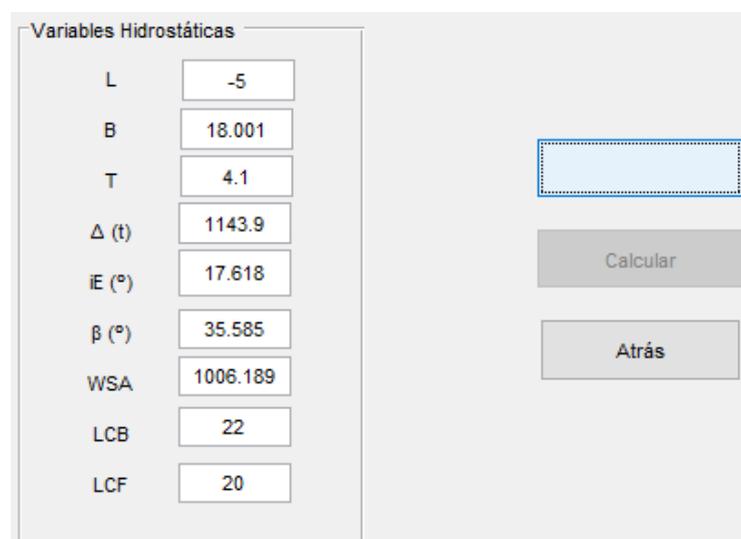


Figura 8.9 Ejemplo de bloqueo del botón “Calcular” al aparecer el mensaje de error.

Como podemos observar en la figura 8.9, una vez aparece el mensaje de error al introducir un valor incorrecto, se bloqueará el botón “Calcular”, siendo imposible continuar con la ejecución del método.

Cuando se introduce un valor de velocidad que no se encuentra dentro del rango de velocidades aplicable, se aparecerá otro mensaje de aviso, como se puede ver en la imagen 8.10, ocurriendo lo mismo que en el caso anterior produciéndose el bloqueo del botón “Calcular”.

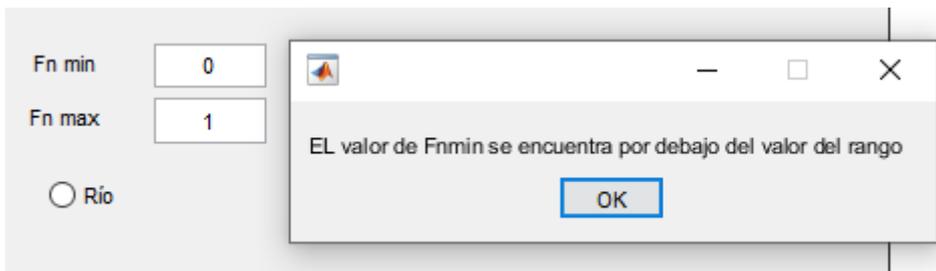


Figura 8.10 Ejemplo de mensaje cuando se introduce un valor de velocidad fuera del rango de velocidades.

Contamos también con otra variable a introducir que deberá ser comprobada si se encuentra dentro de los rangos aplicables para el método, este será el valor de s/L que corresponde al factor de la distancia entre los cascos del catamarán y la eslora de este. Este valor deberá encontrarse entre 0.2 y 0.4, y como anteriormente si el usuario introduce un valor fuera del rango aplicable aparecerá un mensaje de aviso y se bloqueará el botón de “Calcular”, hasta que se corrija ese valor.

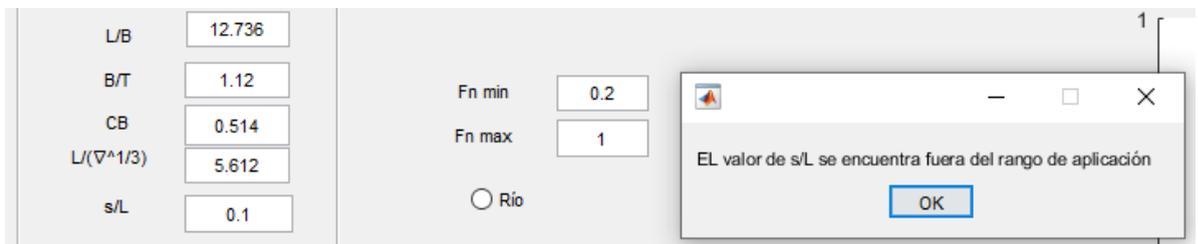
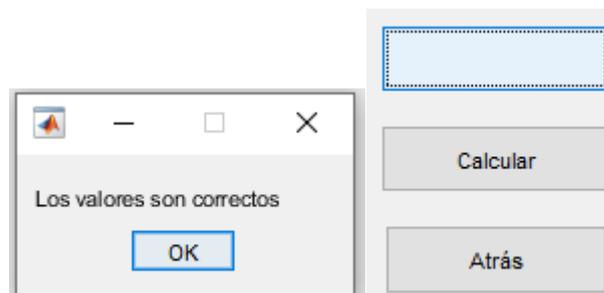


Figura 8.11 Ejemplo de mensaje de aviso al introducir un valor de s/L fuera del rango aplicable.

Finalmente, cuando los todos los valores se encuentran dentro de los rangos aplicables por el método aparecerá un mensaje en el que se indicará que los valores son correctos y se desbloqueará el botón de “Calcular”, permitiéndonos continuar con la ejecución del método.



Figuras 8.11 y 8.12 Ejemplo del interfaz cuando los valores introducidos son correctos.

Por último, tendremos otra condición que dependerá del medio por el que navegue nuestro catamarán. Esta condición se aplicará a través de un *radiobutton* al que le llamaremos “Río”, en el que al pulsar ese botón cambiarán las condiciones de densidad y viscosidad de un medio salado a un medio dulce, por lo tanto, los resultados serán distintos.



The image shows a control panel with two input fields. The first is labeled 'Fn min' and contains the value '0.2'. The second is labeled 'Fn max' and contains the value '1'. Below these fields is a radio button that is selected, with the label 'Río' next to it.

Figura 8.13 *Radiobutton* “Río” para cambiar las condiciones del medio del catamarán.

Una vez comprobados que todos los valores necesarios para la aplicación del método se encuentran dentro de los rangos de aplicación, podremos continuar con la ejecución del método. Para ello bastará con pulsar el botón “Calcular” y se representarán las gráficas de “Resistencia-Velocidad” y “Potencia-Velocidad”.

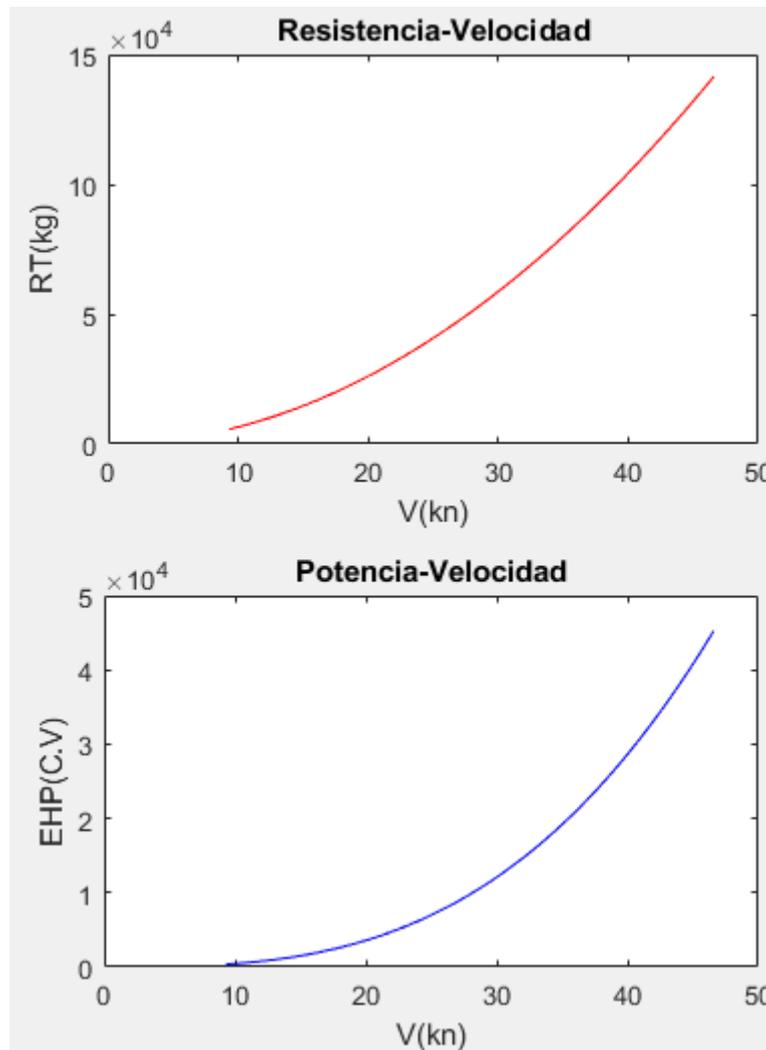


Figura 8.14 Representación de las curvas Resistencia-Velocidad y Potencia -Velocidad.

A su vez, al pulsar el botón “Calcular” se generará una tabla en la que se nos mostrarán los diferentes resultados de los distintos parámetros que componen la resistencia al avance del catamarán, también su potencia y valores del número de Reynolds (Rn) que variarán en función del rango de velocidades en el que aplicaremos el método. Los valores representados en la tabla de resistencia (Rt) y potencia (EHP), serán los que utilizaremos para representar las dos gráficas anteriores representados en la figura 8.14.

-----Método de Sahoo-----
-----Método de Sahoo-----

	V_kn	Fn	Rn	CW _{cat}	CW _{mono}	CT	RT_kg	EHP_CV
9	9.3162	0.2	2.2939e+08	0.013428	0.00979	0.027058	5660.8	361.73
13	13.974	0.3	3.4408e+08	0.01049	0.0096742	0.019459	12737	1220.9
18	18.632	0.4	4.5878e+08	0.010345	0.0047608	0.016854	22643	2893.9
23	23.29	0.5	5.7347e+08	0.014844	0.0098175	0.019816	35380	5652.1
27	27.949	0.6	6.8817e+08	0.0084367	0.0057062	0.012354	50947	9766.8
32	32.607	0.7	8.0286e+08	0.0059769	0.0045239	0.0091215	69344	15509
37	37.265	0.8	9.1756e+08	0.0046358	0.0035954	0.0071893	90572	23151
41	41.923	0.9	1.0323e+09	0.0034237	0.003514	0.0055093	1.1463e+05	32963
46	46.581	1	1.1469e+09	0.0029826	0.0030239	0.0046884	1.4152e+05	45217

Figura 8.15 Tabla de los resultados obtenidos por el método de Sahoo.

Los resultados de resistencia y potencia, (Rt) y (EHP), estarán dados en kg y C.V. ya que son las medidas de resultado más usuales. Estos resultados obtenidos, los compararemos con los resultados del proyecto mencionado anteriormente para poder ser validados correctamente.

Velocidad (kn)	Fn	Rn	CW _{cat}	CW _{mono}	CT	RT (kg)	EHP (C.V.)
9,315	0,2	2,360E+08	1,343E-02	9,797E-03	3,126E-02	5660,8	5,19
13,972	0,3	3,541E+08	1,050E-02	9,684E-03	2,378E-02	12737	11,89
18,629	0,4	4,721E+08	1,033E-02	4,763E-03	2,659E-02	22643	22,62
23,286	0,5	5,901E+08	1,484E-02	9,813E-03	3,063E-02	35380	38,35
27,994	0,6	7,08E+08	8,439E-03	5,707E-03	2,387E-02		60,43
32,601	0,7	8,262E+08	5,979E-03	4,525E-03	2,111E-02	1665,5	91,39
37,258	0,8	9,442E+08	4,638E-03	3,596E-03	1,952E-02	2208,5	136,34
41,916	0,9	1,062E+09	3,425E-03	3,514E-03	1,809E-02	2961,6	203,14
46,573	1	1,180E+09	2,983E-03	3,023E-03	1,746E-02	4123,9	311,16

Tabla 8.2 Tabla de resultados comparados con el catamarán de ejemplo.

Como podemos observar, los resultados que se obtienen y los resultados aportados en el proyecto son bastante similares. Se puede achacar la diferencia obtenida en los resultados a los valores adoptados de densidad y viscosidad del medio en el que navegue el catamarán. Se puede ver que el error es muy pequeño y por tanto se puede comprobar que el programa tiene una gran fiabilidad numérica.

Por último, contamos con el botón de “Salir” con el que finalizaremos el programa y volveremos a la ventana de selección del método.

8.4 Método de Molland et AL.

Para la aplicación de este método usaremos el mismo ejemplo que en el método anterior, ya que nos servirá para realizar una comparación entre los resultados obtenidos entre ambos. Esta comparación entre el método de Sahoo, Browne y Salas y el método de Molland et Al suele realizarse ya que ambos usan la misma fórmula para el cálculo del factor de forma.

Parámetros	Valor
Eslora de flotación	58,536 m
Manga	18,001 m
Calado	4,1 m
Desplazamiento	1143.9 t
Superficie mojada	1006,189 m ²
s/L	0,229
L/B	12,736 m
B/T	1,12 m
$L/V_{mono}^{1/3}$	5,612

Tabla 8.3 Parámetros de entrada del catamarán para el método de Molland et Al.

Por lo tanto, y como podemos ver usaremos los mismos valores de los parámetros de entrada para poder realizar el estudio del método, a excepción del valor del Coeficiente de Bloque, que en este método no será necesario.

Igual que para el caso anterior, tendremos que ir a la ventana del menú de selección del método a estudiar y elegir el método de Molland et Al para poder ejecutar el programa.



Figura 8.16 Ventana de selección para el método de Molland et Al.

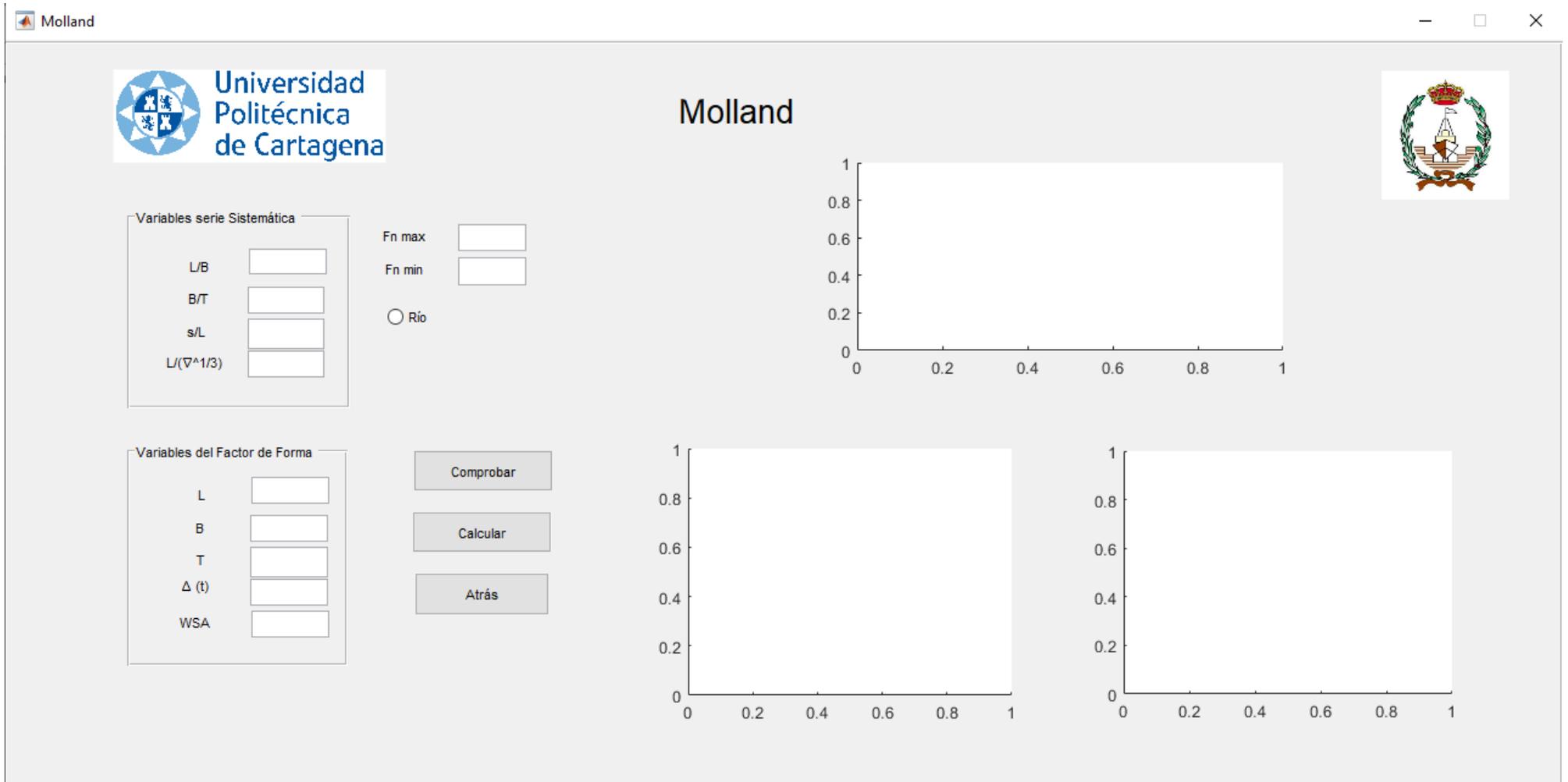


Figura 8.17 Ventana del método de Molland et Al.

Como podemos ver, contamos con una distribución similar a la del anterior método ya que contamos con unos parámetros de entrada que deberán estar dentro de unos rangos de aplicación . Por tanto, deberán ser comprobados antes de iniciar el programa, para ello contamos con el botón “Comprobar” que nos avisará y si los valores de los parámetros introducidos se encuentran dentro del rango de aplicación.

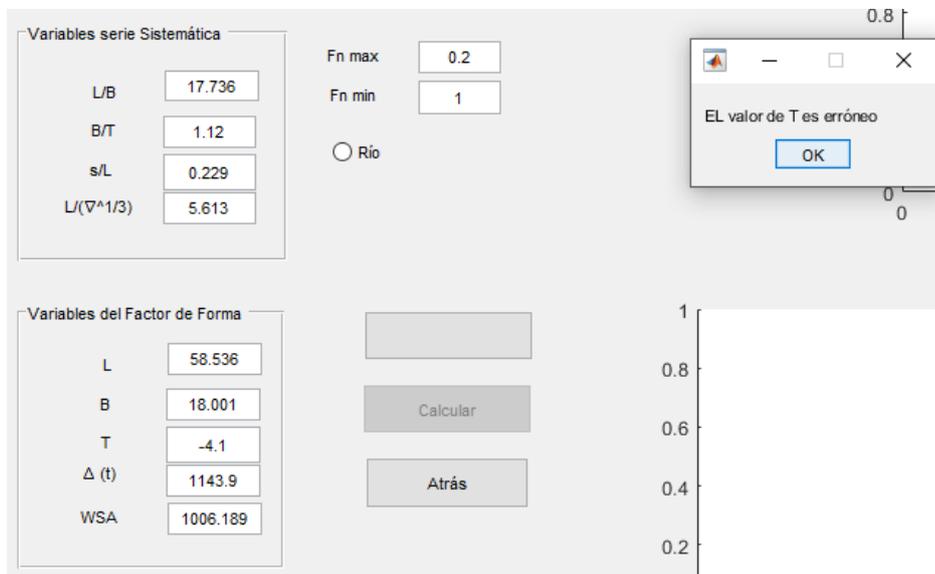


Figura 8.18 Ejemplo de mensaje de aviso cuando no se introduce un valor correcto en una de las variables.

En este ejemplo podemos ver el funcionamiento del interfaz en caso de que se introduzca un dato fuera del rango de aplicación del método. Vemos como al pulsar el botón “Comprobar”, el mensaje de aviso varía dependiendo de la variable introducida de manera incorrecta y a su vez al aparecer este mensaje por pantalla, se bloquea el botón “Calcular” haciendo que sea imposible continuar con la ejecución del programa hasta que no se introduzca un valor de variable que sea correcto.

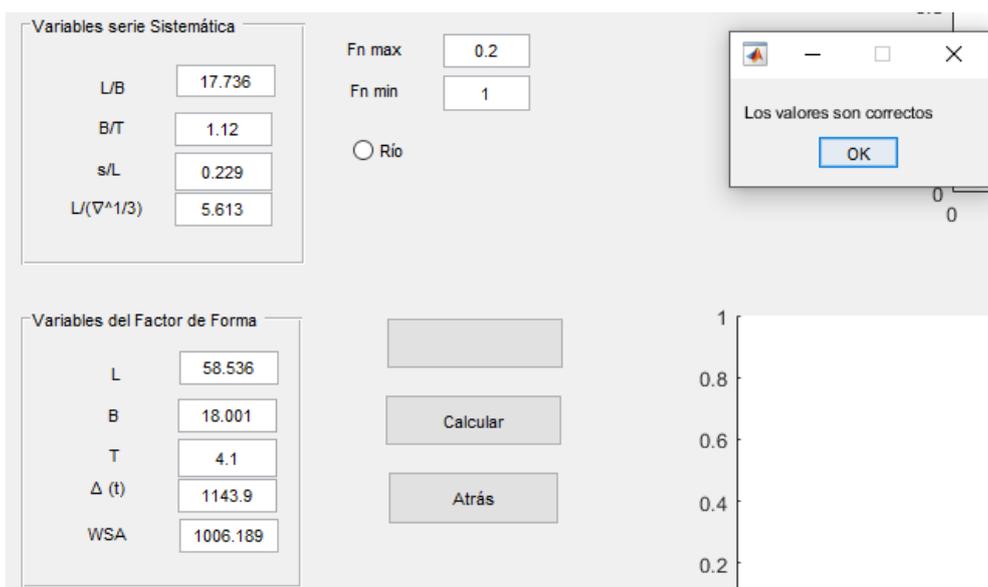


Figura 8.19 Ejemplo de mensaje de aviso cuando todos los valores que se introducen son correctos.

Igual que en el método de Sahoo, una vez se comprueba que los valores introducidos se encuentran dentro del rango de aplicación del método se desbloquea el botón de “Calcular” y podremos proceder con la ejecución del método.

También tendremos la condición del medio en el que navegue nuestro catamarán, que como con el método de Sahoo nos ayudaremos de un botón *radiobutton* llamado “Río”, el cual al ser pulsado cambiará las condiciones de densidad y viscosidad del medio, por lo que los resultados que obtendremos serán distintos.



The image shows a software interface with three elements: a label 'Fn max' next to a text input field containing '0.2', a label 'Fn min' next to a text input field containing '1', and a radio button with the label 'Río' next to it.

Figura 8.20 Radiobutton “Río”.

Tras comprobar que todos los valores de las variables se encuentran dentro del rango de aplicación del método, podremos continuar con la ejecución del método. Para ello bastará con pulsar el botón “Calcular” y se representarán las gráficas de “Resistencia-Velocidad”, “Potencia-Velocidad” y “CWcat-Velocidad”.

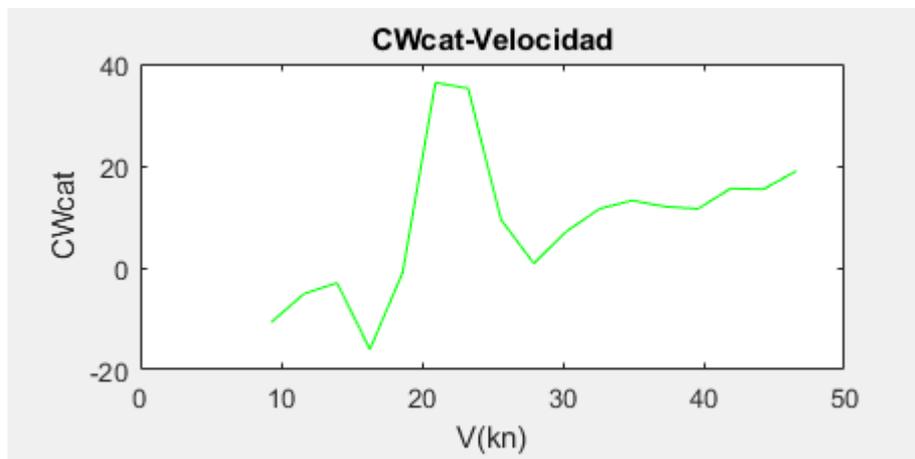


Figura 8.21 Gráfica de la curva “CWcat-Velocidad”.

Esta gráfica muestra una comparación entre el valor del coeficiente por formación de olas del catamarán y la velocidad a la que éste navega. Como se puede observar hasta un valor de 20 nudos, tendremos valores negativos del coeficiente por formación de olas lo que resulta incoherente, pero al comparar los resultados con los obtenidos en el PFC de ejemplo vemos que se obtienen valores similares.

F _n	C _{WCAT}
0,20	-5,087
0,30	-1,088
0,40	0,245
0,50	21,054
0,60	4,710
0,70	8,124
0,80	7,565
0,90	9,031
1,00	10,337

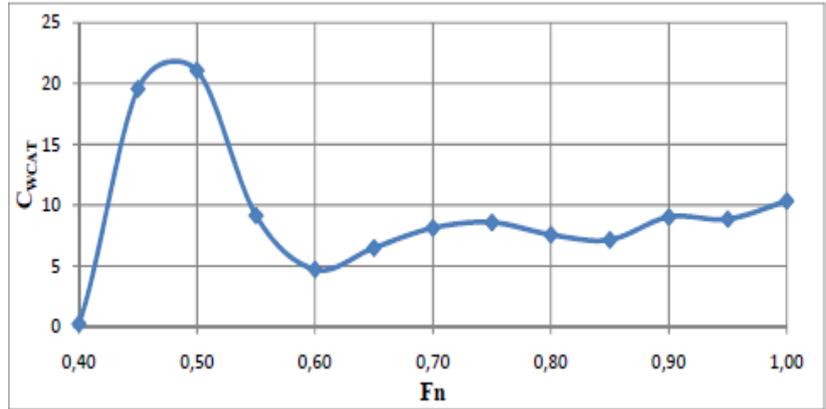


Figura 8.22 Gráfica del coeficiente de resistencia por formación de olas calculado a través del método de Molland y al para el catamarán de estudio.

Como se puede ver en la tabla, para valores de 0,2 a 0,4 del número de Froude se tienen valores negativos del coeficiente de resistencia por formación de olas, lo que se corresponde con los resultados obtenidos en nuestro diagrama.

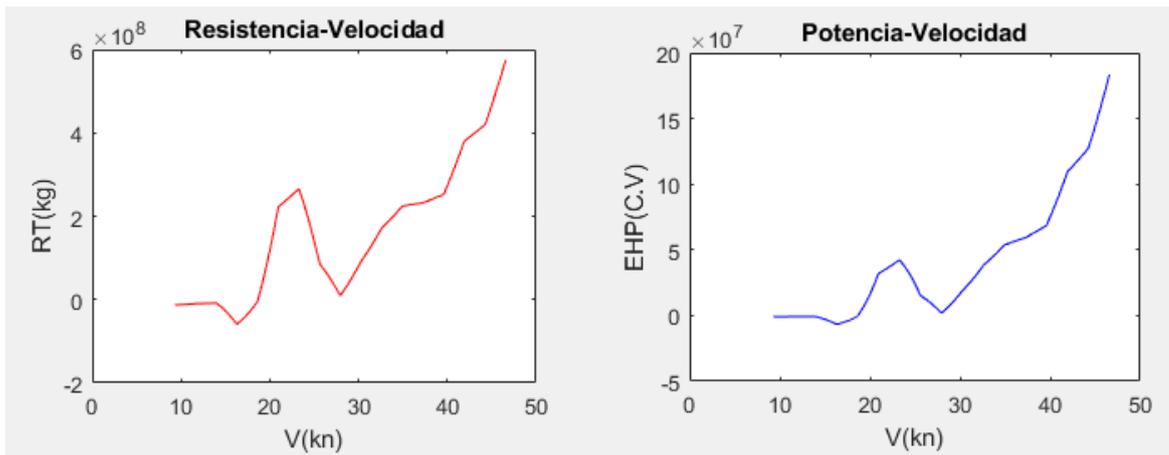


Figura 8.23 Representación de las curvas “Resistencia-Velocidad” y “Potencia-Velocidad”.

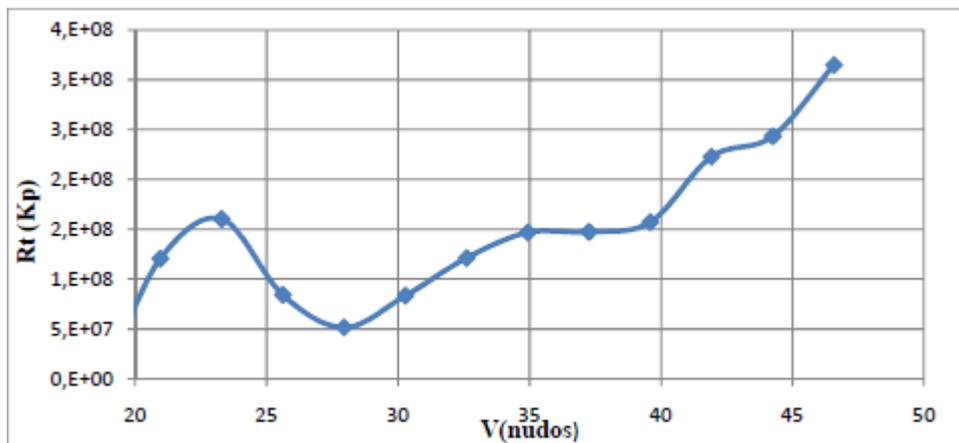


Figura 8.24 Representación curva “Resistencia-Velocidad” del caso de comparación.

Podemos observar que las curvas “Resistencia-Velocidad” y “Potencia-Velocidad” no presentan un comportamiento normal, ya que vemos que, tanto en la resistencia al avance como en la potencia necesaria, se obtienen valores negativos en el mismo tramo de velocidad. Esto puede ser debido a que para este método no tenemos en cuenta el coeficiente de resistencia por formación de olas del monocasco, por lo que únicamente se calcula la resistencia al avance teniendo en cuenta el coeficiente por formación de ola del catamarán (CWcat).

-----Método de Molland-----

V_kn	Fn	Rn	CWcat	CT	RT_kg	EHP_CV
9.3162	0.2	2.2939e+08	-10.657	-10.65	-1.2859e+07	-8.2171e+05
13.974	0.3	3.4408e+08	-2.9714	-2.9673	-8.0613e+06	-7.727e+05
18.632	0.4	4.5878e+08	-0.91152	-0.90893	-4.3898e+06	-5.6104e+05
23.29	0.5	5.7347e+08	35.188	35.19	2.6555e+08	4.2424e+07
27.949	0.6	6.8817e+08	0.84664	0.84772	9.212e+06	1.766e+06
32.607	0.7	8.0286e+08	11.576	11.576	1.7122e+08	3.8295e+07
37.265	0.8	9.1756e+08	11.997	11.997	2.3176e+08	5.9241e+07
41.923	0.9	1.0323e+09	15.559	15.559	3.8041e+08	1.0939e+08
46.581	1	1.1469e+09	19.027	19.026	5.7432e+08	1.835e+08

Figura 8.25 Tabla de los resultados obtenidos por el método de Molland et Al.

Como podemos ver, los resultados de resistencia y potencia, (Rt) y (EHP), estarán dados en kg y C.V. ya que son las medidas de resultado más usuales. Estos resultados los compararemos con los resultados del proyecto mencionado anteriormente para que puedan ser validados correctamente.

V(kn)	Fn	Rn	C _{W,CAT}	C _{TCAT}	R _{TCAT} (kg)	EHP (C.V.)
9,315	0,20	2,360E+08	-10,607	-10,62	-12870258	-822295,3446
13,972	0,30	3,541E+08	-2,884	-2,865	-8068292	-773238,4783
18,629	0,40	4,721E+08	-0,895	-0,874	-4393676	-561433,9212
23,286	0,50	5,901E+08	34,094	34,101	265788947	42453892,57
27,944	0,60	7,081E+08	0,832	0,837	9220035	1767235,461
32,601	0,70	8,262E+08	11,424	11,428	171368991	38321356,59
37,258	0,80	9,442E+08	11,565	11,568	231969173	59283093,33
41,916	0,90	1,062E+09	15,538	15,539	380753883	109470586,8
46,573	1,00	1,180E+09	19,012	19,021	574811084	183626657,6

Tabla 8.4 Resultados obtenidos por el método de Molland et Al del caso de referencia.

Como se puede observar, los resultados obtenidos por nuestro programa y los resultados que se obtienen del caso de referencia son muy similares, esto se puede deber a la diferencia de los valores usados para la densidad o la viscosidad del medio de en el que navegue el catamarán o también a diferencias en los decimales usados para los diferentes cálculos que se realizan.

Podemos comprobar a su vez que la fiabilidad numérica de cálculo es muy buena, ya que la diferencia de los resultados es muy pequeña.

Debemos mencionar que los resultados que se obtienen de resistencia al avance y de potencia, son muy superiores que los hallados a través del método de Sahoo y se podrían considerar también como incongruentes para valores del número de Froude inferiores a 0,4, esto puede ser que se deba a que las características del caso de estudio se diferencian de las características del caso de estudio original empleadas en el método de Molland et Al.

Se cuenta con una gráfica conseguida del estudio de referencia del método en el que se realiza la comparación del coeficiente de resistencia por formación de olas conseguido a través del método en cuestión para una serie de embarcaciones de doble casco de tipo catamarán cuyos pantoques tienen formas redondeadas.

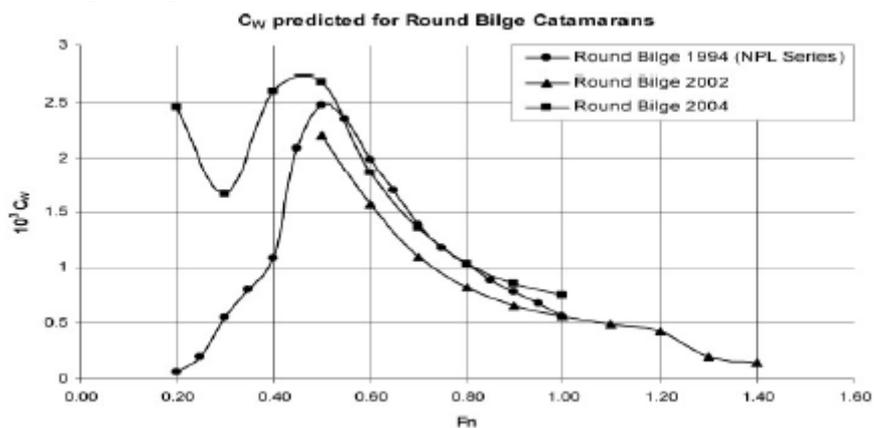


Figura 8.26 Gráfica del estudio de referencia realizado en 1994 para la serie de catamaranes.

Al comparar los valores del coeficiente de resistencia que se obtienen a partir de la embarcación estudiada, se puede observar que estos no serán aplicables ya que difieren en demasía de los valores normales que se obtienen, ya que nos dan resultados negativos y los valores de resistencia y potencia obtenidos, además de ser negativos, son muy muy superiores a los que normalmente se suelen obtener. Debido a esto, finalmente se desestima este método de predicción de la resistencia para nuestro catamarán del ejemplo.

Una vez finalizado el estudio de la resistencia al avance y la potencia a través del programa, únicamente quedaría pulsar el botón “Salir” para volver al menú de selección de método y realizar el estudio con cualquiera de los otros métodos.

8.5 Método de Ping Zong

Para este caso del estudio del método de Ping-Zong, tendremos como referencia a la hora de dar valores a las variables del catamarán y para comparar los resultados que obtendremos, el PFC de María Martín Martínez “*Estimación y análisis paramétrico de la resistencia al avance de embarcaciones catamaranes con pantoque redondeado mediante métodos numéricos*”, donde se aplicará dicho método para una embarcación catamarán con las siguientes características:

Características	Valores
Eslora de la flotación	45 m
Manga	8,4 m
Calado	3,09 m
Volumen de carena	547,758 m ³
Superficie mojada	413,2 m ²
Área de la maestra	18,2 m ²
Área del espejo de popa	6,7 m ²
LCB	1,44 m
iE	17,1°
C _A	4,00 E-04
Rango de velocidades	17-32 nudos

Tabla 8.5 Valores de los parámetros iniciales para el método de Ping Zong.

Al igual que con los métodos anteriores, deberemos seleccionar en el menú de selección de método, el método de Ping-Zong y posteriormente pulsar el botón de “Continuar” para proceder con la ejecución del método.

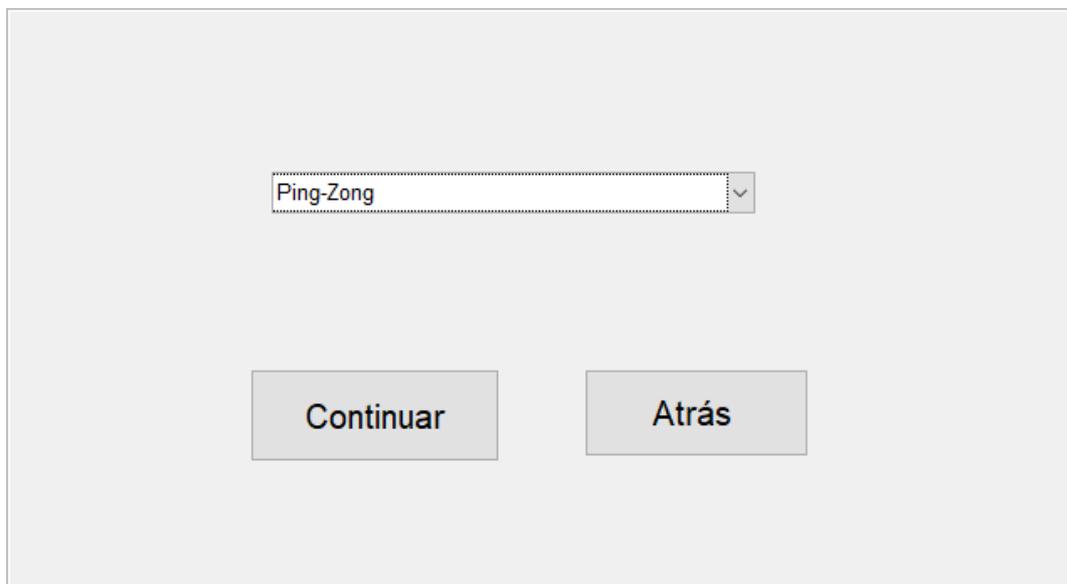


Figura 8.27 Ventana de selección para el método de Ping-Zong.

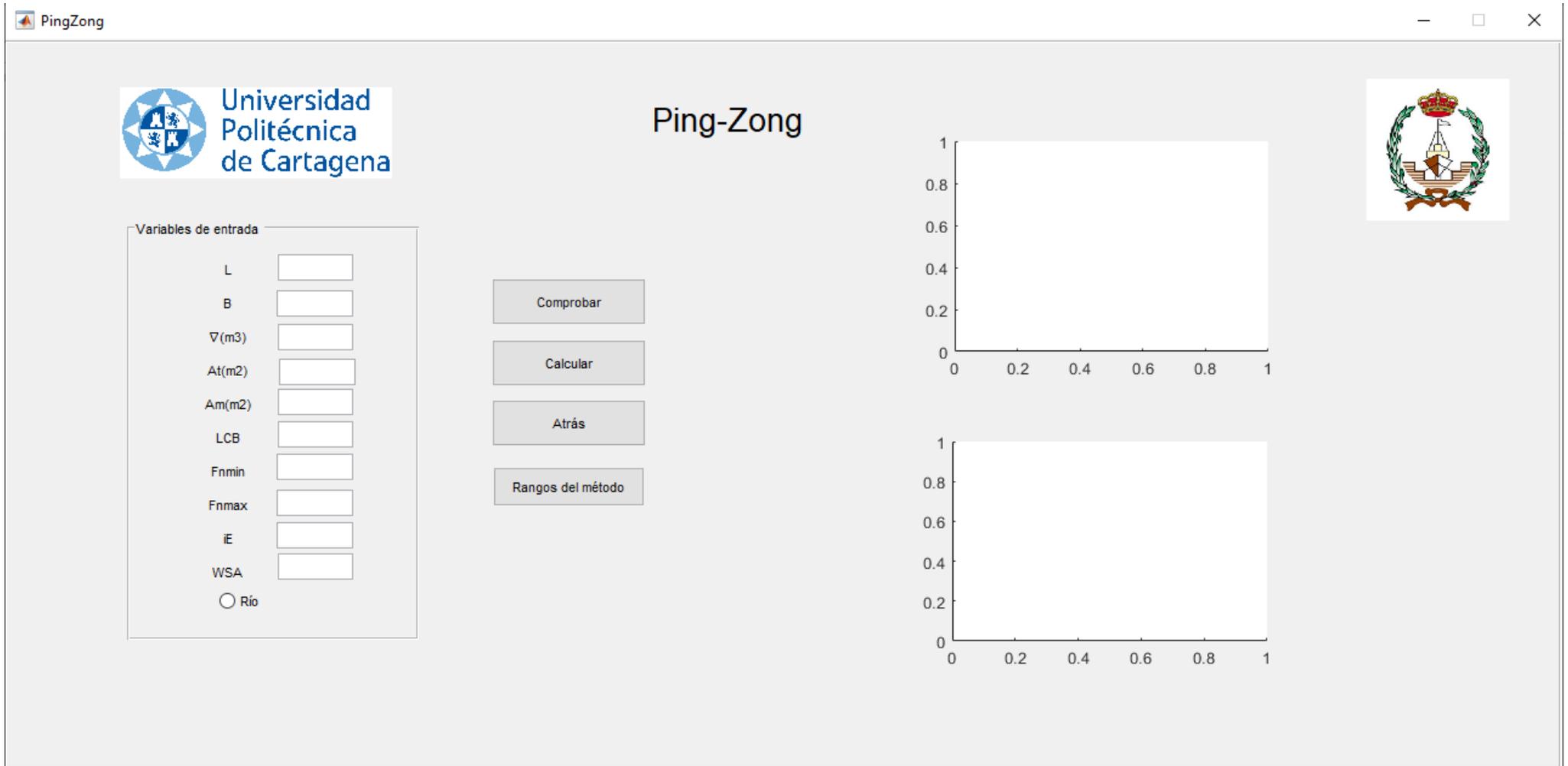


Figura 8.28 Ventana del método de Ping-Zong.

Como se puede observar, contamos con una distribución similar a la que tenemos en los métodos anteriores. Tendremos una serie de parámetros que deberemos comprobar que se encuentren dentro del rango de aplicación del método.

Para asegurarnos que se introducen correctamente el valor de los parámetros contamos con dos botones, uno de ellos será el botón de “Rangos del método”, en el que se nos mostrará por pantalla un mensaje en el que se indica el rango en el que se debe encontrar el valor del parámetro.

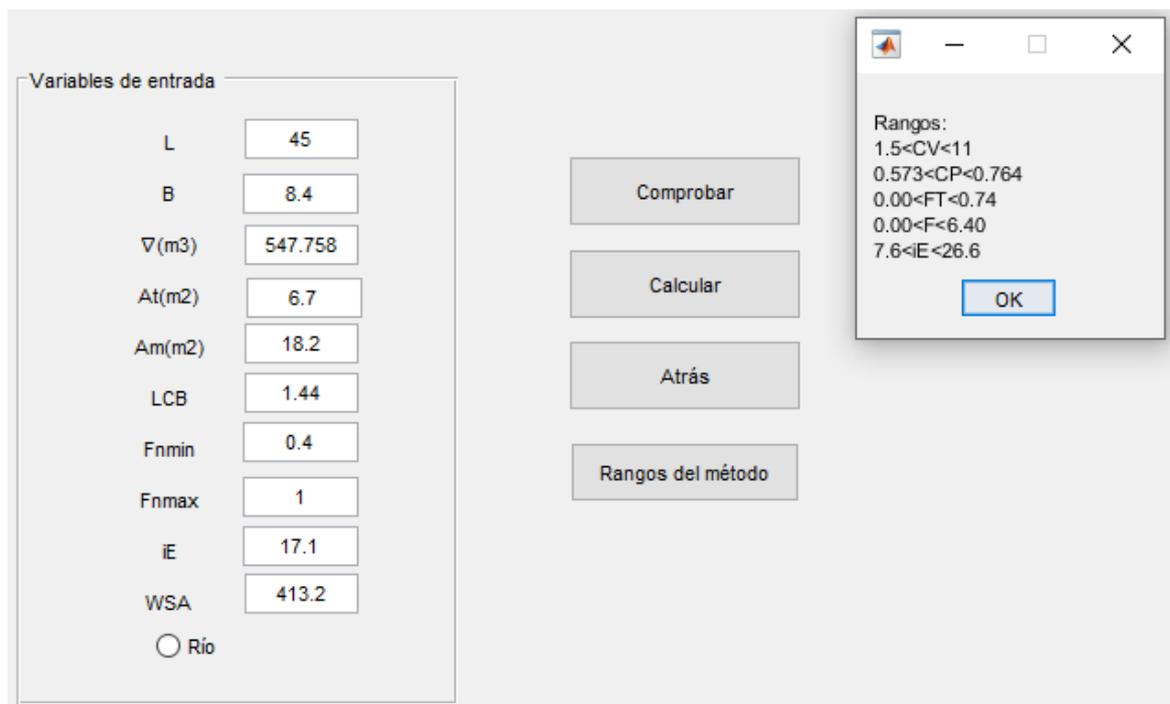


Figura 8.29 Ejemplo de la ventana de aviso al pulsar el botón “Rangos del método”.

Como podemos observar, se trata simplemente de un mensaje informativo donde el usuario puede visualizar los diferentes rangos en los que se aplica el método de Ping-Zong.

El otro de los botones será el botón “Comprobar”, con el que al pulsarlo comprobaremos si alguno de los valores de los parámetros que introducimos se encuentra fuera del rango de aplicación del método de Ping-Zong o no.

En caso de que se introduzca un valor que se encuentre fuera del rango de aplicación del método, aparecerá un mensaje de aviso por pantalla en el que se indicará cuál es el parámetro erróneo y además se bloqueará el botón “Calcular” y será imposible continuar con la ejecución del programa hasta que no se introduzca de nuevo un valor correcto y todos los parámetros sean correctos.

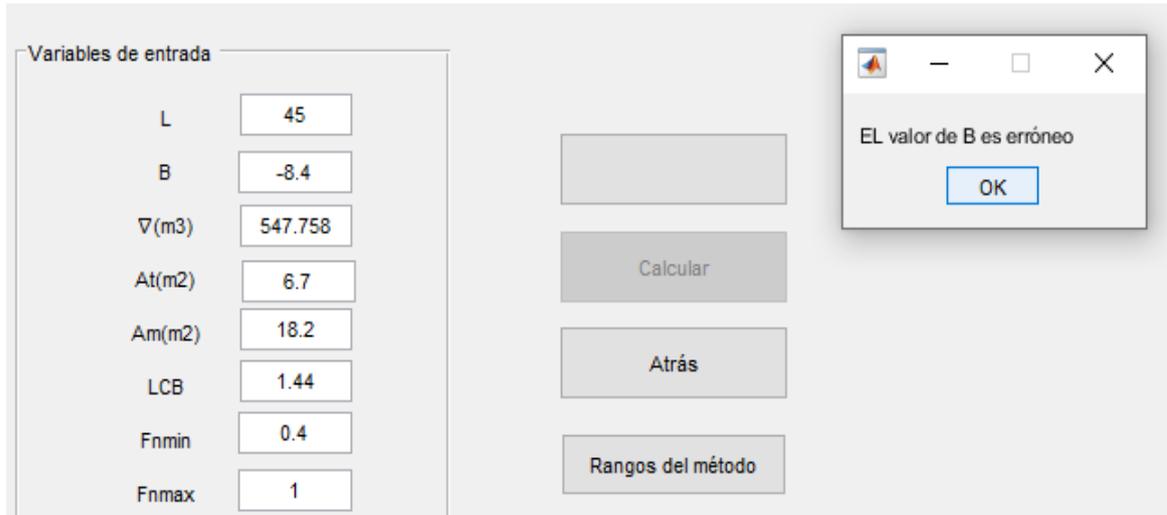


Figura 8.30 Ejemplo de mensaje de aviso al introducir un valor fuera del rango de aplicación.

Como se puede ver, al introducir un valor que se encuentra fuera del rango de aplicación aparecerá un mensaje por pantalla en el que se nos indicará cuál es el parámetro erróneo y que deberemos modificar. A su vez, se puede ver como en caso de tener un valor erróneo se bloquea el botón de “Calcular” haciendo que sea imposible continuar con la ejecución del método.

Para poder continuar con la ejecución del método, deberemos corregir el parámetro erróneo y pulsar de nuevo el botón de “Comprobar”, de esa manera aparecerá por pantalla un mensaje de aviso en el que se indica que todos los valores de los parámetros introducidos son correctos y, además se desbloqueará el botón “Calcular” y podremos continuar con la ejecución del método.

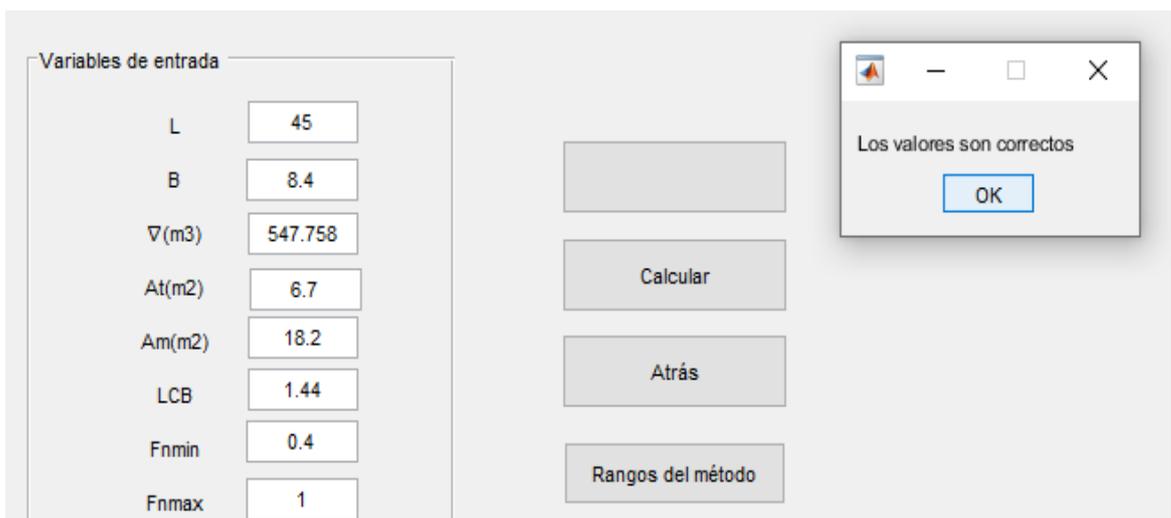


Figura 8.31 Ejemplo de mensaje que aparece cuando los valores introducidos son correctos

Como en los anteriores métodos, contamos con un botón del tipo *radiobutton* al que llamaremos “Río”, con el que se cambiarán las condiciones de densidad y viscosidad debidas al medio en el que navegue el catamarán, por tanto, los resultados que obtendríamos serán distintos dependiendo de si pulsamos el botón o no.



Figura 8.32 *Radiobutton* “Río”.

Una vez se han comprobado todos los valores de los parámetros que debe introducir el usuario son correctos y se han elegido las condiciones el medio en el que navega, solo quedaría pulsar el botón “Calcular” para poder seguir con la aplicación del método. Al pulsar el botón “Calcular”, se realizarán todos los cálculos necesarios y se representarán las curvas de “Resistencia-Velocidad” y “Potencia-Velocidad”.

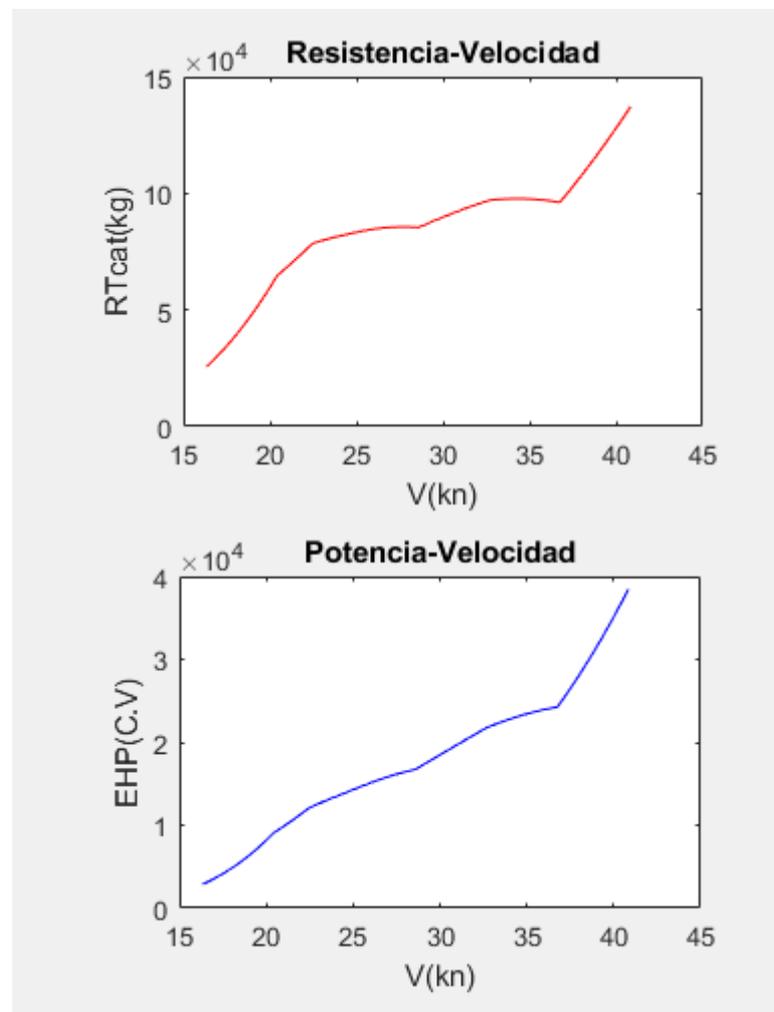


Figura 8.33 Representación gráfica de las curvas “Resistencia-Velocidad” y “Potencia-Velocidad”.

Comparando los resultados de la representación de la resistencia al avance respecto a la velocidad a la que navega el catamarán con los resultados obtenidos en el PFC de referencia, que para las comparaciones de las curvas tomaremos las resultantes del PFC de Francisco Javier Ros Morales, vemos que las curvas son muy similares.

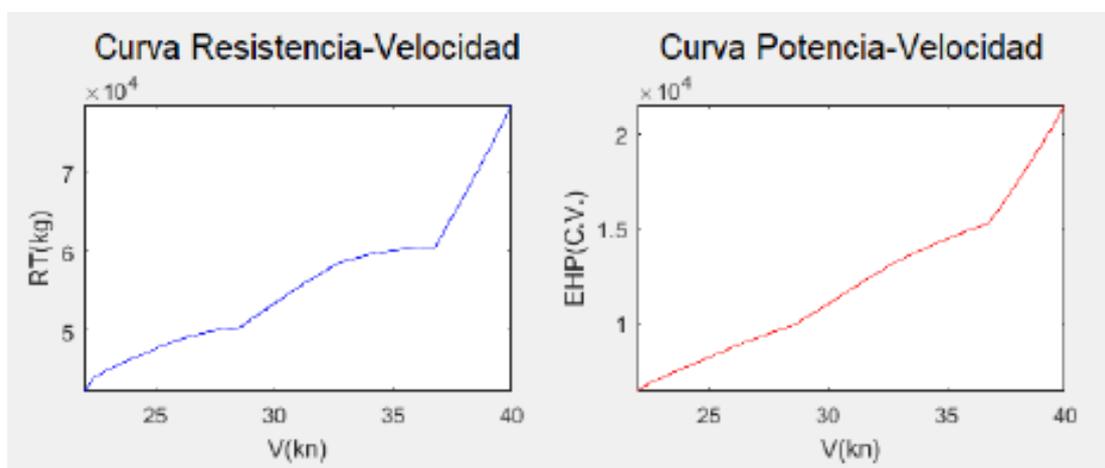


Figura 8.34 Representación de las curvas “Resistencia-Velocidad” y “Potencia-Velocidad” del PFC de referencia.

Las diferencias que se observan son debidas a que para la aplicación de este método para embarcaciones catamaranes lo que hacemos es realizar los cálculos pertinentes para una embarcación monocasco y posteriormente multiplicaremos esos resultados por el doble ya que tenemos dos cascos en vez de uno.

También al pulsar el botón “Calcular” se generará una tabla en la que se nos mostrarán los diferentes resultados de los distintos parámetros que componen la resistencia al avance del catamarán, su potencia y valores del número de Reynolds (Rn) que variarán en función del rango de velocidades en el que aplicaremos el método.

Los valores representados en la tabla de resistencia (Rt) y potencia (EHP), serán los que utilizaremos para representar las dos gráficas anteriores representados en la figura 8.33.

-----Método de Ping Zong-----

V_kn	Fn	Rn	CF	CR	CTcat	RTcat_kg	EHP_CV
16.337	0.4	3.0923e+08	1.7805e-06	0.0079738	0.016751	25541	2862
20.421	0.5	3.8654e+08	1.7285e-06	0.01317	0.027144	64666	9057.9
24.505	0.6	4.6385e+08	1.6876e-06	0.011616	0.024036	82458	13860
28.589	0.7	5.4116e+08	1.6543e-06	0.0087394	0.018282	85366	16740
32.673	0.8	6.1847e+08	1.6261e-06	0.0075569	0.015917	97076	21756
36.757	0.9	6.9578e+08	1.6019e-06	0.0058259	0.012455	96138	24239
40.842	1	7.7308e+08	1.5807e-06	0.0067972	0.014398	1.372e+05	38436

Figura 8.35 Tabla de los resultados obtenidos por el método de Ping-Zong.

A continuación, compararemos los resultados obtenidos a través de nuestro programa con los obtenidos del PFC de referencia de María Martín Martínez.

V(kn)	Fn	Rn	CF	CR	CT	RT (kg)	EHP (C.V.)
16,337	0,40	3,092E+08	1,684E-03	7,937E-03	1,675E-02	25540	2862
20,421	0,50	3,865E+08	1,636E-03	1,317E-02	2,714E-02	64665	9058
24,505	0,60	4,774E+08	1,681E-03	1,162E-02	2,410E-02	82458	13860
28,589	0,70	5,570E+08	1,648E-03	8,744E-03	1,829E-02	85365	16740
32,673	0,80	6,365E+08	1,620E-03	7,606E-03	1,591E-02	97077	21756
36,757	0,90	7,161E+08	1,596E-03	5,830E-03	1,245E-02	96138	24239
40,842	1,00	7,957E+08	1,575E-03	6,801E-03	1,439E-02	137205	38436

Tabla 8.6 Resultados del método de Ping-Zong del proyecto de referencia.

Se puede comprobar que los resultados obtenidos son muy similares a los del proyecto de referencia, lo cual nos indica que el método funciona correctamente, también podemos comprobar que la fiabilidad numérica del programa es muy buena. Las diferencias que se pueden apreciar pueden ser debidas a diferencias de los decimales en los valores tomados para los cálculos o también debidas a una diferencia en el medio en el que navega nuestro catamarán.

También podemos apreciar al comparar los resultados obtenidos en el PFC de Francisco Javier Ros Morales (Ros Morales, 2020), que los valores de resistencia y potencia son mucho mayores, prácticamente el doble. Eso se debe a que este método no es creado expresamente para catamaranes, ya que es utilizado para embarcaciones rápidas, pero las curvas y valores obtenidos dan resultados razonables y por tanto se suele usar para comparar estos resultados con los que se obtendrían empleando un método más concreto para catamaranes, como el método de Sahoo.

Lo que se hace en el método de Ping-Zong para que pueda aplicarse a catamaranes, es realizar todos los cálculos necesarios para hallar el coeficiente de resistencia total, de uno de los cascos del catamarán y después, multiplicar este coeficiente por dos para realizar el cálculo de la resistencia al avance, ya que será la debida a los dos cascos que forman nuestro catamarán.

8.6 Método de De Groot

Para el estudio de este método, tendremos como referencia el proyecto de final de carrera de Joan Alonso i Roig *“Estimación y comparación de la resistencia al avance de embarcaciones rápidas con formas de pantoque redondeado mediante diferentes métodos numéricos”* (Alonso i Roig, 2015) a la hora de la toma de las variables de nuestro catamarán de estudio.

De este, obtendremos los datos de un buque modelo al cual le aplicaremos los diferentes cálculos necesarios para la aplicación del método de De Groot. Los datos de esta embarcación son:

Características	Valores
Eslora de flotación	40 m
Manga	7.55 m
Calado	2.26 m
Volumen de carena	294.64 m ³
Desplazamiento	302.30 t
LCB	-0.697
CP	0,64
CB	0,432
Rango de velocidades	0,8-2,7 Fn

Tabla 8.7 Parámetros de entrada del método de De Groot.

Como en los métodos anteriores, deberemos seleccionar en el menú de selección de método, el método de De Groot y a continuación pulsar el botón de “Continuar” para proceder con la ejecución del método.



Figura 8.36 Ejemplo de la ventana de selección del método de De Groot.

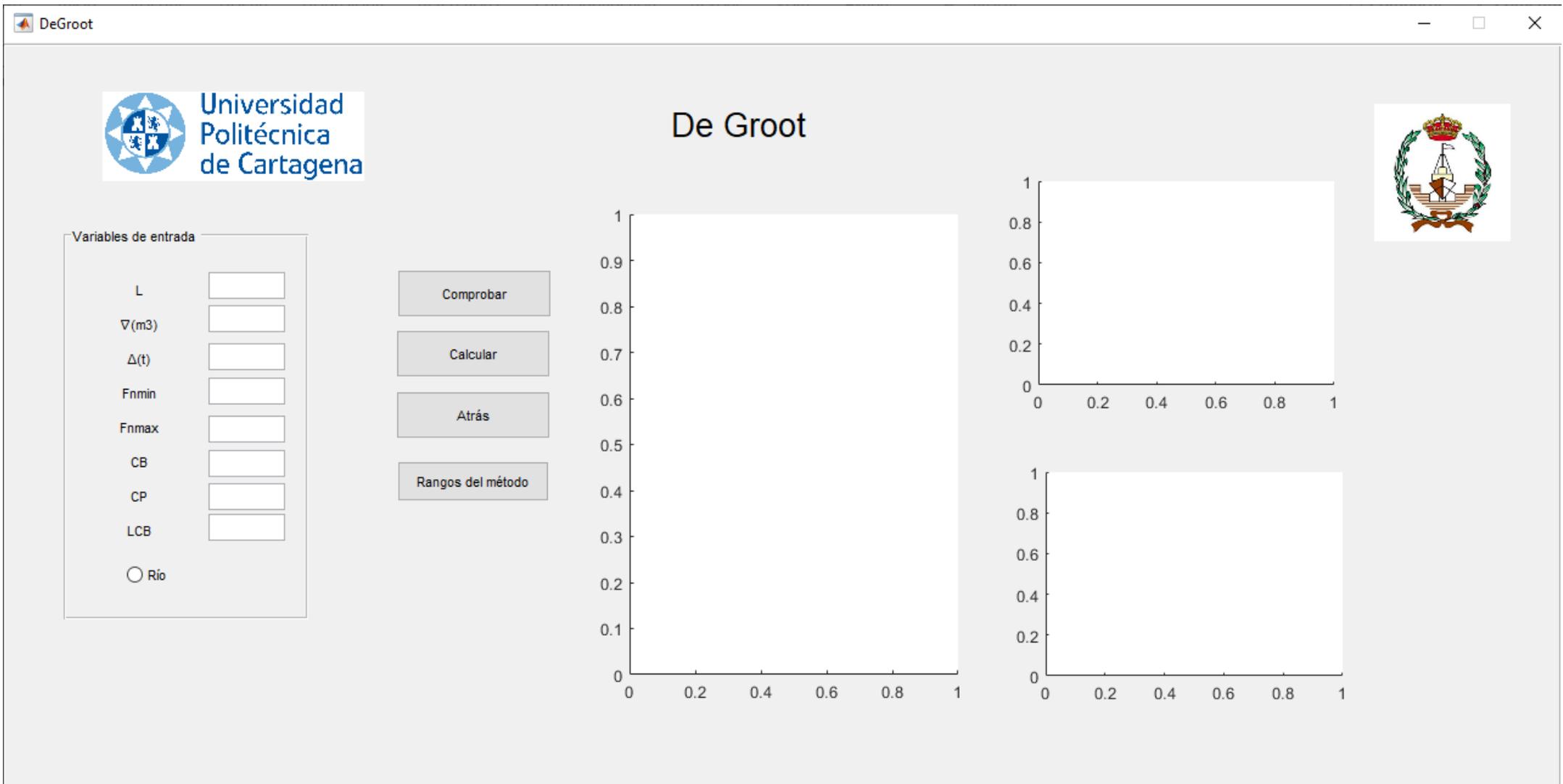


Figura 8.37 Menú del método de De Groot.

Al igual que en los métodos anteriores, tendremos una distribución muy similar a la de los métodos anteriores, en la que deberemos introducir una serie de parámetros que se deberán encontrar dentro del rango de aplicación de nuestro método.

Para asegurarnos que se encuentran dentro del rango de aplicación, contamos con distintas herramientas, la primera de ellas es meramente informativa. Al pulsar el botón de “Rangos del método” aparecerá por pantalla un mensaje en el que se nos indicará los rangos de los valores de los distintos parámetros que deben ser introducidos para la una correcta ejecución del método.



Figura 8.38 Ejemplo de mensaje de aviso al pulsar el botón “Rangos del método”.

Como se puede observar, se trata simplemente de un mensaje de aviso en el que se nos muestra los rangos de aplicación de cada parámetro. Una vez introducidos los parámetros se deberán comprobar si estos se encuentran dentro del rango de aplicación del método.

Para ello nos ayudaremos de la siguiente herramienta, el botón de “Comprobar” al pulsar el botón una vez introducidos los parámetros del método, aparecerá un mensaje de aviso en caso de que se haya introducido un valor de un parámetro que se encuentre fuera del rango de aplicación del método.

En caso de haber introducido un valor erróneo de un parámetro, también provocará que se bloquee el botón de “Calcular” haciendo que sea imposible continuar con la ejecución del método hasta que no se modifique el valor del parámetro introducido erróneamente y se compruebe que se trata de un valor que esté dentro del rango de aplicación del método.



Figura 8.39 Ejemplo de mensaje de aviso al introducir un valor erróneo de un parámetro.

Se puede comprobar en la figura 8.39 como el botón “Calcular” se encuentra bloqueado haciendo imposible continuar con la ejecución del método con valores erróneos.

Una vez hemos asegurado que los parámetros y sus valores introducidos se hallan dentro del rango de aplicación del método, aparecerá un mensaje por pantalla en el que se indicará que la totalidad de los valores de los parámetros introducidos se hallan dentro del rango de aplicación del método y se desbloqueará el botón de “Calcular”, permitiéndose así continuar con la ejecución del método.

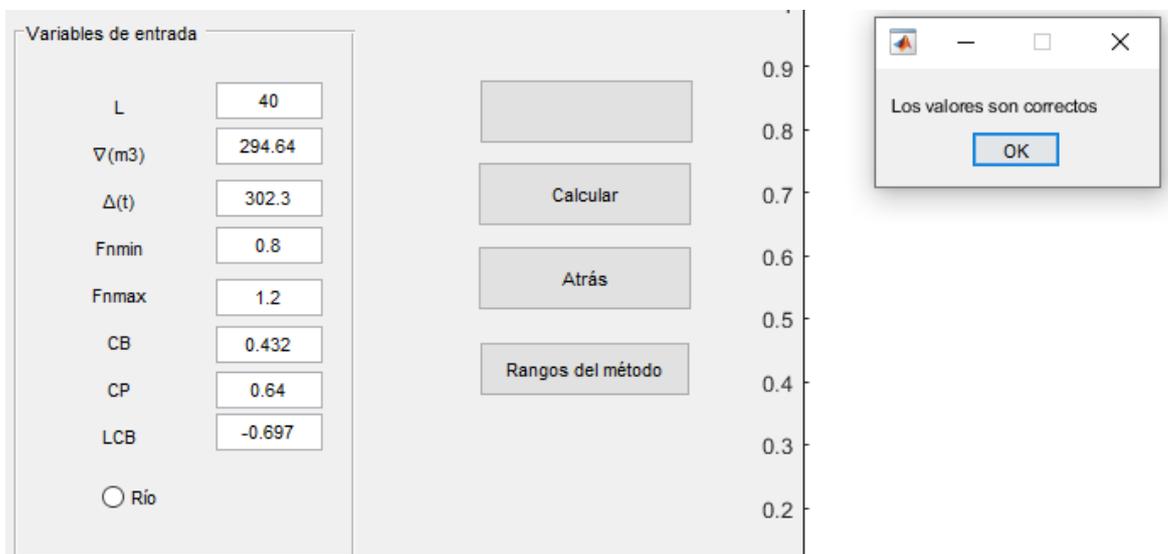


Figura 8.40 Ejemplo de mensaje de aviso cuando los parámetros introducidos son correctos.

Por último, contamos con un botón tipo *radiobutton* llamado “Río” el cual nos modificaría las variables de densidad y viscosidad del medio en el que navega nuestro catamarán de estudio, por lo que los resultados que se obtendrán serán diferentes si se acciona este botón o no.



Figura 8.41 Radiobutton “Río” accionado.

Una vez se han comprobado que todos los parámetros que se deben introducir son correctos y se ha seleccionado el medio donde navegará nuestro catamarán de estudio, lo único que quedará es pulsar el botón “Calcular” y así proseguir con la ejecución del método.

Al pulsar el botón “Calcular” se realizarán todos los cálculos necesarios para el cálculo de la resistencia al avance y la potencia necesaria de nuestro catamarán, a su vez se representarán las curvas de “Resistencia-Velocidad” y “Potencia-Velocidad”

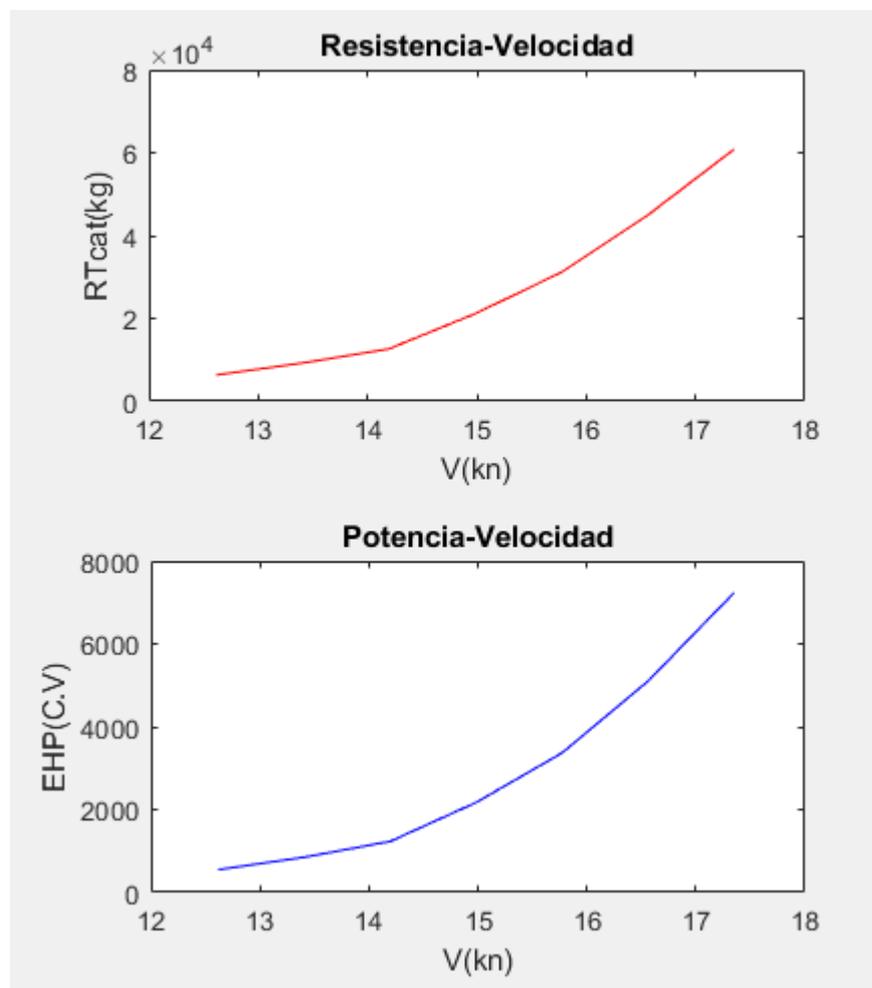


Figura 8.42 Representación de las curvas “Resistencia-Velocidad” y “Potencia-Velocidad”.

Como se puede observar, las curvas obtenidas con el método tienen una forma muy similar a las anteriores exceptuando las que se obtienen a través del método de Ping-Zong. Lo cual nos asegura que los resultados obtenidos son coherentes.

Comparando los resultados con los obtenidos en el PFC de referencia de Joan Alonso i Roig, podemos ver que los valores obtenidos para la resistencia son bastante menores que los que obtenemos a través de nuestro método.

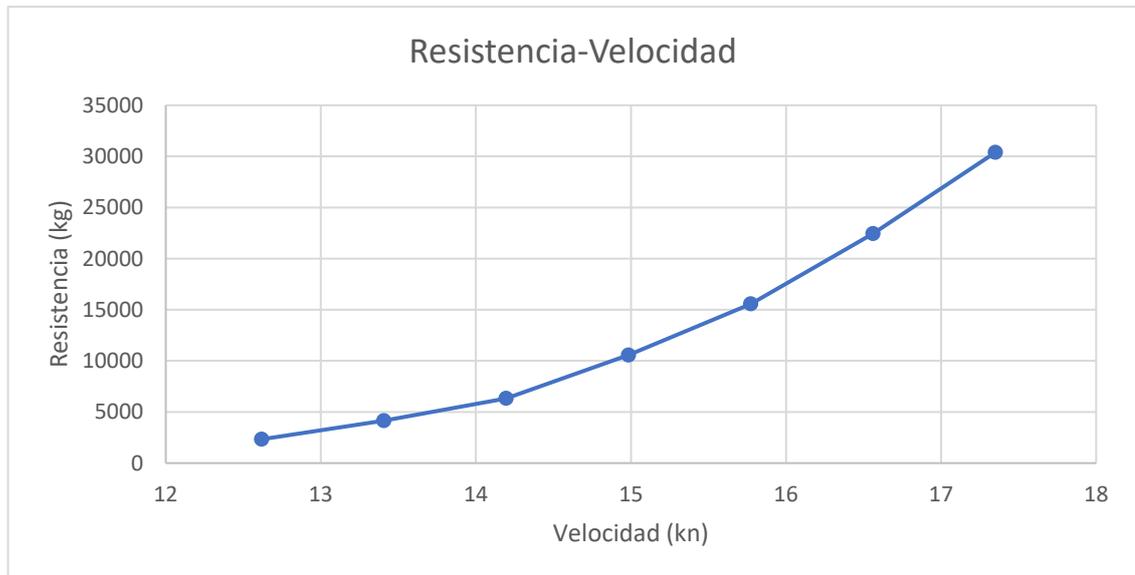


Figura 8.43 Curva Resistencia-Velocidad del PFC de referencia.

Esta diferencia en los resultados de la resistencia al avance es debida a que este método está preparado expresamente para el estudio de la resistencia al avance en embarcaciones rápidas. Nosotros para adaptar este método al estudio de la resistencia al avance en catamaranes, lo que hemos hecho es multiplicar por dos el valor que se obtendría del diagrama de la serie sistemática de De Groot, ya que el catamarán está constituido por dos cascos idénticos.

La diferencia también puede ser debida a los valores adoptados para las diferentes variables del para los cálculos, como por ejemplo los decimales de la densidad o la viscosidad del medio, o los referentes a las velocidades o medidas de nuestro catamarán.

Finalmente, la ventana del menú del método de De Groot quedará de la siguiente manera:

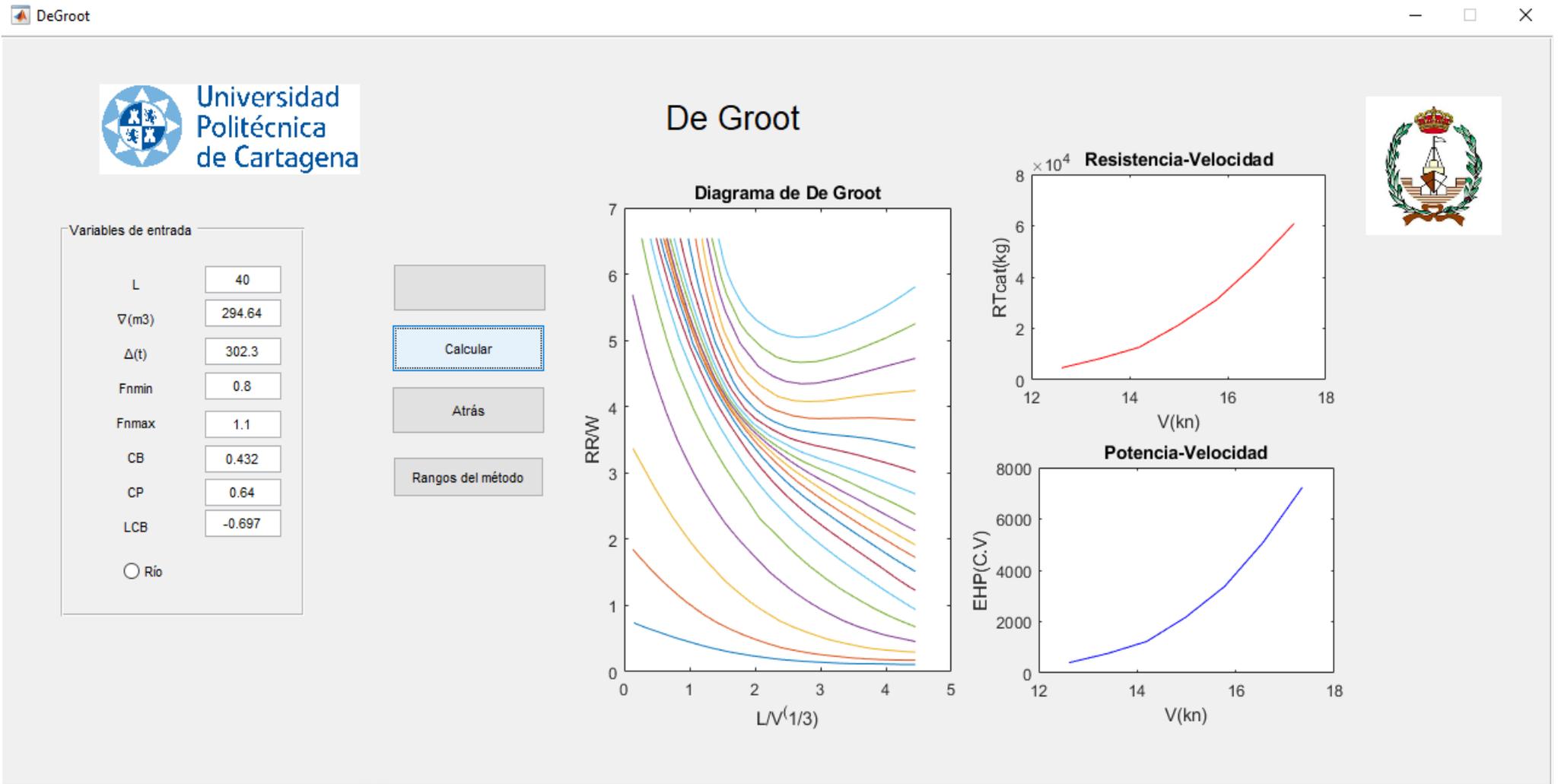


Figura 8.44 Ventana del menú del método de De Groot una vez ha sido ejecutado.

Como se ha mencionado con anterioridad cuando se explicaron los diferentes métodos que se van a utilizar para el cálculo de la resistencia al avance, para la aplicación del método de De Groot, nos ayudaremos del diagrama de la serie sistemática de De Groot para la obtención del valor de la resistencia residuo partido del desplazamiento de nuestro catamarán ($\frac{R_R}{\Delta}$).

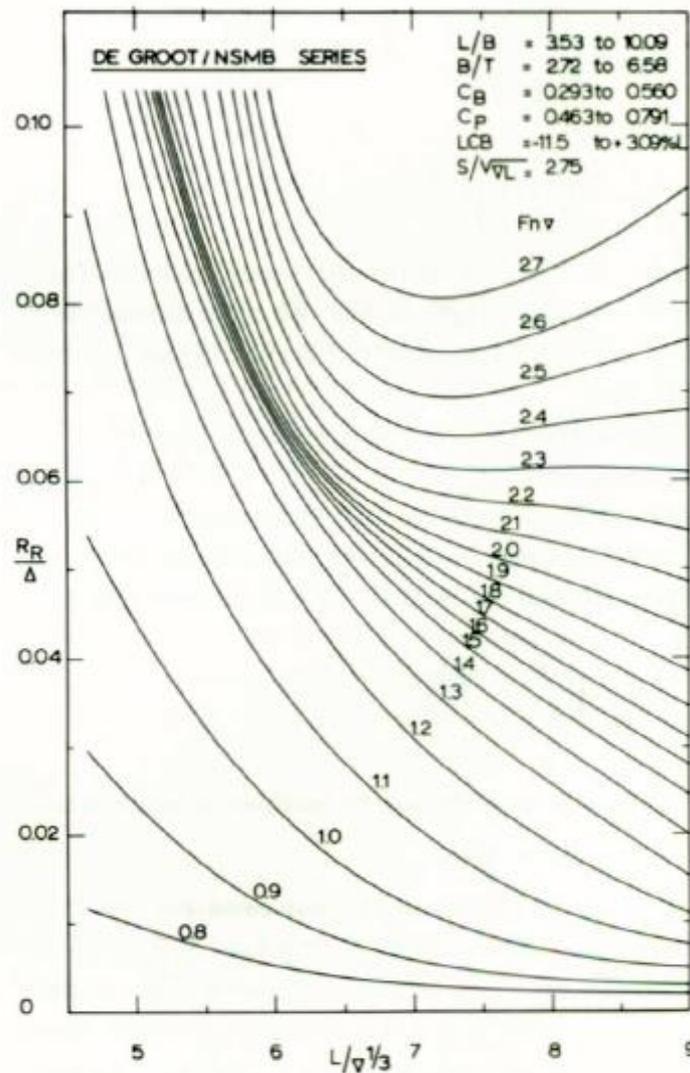


Figura 8.45 Diagrama de la serie sistemática del método de De Groot.

En la ventana del método de De Groot de nuestro programa, se verá representada para que así el usuario pueda tener una mayor comprensión de la funcionalidad del método.

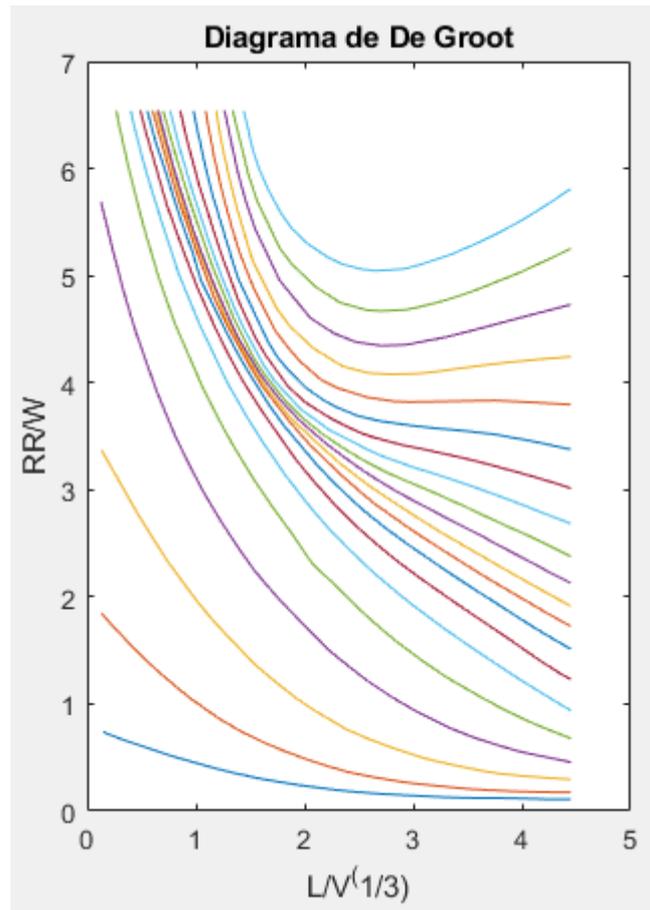


Figura 8.46 Diagrama de la serie sistemática del método de De Groot de la ventana del programa.

Las posibles diferencias que se puedan observar son debidas a la hora de la creación del diagrama, ya que para ello se usó el programa Rhinoceros para representar las curvas del diagrama y posteriormente tomar diferentes coordenadas de cada curva.

Estas curvas representarán el valor de la resistencia residuo partido del desplazamiento de nuestro catamarán ($\frac{R_R}{\Delta}$) en función del valor de la longitud de nuestro catamarán partido del volumen de carena de este elevado a un tercio ($\frac{L}{V^{\frac{1}{3}}}$). Las curvas se representan en sentido ascendente según el valor de Fn de 0,8 a 2,7.

Esta implementación del diagrama para su utilización en el método se ha conseguido gracias a la utilización de la función de las *Cubic-B-Splines*, que nos permite realizar las operaciones necesarias de una manera satisfactoria a la hora de obtener el valor de la resistencia residuo partida por el desplazamiento de nuestro catamarán.

También se debe remarcar que para hallar el valor del coeficiente de fricción se ha hecho uso de la función del método de *Newton-Raphson*, programada previamente.

A su vez, al ejecutar el método de De Groot se generará una tabla donde se nos mostrarán los diferentes resultados de los distintos parámetros que componen la resistencia al avance del catamarán, su potencia, valores del número de Reynolds (Rn) y también los valores de los diferentes coeficientes obtenidos, así como el valor de $(\frac{R_R}{\Delta})$ que variarán en función del rango de velocidades en el que aplicaremos el método.

Los valores representados en la tabla de resistencia (Rtcat) y potencia (EHP), serán los que utilizaremos para representar las dos gráficas anteriores representados en la figura 8.42.

-----Método De Groot-----

V_kn	Fn	Rn	CFcat	RR_wcat	RTcat_kg	EHP_CV
12.618	0.8	2.1231e+08	0.0018695	0.010335	4660.1	403.33
13.407	0.85	2.2558e+08	0.0018544	0.016398	8291.2	762.46
14.195	0.9	2.3885e+08	0.0018403	0.022461	12652	1232
14.984	0.95	2.5211e+08	0.0018271	0.033874	21134	2172.2
15.773	1	2.6538e+08	0.0018147	0.045286	31133	3368.2
16.561	1.05	2.7865e+08	0.001803	0.059551	44898	5100.3
17.35	1.1	2.9192e+08	0.0017919	0.073817	60774	7232.5

Figura 8.47 Tabla de los resultados obtenidos por el método de De Groot.

Comparando los resultados con los obtenidos en el PFC de Joan Alonso i Roig podemos realizar las siguientes deducciones.

V(kn)	Fn	Rn	CF _{CAT}	$(\frac{R_R}{\Delta})_{cat}$	R _T CAT (kg)	EHP (C.V.)
12,618	0,8	2,1242E+08	1,8697E-03	5,1675E-03	2330,05	201,665
13,407	0,85	2,560E+08	1,8543E-03	8,199E-03	4145,6	381,258
14,195	0,9	2,3901E+08	1,8401E-03	1,12305E-02	6326	615,97
14,984	0,95	2,5209E+08	1,8273E-03	1,6937E-02	10567	1086,093
15,773	1	2,6539E+08	1,8149E-03	2,2643E-02	15566,5	1684,098
16,561	1,05	2,7865E+08	1,8032E-03	2,97755E-02	22449	2550,149
17,35	1,1	2,9201E+08	1,7920E-03	3,69085E-02	30387	3616,248

Tabla 8.8 Resultados del proyecto de referencia del método de De Groot.

Como se ha mencionado anteriormente, los resultados del proyecto de referencia son muy similares, exceptuando los valores de la resistencia residuo obtenida del diagrama que al estar nuestro catamarán constituido por dos cascos hemos optado por multiplicar este valor por dos, para así poder adaptar este método al estudio para catamaranes.

Por lo que los siguientes resultados que se obtendrán, la resistencia al avance y la potencia, serán mucho mayores para catamaranes. Tanto este método como el anterior, Ping-Zong, no nos proporcionan resultados aplicables a la realidad ya que no se tratan de métodos creados para ser aplicados en catamaranes, pero los resultados obtenidos sí serán interesantes a la hora de ofrecernos una comparación con métodos más adecuados.

9. Aplicación del caso práctico

A continuación, vamos a aplicar los métodos de análisis y estimación de la resistencia al avance y potencia de Sahoo y de Ping-Zong a un catamarán que ha sido modificado con un alargamiento del cuerpo cilíndrico de los cascos de nuestro catamarán. El catamarán al que se le ha realizado el alargamiento es el del proyecto de referencia de María Martín Martínez “*Estimación y análisis paramétrico de la resistencia al avance de embarcaciones catamaranes con pantoque redondeado mediante métodos numéricos*”, las nuevas características de este catamarán serán representadas en la siguiente tabla.

Medida	Monocasco	Catamarán
Δ	582,5 t	1164 t
∇	567,9605 m ³	1135,921 m ³
T	4,1 m	4,1 m
B	4,596 m	18,001 m
L	62,649 m	62,649 m
S	536,415 m ²	1072,83 m ²
Af	221,2165 m ²	442,433 m ²
Am	28,454 m ²	56,908 m ²
At	12,81 m ²	24,62 m ²
CP	0,636	0,636
CB	0,5658	0,5658
LCB	25,808 m	25,808 m
LCF	24,688 m	24,688 m
KB	2,625 m	2,625 m
i_E	17,62 °	17,62 °
β	35,586 °	35,586 °

Tabla 9.1 Características del catamarán del caso práctico.

Estos valores han sido obtenidos a través del programa *MaxSurf*, con la ayuda de este programa, hemos realizado el alargamiento y conseguido las características hidrostáticas de nuestro catamarán, una vez ha sido modificado.

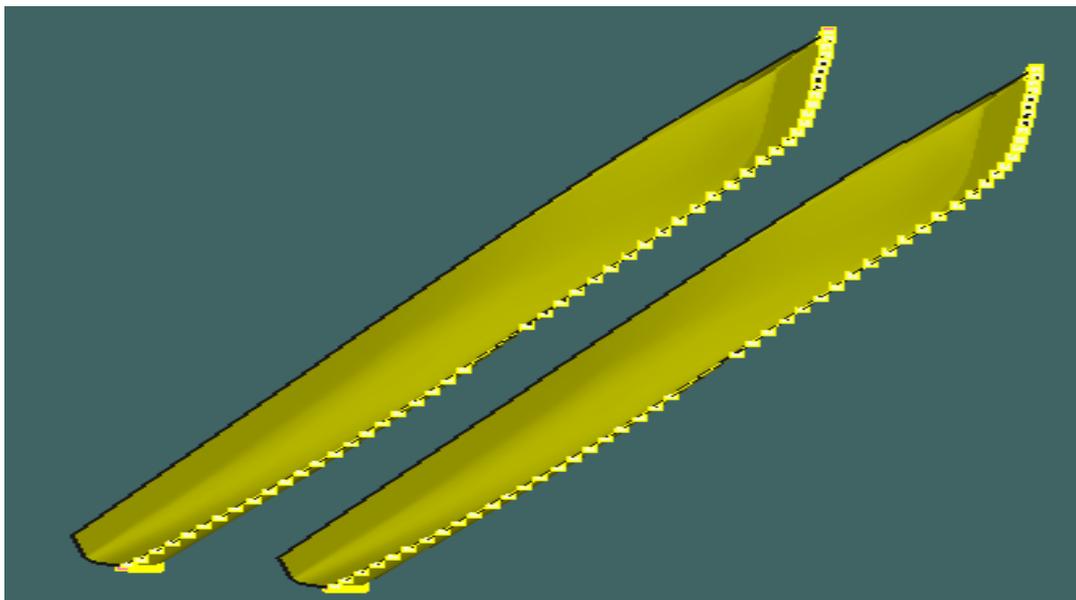
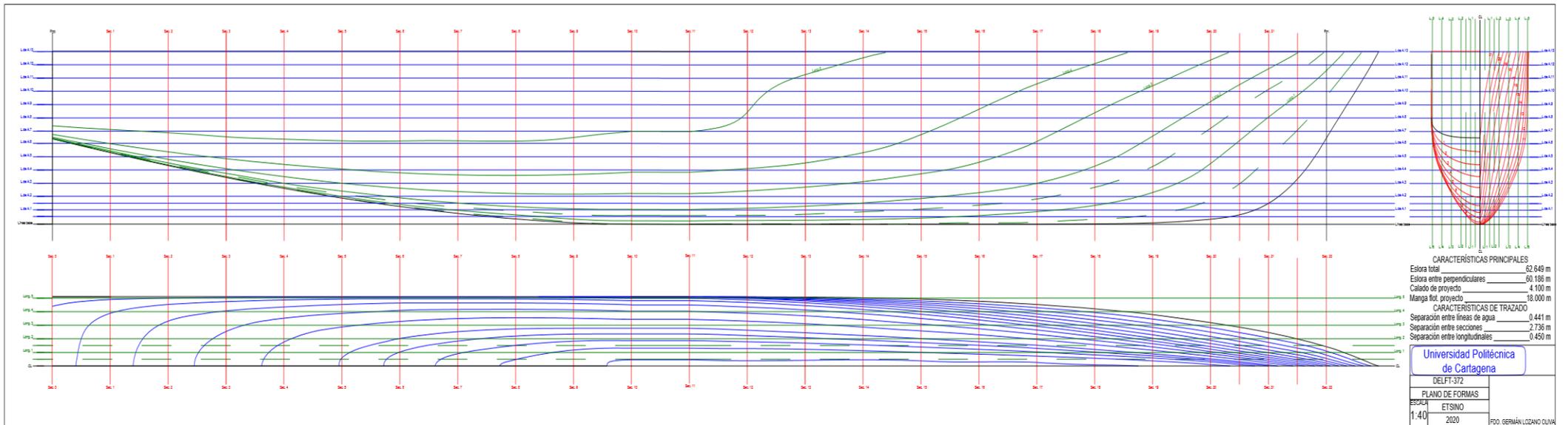


Figura 9.1 Modelo en MaxSurf del catamarán del caso práctico con el alargamiento



Primero a este catamarán le aplicaremos el método de Sahoo, para ello tendremos que abrir el programa, como se ha explicado en los métodos anteriores.

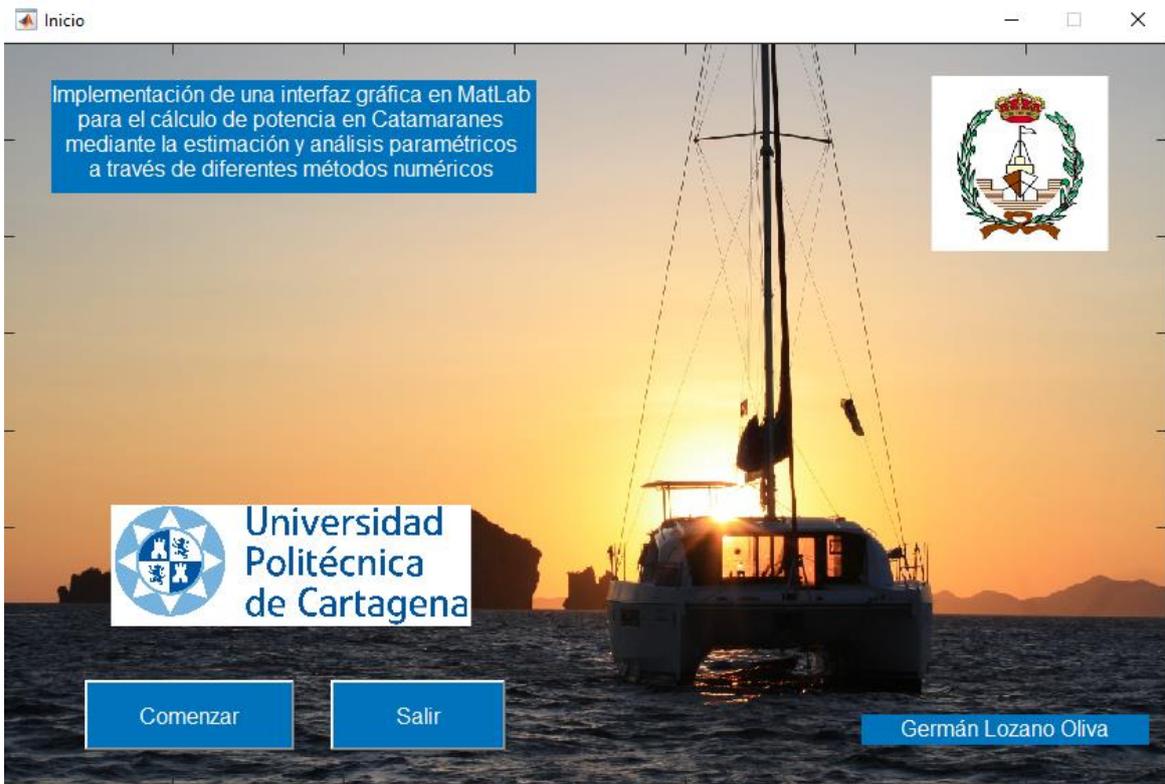


Figura 9.2 Ventana del Inicio del programa.

Iniciamos la ventana del inicio del programa y pulsaremos el botón “Comenzar”, a continuación, nos llevará a la ventana del menú de selección, donde se escogerá el método de Sahoo y pulsaremos el botón de “Continuar” para proseguir con la aplicación del método.

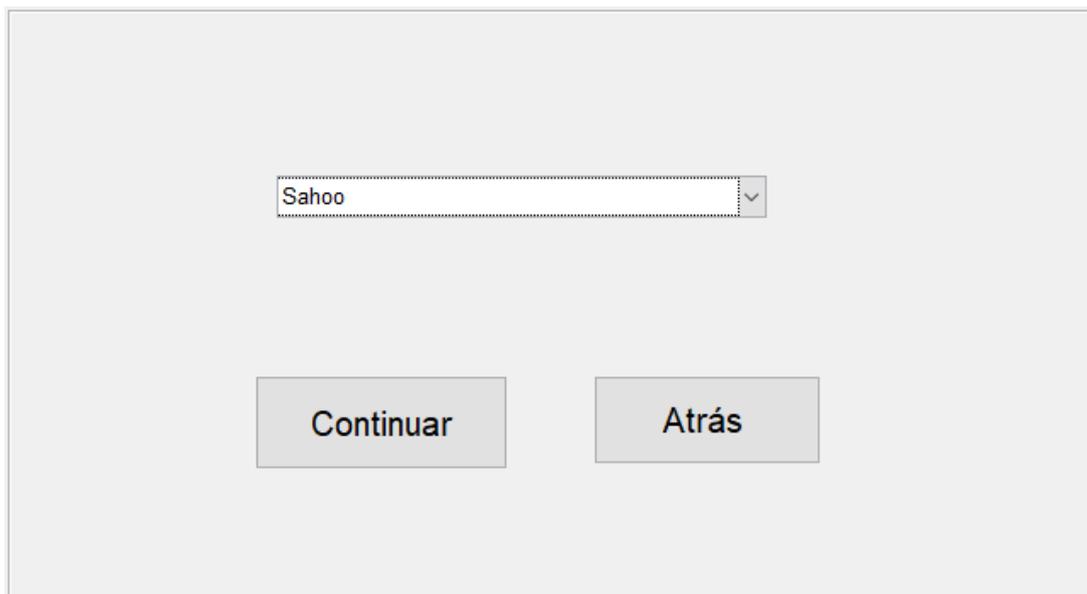


Figura 9.3 Ventana del menú de Selección.

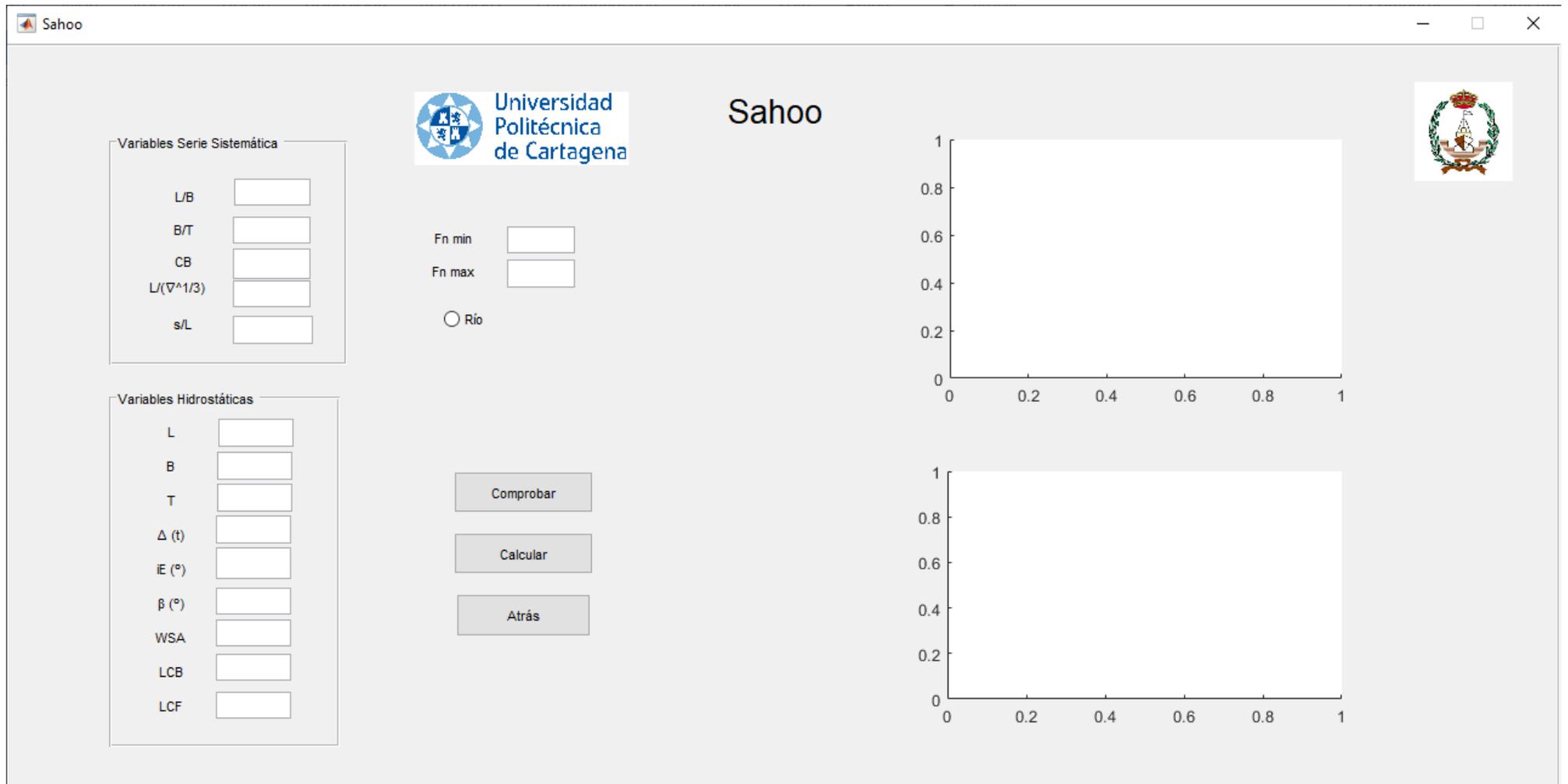


Figura 9.4 Ventana del menú de Sahoo.

Primero tendremos que introducir los valores de los parámetros de entrada para la aplicación del método de Sahoo y comprobar a través del botón “Comprobar” que los valores que se han introducido se encuentran dentro del rango de aplicación.

The screenshot displays the Sahoo software interface. At the top left is the logo of Universidad Politécnica de Cartagena. The main window is titled 'Sahoo'. On the left, there are two panels of input fields:

- Variables Serie Sistemática:**
 - L/B: 13.631
 - B/T: 1.12
 - CB: 0.5658
 - $L/(\nabla^{1/3})$: 6.004
 - s/L: 0.214
- Variables Hidrostáticas:**
 - L: 62.649
 - B: 18.001
 - T: 4.1
 - Δ (t): 1164
 - iE (°): 17.62
 - β (°): 35.586
 - WSA: 1072.83
 - LCB: 25.808
 - LCF: 24.688

In the center, there are input fields for 'Fn min' (0.2) and 'Fn max' (1), and a radio button labeled 'Río'. Below these are three buttons: a grey button (partially obscured), 'Calcular', and 'Atrás'. A small dialog box is open on the right with the text 'Los valores son correctos' and an 'OK' button.

Figura 9.5 Ventana del método de Sahoo una vez comprobados los parámetros de entrada.

Una vez se han comprobado que los valores de los parámetros introducidos por el usuario son correctos, podremos continuar con la ejecución del método pulsando el botón “Calcular”.

Al pulsar el botón “Calcular” se realizarán todos los cálculos necesarios para la estimación de la resistencia al avance y la potencia necesaria para vencer tal resistencia, los resultados se mostrarán de manera gráfica en las dos siguientes curvas a las que se les ha llamado curva ”Resistencia-Velocidad” y curva “Potencia-Velocidad”

Sahoo

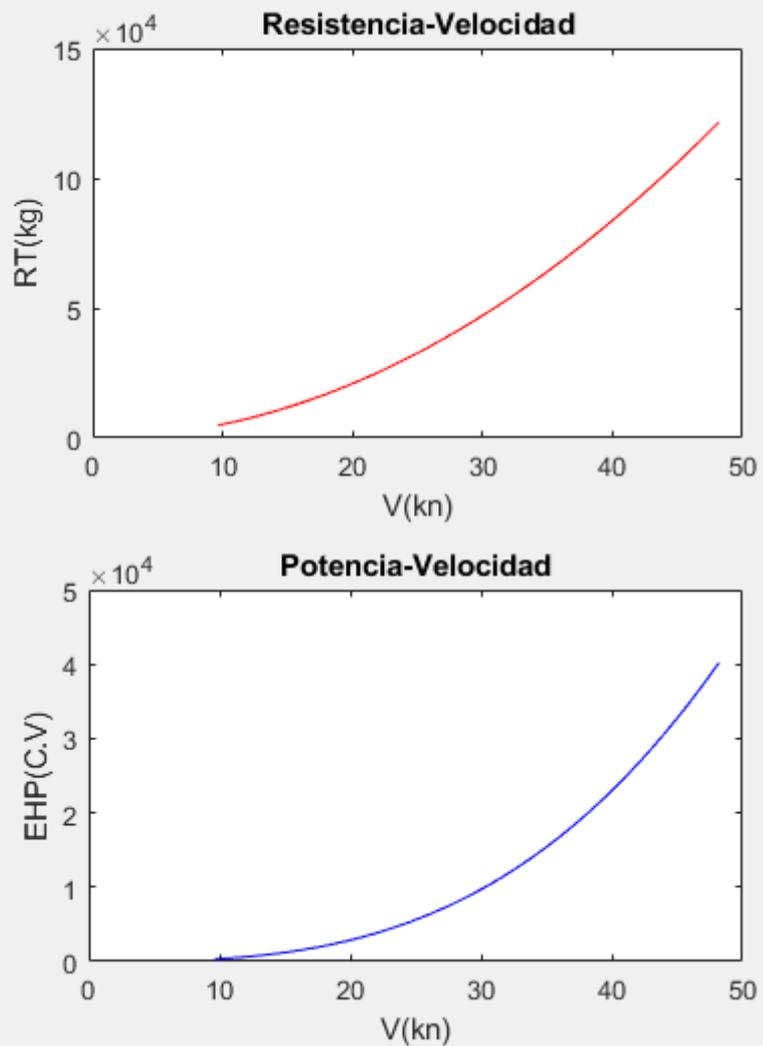


Figura 9.6 Representación de las curvas “Resistencia-Velocidad” y “Potencia-Velocidad”.

Como se puede observar, las formas de las curvas de la resistencia al avance y la potencia calculadas, son muy similares a las que se obtienen para el ejemplo usado en la explicación del método de Sahoo, esto es debido a que el alargamiento que ha sufrido el catamarán de origen no es muy elevado, pero sí lo suficiente para ver una modificación de la potencia requerida para el avance del catamarán.

Esto se podrá visualizar de una manera mucho más sencilla al comparar los resultados de la tabla que se genera de manera automática al pulsar el botón de “Calcular” y nos mostrará a demás, de los valores de la resistencia al avance y la potencia, otros valores de importancia para la comprensión del método.

-----Método de Sahoo-----

V_kn	Fn	Rn	CWcat	CWmono	CT	RT_kg	EHP_CV
9.6379	0.2	2.5399e+08	0.010444	0.0079444	0.01921	4863.7	321.54
14.457	0.3	3.8098e+08	0.0092589	0.0082908	0.015037	10943	1085.2
19.276	0.4	5.0797e+08	0.0074526	0.0038139	0.011651	19455	2572.3
24.095	0.5	6.3496e+08	0.011055	0.0070621	0.014267	30398	5024
28.914	0.6	7.6196e+08	0.0066968	0.004462	0.0092317	43774	8681.5
33.733	0.7	8.8895e+08	0.0047282	0.0035856	0.0067669	59581	13786
38.552	0.8	1.0159e+09	0.0036413	0.0028671	0.0053001	77820	20578
43.371	0.9	1.1429e+09	0.0027461	0.0027778	0.0041043	98491	29300
48.19	1	1.2699e+09	0.0024159	0.002383	0.00353	1.2159e+05	40192

Figura 9.7 Tabla generada con los resultados obtenidos del método de Sahoo.

-----Método de Sahoo-----

V_kn	Fn	Rn	CWcat	CWmono	CT	RT_kg	EHP_CV
9.3162	0.2	2.2939e+08	0.013428	0.00979	0.027058	5660.8	361.73
13.974	0.3	3.4408e+08	0.01049	0.0096742	0.019459	12737	1220.9
18.632	0.4	4.5878e+08	0.010345	0.0047608	0.016854	22643	2893.9
23.29	0.5	5.7347e+08	0.014844	0.0098175	0.019816	35380	5652.1
27.949	0.6	6.8817e+08	0.0084367	0.0057062	0.012354	50947	9766.8
32.607	0.7	8.0286e+08	0.0059769	0.0045239	0.0091215	69344	15509
37.265	0.8	9.1756e+08	0.0046358	0.0035954	0.0071893	90572	23151
41.923	0.9	1.0323e+09	0.0034237	0.003514	0.0055093	1.1463e+05	32963
46.581	1	1.1469e+09	0.0029826	0.0030239	0.0046884	1.4152e+05	45217

Figura 9.8 Tabla generada del método de Sahoo para el catamarán de ejemplo.

Como se puede observar, los resultados que obtenemos no distan mucho entre sí, pero sí lo suficiente para que deban ser tenidos en cuenta a la hora de la selección del motor a instalar en nuestro catamarán, hay que remarcar que, para ambos modelos, se ha realizado la aplicación del método en el mismo medio y para el mismo rango de velocidades.

Si comparamos los resultados obtenidos entre los dos catamaranes a los que les hemos aplicado el método de Sahoo podemos ver que para el caso del catamarán del ejemplo al que no se le aplica el alargamiento, tiene una potencia mayor que al catamarán al que se le realiza el alargamiento. Esto se debe a que, al alargar la eslora de un buque, ya sea catamarán o monocasco, si mantenemos la manga tendremos lo que se llama un barco más esbelto. Este tipo de barcos tiene un mejor comportamiento en el mar, lo que se traduce en una menor resistencia al avance y por lo tanto requieren de una menor potencia para su navegación.

Con esto también se puede comprobar que el programa funciona correctamente y por tanto los resultados obtenidos serán válidos para que sean tenidos en cuenta a la hora de ser estudiados y comparados con otros métodos o análisis en CFD.

A continuación, procederemos a aplicar el método de Ping-Zong al catamarán de estudio del caso práctico al que se la ha realizado el alargamiento. Para la aplicación del método de Ping-Zong deberemos retroceder al menú de selección para escoger el método que queremos aplicar, esto podremos conseguirlo desde la misma ventana del método de Sahoo si pulsamos el botón “Atrás”.

La razón por la que hemos escogido estos dos métodos es porque además de comprobar la correcta función del programa, podremos comprobar la diferencia de los resultados en nuestro caso práctico entre usar un método expresamente estudiado para su aplicación en catamaranes y usar un método al que le realizamos una modificación para que pueda ser aplicado en embarcaciones tipo catamarán.

Una vez en el menú de selección del método, tendremos que seleccionar a través del *popupmenu* el método de Ping-Zong y pulsar el botón de “Continuar” para que nos dirija a la ventana del método.



Figura 9.9 Ventana del menú de selección una vez se ha seleccionado el método de Ping-Zong.

Como en el caso anterior, para la aplicación del método de Ping-Zong deberemos tener en cuenta que las modificaciones ocasionadas en el alargamiento del catamarán nos proporcionarán diferentes resultados, para ello nos ayudaremos de la embarcación del proyecto de referencia de María Martín Martínez.

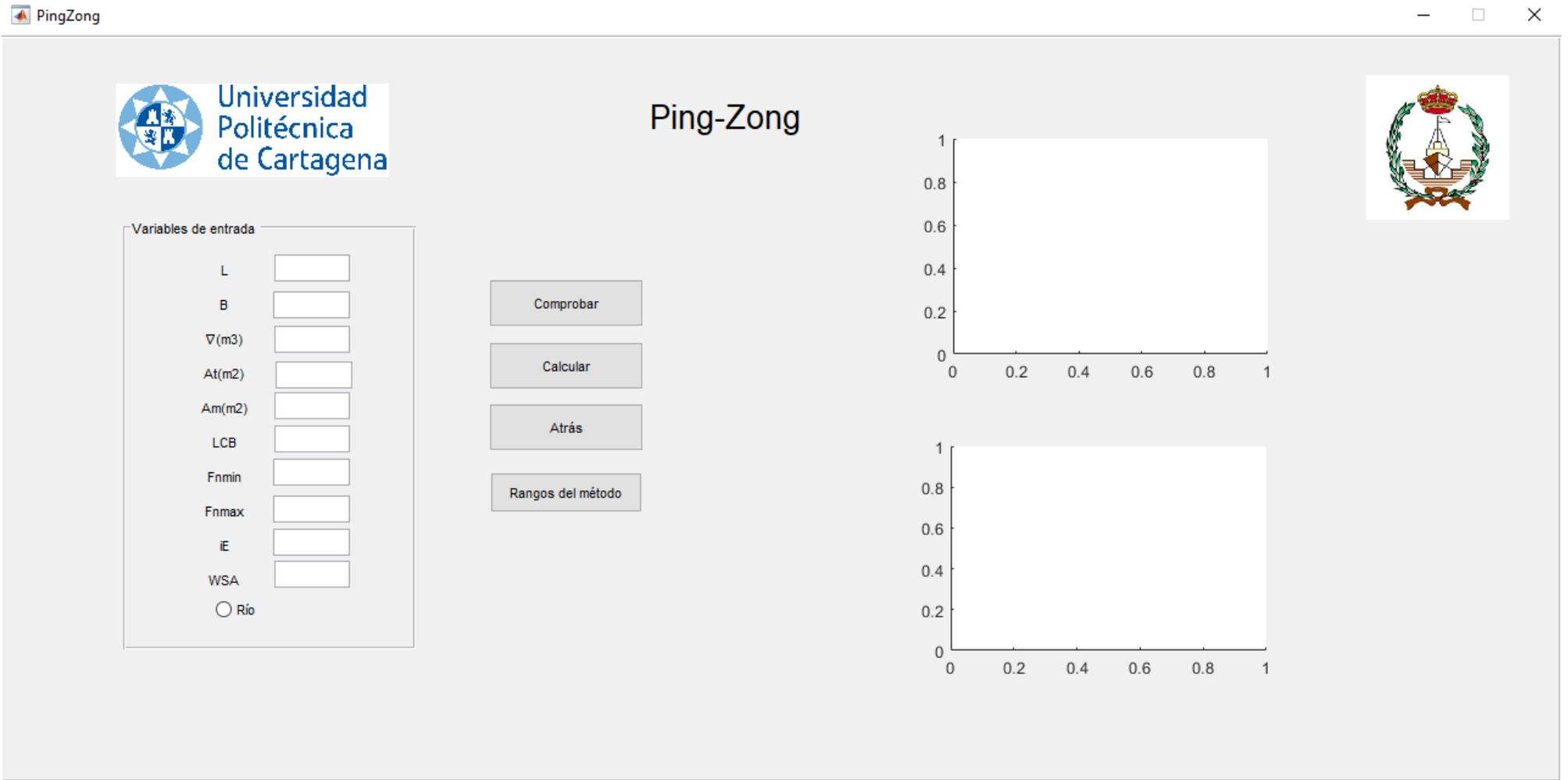


Figura 9.10 Ventana del método de Ping-Zong.

A continuación, tendremos que introducir los valores de los parámetros correspondientes al catamarán del caso práctico para una correcta aplicación del método de Ping-Zong. Estos valores deberán ser comprobados para que se encuentren dentro del rango de aplicación del método de Ping-Zong, eso lo haremos pulsando el botón “Comprobar” una vez se han introducido todos los parámetros, si estos son correctos aparecerá un mensaje por pantalla en el que se nos comunicará que los valores son correctos y en caso contrario, aparecerá un mensaje por pantalla indicándonos cuál es el valor erróneo y obligándonos a corregirlo para proseguir con la aplicación del método.

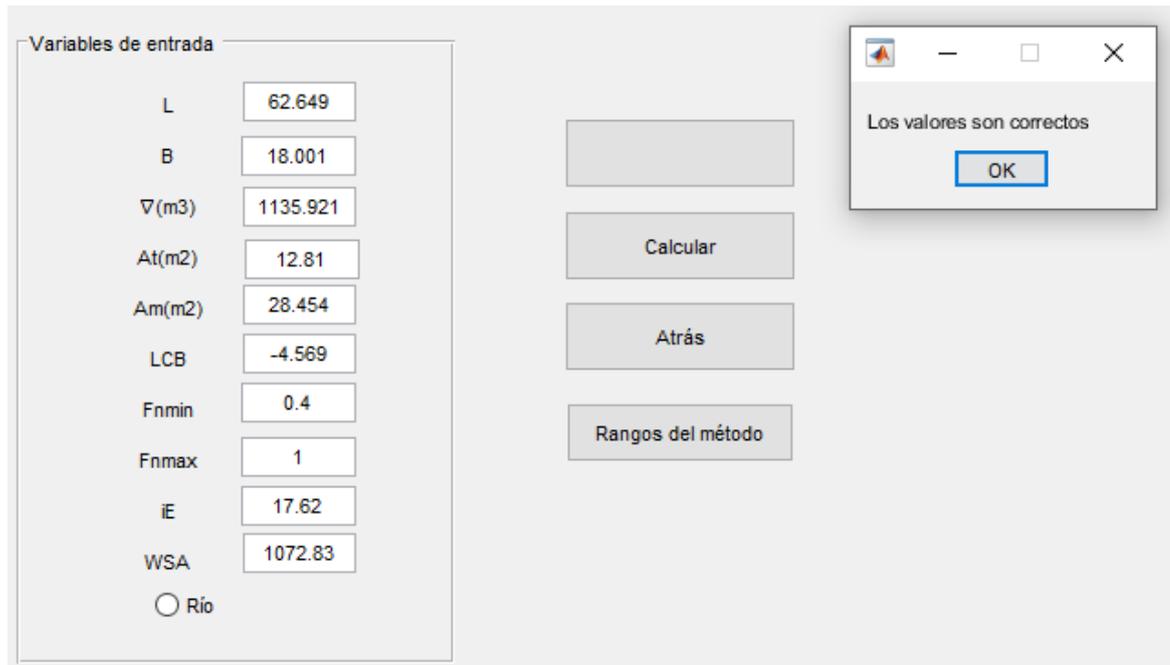


Figura 9.11 Ventana del método de Ping-Zong una vez son comprobados los valores de los parámetros.

Si pulsamos el botón “Rangos” aparecerá por pantalla un mensaje en el que se nos indicará una serie de rangos en los que nos tendremos que fijar en caso de que aparezca algún mensaje de error en la ventana del método de Ping-Zong.

Como podemos ver, una vez introducidos los valores se deberá pulsar el botón “Comprobar” para asegurarnos que los valores que ha introducido el usuario son correctos y se encuentran dentro del rango de aplicación del método de Ping-Zong, en caso de tener algún valor fuera del rango de aplicación del método, aparecerá por pantalla un mensaje de aviso donde se nos indicará el parámetro que deberá ser corregido antes de continuar con la ejecución del método de Ping-Zong.

Una vez se han comprobado que todos los valores de los parámetros introducidos por el usuario se encuentran dentro del rango de aplicación del método de Ping-Zong, solo quedará pulsar el botón “Calcular” para continuar con la aplicación del método.

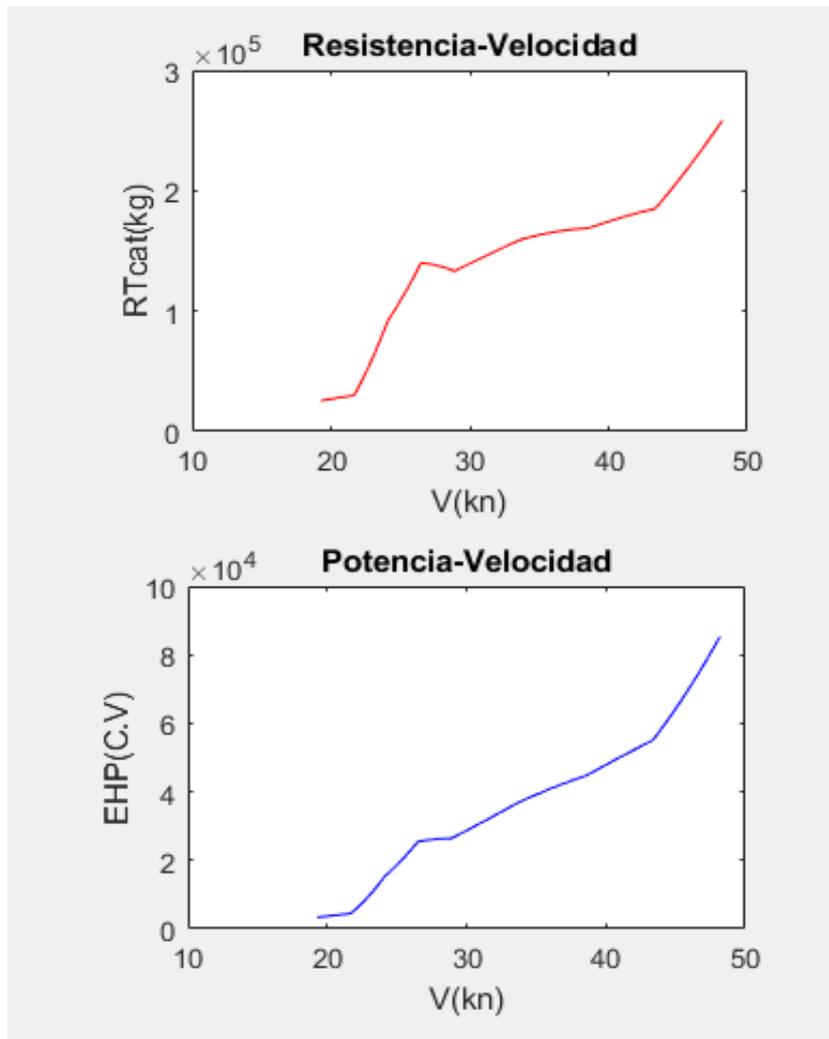


Figura 9.12 Representación de las curvas “Resistencia-Velocidad” y “Potencia-Velocidad”.

Al pulsar el botón “Calcular” se realizarán todos los cálculos necesarios para obtener los resultados de la resistencia al avance y la potencia referentes al catamarán del caso práctico.

Se generarán las curvas “Resistencia-Velocidad” y Potencia-Velocidad” en las que se nos representará la variación de la resistencia al avance de nuestro catamarán de estudio y la potencia necesaria para su navegación en función de la velocidad a la que navegue nuestro catamarán.

Si comparamos las curvas generadas del catamarán que al que se le ha ejercido el alargamiento con las del proyecto de referencia de María Marín Martínez, se pueden apreciar las siguientes diferencias en su forma.

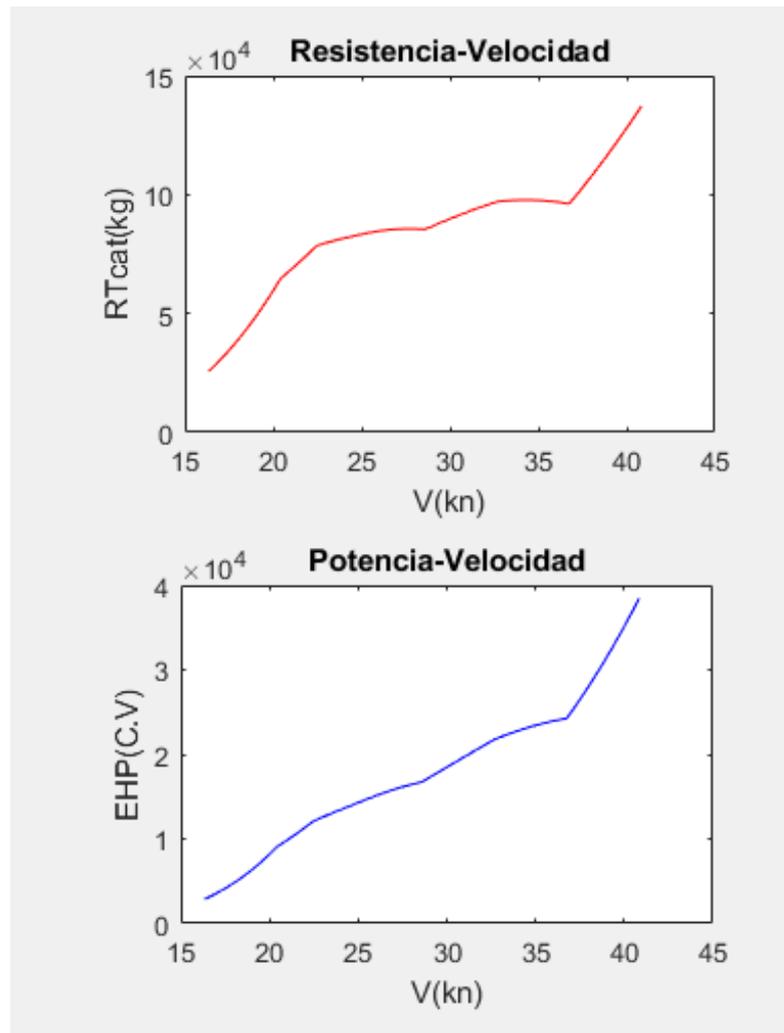


Figura 9.13 Curvas “Resistencia-Velocidad” y “Potencia-Velocidad” del proyecto de referencia.

Como se puede comprobar, las formas de las curvas son similares pero presentan sus diferencias, en el caso práctico del catamarán al que se le realiza el alargamiento, podemos ver como en el tramo correspondiente a velocidades entre los 25 y los 30 nudos (kn) en la curva de “Resistencia-Velocidad” el catamarán sufre una disminución de la resistencia al avance y en la curva ”Potencia-Velocidad” se aprecia que el valor de la potencia requerida para la navegación se mantiene en un valor constante antes de continuar aumentando a partir de los 30 nudos (kn).

Estas diferencias en las formas de las curvas son razonables ya que los parámetros de entrada del catamarán del caso de referencia y los parámetros de entrada del catamarán del caso práctico distan mucho entre sí.

Estas diferencias en las formas de las curvas de la resistencia y la potencia pueden ser explicadas de una manera más sencilla al visualizar los resultados de las tablas generadas tras la ejecución del método.

Al pulsar el botón “Calcular” al mismo tiempo que se generan las curvas de “Resistencia-Velocidad” y “Potencia-Velocidad”, se generará de manera automática una tabla con los valores de la resistencia al avance y potencia necesarias para la navegación de nuestro catamarán, así como los valores de otros parámetros que se calculan en la ejecución del método de Ping-Zong y que son de relevancia a la hora de comparar los resultados entre el caso de referencia y el caso práctico.

Estos valores nos pueden ayudar a tener un mejor seguimiento de las diferencias de los resultados obtenidos entre los dos casos.

-----Método de Ping Zong-----

V_kn	Fn	Rn	CF	CR	CTcat	RTcat_kg	EHP_CV
19.276	0.4	5.0797e+08	1.6678e-06	0.0019182	0.0046398	25571	3381
24.095	0.5	6.3496e+08	1.6207e-06	0.0049252	0.010654	91744	15163
28.914	0.6	7.6196e+08	1.5836e-06	0.0049643	0.010732	1.3308e+05	26393
33.733	0.7	8.8895e+08	1.5532e-06	0.0043238	0.0094507	1.5951e+05	36908
38.552	0.8	1.0159e+09	1.5276e-06	0.0034279	0.0076589	1.6884e+05	44649
43.371	0.9	1.1429e+09	1.5056e-06	0.0029145	0.0066321	1.8504e+05	55049
48.19	1	1.2699e+09	1.4862e-06	0.0033462	0.0074953	2.5818e+05	85341

Figura 9.14 Tabla generada del método de Ping-Zong para el caso práctico.

-----Método de Ping Zong-----

V_kn	Fn	Rn	CF	CR	CTcat	RTcat_kg	EHP_CV
16.337	0.4	3.0923e+08	1.7805e-06	0.0079738	0.016751	25541	2862
20.421	0.5	3.8654e+08	1.7285e-06	0.01317	0.027144	64666	9057.9
24.505	0.6	4.6385e+08	1.6876e-06	0.011616	0.024036	82458	13860
28.589	0.7	5.4116e+08	1.6543e-06	0.0087394	0.018282	85366	16740
32.673	0.8	6.1847e+08	1.6261e-06	0.0075569	0.015917	97076	21756
36.757	0.9	6.9578e+08	1.6019e-06	0.0058259	0.012455	96138	24239
40.842	1	7.7308e+08	1.5807e-06	0.0067972	0.014398	1.372e+05	38436

Figura 9.15 Tabla generada del método de Ping-Zong para el caso de referencia.

Como se puede apreciar, existe una gran diferencia ya que la velocidad respectiva de cada valor del número de Froude (Fn), es mayor en el caso práctico que en el caso del proyecto de referencia, esto se debe a que el valor de la velocidad es calculado con relación al valor del número de Froude (Fn) y la eslora (L) de la embarcación. Como la diferencia entra las esloras del proyecto de referencia y el caso práctico son tan notorias, siendo este último mucho mayor que el del proyecto de referencia, esta diferencia en los valores de la resistencia al avance y la potencia necesarias son comprensibles.

En definitiva, se puede llegar a la conclusión, que un aumento considerable de la eslora o cualquier otra dimensión de la embarcación, en este caso catamarán, conlleva un aumento de la resistencia al avance y por tanto conlleva un aumento de la potencia requerida para la navegación del catamarán del caso práctico

Como se ha explicado anteriormente, este método de Ping-Zong no es un método que se haya formulado expresamente para su aplicación en catamaranes por lo que los resultados que se obtengan de la aplicación de este método no deberán ser tomados como referencia para posteriores procesos de la construcción y diseño del catamarán.

Por lo tanto y como se ha comentado anteriormente, estos resultados obtenidos únicamente deberán ser utilizados para su comparación con los resultados que se obtendrían a través de otros métodos como el de Sahoo, utilizado en este caso, del que sí se podrán tomar los resultados de la resistencia al avance y potencia requerida como referencia para continuar con los siguientes procesos de construcción y diseño, como pueden ser el diseño de las hélices o la selección del motor a instalar.

También se ha podido comprobar la fiabilidad de cálculo del programa y que funciona correctamente, por lo tanto, los valores obtenidos podrán ser utilizados como se ha mencionado antes, para posteriores procesos constructivos o en estudios comparativos con el análisis en CFD.

10. Selección del motor

Para la selección del motor a instalar el valor que deber ser nuestra referencia a la hora de escoger el motor y el tipo de propulsión, debe ser la potencia obtenida que será la necesaria para vencer la resistencia al avance que tendrá nuestro catamarán al navegar a distintas velocidades.

En nuestro caso seleccionaremos el motor a instalar a partir de los resultados obtenidos por el método de Sahoo, al catamarán del caso práctico al que se le realizó el alargamiento. Se han usado estos resultados ya que se trata de un método expresamente preparado para el estudio de la resistencia al avance y la potencia en catamaranes.

Y, por tanto, los resultados obtenidos se ajustarán más a los que se obtendrían en la realidad al hacerse las distintas pruebas de mar, o al ser comparados con los resultados obtenidos por el estudio a través de programas de CFD.

Por tanto, nuestros valores de referencia serán los siguientes:

-----Método de Sahoo-----

V_kn	Fn	Rn	CW _{eat}	CW _{mono}	CT	RT_kg	EHP_CV
9.6379	0.2	2.5399e+08	0.010444	0.0079444	0.01921	4863.7	321.54
14.457	0.3	3.8098e+08	0.0092589	0.0082908	0.015037	10943	1085.2
19.276	0.4	5.0797e+08	0.0074526	0.0038139	0.011651	19455	2572.3
24.095	0.5	6.3496e+08	0.011055	0.0070621	0.014267	30398	5024
28.914	0.6	7.6196e+08	0.0066968	0.004462	0.0092317	43774	8681.5
33.733	0.7	8.8895e+08	0.0047282	0.0035856	0.0067669	59581	13786
38.552	0.8	1.0159e+09	0.0036413	0.0028671	0.0053001	77820	20578
43.371	0.9	1.1429e+09	0.0027461	0.0027778	0.0041043	98491	29300
48.19	1	1.2699e+09	0.0024159	0.002383	0.00353	1.2159e+05	40192

Figura 10.1 Valores obtenidos por el método de Sahoo del caso práctico.

Para realizar una mejor selección, se han comparados distintos catamaranes y sus distintos motores cuyos datos se expondrán en la siguiente tabla.

Catamarán	Eslora	Motores principales
Auto Express 65	64,80 m	4 motores MTU 20V 1163 TB73L
Farasan y Jazan	68,6 m	4 motores MTU 16V 4000 M73L 2880kW
Derecktor 73	73,4 m	4 motores MTU 16V595 3600kW
Cotai Strip	50m	4 motores MTU 16V 4000 M70 2320kW

Tabla 10.1 Catamaranes de ejemplo para la selección del motor.

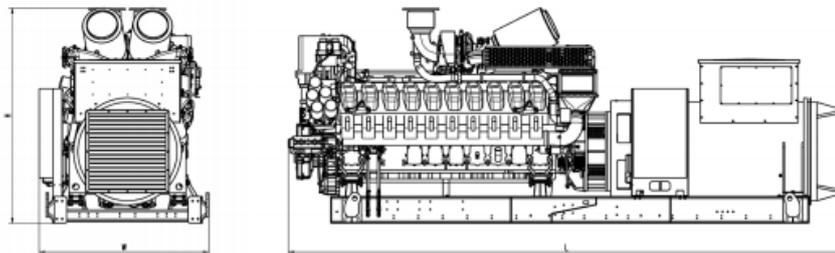
Como se puede observar, en todos los catamaranes que hemos escogido para obtener los datos y poder realizar una mejor selección de los motores y sistema propulsor de nuestro catamarán, llevan instalados cuatro motores de cuatro tiempos .

Como se ha dicho anteriormente, el parámetro que limitará la selección de nuestros motores será la potencia necesaria para vencer la resistencia al avance que tendrá nuestro catamarán al navegar a ciertas velocidades.

El rango de velocidades entre los que navegará nuestro catamarán será entre los 25 y 30 nudos, por lo que la potencia mínima requerida por los motores será de 13786 (CV). El siguiente paso será seleccionar de un catálogo el tipo de motor a instalar en nuestro catamarán.

Para poder escoger el motor, deberemos pasar el valor de nuestra potencia de caballos (CV) a kilovoltio amperio (kW), por lo que pasamos de tener una potencia mínima requerida de 13786 (CV) a 10280 (kW). Como se instalarán cuatro motores de cuatro tiempos, esta potencia se deberá dividir entre cuatro, por lo que la potencia mínima de cada motor deberá ser de 2570 (kW).

Seleccionaremos los motores de entre los aportados en el catálogo para motores marinos Diesel de MTU, el motor seleccionado en cuestión será el motor Diesel MTU 20V4000 DS3600.



Drawing above for illustration purposes only, based on a standard open power 400 Volt engine-generator set. Lengths may vary with other voltages. Do not use for installation design. See website for unit specific template drawings.

System	Dimensions (LxWxH)	Weight (dry/less tank)
Open power unit (OPU)	6249 x 1887 x 2412 mm	18420 kg

Weights and dimensions are based on open power units and are estimates only. Consult the factory for accurate weights and dimensions for your specific engine-generator set.

Figura 10.2 Esquema y dimensiones del motor seleccionado.

Deberemos tener en cuenta un margen del 10% en la potencia del motor para la selección de este, por lo que las características técnicas del motor serán representadas en las siguientes figuras:

Application data ¹⁾

Engine		Liquid capacity (lubrication)	
Manufacturer	MTU	Total oil system capacity: l	390
Model	20V4000G94F	Engine jacket water capacity: l	260
Type	4-cycle	Intercooler coolant capacity: l	50
Arrangement	20V	Combustion air requirements	
Displacement: l	95.4	Combustion air volume: m ³ /s	4.3
Bore: mm	170	Max. air intake restriction: mbar	30
Stroke: mm	210	Cooling/radiator system	
Compression ratio	16.4	Coolant flow rate (HT circuit): m ³ /hr	80
Rated speed: rpm	1500	Coolant flow rate (LT circuit): m ³ /hr	44
Engine governor	ECU 9	Heat rejection to coolant: kW	1090
Max power: kWm	3088	Heat radiated to charge air cooling: kW	795
Air cleaner	dry	Heat radiated to ambient: kW	105
Fuel system		Fan power for electr. radiator (40°C): kW	105
Maximum fuel lift: m	5	Exhaust system	
Total fuel flow: l/min	27	Exhaust gas temp. (after engine, max.): °C	550
Fuel consumption ²⁾		Exhaust gas temp. (before turbocharger): °C	643
At 100% of power rating:	l/hr	g/kwh	196
At 75% of power rating:	730	196	Exhaust gas volume: m ³ /s
At 50% of power rating:	531	190	10.6
	378	203	Maximum allowable back pressure: mbar
			50
			Minimum allowable back pressure: mbar
			-

Figura 10.3 Características técnicas de aplicación del motor seleccionado.

Standard and optional features

System ratings (kW/kVA)

Generator model	Voltage	Fuel consumption optimized		
		without radiator		
		kWel	kVA*	AMPS
Leroy Somer LSA54.2 XL11 (Med. volt. Leroy Somer)	11 kV	2864	3580	188
Marathon 1040FDH7103 (Medium volt. marathon)	11 kV	2976	3720	195
Leroy Somer LSA54.2 ZL12 (MV Leroy Somer oversized)	11 kV	2864	3580	188
Marathon 1040FDH7105 (MV marathon oversized)	11 kV	2976	3720	195
Leroy Somer LSA54.2 ZL12 (Engine output optimized)	11 kV	2984	3730	195

* cos phi = 0.8

Figura 10.4 Ratios del sistema según el modelo del generador.

Podemos comprobar que la potencia mínima requerida por cada motor estará más que asegurada ya que nuestra potencia mínima contado con el margen de seguridad del 10% será de 2827 (kW) y vemos que la potencia mínima de este motor es de 2864 (kW)

11 Bibliografía

Prof. Dr. José Alfonso Martínez García. - *“Fundamentos de la Construcción Naval”*

Prof. Dr Jerónimo Antonio Esteve Pérez - *“Clasificación de los buques”*

Prof. Dr. Domingo García López - *“Métodos de cálculo de potencia”*

PFC de María Martín Martínez *“Estimación y análisis paramétrico de la resistencia al avance de embarcaciones catamaranes con pantoque redondeado mediante métodos numéricos”*.

PFC de Joan Alonso i Roig *“Estimación y comparación de la resistencia al avance de embarcaciones rápidas con formas de pantoque redondeado mediante diferentes métodos numéricos”*.

PFC de Francisco Javier Ros Morales *“Estimación y análisis paramétrico mediante diferentes métodos numéricos de cálculo de potencia para buques, e implementación en una interfaz gráfica mediante MatLab”*.

Richard h. Bartels, John C. Beatty & Brian A. Barsky *“An Introduction to Splines for use in Computer Graphics and Geometrix Modeling”*

José María Ríolas *“Propulsive Qualities of Catamaran Vessels”*

Van Oossanen *“Resistance Prediction of Small Highspeed Displacement Vessels”*

Ebrahimi A, Rad M, Benisis AH. *“Experimental and numerical studies on resistance of a catamarán vessel with non-parallel demihull”*.

Sahoo, PK and Manson, S and Tuite, *“A Practical evaluation of resistance of high-speed catamarán hull forms-Part II. Ship and Offshore Structures”*

Molland A.F, Wellicome J.f, Crouser P.R. *“Resistance Experiments on a Systematic Series of High-Speed Displacement Catamaran Forms: Variation of Length-Displacement Ratio and Breadth-Draught Ratio”*.

Crouser P.R, Molland A.F, Armstrong N.A, *“Calm water powering predictions for high-speed catamarans”*.

Alaez-Zazurca J.A. *“Catamaranes de alta velocidad, canal de experiencias Hidrodinámicas”*.

Daniel Cao Chiew *“Diseño y cálculo de una embarcación sin licencia de 5 m de eslora”*

Manuel Ramón Busto Rodríguez *“Diseño del proceso de fabricación de un catamarán de fibra de vidrio en astillero”*

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/schoenherr>

https://www.cfd-online.com/Wiki/Skin_friction_coefficient

<https://dcain.etsin.upm.es/~leonardo/tema4.htm>

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:%27Canoe_of_the_Sandwich_Islands,_the_Rowers_Masked%27,_by_John_Webber,_c._1778.jpg

<https://docplayer.es/77393001-Instituto-de-historia-y-cultura-naval-armada-espanola.html>

https://www.google.com/search?q=Barcos+de+Tasman+y+multicasco+en+Tongatapu+%281642%29.&tbn=isch&chips=q:barcos+de+tasman+y+multicasco+en+tongatapu+1642,online_chips:naval:i5JPgE765iw%3D&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiLjaKGrZrAhUK8RoKHWyjAt4Q4lYoA3oECAEQHA&biw=1349&bih=657#imgrc=LOb6ToBPkovFbM

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Catamaran_John_Gilpin.jpg

<https://www.expansion.com/nauta360/regatas/2019/11/29/5de0de77e5fdeab23c8b46bd.html>

<https://images.marinelink.com/images/maritime/mcs-pampero-11171.jpg>

<https://nara.getarchive.net/media/a-starboard-bow-view-of-the-surface-effect-ship-200-ses-200-as-it-is-prepared-602739>

https://www.researchgate.net/profile/Jalal_Rafie_Shahraki/publication/279840639/figure/fig2/AS:284543954243592@1444851973964/Condor-Express-INCAT-Hull042-an-86m-car-passenger-wave-piercing-catamaran-the.png

<https://www.nauticexpo.es/prod/the-great-cup-bv/product-49338-364118.html>

<https://es.boats.com/boat-content/files/0H3T5243.jpg>

https://15f8034cdf6595cbfa1-1dd67c28d3aade9d3442ee99310d18bd.ssl.cf3.rackcdn.com//uploaded_thumb_big/2243d6091bb95585b629afb75bc85535/FC_70_Passenger_1-Fly2-Exterior_2.295_1.jpg

<https://www.vesselfinder.com/images/media/20191025/24278-8345609bf436bb2e0f34d50440ad3b71.jpg>

https://www.puentedemando.com/wp-content/uploads/2018/11/45261609_10216879106880824_3347613693662724096_o.jpg

<http://www.fao.org/3/v9468s/v9468s0r.gif>

<https://www.mtu-solutions.com/eu/en/products/power-generation-products-list.html>



Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Naval y Oceánica



Universidad
Politécnica
de Cartagena