



**Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar**

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis hidrodinámico de un velero monocasco con hidroalas de la clase AC75 de la Copa América.

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Eduardo Peinado Martos

DIRECTORES: Antonio Eirís Barca

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis hidrodinámico de un velero monocasco con hidroalas de la clase AC75 de la Copa América.

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

En este trabajo fin de grado se realiza el estudio hidrodinámico de los barcos veleros monocascos de la clase AC75 con hidroalas participantes en la Copa América de Vela. La normativa de la competición impone elementos de diseño único fijados por ellos para todas las embarcaciones participantes y deja libertad para el diseño de otros elementos como son el casco, la vela y la hidroala, a partir de los cuales se pueda adquirir la mayor ventaja posible para alcanzar la victoria en las regatas.

Considerando como punto de partida el modelo CAD de este velero y algunos datos registrados de una embarcación participante en una edición pasada el trabajo consiste en explicar las condiciones de estabilidad y velocidades alcanzadas en los distintos modos de operación. En el modo desplazamiento todo el peso de la embarcación es contrarrestado por el empuje del casco. Sin embargo, en el modo foil el peso de la embarcación es soportado por la fuerza de sustentación del foil. El cálculo de las fuerzas aerodinámicas de las velas y las hidrodinámicas de las hidroalas se calculan con el software XFLR5.

PALABRAS CLAVE

Copa América, velero, foil, fluidodinámica, hidroala, Autodesk Inventor, XFLR5

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a todo el personal de la Escuela Naval Militar que ha intervenido en mi formación tanto técnica como militar a lo largo de estos cinco años de escuela. Todos los conocimientos adquiridos son gracias a ellos.

Por otro, me gustaría agradecer a mi familia, especialmente mis padres ya que son mi principal motivación diaria. Siempre aportan su apoyo incondicional y animan a seguir adelante a pesar de cualquier problema.

En especial agradecer a mi tutor, Antonio, para el cual solo tengo buenas palabras. Agradecer por su gran desempeño a la hora de dirigir y tutorizar mi trabajo. Sobre todo, en los momentos en los cuales aparecían algunas piedras por el camino, ya que mostraba totalmente su apoyo y paciencia con el objetivo de seguir avanzando.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas	5
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Contexto y motivación	7
1.2 Objetivos	9
1.3 Estructura de la memoria	9
2 Estado del arte	11
2.1 Historia de la Copa América	11
2.2 Evolución de los barcos de regata	14
2.3 Aerodinámica en veleros	16
2.3.1 Energía eólica	16
2.3.2 Velocidad y presión del viento	16
2.3.3 Teoría de perfil alar	17
2.3.4 Ángulo de ataque	18
2.3.5 Arrastre y resistencia	19
2.4 Viento real y relativo	19
2.5 Rumbos de navegación a vela	20
2.6 ¿Qué son los hidrofoils?	21
2.7 Componentes de los veleros AC75	24
2.8 Reglamento de la competición Copa América. Monocascos AC75	25
2.8.1 Características generales de los AC75	25
2.8.1 Vela mayor	26
2.8.2 Génova	27
2.8.3 Casco	29
2.8.4 Estructura de los foils	30
2.8.5 Tripulación	32
3 Desarrollo del TFG	33
3.1 Modelado CAD	33
3.1.1 Introducción	33
3.1.2 Modelado del casco y el mástil	35
3.1.3 Modelado de los foils	36
3.1.4 Modelado de las velas	38

3.2 Sistema de referencia	38
3.3 Cálculo de fuerzas de un sólido	39
3.3.1 Cálculo de las fuerzas de los foils.....	40
3.3.2 Cálculo del centro de presiones de ambas velas	41
3.3.3 Cálculo de las fuerzas generadas por la vela mayor	44
3.3.4 Cálculo de las fuerzas generadas por el génova	47
3.4 Maniobra de despegue	48
3.5 Maniobra de virada	49
4 Resultados	51
4.1 Equilibrio de fuerzas en el eje Z	52
4.2 Equilibrio de fuerzas en el eje X.....	54
4.3 Equilibrio de fuerzas en el eje Y	55
4.4 Equilibrio de momentos sobre el eje X.....	56
4.5 Equilibrio de momentos sobre el eje Z	57
5 Conclusiones y líneas futuras	59
5.1 Conclusiones	59
5.2 Líneas futuras	60
6 Bibliografía.....	61
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	63
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	64
Anexo III: Planos de la estructura de los foils	65
Anexo IV: Plano general	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Monocasco de la Copa América [3]	7
Figura 1-2. Catamaranes de SailGP [2]	7
Figura 1-3. Deportes acuáticos que usan foils	8
Figura 1-4. Uso de foils en ferris [4].....	8
Figura 2-1. Yate America [1].....	11
Figura 2-2. Goleta [5].....	12
Figura 2-3. Cutter [6]	12
Figura 2-4. Velero Valkyrie II [7].....	13
Figura 2-5. Velero de la clase J Shamrock V [8]	13
Figura 2-6. Velero IACC [9].....	14
Figura 2-7. Uso de daggerboards en veleros de competición [10].....	15
Figura 2-8. Comparación de los coches con los barcos de vela.....	15
Figura 2-9. Fenómenos causantes de los vientos térmicos [12].....	16
Figura 2-10. Partes más relevantes de un perfil alar	17
Figura 2-11. Fuerza de empuje generada en la vela debido a la teoría de perfil alar.....	18
Figura 2-12. Expresión vectorial del viento real y relativo y sus respectivos ángulos	20
Figura 2-13. Esquema de los distintos rumbos de navegación a vela [15]	21
Figura 2-14. Diferencia de presión entre ambas caras del foil.....	22
Figura 2-15. Descomposición de la fuerza resultante en drag y lift	22
Figura 2-16. Contrarresta de escora con el momento adrizante en velero convencional vs monocascos AC75 (fuente: propia basada en [17]).....	23
Figura 2-17. Partes generales del velero AC75.....	24
Figura 2-18. Partes relevantes de la vela mayor	26
Figura 2-19. Partes relevantes del génova (fuente: propia basada en [18])	28
Figura 2-20. Diferentes diseños de cascos entre los barcos participantes [19].....	29
Figura 2-21. Casco real del velero participante Luna Rossa [20].....	30
Figura 2-22. Estructuras de los foils (fuente: propia basada en [18])	30
Figura 2-23. Estructura del foil real [21]	31
Figura 2-24. Sistema hidráulico de los monocascos [19]	31
Figura 2-25. Zona de trabajo de la tripulación en el Luna Rossa [19].....	32
Figura 3-1. Modelado completo vs imagen real del monocasco amurado a babor.....	34
Figura 3-2. Vista del modelo de través	34
Figura 3-3. Vista del modelo desde proa	34
Figura 3-4. Vista del modelo desde popa.....	35

Figura 3-5. Modelado del casco en CAD [20]	35
Figura 3-6. Modelo CAD del casco y el mástil.....	36
Figura 3-7. Modelado del perfil foil.....	36
Figura 3-8. Modelado del brazo del foil	37
Figura 3-9. Modelado de la estructura completa de los foils	37
Figura 3-10. Vela mayor y génova del modelado	38
Figura 3-11. Cálculo del centro de gravedad del casco	38
Figura 3-12. Posicionamiento del sistema de referencia usado	39
Figura 3-13. Interfaz del programa XFOIL	40
Figura 3-14. Interfaz del programa XFLR5	41
Figura 3-15. Cálculo de la cuerda media aerodinámica.....	42
Figura 3-16. Cálculo del centro de presiones de la vela mayor	43
Figura 3-18. Cálculo del viento aparente	44
Figura 3-19. Descomposición de las fuerzas de lift y drag	46
Figura 3-20. Relación entre el coeficiente de lift y drag con el ángulo de ataque.....	48
Figura 3-21. Esquema gráfico de la maniobra de virada	49
Figura 4-1. Sistema de referencia usado para los cálculos	51
Figura 4-2. Distancias de interés para el cálculo de momentos	52
Figura 4-3. Esquema de fuerzas verticales sobre el velero	53
Figura 4-4. Fuerzas que intervienen en el equilibrio sobre el eje X	54
Figura 4-5. Fuerzas que intervienen en el equilibrio de fuerzas en el eje Y	55
Figura 4-6. Fuerza generada por la inclinación del foil	56
Figura 4-7. Fuerzas que intervienen en el equilibrio de momentos en el eje X.....	56
Figura 4-8. Fuerzas que intervienen en el equilibrio de momentos sobre el eje Z	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Especificaciones generales de los AC75 [18].....	25
Tabla 2-2. Rango de dimensiones de dimensiones de la vela mayor [18]	27
Tabla 2-3. Dimensiones del génova impuestas por el reglamento de la competición [18].....	28
Tabla 3-1. Datos de entrada y resultados para el cálculo de los coeficientes del foil en el programa XFLR5	41
Tabla 3-2. Datos de entrada y resultados para el cálculo de los coeficientes de la vela mayor en el programa XFLR5	45
Tabla 3-3. Cálculo en Excel de las fuerzas generadas por la vela mayor	45
Tabla 3-4. Descomposición de las fuerzas de lift y de drag generadas por la vela mayor	46
Tabla 3-5. Datos de entrada y resultados para el cálculo de los coeficientes del génova en el programa XFLR5	47
Tabla 3-6. Cálculo en Excel de las fuerzas generadas por el génova	47
Tabla 3-7. Descomposición de las fuerzas de lift y de drag generadas por el génova.....	47

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contexto y motivación

El uso de nuevas tecnologías cada vez más sofisticadas en las competiciones de vela en el mundo actual incrementa año tras año. Estas tecnologías se pueden ver reflejadas en numerosas competiciones como son La Copa América [1] y SailGP [2].



Figura 1-1. Monocasco de la Copa América [3]



Figura 1-2. Catamaranes de SailGP [2]

Este trabajo fin de grado se centra especialmente en La Copa América, una de las competiciones más importante de vela a nivel mundial. En esta copa, los barcos participantes son barcos monocascos que “vuelan” a ras de agua gracias a sus desarrollados sistemas de hidroalas, conocidos comúnmente como Foils. Estos barcos se corresponden con la clase AC75, destacando una eslora de 75 pies y una manga de 16 pies, equivalente a 20,25 y 5 metros, respectivamente. También cabe destacar el desplazamiento de estos veleros equivalente a 6,5 toneladas.

Cierto es, que un barco está compuesto por varios foils como son las velas, las hidroalas, la pala del timón, etc. Las velas tienen como objetivo proporcionar una diferencia de presión suficiente para generar fuerza de avance al velero. La pala del timón tiene como objetivo la capacidad de maniobrabilidad. Las hidroalas soportan la sustentación de estos barcos y hacen reducir la fuerza de rozamiento del casco con el agua. A partir de este punto, todas las palabras nombradas en este trabajo como foil se referirán específicamente a las hidroalas.

En estas competiciones, los barcos alcanzan velocidades que sobrepasan los 50 nudos, es decir 92 km/h. Sin embargo, la velocidad media de un velero de competición convencional oscila entre 10 y 15 nudos. Por lo tanto, estos monocascos son capaces de sobrepasar el triple de la velocidad de un velero convencional. Lo sorprendente de este dato es la manera llevada a cabo para conseguirlo ya que son capaces de obtener una velocidad el doble o el triple de la del viento real en el campo de regatas.

La Armada, actualmente cuenta con barcos con tecnologías muy desarrolladas. Por ello, es de interés que la Escuela Naval y sus alumnos estén actualizados de las tecnologías más avanzadas en el mundo naval.

La motivación de este trabajo fin de grado viene de visualizar varios deportes acuáticos relacionados con la vela que usan este tipo de tecnologías e intentar buscar una explicación a su funcionamiento. Estos foils se usan también en fines recreativos como son el windsurf, surf, paddle surf, kitesurf, etc. Estos usos recreativos se pueden observar en la Figura 1-3. Por ello, se debe tratar de entender los principios hidrodinámicos del funcionamiento de todos los componentes de los barcos de la clase AC75, especialmente el de los foils ya que son los responsables de las grandes velocidades y los que les permiten “volar”.



Figura 1-3. Deportes acuáticos que usan foils

Aparte de su uso en fines recreativos, es de gran importancia el uso de los foils en ferris tal y como se puede observar en la Figura 1-4. Muchos de estos barcos tienen una ruta fija sin cambios de rumbos significativos. Por ello, solo interesa consumir el menor combustible posible y llegar de la manera más rápida a su destino. En definitiva, estos barcos buscan la manera más eficiente de realizar sus transportes y esta eficiencia se la proporciona en gran medida el uso de los foils.



Figura 1-4. Uso de foils en ferris [4]

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es analizar la hidrodinámica de los veleros monocasco con hidroalas de la clase AC75 para explicar sus elevadas prestaciones con respecto a los veleros convencionales de empuje por desplazamiento. Principalmente, se busca entender el principio de funcionamiento por el cuál estos barcos alcanzan velocidades tan elevadas y consiguen mantener un equilibrio estable.

Para acometer el objetivo principal y planificar el desarrollo del trabajo se han marcado los siguientes logros parciales:

- Obtener la configuración geométrica más detallada posible y plasmarla en un modelo CAD.
- Estudiar la hidrodinámica de las hidroalas y cuantificar las fuerzas resultantes y su punto de aplicación para las diversas condiciones de operación del velero.
- Estudiar la aerodinámica de las velas y cuantificar las fuerzas para las diferentes configuraciones del velero y condiciones del viento.
- Plantear las ecuaciones de equilibrio necesarias para verificar los puntos de operación más representativos de la operación del velero de la clase AC75.

1.3 Estructura de la memoria

Tras hacer referencia al marco en el que se encuadra este trabajo contextualizándolo y tras haber definido los objetivos que se esperan alcanzar, se pasa a explicar la estructura que seguirá la presente memoria con el fin de organizar la presentación de los trabajos realizados, así como los resultados obtenidos, de la forma más clara posible. El documento está dividido en cinco capítulos a los que a la finalización de los mismos se incluye la bibliografía que recoge todas las fuentes empleadas y los anexos que servirán de apoyo a lo largo del desarrollo del trabajo. Este TFG se organiza como sigue:

- Capítulo 1: Introducción y objetivos. En este capítulo se explica la razón de ser de este trabajo fin de grado, los objetivos que se van a intentar abarcar para conseguir una completa explicación del trabajo y la organización de la memoria.
- Capítulo 2: Estado del arte. En este capítulo se englobará un resumen sobre la creación de la Copa América y su evolución desde su inicio a la actualidad. Además, se realizará una revisión del contexto teórico que engloba este trabajo que se puede resumir en los siguientes puntos:
 - Explicación de todos los conceptos relacionados con la aerodinámica de los barcos de vela.
 - Resumen de los distintos tipos de rumbos que puede llevar a cabo un barco de vela en navegación.
 - Introducción al concepto de hidrofoil y explicación de su principio de funcionamiento.
 - Enumeración de los distintos componentes del monocasco más relevantes para su posterior estudio y descripción de las reglas más relevantes sobre la Copa.
- Capítulo 3: Desarrollo del TFG. En este capítulo se realizará el modelado CAD del velero y una breve explicación del programa usado para ello. Además, se calcularán las fuerzas generadas por las velas y el foil y se define el sistema de referencia a usar. Por último, se explicará de manera resumida las maniobras de despegue y virada del monocasco.
- Capítulo 4: Resultados. En este capítulo se expondrán los resultados de la condición de equilibrio sobre los distintos ejes de referencia con el objetivo de demostrar que el barco se encuentra en equilibrio en las condiciones de navegación determinadas.

- Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras. En este capítulo se resumen las conclusiones alcanzadas tras el desarrollo del trabajo. También se plantean las posibles líneas futuras que traten de mejorar el trabajo o complementarlo con el fin de seguir avanzando en los objetivos del proyecto.
- Finalmente se adjunta la bibliografía donde se especifican las fuentes utilizadas a lo largo del trabajo y una serie de anexos con el objetivo de mejorar la comprensión del trabajo.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Historia de la Copa América

Su inicio se remonta a mediados del siglo XIX, donde las apuestas sobre las regatas eran uno de los mayores entretenimientos para la población enriquecida. Uno de los hitos más importantes fue una gran regata en los alrededores de la Isla Wight con el objetivo de atraer participación internacional, especialmente con el punto de mira en Estados Unidos ya que era una gran potencia.

Sin embargo, el verdadero origen de la Copa América actual ocurre cuando se crea el Club de Yates de New York (NYYC), formado por seis miembros con ideas de crear barcos capaces de demostrar desarrolladas técnicas de navegación y gran potencial. Uno de estos seis miembros recibió una apuesta valorada en treinta mil dólares. Esta apuesta se basaba en la construcción de un velero que fuera capaz de navegar más rápido que todos los existentes en Estados Unidos. Estos aceptaron, fabricando así el conocido yate “América”. Sus dimensiones fueron 93 pies de eslora y 22 pies de manga.



Figura 2-1. Yate America [1]

Unos días más tarde este barco navegaba hacia Le Havre, una ciudad francesa donde fue reparado tras el cruce del Atlántico. Tras dejarlo a punto, pusieron rumbo hacia Isla de Wight en Gran Bretaña, donde desafiaron al velero inglés reconocido como el más rápido de su flota denominado Lavrock. Tras una intensa regata y comenzando considerablemente más atrás, esta finalizó siendo victorioso el estadounidense America. Este hecho fue publicado en numerosos medios de comunicación, destacando una famosa frase en uno de ellos que dice lo siguiente: “the appearance of a sparrow hawk on the

horizon creates among a flock of wood pigeons or skylarks,” lo que significa que el America parecía un gavián en medio de un horizonte repleto de palomas.

Después de esta victoria, ganaron algunas más recibiendo una copa grabada con la fecha y la inscripción conmemorativa del día de la regata, la cual es reconocida como un trofeo internacional con una serie de condiciones que se mantiene actualmente.

A raíz de esta derrota y de la guerra civil americana, los ingleses comenzaron a estudiar diseños de barcos de vela y pusieron el pasatiempo de la vela en la periferia de la discordia nacional. Sin embargo, no fue hasta 1866 cuando el director de NYYC inició una regata oceánica entre tres goletas por un premio al ganador de noventa mil dólares. Esta vez, fueron los ingleses los ganadores de la regata, lo que creó una gran competencia entre los ingleses y americanos. A partir de este momento, llegaron a un acuerdo que explicaba que las regatas se harían bajo las reglas y condiciones impuestas por el club que tuviera la copa en posesión y no se excluiría a ningún barco debidamente capacitado para navegar en dichas regatas.

Las numerosas victorias por parte de los americanos produjeron un enfriamiento significativo en las relaciones angloamericanas en cuanto a las competiciones de regatas. Esto tuvo como consecuencia la ausencia de participación de los ingleses en dos regatas celebradas en los lagos canadienses en los años 1876 y 1881. La postura inglesa fue intentar demostrar que la participación en estas regatas no merecía la pena y simplemente actuaban como espectadores interesados en ellas. Por estas fechas, con el objetivo de equilibrar más las competiciones, se llegó a un acuerdo en el cual se decidió nombrar solo un barco para la serie, cosa que se mantiene hasta hoy en la actual Copa América.

Por otro lado, temerosos de que los competidores construyeran barcos y los remolcaran hasta el lugar de la competición o fueran llevados mediante un barco, se incluyó una regla que obligaba a todos los barcos participantes en las regatas llegar con sus propias velas al puerto donde se celebrara la competición.

A partir de este momento no se produjo ningún desafío hasta el año 1885. A su vez, el diseño de los barcos estaba evolucionando y se decidió cambiar las goletas por la nueva generación de Cutters. La principal diferencia es que las goletas tenían dos o más mástiles y los cutters solían tener solo uno.



Figura 2-2. Goleta [5]



Figura 2-3. Cutter [6]

Desde entonces hubo un prolongado tiempo en el cual no hubo regatas por la falta de acuerdos entre los ingleses y los británicos. Sin embargo, en 1893, los británicos propusieron al club de yates un periodo de diez meses para una serie de cinco regatas, tras haber construido un nuevo barco con características inmejorables, según los ingleses. La principal innovación fue usar una quilla en vez de una orza. Este recibía el nombre de Valkyrie II.



Figura 2-4. Velero Valkyrie II [7]

Uno de los desafiantes más famoso y decidido fue el escocés Thomas Lipton. Entre 1899 y 1930, él inició un periodo de cinco desafíos en yates llamados Shamrock. Estos eran grandes yates de la clase J con una eslora aproximada a 36 metros.



Figura 2-5. Velero de la clase J Shamrock V [8]

Después de la Segunda Guerra Mundial, los enormes y costosos yates de la clase J fueron sustituidos por los yates de la clase 12 metros. Estos tenían alrededor de 20 metros de eslora.

La racha invicta del New York Yacht Club continuó hasta 1980. A partir de este momento, ocurren numerosas regatas, en las cuáles entran en juego también los franceses y australianos. De hecho, en 1983 Australia ganó la copa América rompiendo la racha de tantos años usando una quilla alada innovadora. En 1988 Nueva Zelanda presentó un desafío con un yate de gran eslora y perdió. Desde este momento, se introdujo la Clase Internacional de Yates de la Copa América (IACC), reemplazando a la clase de 12 metros que se llevaba utilizando desde 1958.



Figura 2-6. Velero IACC [9]

La primera regata con los veleros de la figura 2-5 se llevó a cabo en 1992 y se siguieron utilizando hasta 2007. En 2007, la Copa de América fue llevada a Europa gracias a Suiza. Estos eligieron sede Valencia, España.

Posteriormente, en 2013, ocurre el nacimiento del foiling en la Copa. En 2017, Nueva Zelanda ganó la copa. El país que posee la copa es el encargado de abrir nuevos retos e incluir nuevas reglas incluso nuevos tipos de barcos en las ediciones siguientes. Por ello, unos años más tarde, en 2021, con la copa en sus manos, presentó el nuevo concepto de monocascos AC75 que se utilizan en la actualidad.

Actualmente, la copa se celebra cada cuatro años, siendo este año 2024 en Barcelona [1]. Hay que destacar que puede haber modificaciones en los diseños de los barcos en la siguiente competición respecto a lo desarrollado en este trabajo fin de grado ya que esta tecnología avanza muy rápido con el objetivo de sacar la mayor ventaja posible y ganar la copa.

2.2 Evolución de los barcos de regata

La esencia principal de los barcos de vela se mantiene desde la antigüedad hasta hoy en día. Sin embargo, como toda tecnología, han ido evolucionando con el paso de los años buscando la eficiencia y la perfección.

En primer lugar, las velas de los barcos tienen forma de ala de avión, para que se produzca la diferencia de presiones entre ambas caras. Sin embargo, las velas antiguas perdían su forma al ser sometidas a la fuerza del viento, por lo que esta diferencia de presiones no era tan eficaz. Hoy en día, en las regatas profesionales, estas velas son rígidas y con la forma de ala de avión. El más habitual es un perfil NACA. Es por ello, que estas velas no se deforman y siempre mantienen un trabajo eficaz.

Por otro lado, la evolución de los barcos de regatas se ha basado en buscar una mejor estabilidad de estos con la forma de los cascos, es decir, buscando geometrías de cascos que resistan la escora. Para ello, se comenzaron a hacer cascos más anchos y planos.

Para evitar el desplazamiento lateral de los veleros también conocido como deriva, se usan quillas y timones. Estos tienen una gran desventaja, hacen aparecer fricciones que reducen el avance útil. Al principio, estos llevaban quillas muy largas y con un gran peso de plomo en su extremo, bajando así el centro de gravedad del buque y aumentando la fuerza adrizante. Posteriormente se comenzó a instaurar quillas basculantes que se inclinaban a barlovento aumentando así la fuerza adrizante. Sin embargo, esta evolución tenía un gran problema ya que debido a la inclinación de las quillas se perdía la contrarresta del desplazamiento lateral.

A raíz de esto último, se implementaron los *daggerboards*. Estos son unas aletas sin peso insertadas en el casco, una a cada lado para aumentar la eficiencia, ligeramente inclinadas.



Figura 2-7. Uso de daggerboards en veleros de competición [10]

La última evolución y más eficiente son los foils, los cuáles aumentan la fuerza de adrizamiento y contrarrestan la fuerza de la gravedad y el rozamiento con el agua [11].

Los barcos más relevantes que usan foils son los AC75 y guardan gran similitud con la Fórmula 1.

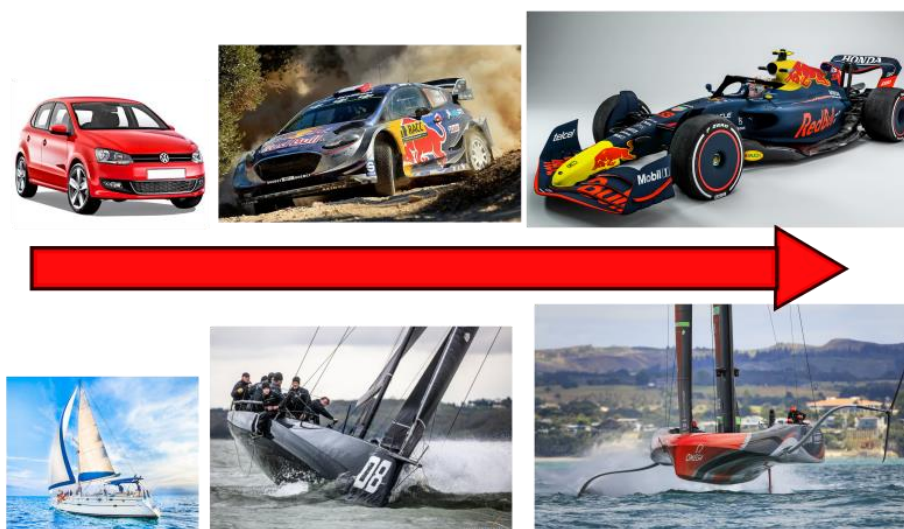


Figura 2-8. Comparación de los coches con los barcos de vela

En la parte izquierda de la Figura 2-8 se observan vehículos de uso común de recreo y que pueden ser usados por cualquier persona que posea un conocimiento mínimo sobre la materia. Las fotos centrales, siguen siendo vehículos comunes pero con una tecnología algo más desarrollada para sacar mejor rendimiento de ellos. Sin embargo, también podrían ser usados por cualquier persona no experta en la materia. Ahora bien, las imágenes de la parte derecha son exclusivamente para competir bajo unas condiciones determinadas y no pueden ser tripuladas por personas con conocimientos básicos. Estas últimas requieren gran conocimiento sobre la materia ya que poseen grandes avances tecnológicos e innovaciones más desarrolladas. Es decir, tanto los coches de Fórmula 1 como los monocascos AC75 deben ser usados por personas expertas. Ambos buscan velocidades muy elevadas y poseen

tecnologías y principios de funcionamientos semejantes, uno en mar y otro en tierra. De hecho, los dos primeros coches se pueden ver en medio de una ciudad en carretera. Sin embargo los coches de Fórmula 1 están preparados exclusivamente para circular por un circuito de alta velocidad.

2.3 Aerodinámica en veleros

Un velero no depende de combustible por lo que su navegación es más sostenible y económica que cualquier otro barco propulsado por un motor o turbina. Básicamente, los veleros son impulsados por la energía del viento, ya que los distintos componentes del barco son capaces de transformar ésta en energía cinética. Para entender el concepto de navegación a vela de una forma más clara, primero es necesario entender las variables que afectan al barco y sus consecuencias.

2.3.1 Energía eólica

Esta energía proviene del viento y por ello es una energía renovable. El origen de la energía eólica es debido al movimiento de las masas de aire que ocurren en la atmósfera.

Cabe destacar los vientos térmicos, esto es un fenómeno debido a la diferencia de temperatura entre el mar y la tierra. Principalmente destacan dos vientos térmicos principales, durante el día y durante la noche. El que se produce de día, que tiene un sentido desde el mar hacia la tierra, ocurre ya que durante el día la tierra adquiere mayor temperatura que el mar, produciéndose así una ascensión de las masas de aire que se calientan y se vuelven menos densas. Por ello, las masas de aire del mar, más frías y densas, tienden a ocupar el espacio libre del aire que ha ascendido en la tierra. El producido de noche, que tiene un sentido desde la tierra hacia el mar, es debido al fenómeno totalmente inverso al anterior. Es decir, las masas de aire del mar, con mayor temperatura y menor densidad que las terrestres ascienden. Esto hace que las masas de aire más frías de la tierra tiendan a ocupar el espacio libre producido por la ascensión de las masas de aire del mar [12].

A continuación, podemos visualizar la Figura 2-9 que esquematiza claramente dichos fenómenos.

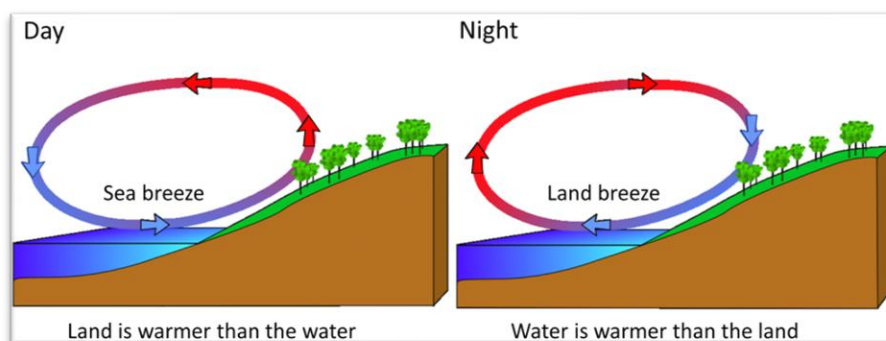


Figura 2-9. Fenómenos causantes de los vientos térmicos [12]

2.3.2 Velocidad y presión del viento

La velocidad y la presión del viento son factores clave para la propulsión del velero. La cantidad de energía transferida a las velas mediante el viento es directamente proporcional a la magnitud de la velocidad y presión del viento. Es decir, cuanto mayor sean la velocidad y presión, mayor cantidad de energía será aportada a las velas del buque. Esta presión proveniente del viento produce por un lado en escora debida a la fuerza ejercida por las velas y otra pequeña parte en fuerza de avance (ver Figura 2-11). Sin embargo, no es un factor determinante para alcanzar el mejor rendimiento del barco. Lo más

importante es adaptar la configuración del aparejo en concordancia con esta velocidad y presión para lograr rendimientos óptimos.

2.3.3 Teoría de perfil alar

Los perfiles alares como son los foils y las velas de este monocasco están destinados a generar una fuerza perpendicular a la dirección del flujo entrante. Por lo general, esta fuerza es la buscada y debe generarse con el menor arrastre posible. Normalmente, este tipo de superficies son delgadas y con un borde de fuga afilado (ver Figura 2-10). Las alas de los aviones son probablemente los elementos más conocidos. Dependiendo si hablamos de perfiles para ser usados en agua o aire se denominarán perfiles hidrodinámicos o perfiles aerodinámicos, respectivamente.

El plano paralelo a la superficie del perfil se denomina planta. La dimensión lateral es la envergadura, es decir, la longitud del borde de ataque o de fuga y la dimensión del flujo axial se llama longitud de cuerda. La cuerda suele ir disminuyendo conforma se va avanzando en la envergadura. El ángulo de ataque α de un perfil alar es el ángulo formado entre el plano de la planta y el flujo entrante [11], tal y como se puede observar en la Figura 2-10.

Estos perfiles tienen un grosor y una curvatura determinada, normalmente definidos por un perfil NACA (National Advisory Committee for Aeronautics). Estos perfiles son una secuencia de puntos definidos y con un determinado grosor muy usados en el mundo aeronáutico. Pueden ser simétricos o asimétricos.

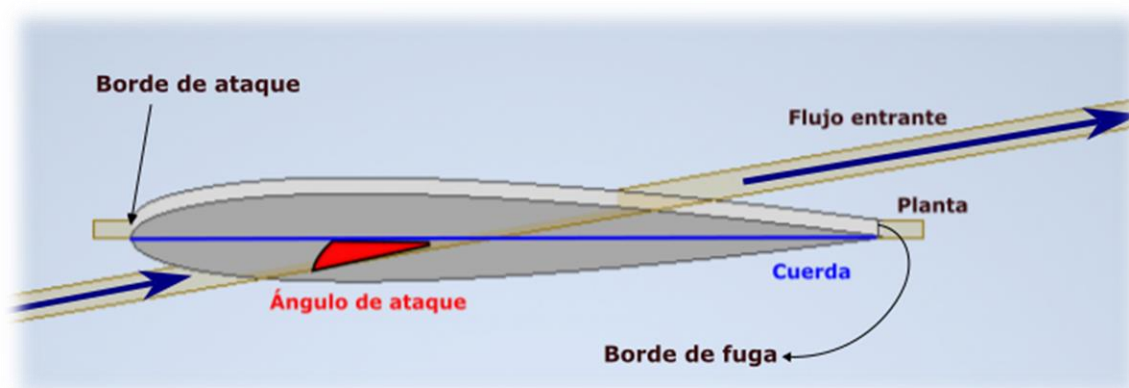


Figura 2-10. Partes más relevantes de un perfil alar

La manera más sencilla de entender el principio de funcionamiento de estos perfiles es mediante el Principio de Bernouilli. Es decir, una partícula del fluido en la cara superior debe recorrer mayor distancia que en la cara inferior. Por ello, el fluido en la cara superior tiene mayor velocidad y menor presión. Por el contrario, en la cara inferior, el fluido tiene menor velocidad y una presión superior. Esto crea una fuerza de succión en la cara superior, lo que finalmente genera una fuerza resultante hacia la cara de menor presión y perpendicular al flujo entrante denominada fuerza de empuje o fuerza de *lift*, tal y como se puede observar en la Figura 2-11. También aparece una fuerza en la dirección del flujo denominada fuerza de *drag*.

Esta fuerza de *drag* en dirección del fluido se descompone de un modo similar a la fuerza de empuje. Se descompone en una fuerza de arrastre en contra de la dirección de la fuerza de avance y en una fuerza de escora que se suma a la fuerza de escora generada por la fuerza de empuje. Aunque estas fuerzas generadas por el *drag* suelen ser de menor magnitud que las generadas por la fuerza de empuje, hay que asegurarse del ángulo de ataque óptimo para generar un arrastre mínimo.

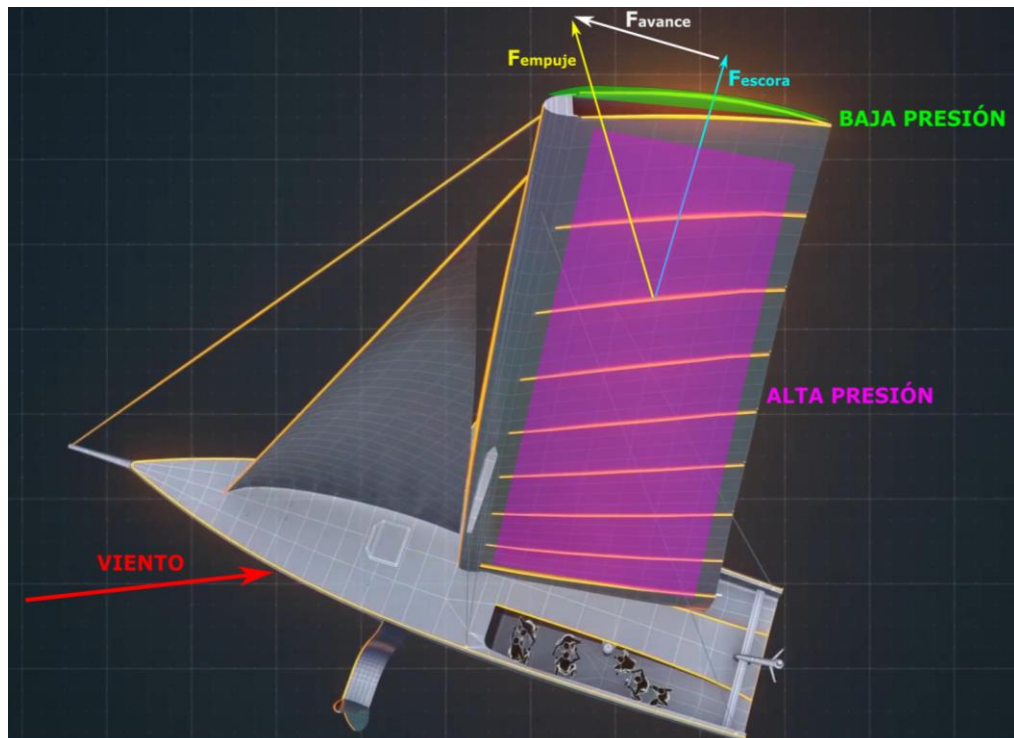


Figura 2-11. Fuerza de empuje generada en la vela debido a la teoría de perfil alar

También es de interés detallar el concepto de número de Reynolds ya que las fuerzas mencionadas anteriormente dependen de este número. El número de Reynolds lleva el nombre de Osborne Reynolds, científico británico quien estudió entre otras muchas cosas el flujo en tuberías y bajo qué condiciones el flujo cambia de laminar a turbulento [13]. Este número es adimensional y depende principalmente de la densidad del fluido de trabajo, su viscosidad y su velocidad. A continuación, se muestra la ecuación de este concepto.

$$Re = \frac{\rho L v}{\mu}; \quad (2-1)$$

Re = número de Reynolds

ρ = densidad del fluido [kg/m^3]

L = longitud de referencia [m]

v = velocidad del fluido [m/s]

μ = viscosidad dinámica [$\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$]

2.3.4 Ángulo de ataque

El ángulo de ataque es el ángulo formado por la dirección del viento y la orientación de las velas. También se entiende por ángulo de ataque el ángulo formado entre el agua y la orientación del foil (ver

Figura 2-10). Todos los competidores de regatas de vela intentan buscar siempre el ángulo de ataque óptimo ya que este permite conseguir un aprovechamiento máximo de la energía proporcionada por el viento y por ello poder maximizar la velocidad del buque. Este ángulo de ataque ha de ajustarse adecuadamente al rumbo del buque en cada circunstancia. En ceñida, podemos ver uno de los límites del ángulo de ataque, esto ocurrirá cuando el empuje vélico tenga una componente lateral excesiva. El otro extremo de los límites del ángulo de ataque lo podemos observar con vientos de popa y ocurre cuando la botavara se apoya en los obenques o cuando el puño de escota del foque se encuentre a la altura de la roda.

La botavara es la parte del velero que sustenta la parte inferior de la vela mayor (pujamen), los obenques son cables de acero que soportan la tensión lateral del mástil y la roda es la parte del casco del barco que se encuentra más a proa.

2.3.5 Arrastre y resistencia

Hasta ahora, se han explicado conceptos que proporcionan la fuerza de avance al buque. Sin embargo, los barcos también experimentan fuerzas en contra de su movimiento. Esto es el caso del arrastre y resistencia al viento.

Cuando el barco avanza, se enfrenta a la resistencia impuesta por el agua sobre el casco, lo que se denomina arrastre. Por otro lado, también encuentra resistencia sobre las velas debida al viento en contra. Por ello, el mayor objetivo para alcanzar grandes velocidades es intentar minimizar estas resistencias en contra, maximizando así la eficiencia del buque. Para alcanzar esta eficiencia, es necesario un buen diseño aerodinámico y un fino ajuste de las velas.

De manera general, la función principal de los foils es reducir al máximo esta resistencia de rozamiento del agua, ya que el casco del barco no está contacto con el agua, solamente los foils.

2.4 Viento real y relativo

Inicialmente, se puede definir el concepto de viento como corrientes de masas de aire que se producen en la atmósfera debido a motivos naturales como podrían ser variaciones de temperatura o de presión.

Por un lado se encuentra el viento real o true wind. Este es el viento que se recibe desde un punto de observación que no se está moviendo. Un ejemplo de esto es el viento que se percibe cuando el barco se encuentra amarrado en puerto o fondeado. El viento real puede denominarse también como viento meteorológico.

Sin embargo, al navegar, la percepción del viento ocurre de forma distinta ya que estamos en movimiento. Por lo tanto, se percibe un viento llamado viento aparente o apparent wind que es la composición de la velocidad del viento real y la velocidad del propio barco. Por otro lado, el viento velocidad es el viento generado por el propio movimiento del barco.

De esta forma se estudia vectorialmente la velocidad de los distintos tipos de vientos por los que se ve afectado un barco y el ángulo de cada uno de ellos. Obteniéndose así del viento real el TWS (True Wind Speed) y el TWA (True Wind Angle) y del aparente, el AWS (Apparent Wind Speed) y el AWA (Apparent Wind Angle) [14]. A continuación, se puede visualizar gráficamente en la Figura 2-12.

En un barco de vela siempre se navega teniendo en cuenta el viento relativo, tanto su dirección como su velocidad, ya que es el causante de generar las fuerzas en las velas.

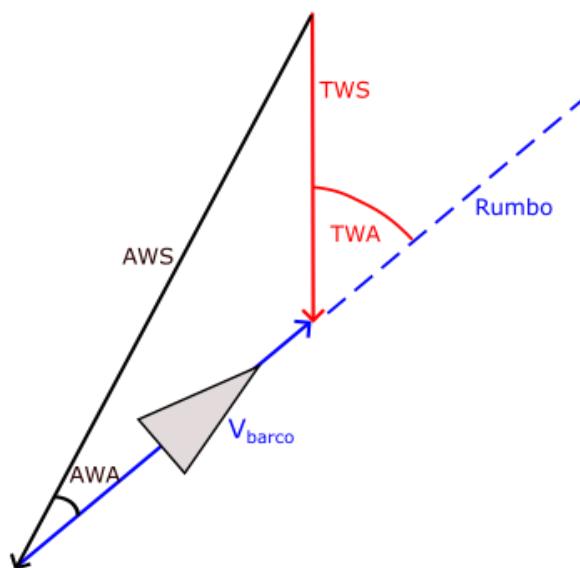


Figura 2-12. Expresión vectorial del viento real y relativo y sus respectivos ángulos

2.5 Rumbos de navegación a vela

Cuando se habla de rumbos de navegación a vela y nos referimos a un cierto ángulo entre la proa del velero y el viento, el viento referido es el viento relativo, nunca el real.

En primer lugar, hay que tener en cuenta que un velero no es capaz de navegar totalmente en contra de la dirección del viento debido a que las velas perderían presión y comenzarían a flamear dejando al velero sin avance. Por este motivo, aparece el nombre del primer rumbo de navegación llamado *de ceñida*. Ceñir consiste en navegar en contra de la dirección del viento formando el menor ángulo posible, aproximadamente 30 grados o amura, depende del tipo de velero. En este tipo de rumbo, los aparejos de las velas deben ir lo más a cruzía posible, es decir, cazados lo máximo posible.

Llevar el ángulo del viento a 60 grados, se denomina navegar *a un descuartelar* y se libera tensión de los aparejos de las respectivas velas, las velas se encuentran más abiertas. El siguiente rumbo tiene el nombre de “través”. En este rumbo, el viento relativo se recibe justo a 90 grados de la proa del velero.

Pasado el rumbo más perpendicular posible, a unos 120 grados se observa el rumbo *de largo*. En este rumbo el viento aparente incide por la aleta del buque. Posteriormente, el viento comienza a incidir por la popa lo que se denomina *navegar de popa, empopada o de aleta*. Dentro de este último, si el viento incide totalmente por la popa, es decir, formando 180 grados, se denomina *popa cerrada o popa redonda*. Los distintos tipos de rumbos se pueden visualizar de forma esquemática en la Figura 2-13.

En general, con rumbos de ceñida las velas van más cazadas que en rumbos de popa, donde van lo más abiertas posibles. Por ello, conforme se va orzando, se van cazando las velas y, por el contrario, conforme se va arribando, se van soltando las escotas. Siempre se debe navegar buscando el punto de flameo de las velas, ya que así se alcanza la máxima optimización de los aparejos del velero.

Por otro lado, todos los aparejos deben llevar poca tensión con poco viento para llevar las velas lo más embolsadas posibles. Esta tensión aumenta con el incremento de la intensidad del viento. Por lo tanto, se van aplanando las velas [14].

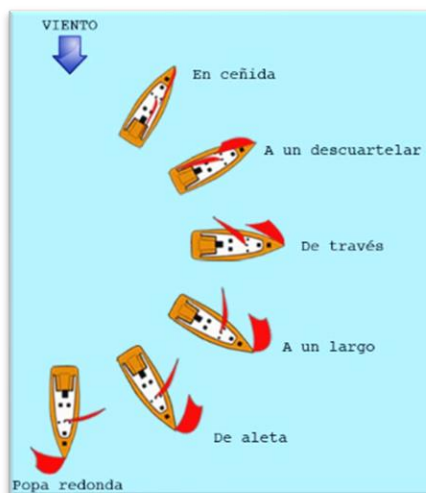


Figura 2-13. Esquema de los distintos rumbos de navegación a vela [15]

2.6 ¿Qué son los hidrofoils?

Técnicamente, un velero tiene varios foils dentro de sus componentes, estos son las velas, la quilla, el timón, etc. Sin embargo, lo que comúnmente se entiende por foil son las “alas” de los veleros de competición modernos, también conocidos como *hidrofoils*.

Los *hidrofoils* son muy similares a las alas de un avión. Su principal diferencia es que trabajan en un fluido líquido como es el agua, mientras las alas de avión trabajan en un fluido gaseoso. Estos perfiles pueden ser simétricos o asimétricos. Sin embargo, ambos tienen un objetivo principal que es producir *lift* o sustentación, es decir producir un movimiento hacia una posición más alta. Esta es la fuerza que mantiene a los barcos de la Copa América suspendidos del agua. Estos perfiles están pensados para conseguir esta fuerza produciendo el mínimo arrastre y resistencia de avance posible. El *lift* aparece principalmente debido a la geometría de estos perfiles y su ángulo de ataque en el fluido, en este caso el agua. Una vez el foil se encuentra sumergido en el fluido, aparece una diferencia de presión entre ambas caras del perfil debido a la teoría de perfil alar (ver 2.3.3) que genera la fuerza llamada *lift*. La cara inferior tiene mayor presión que la superior. A parte de este fenómeno, también existe una componente resultante de esta diferencia de presión en dirección horizontal conocido como *drag* o fuerza de arrastre. Cabe destacar la importancia de estudiar las características de estos perfiles con el objetivo de maximizar el *lift* y minimizar el *drag*. Estas fuerzas dependen directamente de la geometría del foil, su superficie, el ángulo de ataque y la densidad del fluido.

La densidad del agua es mucho mayor que la del aire por lo que la fuerza generada por estos perfiles en el agua es mucho mayor que la generada en el aire [16].

En la Figura 2-14 se puede observar las presiones que aparecen en ambas caras del perfil, destacando como se ha mencionado anteriormente, la idea de mayor presión en la cara inferior.

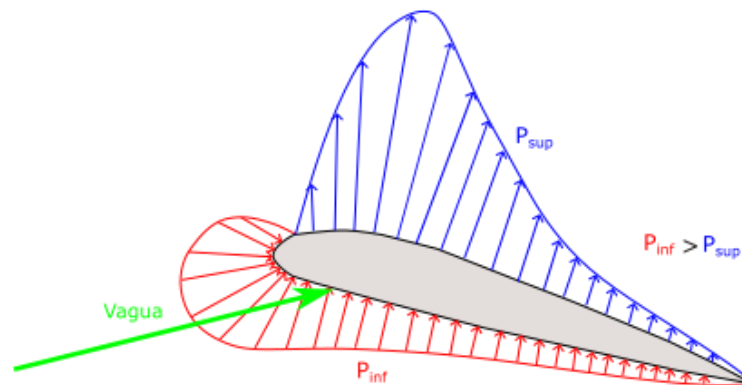


Figura 2-14. Diferencia de presión entre ambas caras del foil

A raíz de eso, se puede observar en la Figura 2-15 una fuerza resultante, la cual se descompone en dos: *lift* y *drag*. Esta fuerza resultante es mayor cuanto mayor sea la densidad del fluido ya que hay un mayor número de partículas impactando en el perfil.

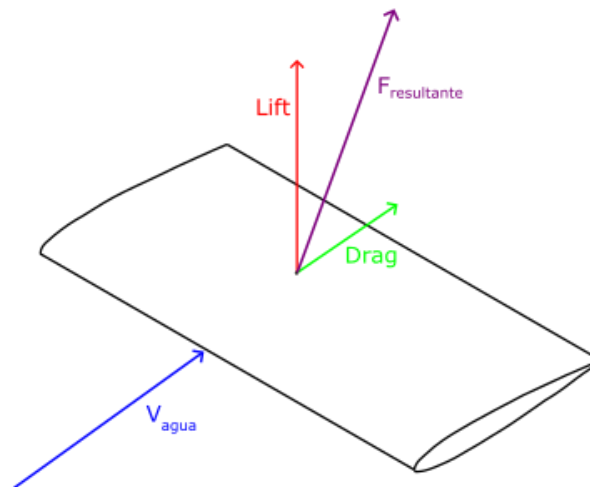


Figura 2-15. Descomposición de la fuerza resultante en drag y lift

Estos foils sustituyen a la quilla de los veleros y están soportados por un sistema hidráulico que permite su movimiento para ajustarse a la configuración óptima en cada situación.

Los veleros que usan foils están diseñados para tener en el agua el foil de la banda de sotavento y fuera el de barlovento. Este último contrarresta la escora y aumenta la fuerza de adrizamiento. Por ello, al no tener quilla, estos barcos son mucho más inestables cuando no están en modo *foiling* que cualquier otro barco. Cada estructura de foil pesa aproximadamente 1300 kg, es decir, un quinto del peso total del barco.

Se ha de tener en cuenta que los pesos de estos son muy importantes ya que en ellos recaen la fuerza adrizante. Por ello, si se quiere fabricar un foil más delgado, que proporciona más velocidad y

menos calado, habría que instaurarle un bulbo en él para aumentar su peso, ya que sino no aportaría el peso suficiente para mantener la estabilidad necesaria.

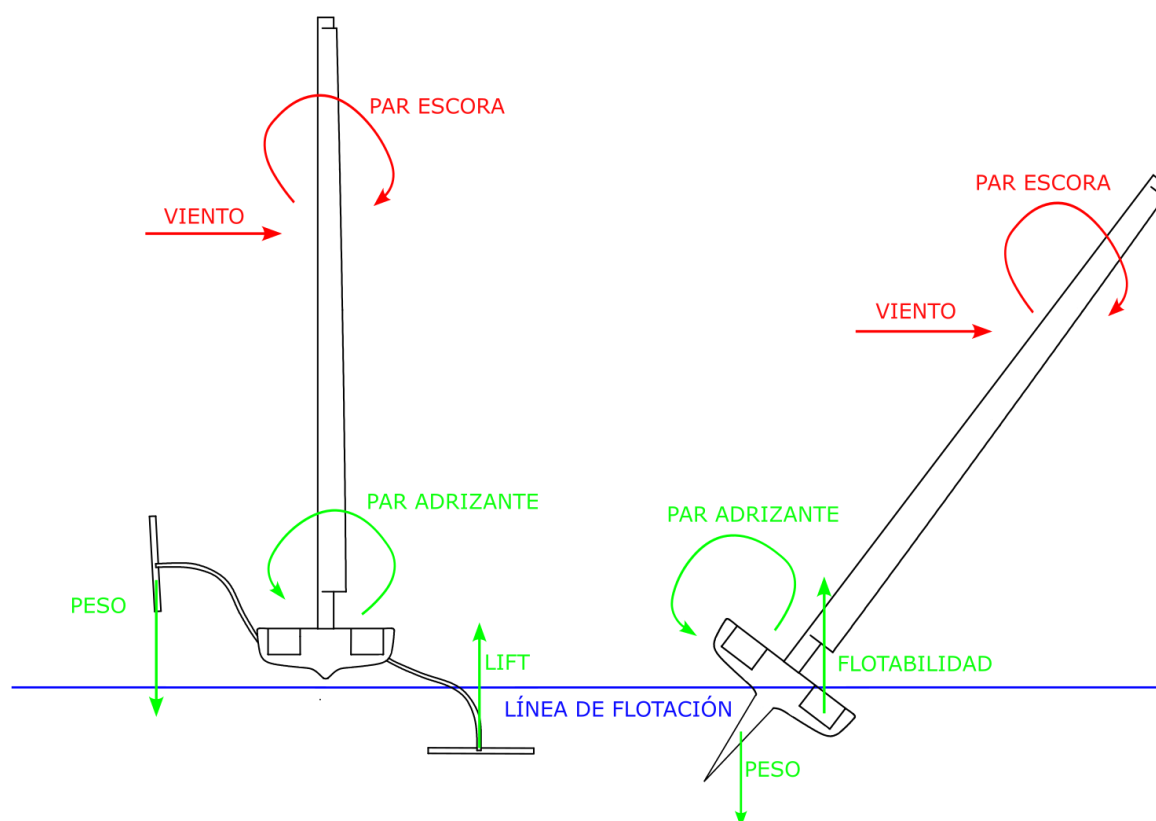


Figura 2-16. Contrarresta de escora con el momento adrizante en velero convencional vs monocascos AC75 (fuente: propia basada en [17])

En la parte izquierda de la Figura 2-16 se puede observar que el par adrizante lo genera la fuerza de sustentación del foil sumergido junto con el peso del foil elevado. Por el contrario, en la parte derecha de la imagen el par adrizante es generado por la quilla del velero y por la parte sumergida del casco debido al principio de Arquímedes.

2.7 Componentes de los veleros AC75

Esta clase de barcos tienen un gran número de elementos, tanto mecánicos como eléctricos y electrónicos. De hecho, también poseen sistemas hidráulicos para el movimiento de los foils. Sin embargo, para el estudio de este trabajo fin de grado es necesario conocer los elementos que afectan a la fluidodinámica, tal y como se puede visualizar en la Figura 2-17.

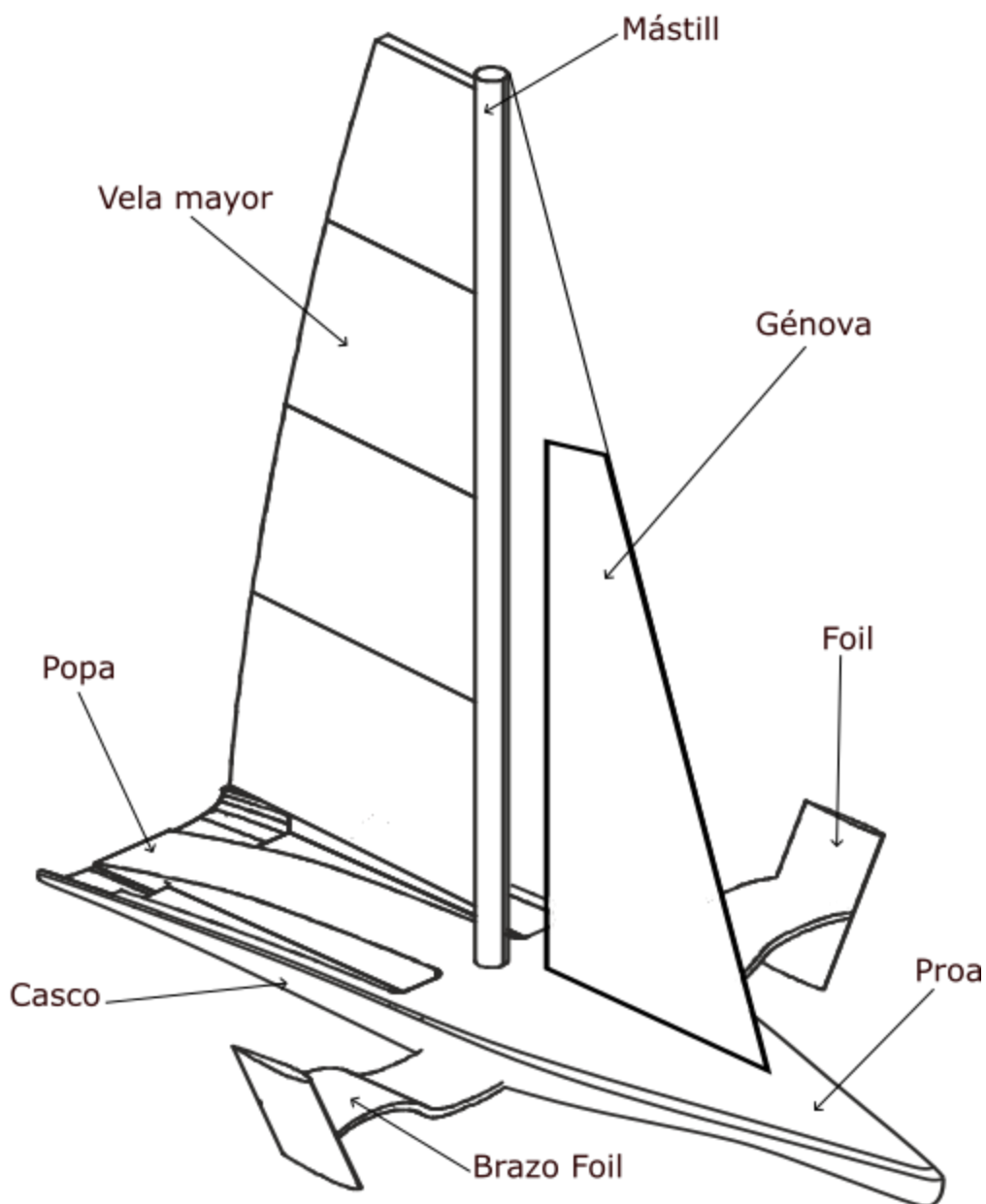


Figura 2-17. Partes generales del velero AC75

Como se puede observar en la Figura 2-17, la mayoría de estas partes son común a cualquier barco de vela y todas ellas son importantes y necesarias para la navegación del velero. Sin embargo, cabe destacar el sistema de los foils, ya que es la esencia de estos veleros y la razón por la cual alcanzan velocidades tan elevadas.

2.8 Reglamento de la competición Copa América. Monocascos AC75

El reglamento de la clase AC75 [18] es el documento que describe todos los requisitos y restricciones relativos al diseño, fabricación y funcionamiento del monocasco AC75. Es importante tener en cuenta que el reglamento se actualizó ligeramente después de la 36ª edición de la Copa América y, a pesar de que los cambios son mínimos, será importante tenerlos en cuenta a la hora de analizar los monocascos de esta clase.

Aunque la Regla de la Clase cubre elementos del barco como los acabados superficiales, los sistemas hidráulicos y eléctricos, los materiales y el timón, estos aspectos están fuera del alcance de este proyecto y no se estudiarán. En su lugar, el trabajo se centrará en el casco, los foils, el mástil, la vela mayor, la vela de proa y la tripulación.

Las normas más generales establecen que el AC75 es un yate monocasco propulsado únicamente por velas. Esto ha fomentado una vuelta a la configuración más clásica de los veleros y una desviación de las modernas configuraciones de catamarán o trimarán. El AC75 consta exactamente de un casco, dos foils, un timón, un mástil, una vela mayor y un foque. Otra consideración general importante del diseño del AC75 es que hay varios componentes suministrados. Entre ellos se incluyen el mástil, los brazos de los foils, la jarcia y el sistema hidráulico. El resto de los componentes que se nos puedan ocurrir del velero está libre de diseño, aunque no deben salirse del reglamento. En estos componentes libres de diseño, los participantes pueden innovar y ajustar sus barcos para encontrar una ventaja ganadora en las regatas.

2.8.1 Características generales de los AC75

La normativa de la clase AC75 nombra una serie de características generales que deben cumplir todos los participantes tal y como se puede observar en la Tabla 2-1.

Eslora total	23 metros (75 pies)
Manga	5 metros (16,5 pies)
Desplazamiento	Sin tripulación: 6200 kg
	Con tripulación: 6950 kg
Altura del mástil (desde cubierta)	26,5 metros
Velas	Vela mayor: 145 m ²
	Génova: 90 m ²
Tripulación	8 personas

Tabla 2-1. Especificaciones generales de los AC75 [18]

2.8.1 Vela mayor

Es la vela con mayor superficie vélica por lo que es la que genera mayor empuje vélico y por ello, mayor avance y escora. A continuación, se puede observar las distintas partes de mayor relevancia de la vela en la Figura 2-18.

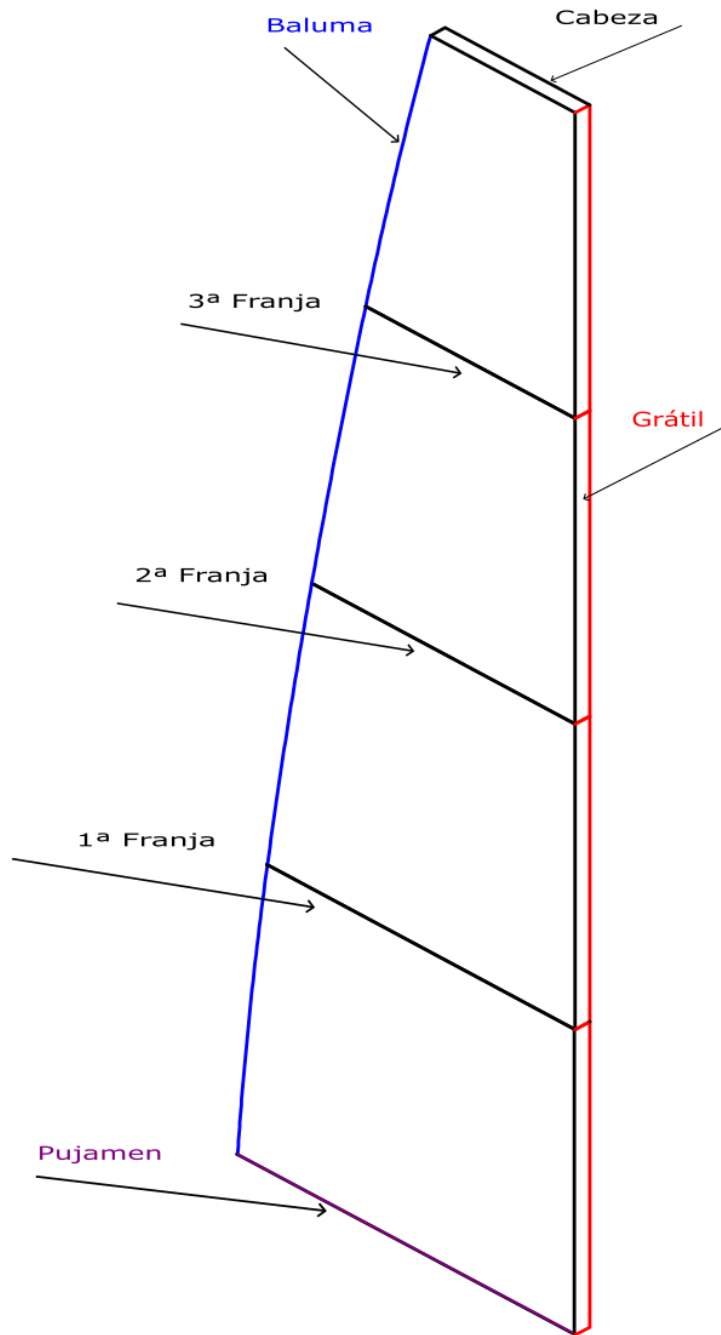


Figura 2-18. Partes relevantes de la vela mayor

Las partes mostradas anteriormente son principalmente las partes las cuales tienen un margen de dimensiones impuestos por la regla de la clase AC75. Estas dimensiones pueden variar en función de cada barco y la estrategia de cada equipo. A continuación, en la Tabla 2-2 se muestra las dimensiones de dichas partes.

PARTES	MÍNIMO (m)	MÁXIMO (m)
Pujamen	7.0	7.4
1ª Franja	6.0	6.6
2ª Franja	5.0	5.8
3ª Franja	3.6	4.7
Cabeza	2.0	3.4

Tabla 2-2. Rango de dimensiones de dimensiones de la vela mayor [18]

Esta vela debe permanecer a 1,5 metros de la superficie del casco y a 0,5 metros por debajo de la parte más alta del mástil.

La mayor novedad que se debe destacar sobre la vela mayor es que es de doble capa, es decir es una superficie con volumen semirrígida. Esta vela tiene forma de ala y es capaz de generar la suficiente potencia para que estos barcos puedan elevarse.

Se debe destacar dos conceptos relacionados con la vela mayor usados en regatas. Estos son *tomar rizados* y *embolsar la vela*. El primero de ellos consiste en reducir la superficie vélica arriando y enrollando la vela. En el caso del género, es más común cambiar la vela completa por otra de un tamaño diferente. Esto se lleva a cabo en condiciones de vientos fuertes. El segundo concepto hace referencia a cambiar la forma de la vela variando la tensión en sus diferentes partes, reduciendo así el *lift* y *drag* generado por la vela. Esta tensión se ajusta en función de la fuerza del viento [16].

En la Copa América la toma de rizados no se usa. Sin embargo, todo lo demás anteriormente explicado si se lleva a cabo con el objetivo de sacarle el mayor potencial al barco y ajustar el aparejo a las condiciones de viento.

2.8.2 Génova

Es la vela más pequeña. Se encuentra a proa de la embarcación. Normalmente, el tamaño de esta vela es variable en relación con las condiciones meteorológicas. Se suele utilizar un género de menor tamaño y más pesado para vientos fuertes. Por el contrario, se utiliza un género de mayor superficie vélica y más ligero para vientos flojos. Sin embargo, el reglamento de la Copa América [18] limita las dimensiones de esta vela. A continuación, en la Figura 2-19 se puede observar las partes a destacar de dicha vela.

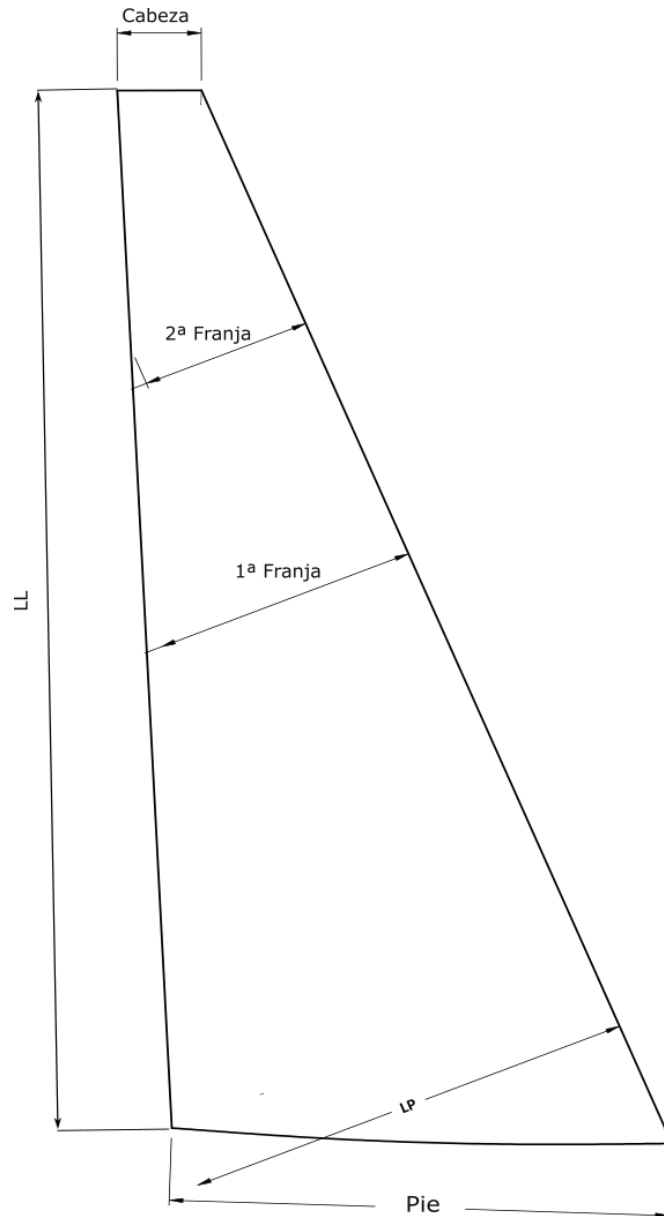


Figura 2-19. Partes relevantes del génova (fuente: propia basada en [18])

Como se ha mencionado anteriormente, el reglamento de la competición restringe las medidas de cada una de estas partes. Estas medidas se pueden visualizar en la Tabla 2-3.

	LL<18 m	LL>18 m
LP	7.05 m	7.05 m
1ª Franja	0.59LP	$(0.869-0.0155LL) \cdot LP$
2ª Franja	0.4LP	$(0.859-0.0255LL) \cdot LP$
Cabeza	0.17LP	$(0.699-0.0294LL) \cdot LP$

Tabla 2-3. Dimensiones del génova impuestas por el reglamento de la competición [18]

2.8.3 Casco

Cada tripulación de los veleros de la Copa América puede hacer su propio diseño sobre los cascos. Ocurre de igual manera con el diseño de los foils. El diseño de estos cascos es totalmente distinto entre los diferentes participantes, incluso una misma tripulación prueba distintos diseños para elegir el más adecuado para obtener la victoria. En la Figura 2-20 se puede visualizar 4 diseños de cascos diferentes entre los distintos competidores en el último evento de la copa.

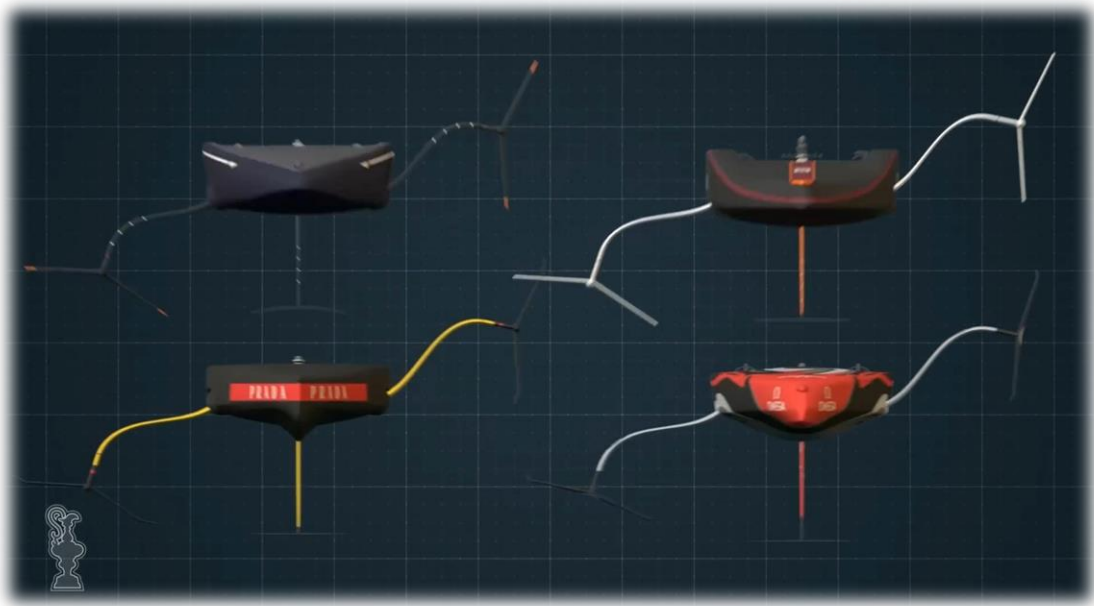


Figura 2-20. Diferentes diseños de cascos entre los barcos participantes [19]

Aunque es un campo de diseño casi totalmente abierto, el reglamento de la clase AC75 [18] obliga a sus participantes a cumplir ciertas características sobre este. Primero de todo, el punto más a proa del casco no debe medir menos de 20,6 ni más de 20,7 metros.

Por otro lado, la superficie total del caso deberá encerrar un volumen de al menos 60 m^3 . Este a su vez deberá incluir un mamparo estanco situado a una distancia de 9 metros desde popa que constituya un extremo de una subdivisión estanca con un volumen de 35 m^3 como mínimo. Esta subdivisión tendrá su otro extremo a una distancia entre 17 y 19 metros desde popa.

A parte de estas restricciones, se definen tres puntos de referencia:

- Uno de ellos en la línea de flotación, a crujía y a 20,7 metros de popa.
- Los otros dos, en la línea de flotación, en popa a 2 metros de crujía hacia cada banda.

Cuando el barco se encuentra con 0° de escora, los puntos de referencia anteriormente nombrados no deben sobrepasar más de 25 mm de distancia sobre la línea de flotación ni por debajo de esta.

A continuación, en la Figura 2-21 se muestra un ejemplo de casco real que participó en la última edición de la Copa. En este caso, pertenece al participante Luna Rossa [20].



Figura 2-21. Casco real del velero participante Luna Rossa [20]

2.8.4 Estructura de los foils

En cuanto al diseño de los foils, el reglamento no es muy restrictivo, ya que deja un amplio margen para que cada barco diseñe esta parte con el objetivo de ganar ventaja sobre la flota. El equipo que mejor sepa cómo deben comportarse los foils estará más cerca de la victoria. Sin embargo, tal y como se puede observar en la Figura 2-22, el brazo de la estructura es fijo para todos.

Dicha estructura debe estar a una distancia desde popa hacia proa entre diez y doce metros. La estructura completa, incluyendo el brazo y el foil pesa alrededor de 1300 kg.

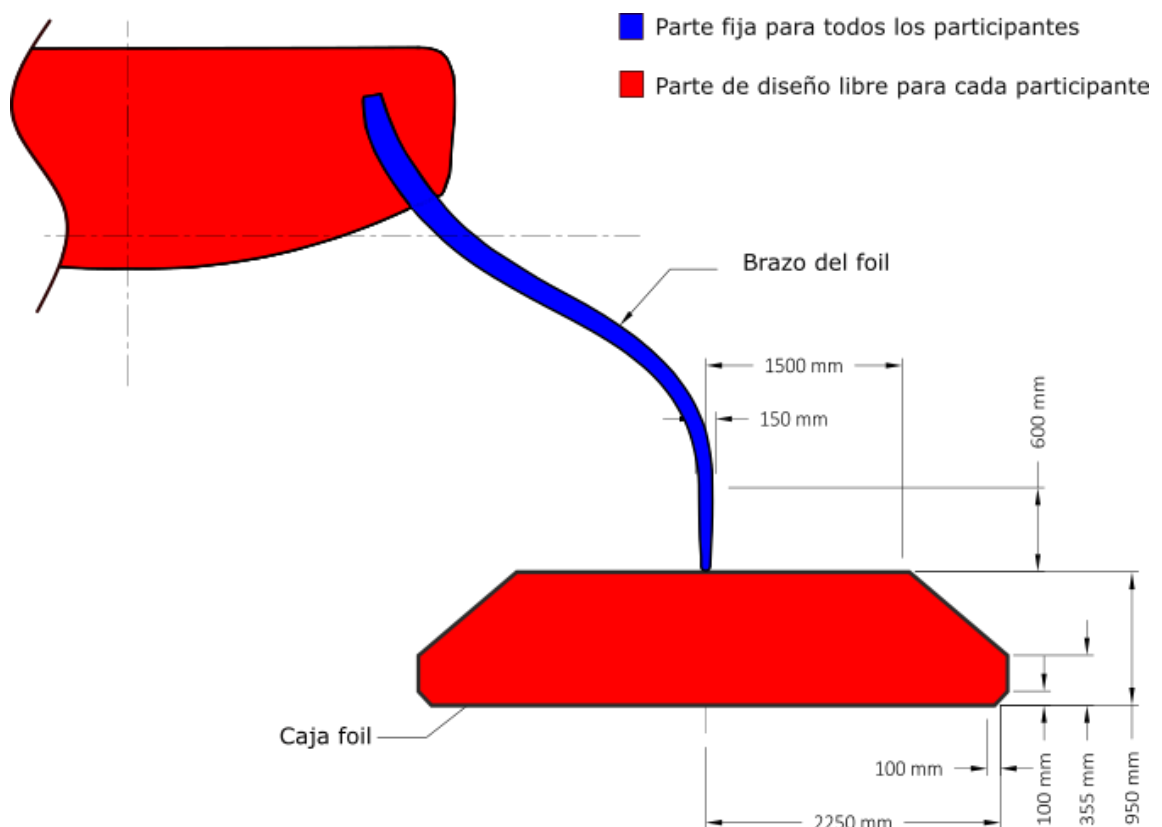


Figura 2-22. Estructuras de los foils (fuente: propia basada en [18])

Las geometrías de las partes rojas de la Figura 2-22 son de libre diseño para cada barco. En las reglas de la clase AC75 [18], se proporciona las dimensiones de la caja del foil. Es decir, el diseño del foil es abierto a cada barco, pero debe entrar en las dimensiones de dicha caja. A continuación, en la Figura 2-23 se muestra una imagen real de la estructura del foil de uno de los participantes.



Figura 2-23. Estructura del foil real [21]

Por otro lado, el brazo del foil es común para todos los participantes, así como su sistema hidráulico. En la Figura 2-24 se pueden observar los brazos hidráulicos del sistema de movimiento de los foils.

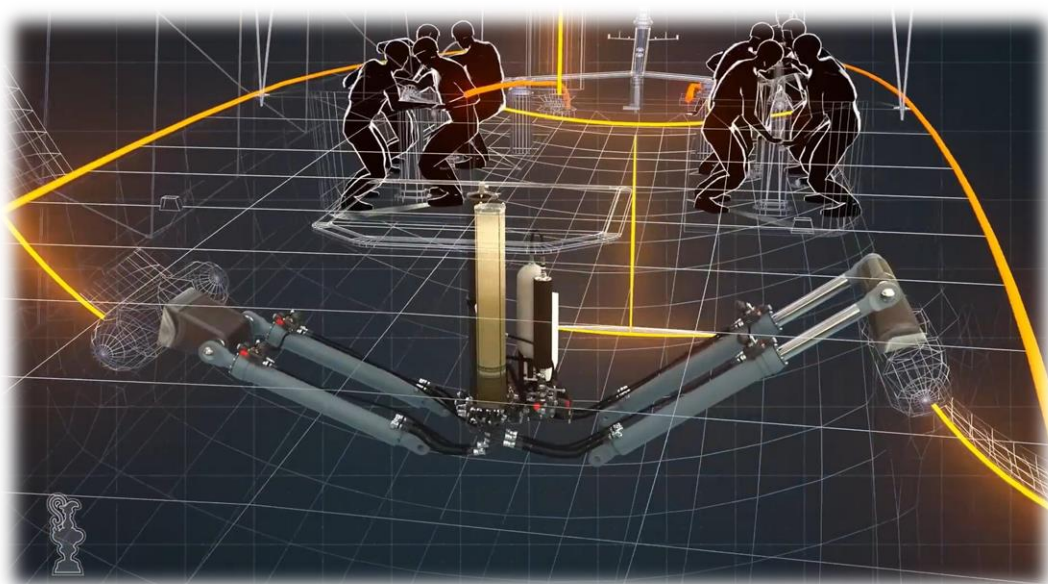


Figura 2-24. Sistema hidráulico de los monocascos [19]

Estos barcos poseen una estructura foil en cada banda. En navegación, solo uno de ellos, el de sotavento va sumergido en el agua. El otro, el de barlovento se encuentra fuera del agua contrarrestando la escora y aumentando el par de adrizamiento.

2.8.5 Tripulación

Hasta 2024, la tripulación constaba de 11 personas. Sin embargo, para la Copa que se celebrará en Barcelona en 2024, serán 8 personas. El peso total de estas 8 personas no debe superar los 700 kg.

Los miembros de la tripulación son pesados dos días antes del comienzo de la regata y son pesados solamente con la ropa interior ligera puesta.

Cada miembro de la tripulación deberá llevar lo siguiente:

- Un chaleco salvavidas que cumpla la norma de flotación ISO 12402-5 y que pueda retirarse o desinflarse en el agua en 5 segundos.
- Un casco de cabeza con al menos 300 cm² de la superficie exterior de color brillante.
- Al menos un suministro de aire comprimido personal equivalente a un volumen de 40 litros y que no requiera el uso de las manos cuando esté en uso.
- Un bolsillo con unas dimensiones determinadas para llevar un equipo multimedia.
- Un equipo multimedia que deberá llevarse de la forma adecuada según el comité de regatas.

Cada miembro de la tripulación podrá llevar un bulto consigo que debe pesar un mínimo de 2,5 kg y un máximo de 6 kg. Los equipos multimedia mencionados anteriormente deberán ser transportado por cada miembro de la tripulación en todo momento.

Por otro lado, todo miembro de la tripulación debe estar entre popa y 9 metros hacia proa. Cualquier miembro de la tripulación podría adelantarse más de 9 metros en caso de un accidente o para arreglar un imprevisto. Ahora bien, si se tiene que adelantar más allá de 11 metros, es obligatorio el uso de un arnés fijado al casco que no supere los dos metros de longitud.

La disposición de los miembros de la tripulación es un estudio continuo en todos los participantes, ya que el flujo de aire se ve muy afectado por dichas personas.

En la Figura 2-25, se puede observar la zona de trabajo de la tripulación en situación normal de uno de los participantes de la edición, el Luna Rossa.

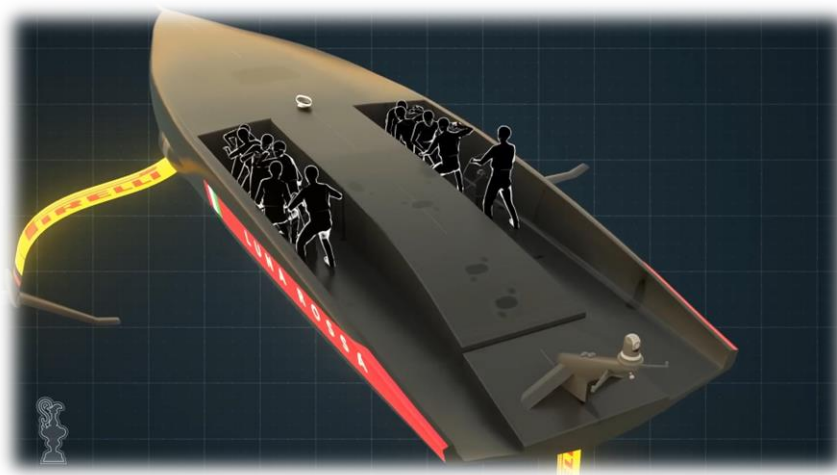


Figura 2-25. Zona de trabajo de la tripulación en el Luna Rossa [19]

3 DESARROLLO DEL TFG

Este apartado engloba el modelado CAD del velero, el cálculo de las fuerzas generadas por el foil y las generadas por las velas, una breve explicación de la maniobra de despegue y una explicación de la maniobra de virada. La información necesaria para la realización de los cálculos de las fuerzas se ha obtenido de la última edición de la Copa. Este punto de estudio elegido tiene las siguientes características:

- TWS: la velocidad del viento real tiene un valor de 14 nudos.
- TWA: el ángulo de ataque del viento real ronda los 45 grados.
- La velocidad del monocasco recogida es de 35 nudos.

3.1 Modelado CAD

3.1.1 Introducción

El primer paso en la realización de este trabajo fin de grado fue modelar en CAD (Computer-Aided Design) el monocasco AC75. Dicho modelo se realizó con Autodesk Inventor. Este es un paquete de modelado paramétrico de sólidos en tres dimensiones producido por la empresa de software Autodesk.

De todos los componentes del modelado, solo uno es descargado de internet. Este es el caso del casco del velero. Todos los componentes restantes son de autoría propia, aunque todos ellos siguiendo el reglamento de la clase AC75. Los componentes modelados son los brazos de los foils, el mástil, la vela mayor, el génova y los foils. Posteriormente, se procedió a ensamblar dichos componentes con el objetivo de obtener un modelado CAD lo más similar posible a un monocasco real, como se puede observar en la Figura 3-1.

A continuación, en la Figura 3-1 se puede visualizar el modelado del velero completo desde la amura de estribor. En esta situación el barco se encontraría amurado a babor. En esta misma figura también se puede ver una imagen real de uno de los participantes en la misma configuración que el modelado realizado.



Figura 3-1. Modelado completo vs imagen real del monocasco amurado a babor

La Figura 3-1 es la idónea para visualizar el modelado completo del velero. Sin embargo, es de gran interés visualizarlo desde distintas perspectivas para entender la geometría total, como se mostrarán en las siguientes figuras. Estas serán figuras vistas desde el través, proa y desde la parte superior.



Figura 3-2. Vista del modelo de través



Figura 3-3. Vista del modelo desde proa

En la Figura 3-2 se puede observar la eslora total del monocasco y altura del mástil. También se puede apreciar las formas de ambas velas ya que ambas se encuentran a crujía y su forma no se ve distorsionada. Por otro lado, se puede comprobar a simple vista la restricción descrita en el apartado 2.8.1. Esta explicaba que la vela mayor debe estar a 1,5 metros de la superficie del casco y a 0,5 metros de la parte más alta del mástil.

Por otro lado, en la Figura 3-3 y la Figura 3-4 se puede observar la manga del velero, así como la manga total teniendo en cuenta los brazos de los foils. Esto es de gran interés ya que su manga aumenta de 5 metros sin foils hasta 13 metros con los dos foils en el agua ya que cada uno de ellos aumenta 4 metros su manga.

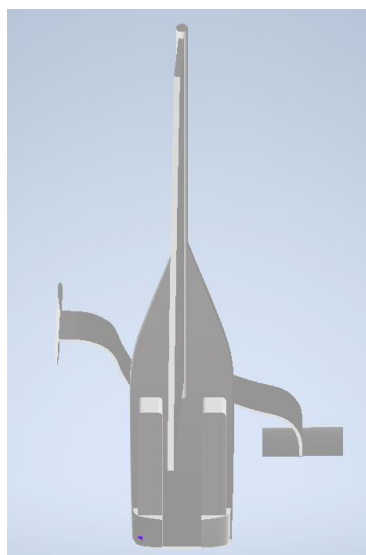


Figura 3-4. Vista del modelo desde popa

3.1.2 Modelado del casco y el mástil

El casco del modelo se consiguió descargar de internet de la página web Ultimaker Thingiverse [20]. Esta página web es accesible por cualquier usuario y puede realizar la descarga de forma gratuita. Pertenece al casco de unos de los participantes de la última edición de la Copa América, este es el participante Luna Rossa.

Este archivo no se encontraba en el formato adecuado para trabajar en inventor. Por ello, el primer paso fue descargarlo y convertirlo a un formato con la extensión .ipt para poder tener el control sobre él en Inventor. Fue necesario retocar varios aspectos de la pieza, sobre todo para tener una imagen visual más limpia. A partir de aquí, se calculó el factor de escala correspondiente para redimensionarlo a unas dimensiones reales. Es decir, tal y como se explica en el reglamento, el casco debe tener una eslora de 21 metros y una manga de 5 metros.

A continuación, se adjunta la Figura 3-5 para visualizar el modelado del casco en Inventor.

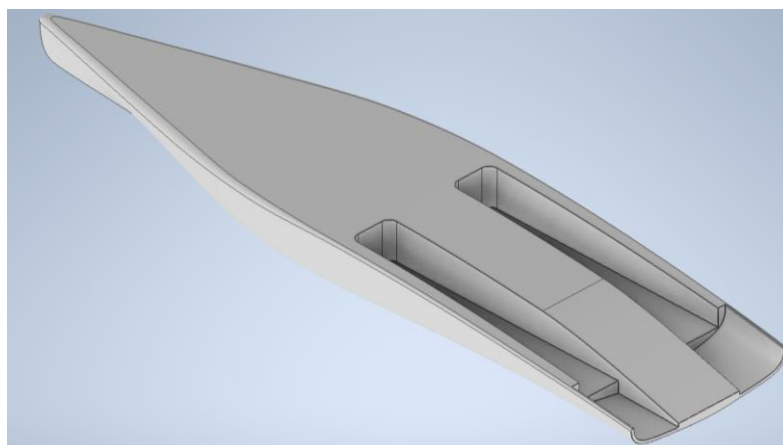


Figura 3-5. Modelado del casco en CAD [20]

Por otro lado, el mástil se hizo mediante una extrusión en dicho programa (ver Figura 3-6) sobre la base del casco. Este se encuentra en el lugar indicado según la normativa y con su correspondiente longitud. El centro del mástil se encuentra a 9,5 metros de popa y una longitud de 26,5 metros, tal y como indica el reglamento [18].

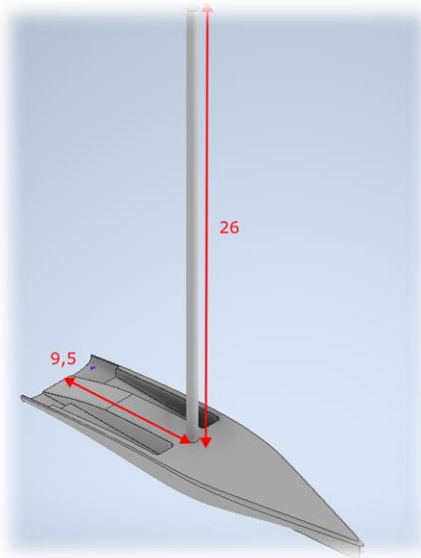


Figura 3-6. Modelo CAD del casco y el mástil

3.1.3 Modelado de los foils

En cuanto a lo que este apartado respecta, se mostrará tanto la estructura del brazo del foil como el mismo foil. Se ha de destacar que la simulación del sistema hidráulico que proporciona el movimiento de estos brazos no se ha materializado, ya que no es necesario para el estudio fluidodinámico del velero. Sin embargo, sí se ha tenido en cuenta en el peso total del velero para realizar los cálculos. Excepto el sistema hidráulico, estas estructuras cumplen totalmente el reglamento de la Copa.

Por un lado, en cuanto a las dimensiones y geometría de los foils, el reglamento deja a los competidores un diseño libre sin apenas restricciones con el objetivo de ganar ventaja sobre el resto. De hecho, este diseño es uno de los factores de estudio entre los competidores para obtener el máximo rendimiento posible de ellos. Por ello, se realizó el foil con unas dimensiones de 4 metros de envergadura y 2 metros de longitud de cuerda. Este objeto se basa en un perfil NACA 0012. Para ello, se realizó un boceto con los puntos de este perfil proporcionados por la página web denominada *Airfoil Tools* [22]. Una vez conseguido el boceto en dos dimensiones, se realizó una extrusión para obtener el modelo real en tres dimensiones como se puede observar en la Figura 3-7.

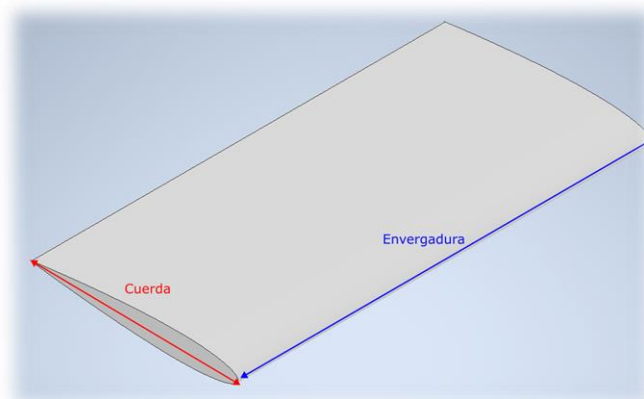


Figura 3-7. Modelado del perfil foil

En segundo lugar, se realizó la estructura que permite la unión entre el foil mostrado anteriormente y el casco del velero, tal y como se puede ver en la Figura 3-8. Las dimensiones de esta estructura vienen restringidas por el reglamento de la copa. La manga del velero se ampliaría a 13 metros con los dos foils sumergidos ya que cada uno de ellos se extiende 4 metros desde el barco.

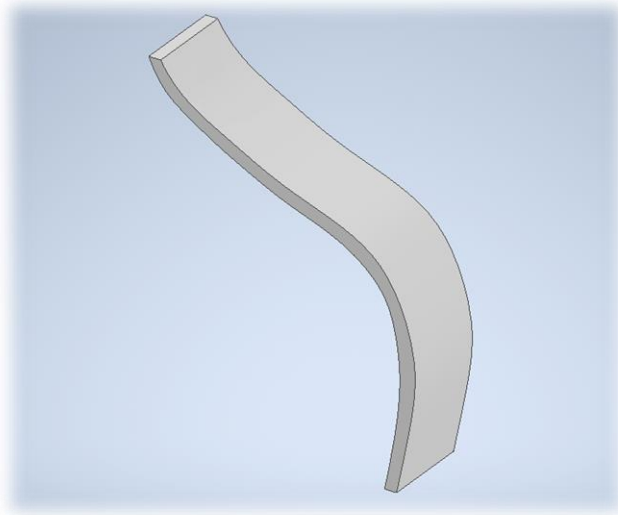


Figura 3-8. Modelado del brazo del foil

El conjunto de estas dos piezas compone el mecanismo que proporciona a estos barcos su característica más relevante, la capacidad de alcanzar velocidades muy altas ya que hacen desaparecer todo el rozamiento del casco con el agua. La parte vertical de este brazo ejerce también la función de la quilla de un velero convencional ya que estos veleros no poseen quilla. A continuación, en la Figura 3-9 se puede observar la estructura formada por el foil y su brazo.

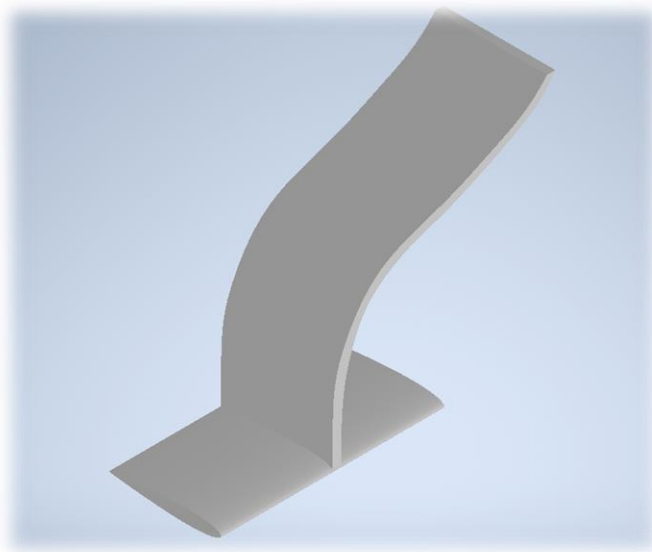


Figura 3-9. Modelado de la estructura completa de los foils

3.1.4 Modelado de las velas

Como ya se ha explicado, las velas son el motor de un velero. Por ello, son de las partes más importantes ya que es lo que le hace a un velero crear su movimiento. Es decir, es la propulsión de un barco de vela.

En el modelado de las velas de este trabajo fin de grado se ha simplificado su forma ya que no es significativo en Autodesk Inventor. Sin embargo, posteriormente en el programa en el cual se analizan las fuerzas generadas por las velas, se ha tenido en cuenta su geometría real. A pesar de esto, el modelado es muy similar al real. A continuación, en la Figura 3-10 se puede observar el modelo en tres dimensiones de ambas velas. La vela de color amarillo es la vela mayor y la de color verde es el génova.

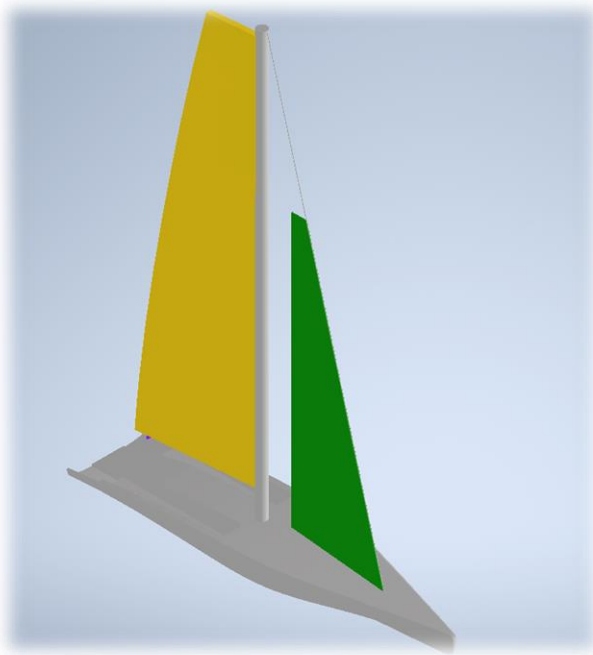


Figura 3-10. Vela mayor y génova del modelado

3.2 Sistema de referencia

Se posiciona el centro de masas del casco del velero mediante los datos proporcionados por el reglamento de la Copa [18]. Posteriormente se posiciona el sistema de referencia en ese punto para todos los cálculos siguientes. El centro de masas (X_{masa} , Y_{masa} , Z_{masa}) según el reglamento es igual a (9.350, 0.000, 0.750) desde la línea de flotación. Este punto se puede visualizar en la Figura 3-11.

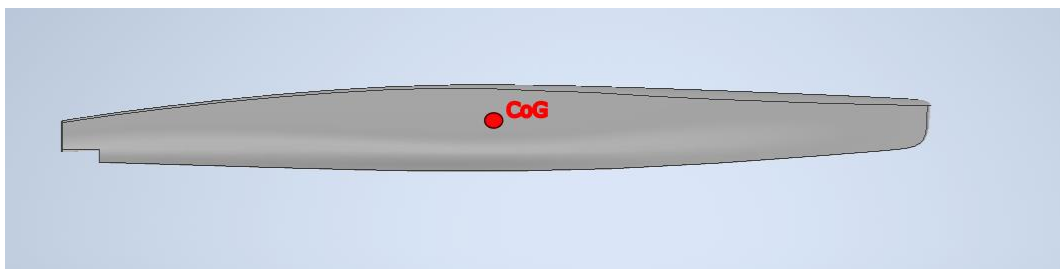


Figura 3-11. Cálculo del centro de gravedad del casco

Una vez calculado el centro de gravedad, se decide situar en este punto los ejes del sistema de referencia que será utilizado posteriormente. Principalmente, este sistema de referencia se usará para realizar el cálculo de sumatorios de momentos y fuerzas sobre el velero. En estos sumatorios se tendrán en cuenta las fuerzas generadas por las velas, el peso de los foils, las fuerzas generadas por los foils y el peso del casco. A continuación, la Figura 3-12 muestra el sistema de referencia comentado anteriormente.

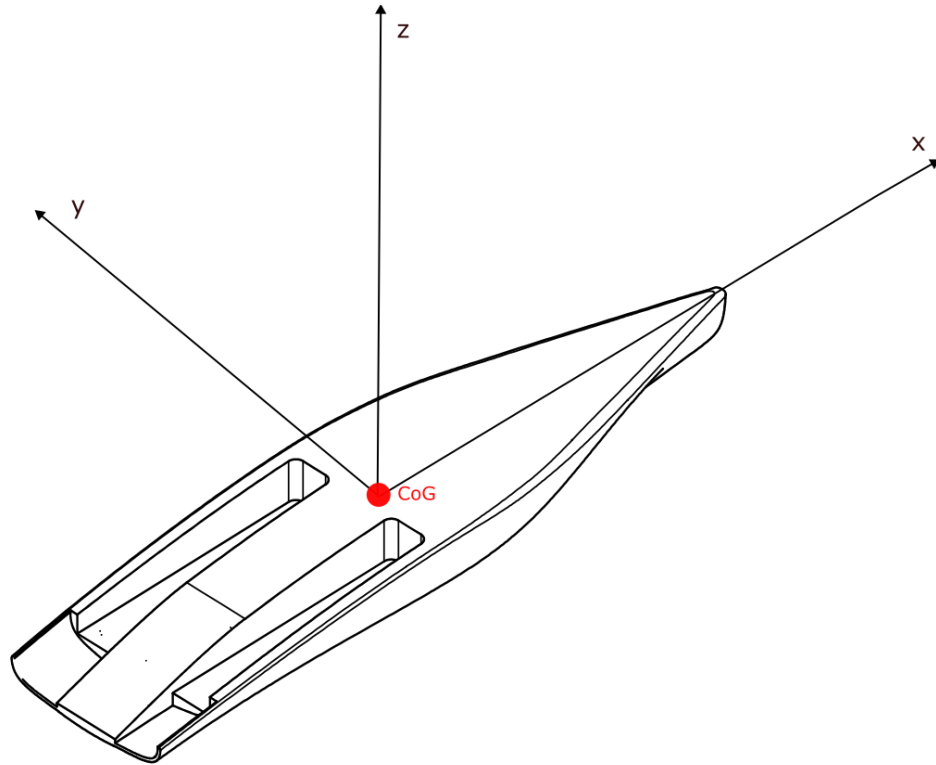


Figura 3-12. Posicionamiento del sistema de referencia usado

3.3 Cálculo de fuerzas de un sólido

En este apartado se muestra las ecuaciones usadas posteriormente para realizar el cálculo de las fuerzas de *lift* y *drag*. Estas fuerzas aparecen tanto en las velas como en los foils. Las ecuaciones (3-1) y (3-2) son necesarias ya que el programa de estudio de fluidodinámico usado proporciona los coeficientes de *lift* y *drag*, pero no las fuerzas directamente.

$$F_L = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2 \cdot A; \quad (3-1)$$

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2 \cdot A; \quad (3-2)$$

C_L = coeficiente de lift

C_D = coeficiente de drag

ρ = densidad del fluido [kg/m^3]

$v = \text{velocidad relativa [m/s]}$

$A = \text{superficie alar [m}^2\text{]}$

$F_L = \text{fuerza de lift [N]}$

$F_D = \text{fuerza de drag [N]}$

Cabe resaltar que la ecuación mostrada anteriormente será usada tanto para las fuerzas generadas por las velas como para la fuerza del foil. Sin embargo, se usará la densidad del agua y la velocidad del velero cuando se trabaje con el foil y, por otro lado, la densidad del aire y la velocidad del viento aparente cuando se trabaje con las velas. Otra diferencia es el área utilizada. En el caso del foil se usará el área formada por la cuerda y por la envergadura del foil. En el caso de las velas se usarán las superficies de las respectivas velas.

3.3.1 Cálculo de las fuerzas de los foils

Primero de todo, hay que tener en cuenta que el programa usado para este apartado no proporciona directamente las fuerzas generadas por los foils. Este programa proporciona el coeficiente de *lift* y de *drag*.

El programa usado para calcular el coeficiente de *lift* y *drag* se denomina XFLR5. Este programa posee un software profesional y avanzado para el diseño de fuselajes de avión, alas y superficies de sustentación. Se basa en XFOIL y el número de Reynolds correspondiente con la simulación.

XFOIL es un programa de diseño y análisis de perfiles alares. Es capaz de proporcionar los coeficientes de *lift* y *drag*, y la distribución de presiones de un perfil dado en dos dimensiones, su número de Reynolds y su número de Mach.

La principal diferencia entre ambos programas es la capacidad de XFLR5 de trabajar en tres dimensiones, mientras XFOIL solo es capaz de trabajar en dos dimensiones y con una interfaz mucho menos desarrollada. A continuación, se puede observar la diferencia entre ambos programas.

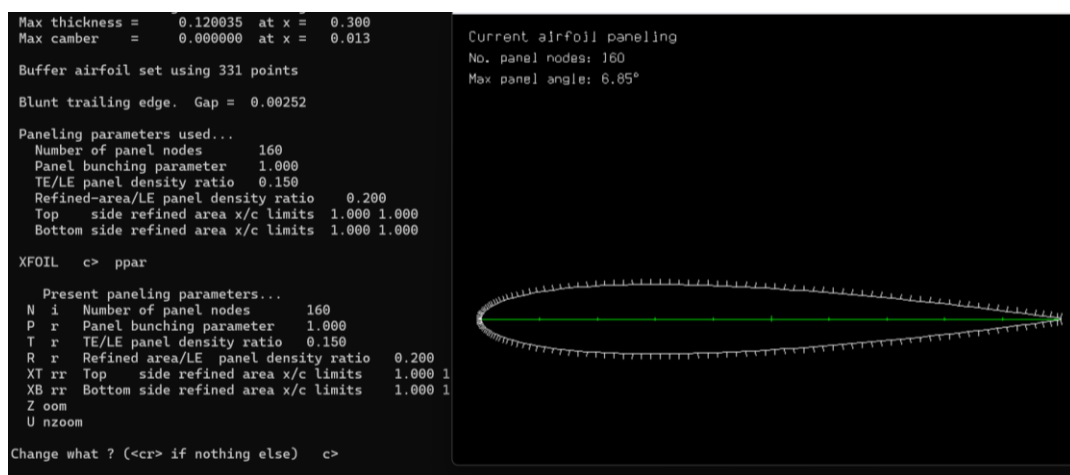


Figura 3-13. Interfaz del programa XFOIL

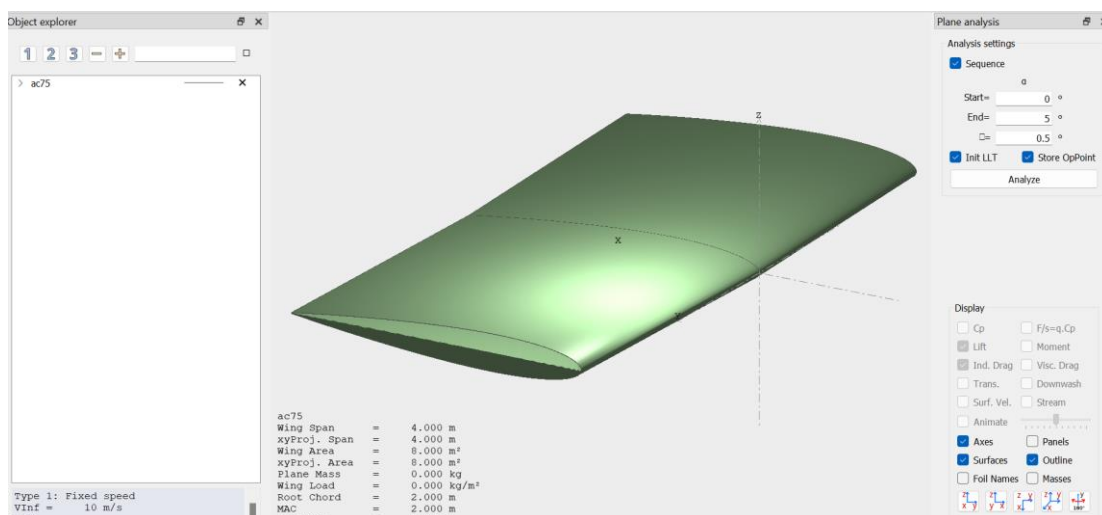


Figura 3-14. Interfaz del programa XFLR5

En ambos programas se introducen una serie de datos para que se pueda llevar a cabo los cálculos: número de Reynolds, valor de Mach, densidad del fluido de trabajo, envergadura del perfil, geometría del perfil a evaluar, velocidad del fluido, viscosidad cinemática del fluido y ángulo de ataque. Con estos datos de entrada el programa proporciona un coeficiente de *lift* y *drag*.

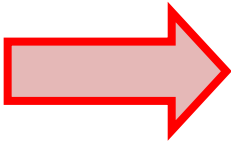
INPUTS		OUTPUTS
$Re = 30 \cdot 10^6$		$C_L = 0.05806$
$Mach = 0.1$		$C_D = 0.00352$
$L = 4 \text{ m}$		
Geometría: NACA 0012		
$\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$		
$v = 18 \text{ m/s}$		
$\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$		
$\alpha = 1,5^\circ$		

Tabla 3-1. Datos de entrada y resultados para el cálculo de los coeficientes del foil en el programa XFLR5

Una vez obtenidos los coeficientes de *lift* y *drag* de los foils, se procede a calcular las fuerzas correspondientes a estos coeficientes con las ecuaciones (3-1) y (3-2). Este coeficiente de *lift* produce una fuerza de *lift* con un valor de 68,55 kN que eleva el monocasco y aguanta todo el peso de él. Por otro lado, el coeficiente de *drag* del foil produce una fuerza de arrastre de 4,156 kN.

3.3.2 Cálculo del centro de presiones de ambas velas

El cálculo del centro de presiones de ambas velas se lleva a cabo en base a teoría aerodinámica [24]. Se basa en obtener la cuerda media aerodinámica y una vez en ella, situar el centro de presiones a una distancia de un cuarto de cuerda desde el borde de ataque.

Para entender el principio de teoría aerodinámica se va a definir los siguientes conceptos:

- Centro de presiones: se considera centro de presiones al punto sobre el cual se aplican las fuerzas generadas por el perfil aerodinámico. Esto es debido a que el momento aerodinámico generado alrededor de este punto es nulo. Es cierto que el centro de presiones varía con el ángulo de ataque del fluido sobre el perfil. Sin embargo, cuando se trabaja con perfiles simétricos, como es el caso de estas velas, y con ángulos de ataques pequeños, la posición del centro de presiones es independiente al ángulo de ataque. Es decir, esta posición se mantiene constante. El centro de presiones es necesario calcularlo ya que es muy útil para calcular momentos.
- Centro aerodinámico: se considera centro aerodinámico al punto donde el valor del momento resultante en ese punto con diferentes ángulos de ataques no se ve modificado. Se puede comprobar experimental y analíticamente que el centro aerodinámico se encuentra a un cuarto de cuerda para ángulos de ataques pequeños. Además, para perfiles simétricos, está comprobado que el punto a un cuarto de cuerda tiene un sumatorio de momentos nulo, por lo que sería también el centro de presiones.
- Cuerda media: tal y como su nombre indica, es la media de las cuerdas. Es decir, su valor es la semisuma de las cuerdas y debe estar en la mitad de la longitud del perfil, dividiendo este en dos mitades.
- Cuerda media aerodinámica: es la que nos sirve para el cálculo del centro de presiones y se encuentra en el punto que divide la superficie del perfil en dos mitades. Por ello, cuanto mayor sea la diferencia entre la cuerda mayor y la menor, más lejos estarán la cuerda media de la cuerda media aerodinámica. Cuando el perfil es un solo trapecio, el cálculo de la cuerda media aerodinámica se puede realizar de manera sencilla. Esto se basa en prolongar en cada extremo de la cuerda mayor la longitud de la cuerda menor y viceversa. Una vez obtenidos dichos segmentos se unen de forma diagonal y en el punto en el que se cortan se encuentra la cuerda media aerodinámica [25], tal y como se puede observar en la Figura 3-15.

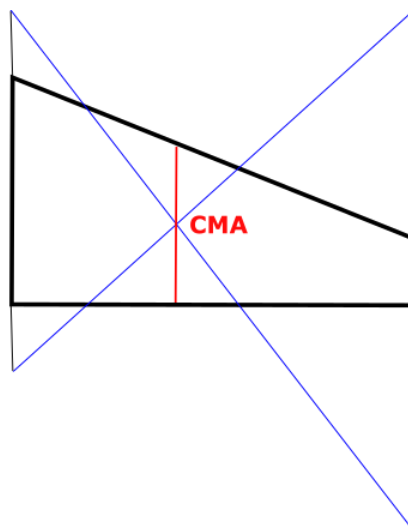


Figura 3-15. Cálculo de la cuerda media aerodinámica

Mediante la teoría explicada anteriormente se calcula la cuerda media aerodinámica de ambas velas y a un cuarto de esta se define el centro de presiones.

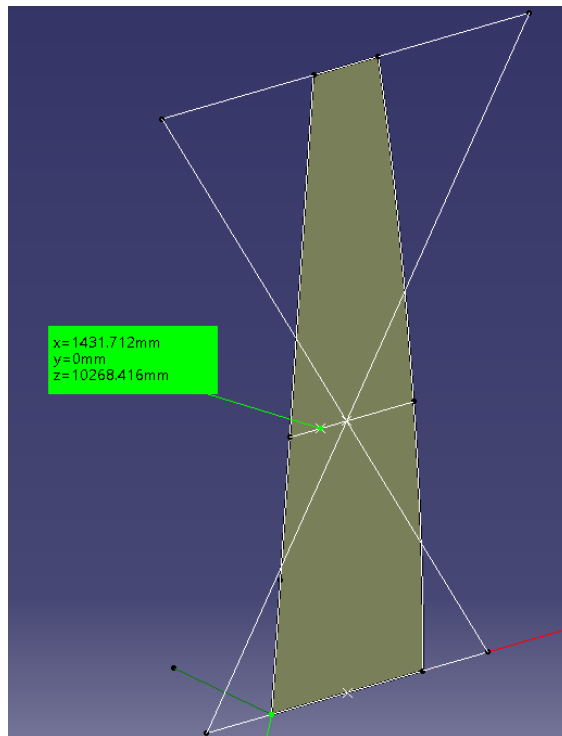


Figura 3-16. Cálculo del centro de presiones de la vela mayor

En la Figura 3-16 se puede visualizar el centro de presiones de la vela mayor. Estas coordenadas están indicadas respecto a un sistema de referencia situado en la esquina inferior izquierda de la vela. Del mismo modo se realiza el cálculo del centro de presiones del génova tal y como se visualiza en la Figura 3-17.

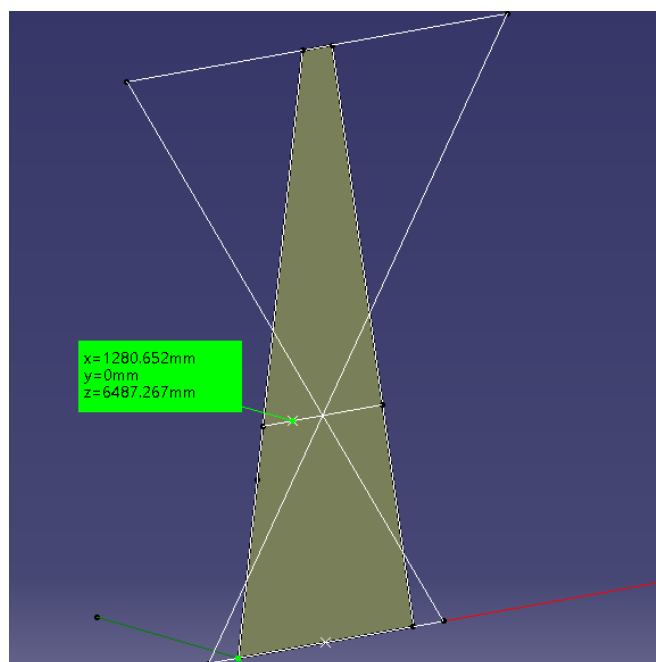


Figura 3-17. Cálculo del centro de presiones del génova

3.3.3 Cálculo de las fuerzas generadas por la vela mayor

Tal y como se menciona al principio del apartado 3, partimos de una velocidad del barco de 35 nudos y un viento de real de 14 nudos con una dirección de 40 grados. A raíz de esta información, el primer paso llevado a cabo relacionado con el cálculo de las fuerzas de las velas es el cálculo del viento aparente que afectarán a las mismas. Este viento, se usará tanto para la vela mayor como para el génova en los siguientes cálculos.

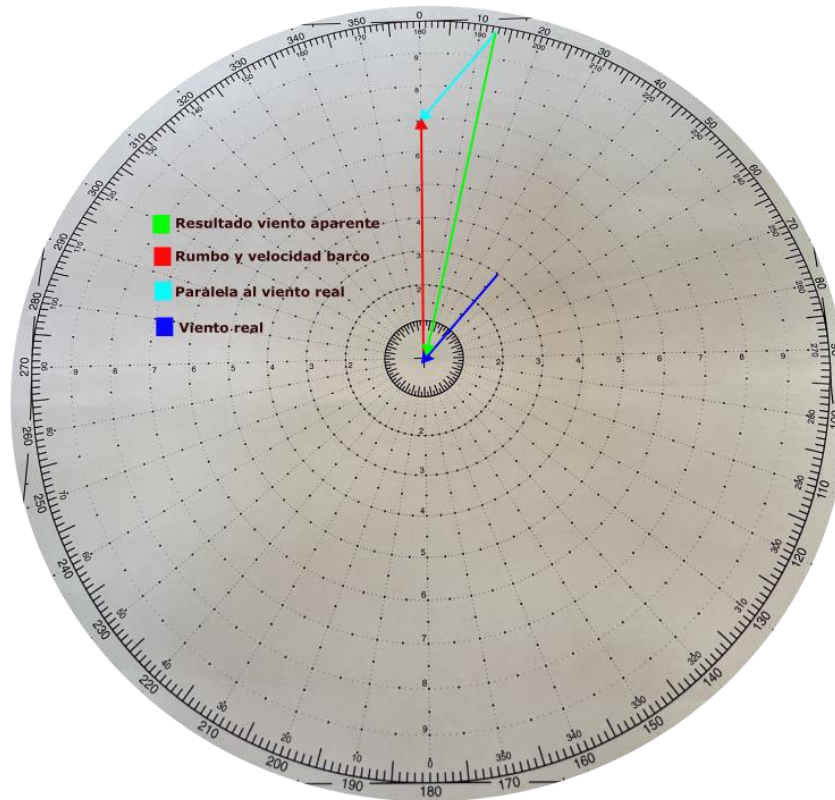


Figura 3-18. Cálculo del viento aparente

Como se puede observar en la Figura 3-18, el viento relativo o aparente calculado tiene una dirección del 012 y una intensidad de 45 nudos. Se ha de destacar que para el cálculo anterior se ha usado una escala 1:5.

Para realizar el cálculo de las fuerzas generadas por la vela mayor, se ha usado el programa XFLR5, el cual nos proporciona los coeficientes de *lift* y *drag*. Sin embargo, no se ha simulado la vela completa. Se ha dividido la vela en cuatro secciones y se ha calculado las fuerzas resultantes en cada sección. Posteriormente a ello, se ha hecho superposición de estas fuerzas sobre el centro de presiones de la vela calculado en el apartado 3.3.2. Por ello, se procede a calcular los coeficientes de *lift* y *drag* de las distintas áreas de la vela mayor mediante el programa XFLR5.

INPUTS		OUTPUTS
	$Re = 3 \cdot 10^6$	
	$Mach = 0.1$	
	Geometría: NACA 0012	
	$\rho = 1,23 \text{ kg/m}^3$	$C_L = 0.667$
	$v = 23.15 \text{ m/s}$	
	$v = 1,48 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	$C_D = 0.00853$
	$\alpha = 12^\circ$	

Tabla 3-2. Datos de entrada y resultados para el cálculo de los coeficientes de la vela mayor en el programa XFLR5

Posteriormente, se calcula las fuerzas de cada sección mediante una hoja de cálculo Excel, introduciendo los datos de los coeficientes calculados anteriormente tal y como muestra la Tabla 3-3. Para ello, se usa las ecuaciones (3-1) y (3-2).

MAYOR	$A(\text{m}^2)$	C_L	$F_{Li}(N)$	C_D	$F_{Di}(N)$
A1	40.8	0.667	8932.93	0.00853	228.48
A2	36.3	0.667	7947.68	0.00853	203.28
A3	30	0.667	6568.33	0.00853	168.00
A4	22.5	0.667	4926.25	0.00853	126.00
		$F_L(N)$	28375.20	$F_D(N)$	725.76

Tabla 3-3. Cálculo en Excel de las fuerzas generadas por la vela mayor

Se ha de destacar que la fuerza más interesante es la fuerza de *lift*, perpendicular a la dirección del fluido, que es la que proporciona una fuerza de escora y una fuerza de avance. Sin embargo, también aparece la fuerza de *drag* en la dirección del fluido que se descompone en una fuerza de escora y una fuerza de arrastre, tal y como se puede observar en la Figura 3-19.

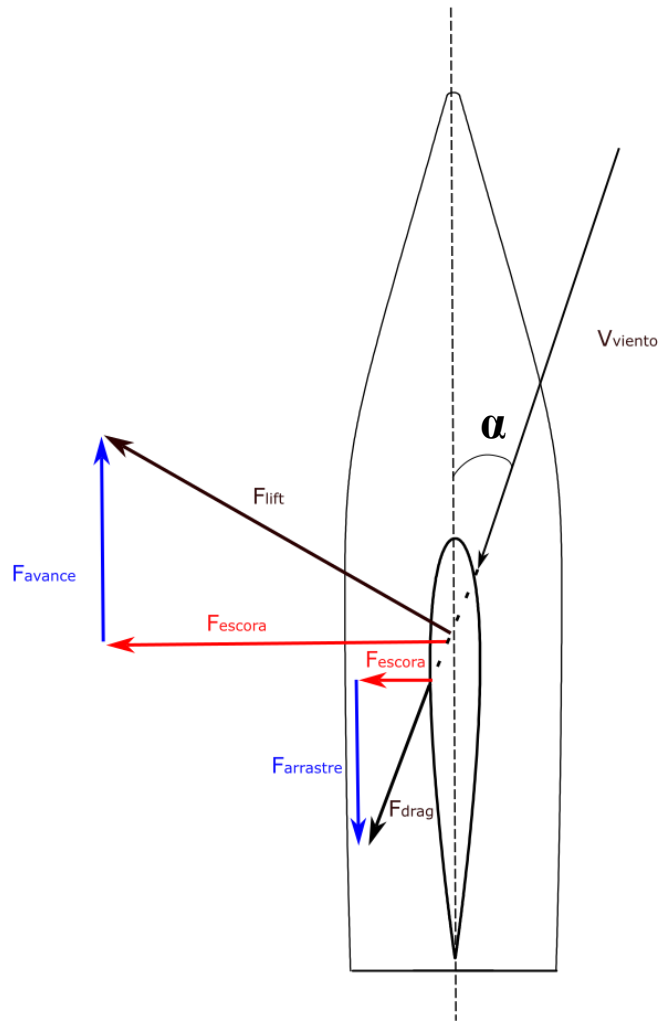


Figura 3-19. Descomposición de las fuerzas de lift y drag

A continuación, en la Tabla 3-4 se calcula la descomposición de las fuerzas de *drag* y *lift* tal y como se observa en la Figura 3-19.

	FUERZA LIFT		FUERZA DRAG
$F_{ESCORA}(N)$	27944.28	$F_{ESCORA}(N)$	126.03
$F_{AVANCE}(N)$	4926.38	$F_{ARRASTRE}(N)$	714.73

$F_{ESCORATOTAL}(N)$	28070.3044
----------------------	-------------------

Tabla 3-4. Descomposición de las fuerzas de lift y de drag generadas por la vela mayor

3.3.4 Cálculo de las fuerzas generadas por el génova

Se ha realizado del mismo modo que la vela mayor, pero con la diferencia que esta se ha dividido en tres secciones en lugar de cuatro.

Una vez obtenido el centro de presiones del génova en el apartado 3.3.2, se procede a calcular los coeficientes de *lift* y *drag* con el mismo programa que el usado para la vela mayor de cada sección, XFLR5.

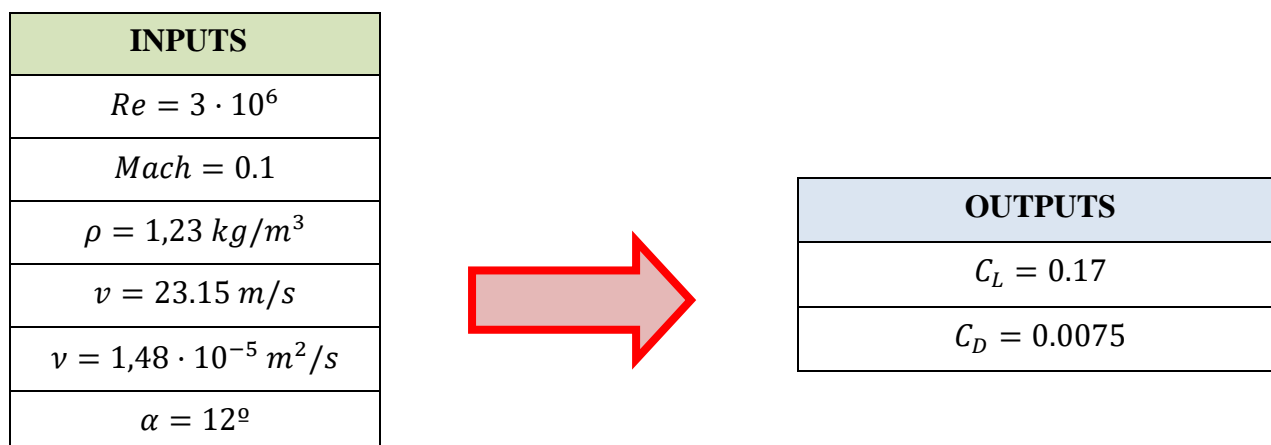


Tabla 3-5. Datos de entrada y resultados para el cálculo de los coeficientes del génova en el programa XFLR5

A partir de este punto, se puede observar en la Tabla 3-6 el uso de una hoja de cálculo Excel para calcular las fuerzas producidas por estos coeficientes mediante las ecuaciones (3-1) y (3-2).

GÉNOVA	$A(\text{m}^2)$	C_L	$F_{Li}(N)$	C_D	$F_{Di}(N)$
A1	50.66	0.17	2811.012	0.0075	201.16
A2	15.77	0.17	874.90	0.0075	178.97
A3	9.074	0.17	503.48	0.0075	147.91
			$F_L(N)$		$F_D(N)$
			4189.40		528.04

Tabla 3-6. Cálculo en Excel de las fuerzas generadas por el génova

Las fuerzas generadas por el génova obtenidas anteriormente se descomponen del mismo modo que ocurre en la vela mayor. Esto se puede observar en la Figura 3-19. Además se puede ver que estas fuerzas son de valores más pequeños que los de la vela mayor debido a la menor superficie vélica.

	FUERZA LIFT		FUERZA DRAG
$F_{ESCORA}(N)$	4125.77	$F_{ESCORA}(N)$	91.69
$F_{AVANCE}(N)$	727.47	$F_{ARRASTRE}(N)$	520.02

$F_{ESCORATOTAL}(N)$	4217.47
----------------------	----------------

Tabla 3-7. Descomposición de las fuerzas de lift y de drag generadas por el génova

3.4 Maniobra de despegue

Estos barcos, como se ha mencionado anteriormente, tienen dos modos de funcionamiento: el modo desplazamiento y el modo foiling. En este apartado se explicará el proceso de transición entre estos dos modos. En primer lugar, antes de que el barco comience a navegar en modo foiling, se comporta como un velero convencional. Es decir, el equilibrio viene dado por la fuerza de elevación de la superficie mojada del casco. Es cierto, que el velero se encuentra con un foil sumergido (el de sotavento) y el otro elevado, como si en modo foiling se encontrase.

La maniobra de despegue consta de tres partes: una fase de aceleración, una fase de elevación y una transición a close-hauled. El objetivo principal de esta maniobra es minimizar el tiempo de transición entre estos dos modos y alcanzar la máxima velocidad según las condiciones del momento. En la fase inicial, la fuerza de sustentación inducida por el agua en el foil no es suficiente para elevar el casco ya que esta fuerza depende de la velocidad del fluido. Por ello, se basa en una navegación con ángulos de ataque de las velas más abiertos para aumentar su velocidad. También se aumenta el ángulo de ataque del foil ya que proporciona un *lift* mayor. Sin embargo, estos ángulos de ataques del foil elevados generan un *drag* elevado conforme la velocidad aumenta. Por ello, cuando comienza a aumentar la velocidad, el ángulo de ataque del foil comienza a disminuir e inicia la fase de elevación. En esta fase, el casco se va elevando hasta salir completamente del agua, punto en el cual finaliza esta fase de elevación. Por último, el velero busca rumbos más cerrados, lo que se denomina transición a “close-hauled” y va aumentando su velocidad [26].

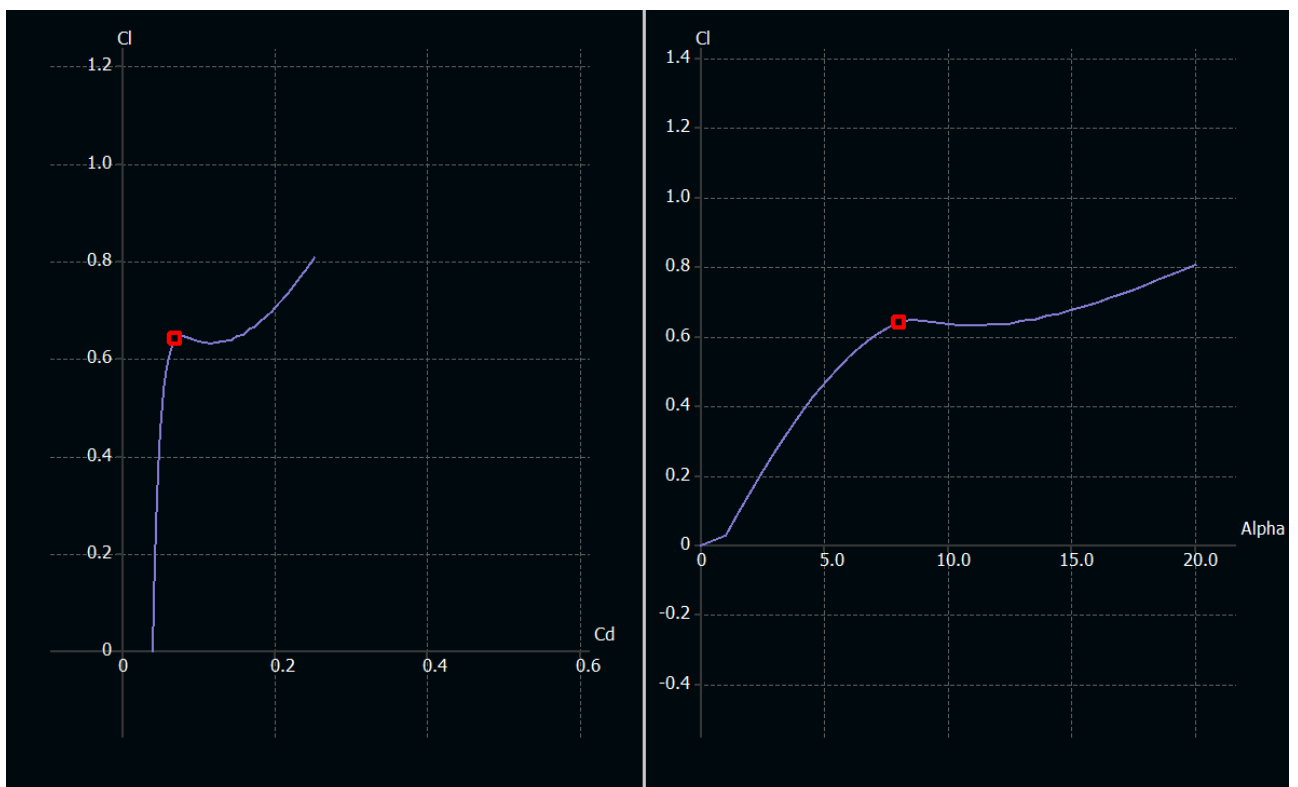


Figura 3-20. Relación entre el coeficiente de lift y drag con el ángulo de ataque

En la Figura 3-20 se observa la relación entre el coeficiente de *drag* y *lift* con diferentes ángulos de ataque. Se puede visualizar el coeficiente de *lift* óptimo, encontrándose en un ángulo de ataque de 7 grados. Hasta ese momento el *lift* aumenta en gran medida a la vez que el *drag* aumenta lentamente. Sin embargo, a raíz de este punto, se observa un aumento mayor del *drag* mientras el *lift* se mantiene prácticamente constante. Por ello, no es eficiente usar ángulos de ataques mayores a este punto en la

fase inicial de la maniobra de despegue ya que se obtendría un aumento del valor de *lift* muy pequeño pero unos valores de *drag* muy elevados, lo que dificultaría el aumento de velocidad.

3.5 Maniobra de virada

La virada es una maniobra fundamental en barcos de vela utilizada en cualquier momento cuando el velero se encuentra navegando de ceñida. Esta maniobra se basa en cambiar la banda de ataque del viento haciendo pasar el viento por la proa. Normalmente, comprende un cambio de rumbo de 90 grados. Para entender la explicación de una forma más sencilla, se va a suponer que el barco se encuentra navegando amurado a estribor. En el momento que se decide hacer una virada, la tripulación comienza a cambiar el rumbo acercándose a la dirección del viento y ajustando las velas para ello. En este momento, con un margen de tiempo antes de que el viento se encuentre justamente por la proa, se baja al agua el foil que se encuentra fuera del agua. Es decir, en este caso, se sumerge el foil de estribor también, encontrándose en este punto los dos foils sumergidos. Esto es necesario ya que en caso de no realizarse el barco perdería toda su estabilidad en el momento que el viento comienza a atacar las velas por la proa.

Una vez el viento haya sobrepasado la proa y el barco se encuentra amurado a la otra banda, en este caso amurado a babor, se eleva el foil de barlovento y se ajustan las velas al nuevo rumbo. Por ello, en este momento el velero se encuentra de igual modo que en la situación inicial antes de comenzar la virada, con la diferencia de que el viento está incidiendo por la banda opuesta a la inicial y por ende la configuración de los foils están invertidas [26].

Para entender mejor esta maniobra, se puede observar el proceso de virada de forma gráfica en la Figura 3-21.

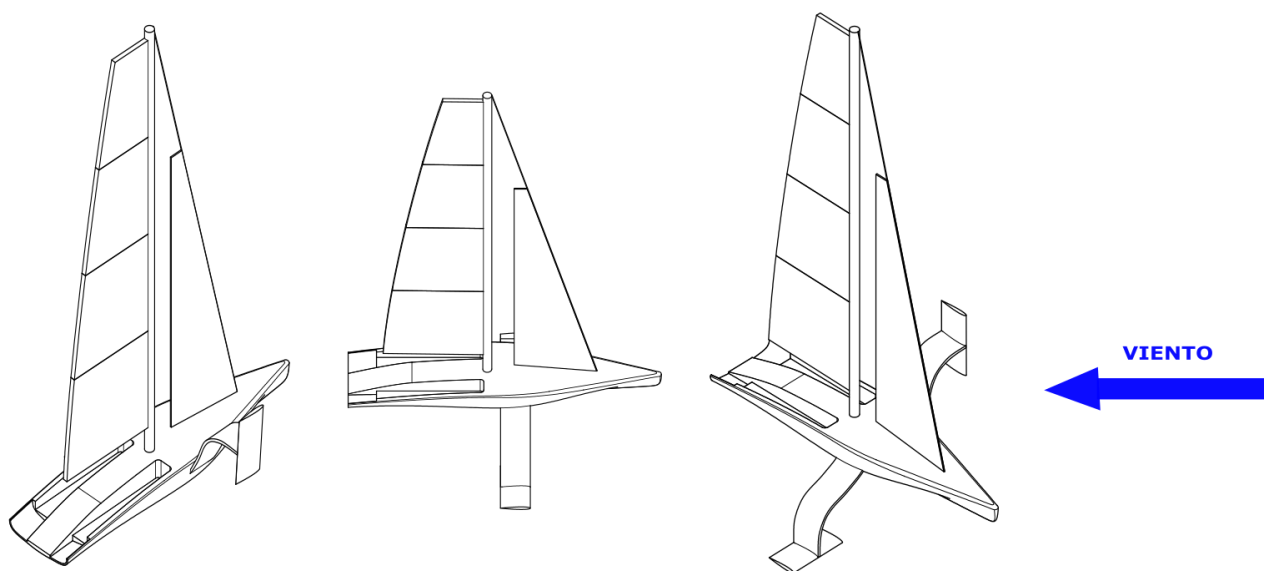


Figura 3-21. Esquema gráfico de la maniobra de virada

4 RESULTADOS

En este apartado se demostrará la condición de equilibrio del velero en unas condiciones determinadas recogidas de la anterior edición de la Copa. Estas condiciones se muestran en el inicio del apartado 3.

En primer lugar, se ha de recordar el sistema de referencia que se va a usar para los siguientes cálculos.

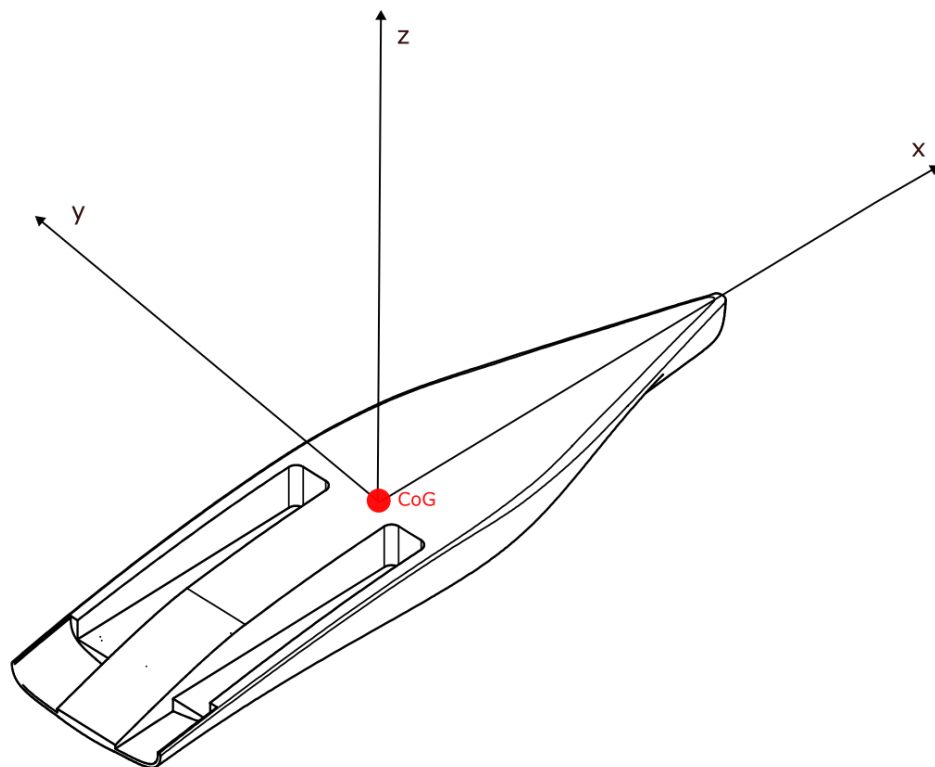


Figura 4-1. Sistema de referencia usado para los cálculos

Las distancias desde el origen del sistema de referencia a cada uno de los puntos de interés, donde entran en juego determinadas fuerzas, para realizar los cálculos de momentos de los siguientes apartados se pueden observar en la Figura 4-2.

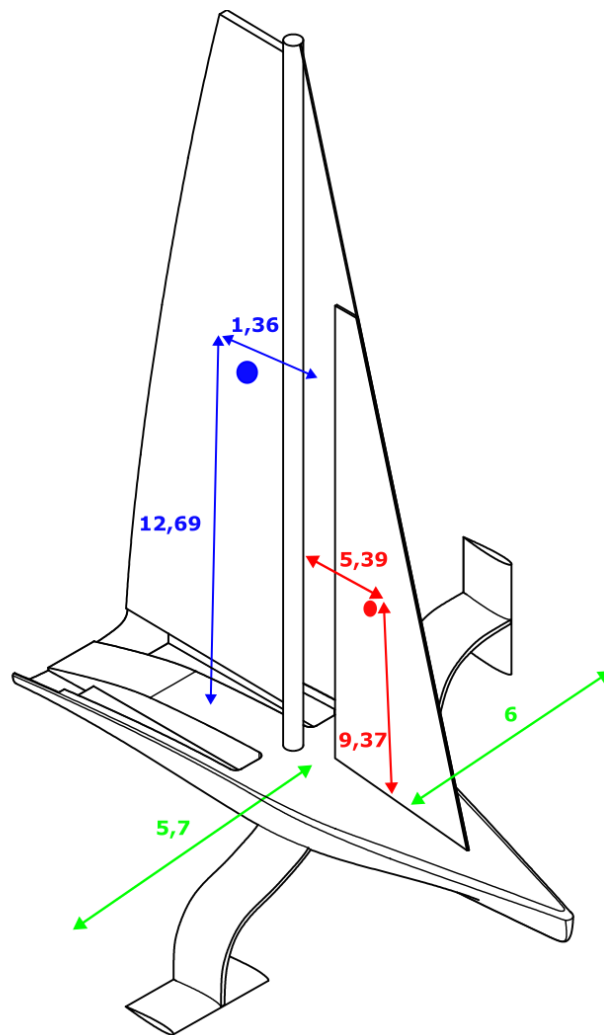


Figura 4-2. Distancias de interés para el cálculo de momentos

4.1 Equilibrio de fuerzas en el eje Z

En este apartado, se comprobará que el velero se encuentra en equilibrio en cuanto a las fuerzas verticales. Este cálculo es el más simple de todos, ya que solamente intervienen el peso total del barco y la fuerza de sustentación generada por el foil que se encuentra en el agua. Realmente los pesos del foils se muestran en el esquema para facilitar el entendimiento. Sin embargo, en el peso del barco se engloba los pesos de los foils por lo que estos últimos no se tendrían en cuenta.

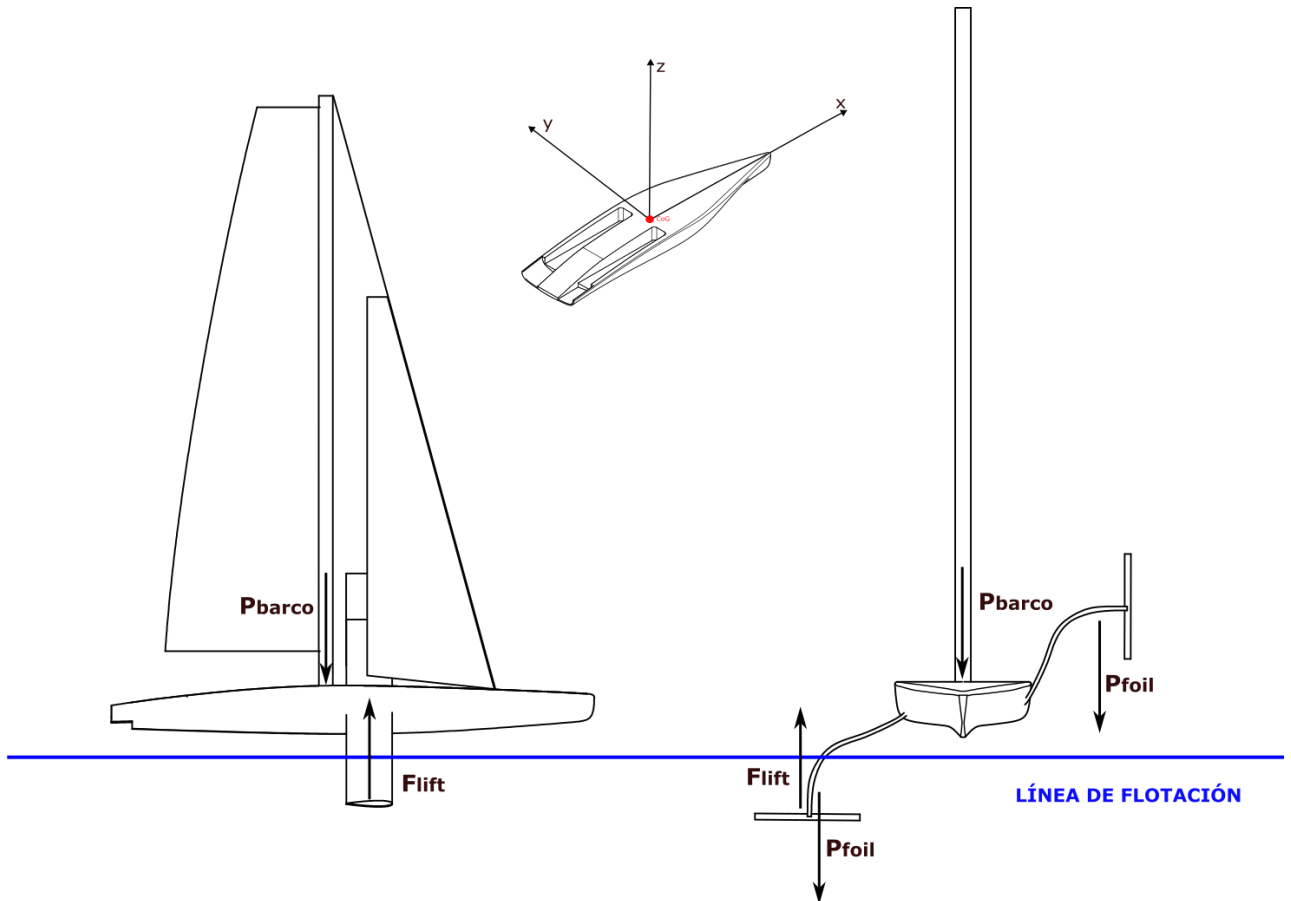


Figura 4-3. Esquema de fuerzas verticales sobre el velero

Una vez estudiado cuáles son las fuerzas que influyen en este equilibrio, se realiza la comprobación de la condición de equilibrio:

$$F_L = 68,55 \text{ KN}$$

$$P_{barco} = 68,11 \text{ KN}$$

$$\sum F_Z = F_L - P_{barco} = 68,55 \text{ KN} - 68,11 \text{ KN} = 0,44 \text{ KN}$$

Tal y como se puede observar en el resultado, el sumatorio de estas fuerzas se aproxima al valor 0, por lo que significa que el barco se encontraría en equilibrio vertical sobre el eje Z. Este equilibrio debe ser cero siempre y cuando el barco se encuentre en una situación estable con unas determinadas condiciones. Es decir, si el barco se encontrara en la maniobra de despegue (ver 3.4) o realizando alguna virada este equilibrio no sería cero ya que el velero estaría disminuyendo o aumentando el valor de su línea de flotación. Esta condición de equilibrio es la más importante ya que demuestra perfectamente que el barco se encuentra “volando”.

4.2 Equilibrio de fuerzas en el eje X

En este caso, se comprobará la condición de equilibrio en el eje X. En cuanto a las fuerzas que intervienen en este equilibrio, se ha de nombrar las fuerzas de arrastre y de avance generadas por la vela mayor y por el génova y la fuerza de arrastre generada por el foil que se encuentra en el agua.

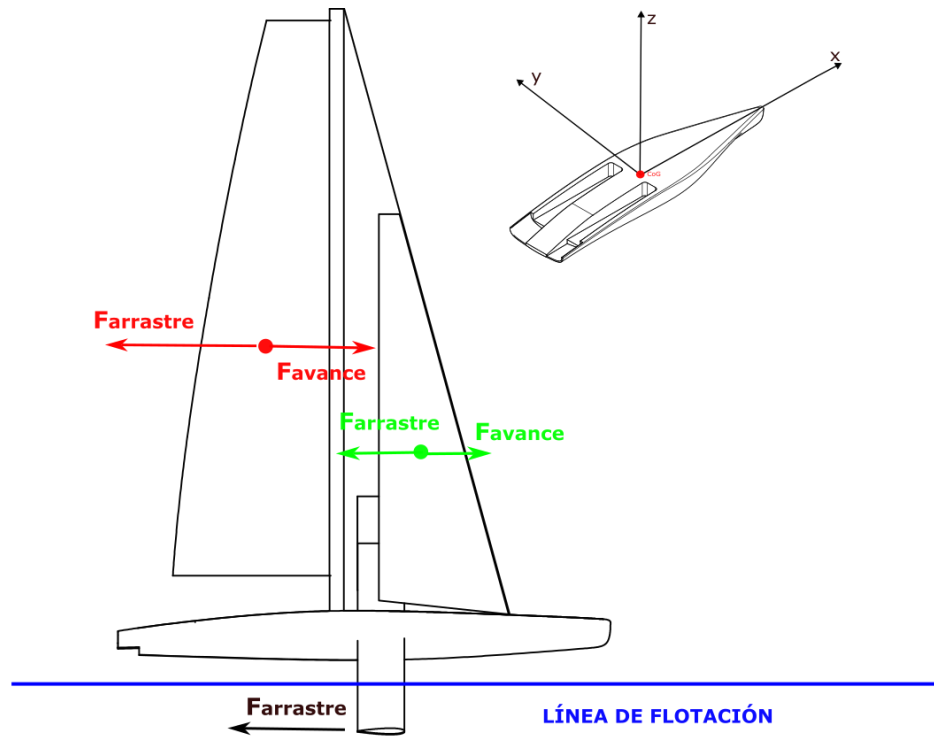


Figura 4-4. Fuerzas que intervienen en el equilibrio sobre el eje X

Los datos de la fuerza de arrastre y de avance de las dos velas son obtenidos de Tabla 3-4 y Tabla 3-7. Una vez obtenidos todos los datos de la Figura 4-4, se procede a comprobar la condición de equilibrio.

Los datos proporcionados por la vela mayor son los siguientes:

- $F_{arrastre} = 714,73 \text{ N}$
- $F_{avance} = 4926,38 \text{ N}$

Por otro lado, los datos proporcionados por el génova son:

- $F_{arrastre} = 520,08 \text{ N}$
- $F_{avance} = 727,469 \text{ N}$

Por último, la fuerza de arrastre generada por el foil tiene el siguiente valor:

- $F_{arrastre} = 4156,14 \text{ N}$

Por lo tanto, se realiza el sumatorio de fuerzas en el eje X:

$$\sum F_x = 4926,38 N + 727,469 N - 714,73 N - 520,08 N - 4156,14 N$$

$$\sum F_x = 262,9 N$$

En este caso, la fuerza resultante del sumatorio no es cero, pero es un valor muy pequeño en comparación con la fuerza de mayor magnitud. Esta relación se puede observar a continuación:

$$\frac{262,9}{4926,38} = 0,053$$

Por ello, se aproxima mucho al resultado esperado que sería cero ya que el barco se encuentra con velocidad constante y la aceleración en el punto de estudio es nula. También se ha de destacar que no se ha tenido en cuenta la fuerza de rozamiento del casco con el aire ni la fuerza de rozamiento del timón con el agua.

4.3 Equilibrio de fuerzas en el eje Y

Las fuerzas que intervienen en este equilibrio de fuerzas en el eje Y son únicamente las fuerzas de escora producidas por ambas velas, tal y como se puede ver en la Figura 4-5.

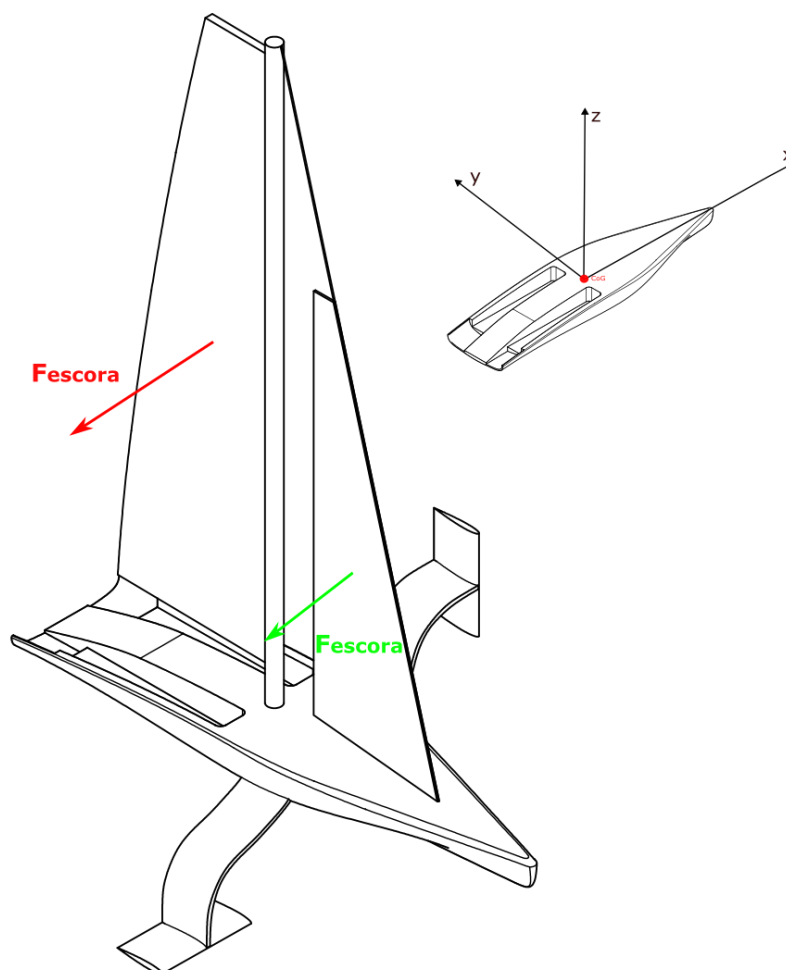


Figura 4-5. Fuerzas que intervienen en el equilibrio de fuerzas en el eje Y

En el estudio del equilibrio de fuerzas desde este punto de vista solamente se puede observar las fuerzas de escora de las velas ya que no se ha tenido en cuenta la fuerza transversal que genera el timón y la fuerza transversal del foil que contrarrestarían estas dos fuerzas mostradas en la Figura 4-5. Esto es debido a la ausencia del timón en los cálculos y la suposición de que el foil se encuentra paralelo a la superficie del agua en vez de tener una cierta inclinación, tal y como se puede observar en la Figura 4-6. Sin embargo, aun teniendo en cuenta estas dos fuerzas, el sumatorio total tampoco sería cero ya que cualquier barco de vela tiende a derivar hacia sotavento.

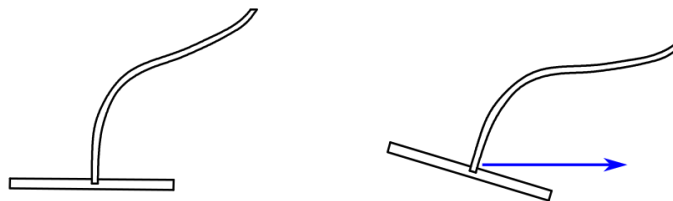


Figura 4-6. Fuerza generada por la inclinación del foil

4.4 Equilibrio de momentos sobre el eje X

Este equilibrio es el más importante de todos y el más interesante ya que es el que demuestra que el barco se mantiene en perfecta condición estática con el foil en el agua. Las fuerzas que intervienen en dicho equilibrio de momentos son los pesos de los foils, la fuerza de *lift* del foil sumergido en el agua y las fuerzas de escora de ambas velas.

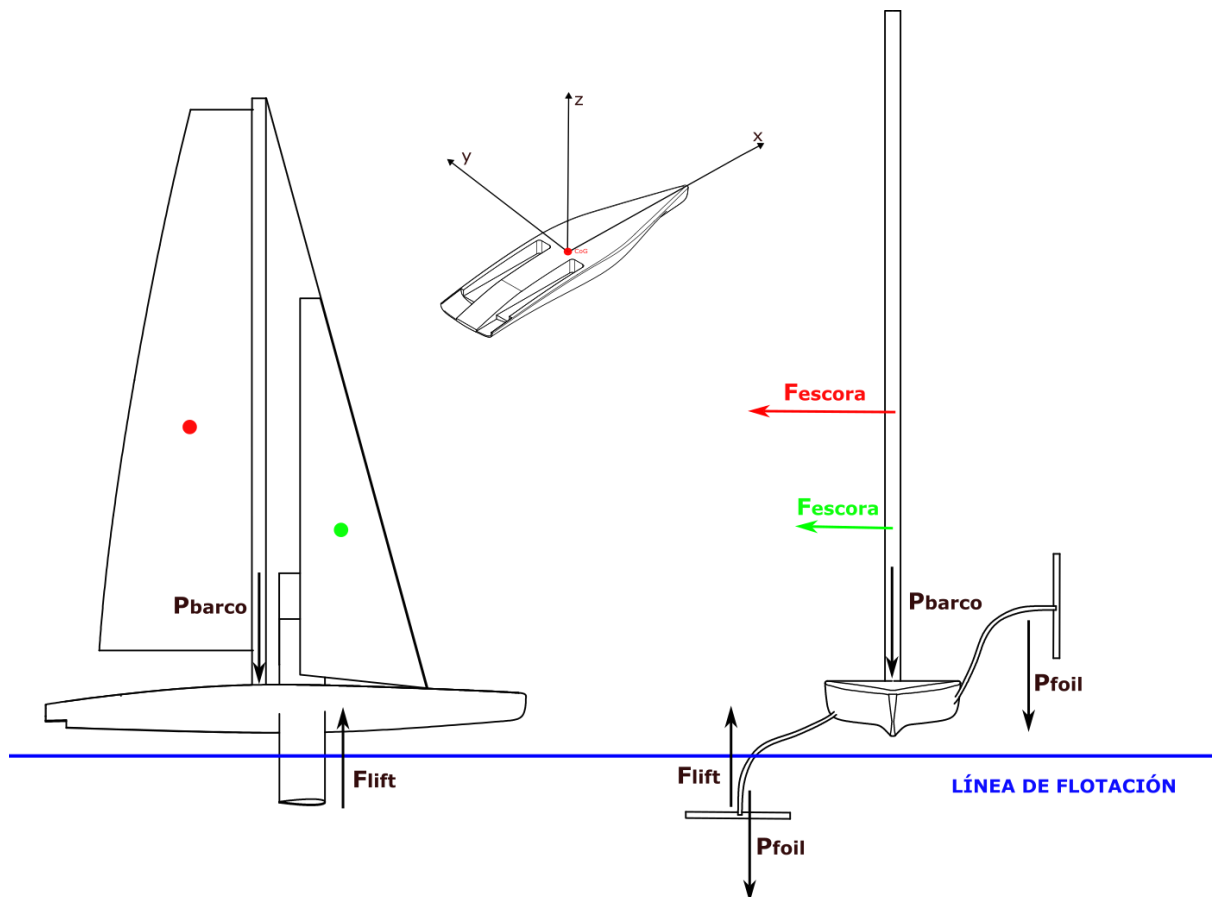


Figura 4-7. Fuerzas que intervienen en el equilibrio de momentos en el eje X

Se ha calculado las distancias de cada fuerza al eje X para realizar dicho sumatorio. En cuanto al peso de la estructura del foil, se ha usado una masa aproximada de 1300 kg, como se menciona en el capítulo 2.8.4. Esta masa corresponde con un peso de 12,74 KN. Por otro lado, las fuerzas de escora de la vela mayor y del génova corresponden con 28,07 KN y 4,217 KN, respectivamente. A continuación, se comprobará la condición de equilibrio.

$$\sum M_x = -68,55 \text{ KN} \cdot 5,7 \text{ m} + 12,74 \text{ KN} \cdot 5,7 \text{ m} + 28,07 \text{ KN} \cdot 12,69 \text{ m} + 4,217 \text{ KN} \cdot 9,37 \text{ m} \\ - 12,74 \text{ KN} \cdot 6 \text{ m}$$

$$\sum M_x = 1,16 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

El equilibrio de momentos en el eje X también es uno de los más importantes ya que demuestra que el barco no tiende a escorarse a ninguna banda y se mantiene adrizado de forma equilibrada. El valor del sumatorio debería ser cero. Sin embargo, aunque no sea cero debido a algunas simplificaciones tenidas en cuenta, el valor del sumatorio es muy pequeño en relación con el momento mayor generado en el barco como se muestra a continuación.

$$\frac{1,16 \text{ KN} \cdot \text{m}}{390,74 \text{ KN} \cdot \text{m}} = 0,0029$$

Por ello, se puede concluir que el resultado es muy próximo a cero y el barco se encuentra en equilibrio en cuanto a los momentos generados sobre el eje X.

4.5 Equilibrio de momentos sobre el eje Z

En este caso, el equilibrio solo se basa en las fuerzas de escora de la vela mayor y el génova. Se ha de destacar que en esta condición hay varios factores que no se han tenido en cuenta en los cálculos y afectarían a este equilibrio de momentos, como es la fuerza ejercida por el timón y la fuerza lateral del foil. Es decir, ocurre lo mismo que en el cálculo del apartado 4.3. Por ello, el resultado no es el esperado de valor cero.

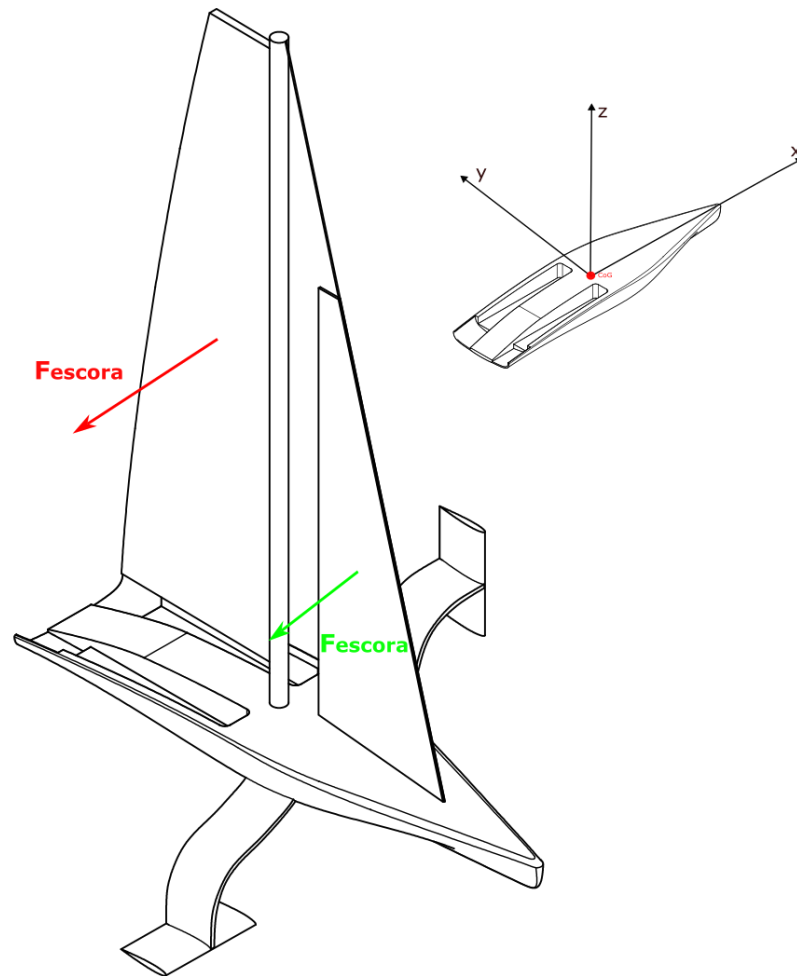


Figura 4-8. Fuerzas que intervienen en el equilibrio de momentos sobre el eje Z

Teniendo en cuenta el valor de estas fuerzas y sus respectivas distancias al centro del sistema de referencia se realiza los siguientes cálculos:

$$\sum M_Z = 28,070 \text{ KN} \cdot 1,36 \text{ m} - 4,217 \text{ KN} \cdot 5,39 \text{ m}$$

$$\sum M_Z = 15,44 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

A pesar de no haber tenido en cuenta la fuerza generada por la pala del timón que tendría un sentido contrario y misma dirección que las fuerzas de la Figura 4-8, el resultado idóneo sería un valor de igual sentido que el resultado, pero de menor magnitud ya que todo barco de vela tiende a orzar. Es decir, todo velero tiende a girar sobre el eje Z de tal manera que la proa busca el viento.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Los avances tecnológicos en el mundo naval avanzan con el objetivo de encontrar medios navales capaces de alcanzar velocidades elevadas y además con un bajo coste de combustible. Para ello, es necesario aumentar la potencia de los medios o disminuir su resistencia de avance. Esto último es la labor que desempeñan los foils, reducir la fuerza de rozamiento del casco de la embarcación con el agua. Es cierto que el casco sigue soportando una fuerza de rozamiento debida al aire. Sin embargo, esta fuerza de rozamiento debida al aire es mucho menor ya que la densidad del aire es una milésima parte de la densidad del agua. Por ello, en el sector del transporte marítimo se podrán ver cada vez más embarcaciones con foils con el paso de los años. Por otro lado, en el mundo de las regatas se seguirá implementando esta tecnología con el fin de seguir aumentando las velocidades máximas y la competitividad entre participantes.

El objetivo principal de este trabajo fin de grado se ha alcanzado ya que se ha podido demostrar que el barco se encuentra en equilibrio en las condiciones elegidas. A pesar de un gran número de aspectos no tenidos en cuenta en el estudio como son el timón, el rozamiento del casco con el aire, la fuerza transversal a la eslora del barco generada por el foil y algunas suposiciones más las prestaciones de estos veleros se ajustan al resultado obtenido. Aunque no se ha logrado un resultado totalmente exacto debido a la falta de información sobre el diseño de los veleros, es útil y válido para entender el problema planteado en el objetivo principal. Se había comentado en los objetivos secundarios estudiar la condición de equilibrio en distintas condiciones de viento y navegación. Sin embargo, sólo se ha detallado los cálculos de una configuración y un viento dado ya que sería todos ellos serían muy similar. Esto ocurre principalmente debido a las altas velocidades alcanzadas, que hacen que el viento relativo tenga siempre un ángulo de ataque pequeño y un módulo elevado. La única excepción que cambiaría lo anterior sería cuando el viento es tan débil que no genera el lift suficiente para elevar el monocasco, pero en este caso cumpliría los principios de funcionamiento fluidodinámicos de un velero convencional. Por lo que no es objeto de estudio de este trabajo fin de grado en el que tiene mayor relevancia el funcionamiento de los foils. A pesar de esto, se ha realizado una breve explicación sobre la maniobra de virada y la maniobra de despegue.

Además, para poder alcanzar el objetivo principal, se han logrado alcanzar los objetivos secundarios. Se ha realizado el modelado CAD de las partes que intervienen en el objeto de estudio de este proyecto con el software Autodesk Inventor. A mayores, se ha calculado las fuerzas generadas por las velas y el foil con el programa XFLR5 y se ha calculado el centro de presiones de ambas velas.

En definitiva, se puede decir que los resultados han sido satisfactorios y son útiles para entender el funcionamiento principal de estos veleros, cómo se mantienen en equilibrio y las velocidades alcanzadas.

5.2 Líneas futuras

Una vez se ha conseguido explicar el funcionamiento general de estos veleros bajo unas condiciones de trabajo recogidas de la anterior edición de la Copa, se proponen las siguientes líneas futuras que permiten continuar con el desarrollo de este trabajo fin de grado o aplicar mejoras sobre el mismo:

- Estudio analítico de la maniobra de virada, demostrando la condición de equilibrio en todo el proceso.
- Estudio en profundidad de la maniobra de despegue.
- Completar el modelado CAD con el timón y estudiar la repercusión que este tendría.
- Estudiar la posibilidad del uso de foils en embarcaciones pertenecientes a las fuerzas y cuerpos de seguridad del estado como pueden ser la Armada o la Guardia Civil con el objetivo de conseguir embarcaciones con velocidades muy elevadas y con un menor consumo de combustible.
- Estudiar un posible programa de predicción de velocidad partiendo de una condición de viento determinada.

En general, el uso de los foils parece ser una vía prometedora en un futuro. Por ello, se podría realizar un estudio del uso de los foils en cualquier ámbito relacionados con embarcaciones navales para alcanzar una mayor eficiencia, mayor velocidad y menor consumo de combustible.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Cup, «37th America's Cup», 37th America's Cup. Accedido: 8 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.americascup.com/history>
- [2] «SailGP - The home of the world's most exciting racing on water», SailGP. Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://sailgp.com/>
- [3] R. Peake, «America's Cup history in the making», Yachts and Yachting. Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.yachtsandyachting.co.uk/americas-cup/americas-cup-history-in-the-making/>
- [4] M. TORREGROSSA, «Boundary Layer Technologies présente son ferry électrique à foils», Bateau-Electrique.com. Accedido: 12 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.bateau-electrique.com/actualites/boundary-layer-technologies-ferry-electrique-foils/>
- [5] «Goleta: Un velero intemporal | Historia, anatomía, tipos». Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.yachting.com/es-es/blog/schooner-a-classic-sailboat-with-timeless-elegance>, <https://www.yachting.com/es-es/blog/schooner-a-classic-sailboat-with-timeless-elegance>
- [6] D. M. Popescu, «Cutter, a Word with More Senses, Designates Several Types of Boats», The Yacht Owner. Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://theyachtowner.net/2017/12/cutter/>
- [7] J. Claes, «JONHSON The secrets of sailing».
- [8] «SHAMROCK V Yacht Charter Price - Camper & Nicholson's Shipyard Luxury Yacht Charter», YachtCharterFleet. Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.yachtcharterfleet.com/luxury-charter-yacht-22285/shamrock-v.htm>
- [9] «<https://nl.yachtworld.com/boten/1989/lacc-Yacht-ITA-1-2976154/country.verenigdestaten#.V9K9yIXIRux>». Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://nl.yachtworld.com/boten/1989/lacc-Yacht-ITA-1-2976154/country.verenigdestaten#.V9K9yIXIRux>
- [10] Cico, «Vendée Globe - Compacting in the south Pacific tunnel to Cape Horn». Accedido: 7 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.nauticareport.it/dettnews/news/vende_globe__compacting_in_the_south_pacific_tunnel_to_cape_horn-3763-22385/
- [11] Sloof, «The Aero- and Hydromechanics of Keel Yachts».
- [12] F. Medina, *Introducción a la oceanografía*. Eudeba. [En línea]. Disponible en: [https://espanol.libretexts.org/Geociencias/Oceanograf%C3%ADa/Libro%3A_Introducci%C3%B3n_a_la_Oceanograf%C3%ADa_\(Webb\)](https://espanol.libretexts.org/Geociencias/Oceanograf%C3%ADa/Libro%3A_Introducci%C3%B3n_a_la_Oceanograf%C3%ADa_(Webb))
- [13] L. Birk, «BIRK Fundamentals of Ship Hydrodynamics».

- [14] B. Gómez Llopart, «Estudio del plano vélico y procedimiento de diseño de las velas. Aplicación al velero escuela “Barcelona”.»
- [15] «Sailandtrip, portal náutico, tienda náutica, nudos marineros», SailandTrip. Accedido: 8 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://sailandtrip.com/>
- [16] G. Borba Labi, «Velocity Prediction Program Development for Hydrofoil-Assisted Sailing Monohulls».
- [17] J. Guerrero Sancho, «DESIGN OF AN AC75 HIGH-PERFORMANCE SAILING YACHT».
- [18] «AC75 Class Rule v2.0». 17 de marzo de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.americascup.com/files/m5498_AC75-Class-Rule-v20.pdf
- [19] «<https://www.prada.com/es/es/americas-cup.html>», Prada. Accedido: 7 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.prada.com/es/es/americas-cup.html>
- [20] «Luna Rossa AC75 by jean_dd», Thingiverse. Accedido: 4 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.thingiverse.com/thing:4697749>
- [21] newattitude, «America’s Cup veteran Dean Barker describes new foiling monohull as a real challenge», CULTURA MARINARA. Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://culturamarinara.com/americas-cup-veteran-dean-barker-describes-new-foiling-monohull-as-a-real-challenge/>
- [22] «<http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>». Accedido: 29 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>
- [23] N. Patterson, «Development of a Six Degree of Freedom Velocity Prediction Program for the foiling America’s Cup Vessels».
- [24] L. M. García-Cuevas González, «UPV Centro de presiones centro aerodinamico y cuerda media aerodinamica».
- [25] J. Luna, «Cuerda Media Aerodinámica y Centro de Gravedad (CMA y CG)», [En línea]. Disponible en: <https://www.acnaeromodelismo.org/index.php/articulos/vuelo/item/142-cuerda-media-aerodinamica-y-centro-de-gravedad>
- [26] R. Rodríguez Nuñez, «OPTIMAL CONTROL OF AN AC75 SAILBOAT FOR THE AMERICA’S CUP RACE».

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

El uso de foils en embarcaciones pueden tener implicaciones económicas, sociales y ambientales.

Desde el punto de vista de las implicaciones económicas, el uso de hidroalas requiere una inversión significativa en comparación con otras tecnologías. Esto conlleva a un largo periodo de tiempo para que el retorno de la inversión merezca la pena. Ahora bien, es cierto que estos sistemas son capaces de mejorar la eficiencia del combustible y reducir los costos operativos a largo plazo. Por ello, en industrias marítimas donde la eficiencia del combustible y las altas velocidades son de gran importancia, el uso de esta tecnología puede conllevar una ventaja competitiva respecto a otras tecnologías. Es decir, este avance puede crear gran competitividad entre empresas de este ámbito. Se puede observar en la figura 1-4 en uso de esta tecnología en ferris. Sin embargo, el mantenimiento de las hidroalas puede tener un coste muy elevado, especialmente si se requiere de una reparación o sustitución de alguna parte debido al desgaste o a algún daño.

Por otro lado, desde el punto de vista social, el empleo de tecnologías con foils puede influir en el sector de la industria marítima, aumentando la demanda de mano de obra. Es decir, aparecen puestos de trabajos para intentar mejorar esta tecnología, realizar labores de mantenimientos, reparaciones y hacer más eficiente su proceso de fabricación. El número de personas de una tripulación de un buque con hidroalas puede ser aumentado debido a la alta complejidad que esto conlleva. Además, el evento de la Copa América crea un gran impacto en la social en la ciudad en la cual se celebra cada edición, haciendo mover un gran número de personas de distintas partes del mundo para ver las regatas.

Por último, en cuanto a implicaciones medioambientales, el uso de hidroalas puede contribuir a la reducción de emisiones contaminantes al mejorar la eficiencia del combustible y reducir el consumo de combustibles fósiles. Estas embarcaciones también tienen un impacto beneficioso en la vida marina, especialmente en áreas sensibles como zonas de cetáceos o áreas de reproducción de peces. Esto es debido a la reducción de vibraciones y ruido que esto produce respecto a otras tecnologías. El impacto más positivo e importante es la reducción del consumo total de energía en el transporte marítimo al mejorar la eficiencia de la propulsión. Por ello, tiene un gran beneficio medioambiental al reducir la huella de carbono de esta industria.

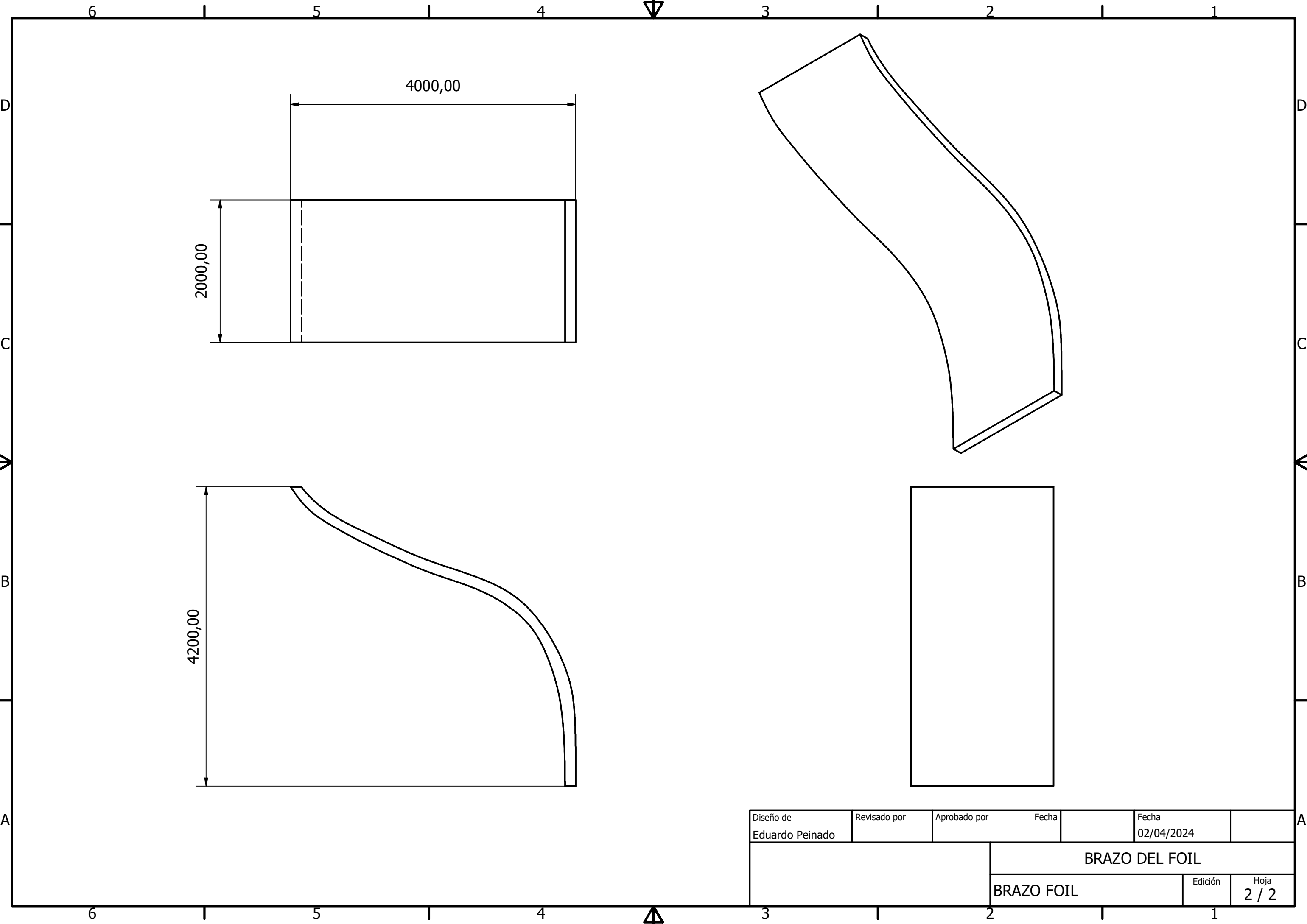
En resumen, si bien el uso de hidroalas conlleva impactos beneficiosos en ámbitos sociales, económicos y medioambientales, también hay que prestar especial interés en ciertas consideraciones que deben ser abordadas para maximizar estos impactos positivos y mitigar cualquier impacto negativo en la sociedad o en el medio ambiente.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

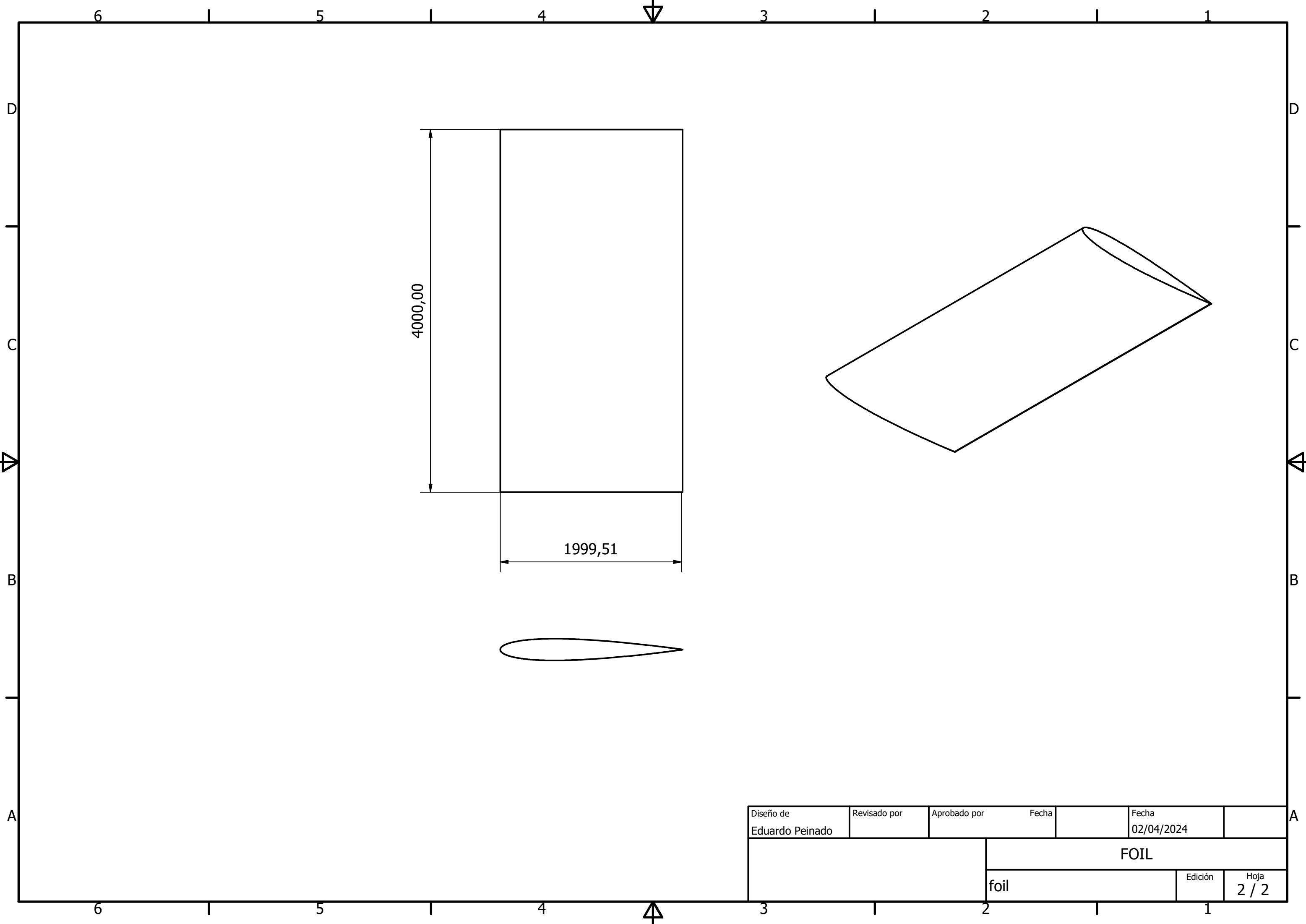
En primer lugar, es cierto que esta tecnología ofrece ventajas en términos de eficiencia y velocidad. Sin embargo, es importante asegurar que estas mejoras estén disponibles de manera equitativa para todas las comunidades. Esto implica considerar cómo estas tecnologías pueden afectar a regiones que podrían quedarse rezagadas en términos de acceso o capacidad para adoptar estas innovaciones. Es decir, podría llegar al punto que haya países que no tengan la capacidad de fabricar embarcaciones con estas tecnologías y pierdan competitividad en este sector, perdiendo a su vez gran número de puestos de trabajos y disminuyendo su capacidad económica.

Además, desde el punto de vista de las personas que le gustan navegar a vela, el uso de tecnologías tan avanzadas provoca la desaparición de la navegación a vela tradicional. Esto puede crear frustración en los amantes de las regatas de velas tradicionales.

ANEXO III: PLANOS DE LA ESTRUCTURA DE LOS FOILS



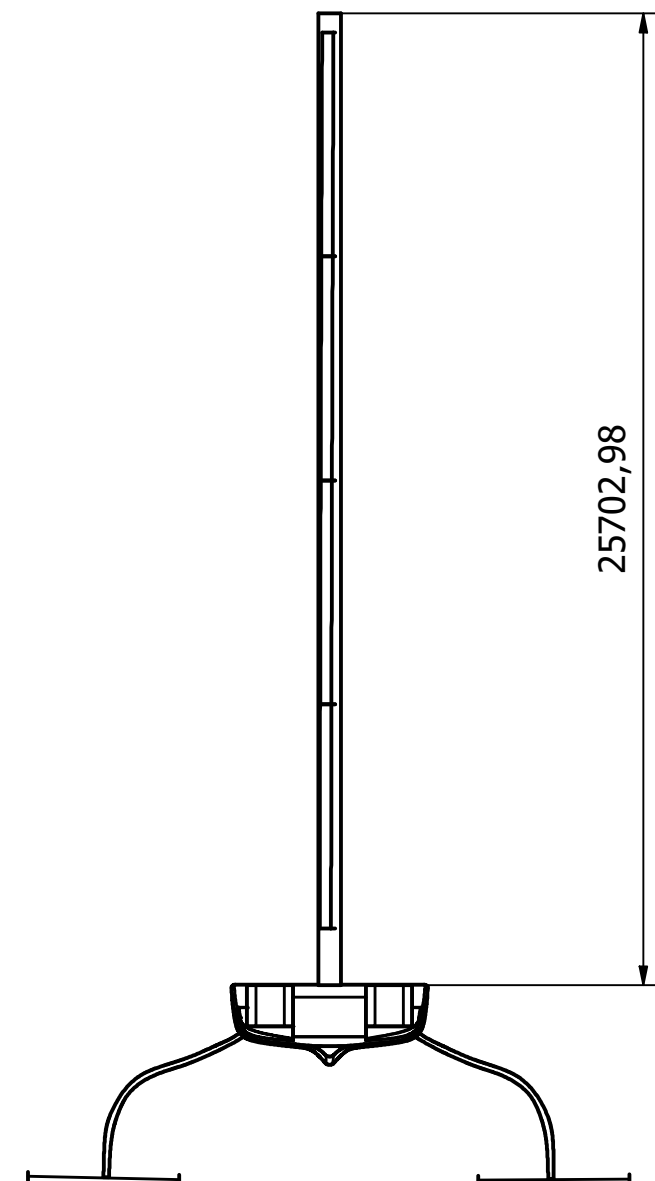
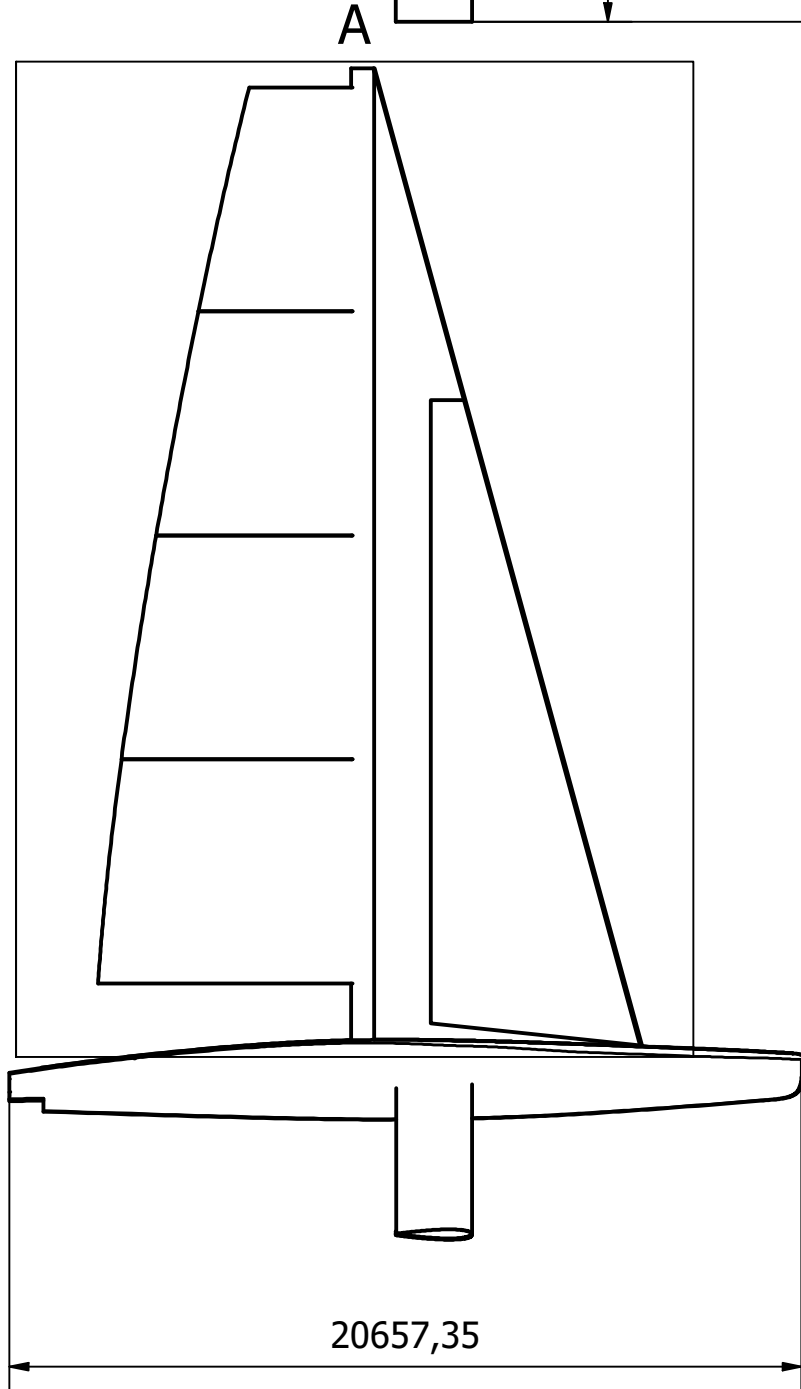
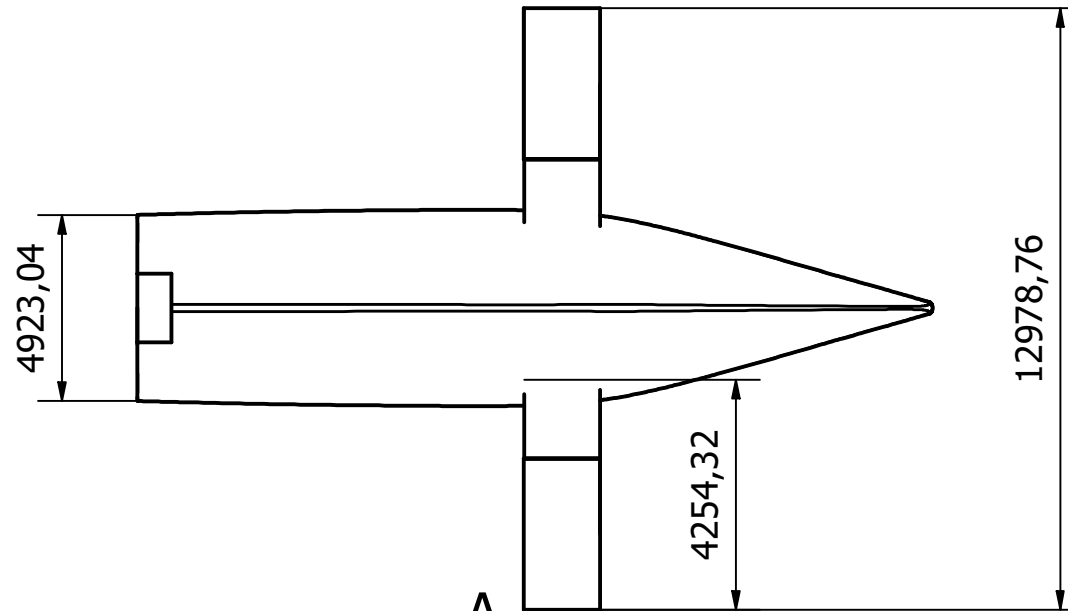
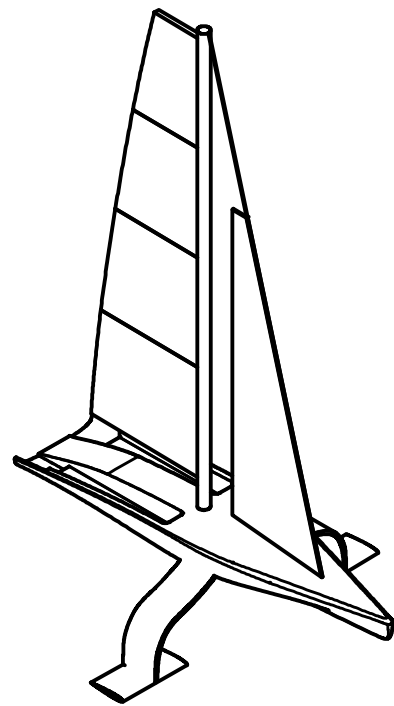
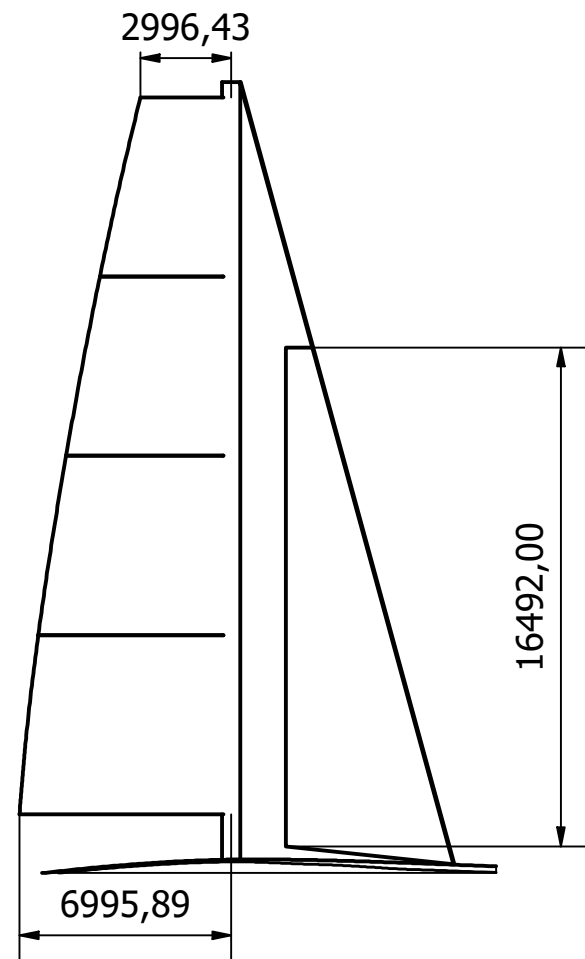
Diseño de Eduardo Peinado	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 02/04/2024
			BRAZO DEL FOIL	
			BRAZO FOIL	Edición Hoja 2 / 2



Diseño de Eduardo Peinado	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 02/04/2024
		FOIL		
		foil	Edición	Hoja 2 / 2

ANEXO IV: PLANO GENERAL

A (1 : 250)



Diseño de Eduardo Peinado	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 03/04/2024
			PLANO GENERAL DEL MODELADO	
			PLANO GENERAL	Edición 1 / 1