

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER



ESTUDIO, DISEÑO Y PROPUESTA DE FABRICACIÓN DE UN
HIDROFOIL PARA LA PRÁCTICA DE KITESURF

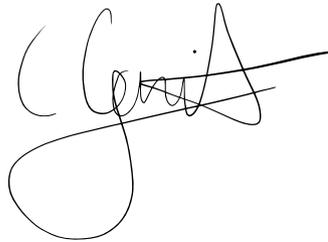
Autora: García Aguilar, Cristina.

Director: Álvarez Hernández, Rodrigo.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título Estudio, diseño y propuesta de fabricación de un hidrofoil para la práctica de kitesurf en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2021-2022 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Cristina García Aguilar Fecha: 16/ 07/ 2022

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'C. García', with a large, stylized flourish at the end.

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Rodrigo Álvarez Hernández Fecha: 16/07/2022

ESTUDIO, DISEÑO Y PROPUESTA DE FABRICACIÓN DE UN HIDROFOIL PARA LA PRÁCTICA DE KITESURF

Autora: García Aguilar, Cristina.

Director: Álvarez Hernández, Rodrigo.

Entidad Colaboradora: ICAI –
Universidad Pontificia Comillas

Resumen del proyecto

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de hidrofoil están cada vez más presentes en los deportes acuáticos. Su incorporación hace que la navegación en las distintas modalidades sea más rápida, compleja y llamativa. Por eso estos sistemas están ganando popularidad y generando tanto interés en el mundo de los deportes náuticos ^[1].

El objetivo de este proyecto es el diseño de un sistema de hidrofoil para una tabla de kitesurf que sea lo más rápido posible y capaz de navegar y competir en las regatas de Fórmula Kite, modalidad de kitesurf que será olímpica a partir de los Juegos Olímpicos de París 2024.

METODOLOGÍA

Este documento contiene un breve análisis histórico sobre el kitesurf y los sistemas hidrofoil y su incorporación en las aplicaciones

náuticas. Además, se realiza un análisis de los componentes del hidrofoil: ala delantera, ala trasera, fuselaje y mástil ^[1]. Se estudia su función y las dimensiones que presentan en los sistemas que se utilizan actualmente en las regatas de Fórmula Kite ^[11]. También se calcula la fuerza de sustentación mínima que tiene que generar el ala delantera durante la navegación.

Seguidamente, se estudian los perfiles hidrodinámicos que pueden utilizarse en el diseño para ver cuál es óptimo para el ala delantera, el ala trasera y el mástil del sistema. Para eso se estudian sus coeficientes de arrastre y sustentación y su comportamiento al variar el ángulo de ataque respecto al fluido que atraviesan.

Se hace un estudio estructural del sistema, calculando las fuerzas a las que se ven sometidos los componentes durante el arranque y la navegación. Se estudian las tensiones y desplazamientos máximos, así como el factor de seguridad, para ver que el diseño y el material seleccionado son adecuados. Para realizar estos cálculos se han asumido una serie de condiciones de navegación como la velocidad de arranque y velocidad máxima de navegación, altura y peso del regatista, fuerza que transmite la cometa al arnés

del *kiter* y el ángulo del mástil con respecto a la superficie del mar durante la navegación.

Por último, se ha realizado una propuesta de fabricación y un cálculo de los costes de fabricación del sistema de hidrofoil.

Los recursos empleados durante este trabajo han sido principalmente internet para la búsqueda de información y SolidWorks para el diseño del sistema y el análisis estructural. También se ha accedido a una base de datos de perfiles hidrodinámicos *Airfoil Tools* [4] para la elección de los perfiles. Para los cálculos se ha utilizado Matlab y Excel y para la redacción de la memoria Word.

RESULTADOS

La fuerza de sustentación mínima que ha de generar el ala delantera es de 939 N durante la navegación y 664 N durante el arranque.

Se ha decidido utilizar para su construcción fibra de carbono de alto módulo, en concreto M46J del proveedor Toray. Para el ala delantera se ha decidido utilizar el perfil ys930 y para el ala trasera y el mástil el perfil simétrico e837.

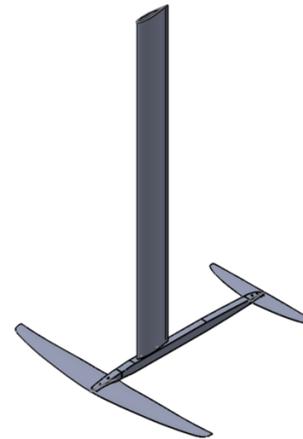


Figura: Diseño sistema de hidrofoil.

Todos los componentes cumplen con el análisis estructural con un factor de seguridad mayor a 1,5. Los desplazamientos y tensiones máximas son asumibles para el sistema y su aplicación.

El coste unitario de fabricación del hidrofoil es de 13.915 €.

La siguiente tabla muestra un resumen de los costes de fabricación del sistema de hidrofoil para series grandes en el caso de comercializar el producto:

Unidades	1.500	22.500	45.000
Costes totales por unidad [€]	909,4	905,3	905,2
Precio de venta [€]	2.728,2	2.715,9	2.715,5

Tabla: resumen de costes por unidad y precio de venta.

CONCLUSIONES

Se han estudiado los componentes de un sistema, comprendido su función y los principios físicos a tener en cuenta para su diseño.

Se ha obtenido un diseño que cumple con los requisitos establecidos y capaz de participar en regatas de Fórmula Kite. Además, se ha elaborado una propuesta de fabricación adecuada para el diseño y los materiales empleados.

El precio estimado en el caso de comercializar el *foil* es similar al precio de venta de los sistemas de hidrofoil que se comercializan actualmente para las regatas de Fórmula Kite.

A la hora de la toma de decisiones durante el diseño de dicho sistema siempre se ha utilizado el criterio de maximizar la velocidad.

BIBLIOGRAFÍA

[I] J. Raney, «The History of Kitesurfing,» Julio 2019. [En línea]. Available: <https://www.groovewatersports.com/blog/history-of-kitesurfing>. [Último acceso: Septiembre 2021].

[II] H. Kitesurf, «Equipo de Kitesurf,» Octubre 2019. [En línea]. Available: <https://hellokitesurf.com/equipo-kitesurf/>. [Último acceso: Enero 2022].

[III] F. K. O. Kiteboarding, «Registered Series Production Hydrofoils 2020-2024,» Mayo 2020. [En línea]. Available: <https://formulakite.org/equipment/eligible-equipment/hydrofoils-2020-2024>. [Último acceso: Septiembre 2021].

[IV] «Airfoil Tools,» Enero 2013. [En línea]. Available:

<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=e387-il>. [Último acceso: Enero 2022].

Palabras clave: hidrofoil, foil, kitesurf, kite, surf, regatas, navegación, velocidad, viento, mar, perfil hidrodinámico, sustentación, arrastre, fuselaje, mástil, tabla, fibra, carbono.

STUDY, DESIGN AND MANUFACTURING PROPOSAL OF AN HYDROFOIL FOR KITESURFING PRACTICE

Author: García Aguilar, Cristina.

Director: Álvarez Hernández, Rodrigo.

Collaborating Entity: ICAI -

Universidad Pontificia Comillas

Abstract

INTRODUCTION

Hydrofoil systems are increasingly present in water sports. Their incorporation makes navigation in the different modalities faster, more complex and eye-catching. That is why these systems are gaining popularity and generating so much interest in the world of water sports ^[1].

The objective of this project is to design a hydrofoil system for a kitesurfing board that is as fast as possible and capable of sailing and competing in Formula Kite races, a kitesurfing modality that will be Olympic as of the Paris 2024 Olympic Games.

METHODOLOGY

This document contains a brief historical analysis of kitesurfing and hydrofoil systems and their incorporation in nautical applications. In

addition, an analysis of the hydrofoil components is made: front wing, rear wing, fuselage and mast ^[1]. Their function and the dimensions they present in the systems currently used in Formula Kite ^[1] racing is studied. The minimum lift force to be generated by the forward wing during sailing is also calculated.

Then, the hydrodynamic profiles that can be used in the design are studied to see which is optimal for the front wing, the rear wing and the mast of the system. For this purpose, their drag and lift coefficients and their behavior when varying the angle of attack with respect to the fluid they pass through are studied.

A structural study of the system is carried out, calculating the forces to which the components are subjected during start-up and navigation. The maximum stresses and displacements are studied, as well as the safety factor, to ensure that the design and the selected material are adequate. In order to perform these calculations, a series of sailing conditions have been assumed, such as starting speed and maximum sailing speed, height and weight of the sailor, force transmitted by the kite to the kiter harness and the angle of the mast with respect to the sea surface during sailing.

Finally, a manufacturing proposal and a calculation of the manufacturing costs of the hydrofoil system have been carried out.

The resources used during this work have been mainly the internet for the information search and SolidWorks for the system design and structural analysis. A database of Airfoil Tools [IV] hydrodynamic profiles has also been accessed for the selection of the profiles. Matlab and Excel were used for the calculations and Word was used to write the report.

RESULTS

The minimum lift force to be generated by the forward wing is 939 N during cruise and 664 N during start-up.

It has been decided to use high modulus carbon fiber for its construction in particular M46J from Toray supplier. For the front wing it has been decided to use the ys930 profile and for the rear wing and mast the symmetrical e837 profile.

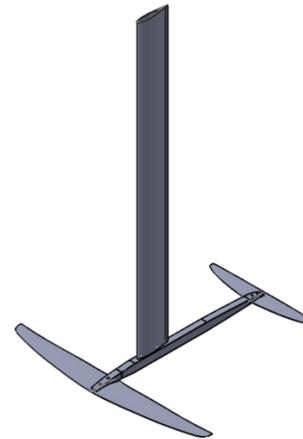


Figure: Hydrofoil system design.

All components comply with the structural analysis with a safety factor greater than 1,5. The maximum displacements and stresses are assumable for the system and its application.

The unit cost of manufacturing the hydrofoil is €13.915.

The following table shows a summary of the manufacturing costs of the hydrofoil system for large series in the case of commercializing the product:

Units	1.500	22.500	45.000
Total cost per unit [€]	909,4	905,3	905,2
Selling price [€]	2.728,2	2.715,9	2.715,5

Table: Summary of unit costs and selling price.

CONCLUSIONS

The components of a system have been studied, their function and the physical principles to be taken into

account for their design have been understood.

A design has been obtained that meets the established requirements and is capable of participating in Formula Kite regattas. Also, a manufacturing approach appropriate to the design and the materials used has been developed.

The estimated price is similar to the selling price of hydrofoil systems currently marketed for Formula Kite racing.

When making decisions during the design of such a system, the criterion of maximizing speed has always been used.

BIBLIOGRAPHY

[I] J. Raney, «The History of Kitesurfing,» Julio 2019. [On line]. Available: <https://www.groovewatersports.com/blog/history-of-kitesurfing>. [Last login: September 2021].

[II] H. Kitesurf, «Equipo de Kitesurf,» Octubre 2019. [On line]. Available: <https://hellokitesurf.com/equipo-kitesurf/>. [Last login: January 2022].

[III] F. K. O. Kiteboarding, «Registered Series Production Hydrofoils 2020-2024,» Mayo 2020. [On line]. Available: <https://formulakite.org/equipment/eligible-equipment/hydrofoils-2020-2024>. [Last login September 2021].

[IV] «Airfoil Tools,» Enero 2013. [On line]. Available:

<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=e387-il>. [Last login: January 2022].

Key words: hydrofoil, foil, kitesurf, kite, surf, regattas, sailing, speed, wind, sea, hydrodynamic profile, lift, drag, fuselage, mast, board, fiber, carbon.

Tabla de contenidos

1.	Introducción.....	16
2.	Motivación.....	17
3.	Objetivos del proyecto.....	18
4.	Metodología de Trabajo.....	19
5.	Recursos a emplear.....	20
6.	Estado de la cuestión.....	21
6.1	Estudio del kitesurf.....	21
6.1.1	Historia del kitesurf [1].....	21
6.1.2	Componentes del kitesurf.....	22
6.2	Estudio hidrofoil.....	28
6.2.1	Historia del hidrofoil [3] [4] [5] [6].....	28
6.2.2	Aplicación del hidrofoil al kitesurf [7].....	30
6.2.3	Componentes de un hidrofoil [8].....	31
6.3	Estudio hidrofoils Fórmula Kite [9].....	34
6.3.1	Mástiles.....	34
6.3.2	Alas delanteras.....	35
6.3.3	Alas traseras.....	36
6.3.4	Fuselajes.....	37
6.3.5	Esbeltez.....	37
7.	Cálculo de fuerzas en todo el sistema.....	40
7.1	Hipótesis.....	40
7.2	Cálculos de fuerzas.....	44
7.2.1	Fuerzas sobre el navegante.....	44
7.2.2	Fuerzas sobre la tabla.....	45
7.2.3	Fuerzas sobre el mástil.....	46

7.2.4	Fuerzas sobre el fuselaje.....	47
8.	Perfil hidrodinámico	50
8.1	Parámetros de un perfil hidrodinámico	50
8.2	Principios de sustentación y resistencia al avance.....	51
8.2.1	Teorema de Bernoulli [10]	51
8.2.2	Fuerza de sustentación.....	53
8.2.3	Fuerza de arrastre.....	55
8.2.4	Peso.....	56
8.3	Selección del perfil del ala delantera.....	57
8.3.1	Capa límite y número de Reynolds [14].....	58
8.3.2	Comparación de las curvas características de cada perfil.....	61
8.3.3	Comprobación perfil ys930	65
8.4	Selección del perfil del ala trasera.....	67
8.5	Selección del perfil del mástil	70
9.	Diseño, materiales y cálculo de tensiones	71
9.1	Diseño.....	71
9.2	Materiales	71
9.3	Cálculo de tensiones	72
9.3.1	Tensiones de <i>Von Mises</i>	73
9.3.2	Desplazamientos máximos	73
9.3.3	Factor de seguridad.....	73
9.4	Ala delantera.....	73
9.5	Ala trasera.....	76
9.6	Fuselaje.....	79
9.7	Mástil.....	82
10.	Propuesta de fabricación.....	85

11.	Estudio económico	87
12.	Conclusiones.....	91
13.	Referencias	93
14.	Anexos	96
	Anexo A: Script Matlab cálculo mecánico	96
	Anexo B: Análisis perfiles hidrodinámicos	97
	Anexo C: Detalle cálculos coste de fabricación	106
	Anexo D: Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible [15]	108
	Anexo E: Planos 2D.....	110

Tabla de ilustraciones

Imagen 1: Regata de la categoría Fórmula Kite.	16
Imagen 2: Cronograma del proyecto.	19
Imagen 3: Representación de los primeros usos de una cometa en China.	21
Imagen 4: Patente de los hermanos Legaignoux.	22
Imagen 5: Cometa hinchable para kitesurf.	23
Imagen 6: Cometa parapente para kitesurf con foil.	24
Imagen 7: Barra de dirección y líneas kitesurf.	25
Imagen 8: Tabla de kitesurf Twin Tip.	26
Imagen 9: Tabla de kitesurf direccional.	27
Imagen 10: Tabla de kite foil.	27
Imagen 11: Hidrofoil de Enrico Forlanini navegando en el Lago Mayor, Italia. 29	
Imagen 12: Hydrodrome 4.	30
Imagen 13: Partes de un hidrofoil.	31
Imagen 14: Hidrofoil sin placa de unión.	33
Imagen 15: Referencias para las medidas de los mástiles.	34
Imagen 16: Referencias para las medidas de las alas delanteras.	36
Imagen 17: Referencias para las medidas de las alas traseras.	36
Imagen 18: Referencias para las medidas de los fuselajes.	37
Imagen 19: Parámetros del ala delantera.	38
Imagen 20: Área del ala delantera.	39
Imagen 21: Cuerda del ala delantera.	39
Imagen 22: Esquema del conjunto durante la navegación.	40
Imagen 23: Descomposición de la fuerza de arrastre de la cometa.	42
Imagen 24: Fuerzas que intervienen en todo el sistema durante la navegación. 43	

Imagen 25: Fuerzas que intervienen en el kiter durante la navegación.	44
Imagen 26: Fuerzas que intervienen en la tabla durante la navegación.....	45
Imagen 27: Fuerzas que intervienen en el mástil durante la navegación.....	46
Imagen 28:Fuerzas que intervienen en el fuselaje durante la navegación.....	47
Imagen 29: Posición de navegación vista de perfil.	49
Imagen 30: Parámetros perfil alar.....	50
Imagen 31: Ángulo de ataque de un perfil hidrodinámico.	51
Imagen 32: Fuerza de sustentación perfil hidrodinámico. Conjetura Bernoulli.	54
Imagen 33: Flujo perturbado por un perfil alar.	54
Imagen 34: Tolerancias a cumplir por los diseños aceptados por la IKA.	57
Imagen 35: Capa límite laminar (izquierda) y turbulenta (derecha).....	59
Imagen 36: Coeficiente de arrastre de los 11 perfiles en función de α	62
Imagen 37: CL/CD en función del ángulo de ataque, α	63
Imagen 38: Coeficiente de sustentación en función del ángulo de ataque, α	64
Imagen 39: Coeficiente de sustentación en función del coeficiente de arrastre.	64
Imagen 40: Perfil aerodinámico ys930.	65
Imagen 41: Posición del sistema de hidrofoil durante la navegación y durante el arranque.	66
Imagen 42: Coeficiente de arrastre en función de α para los 4 perfiles simétricos.	69
Imagen 43: Diseño del sistema de hidrofoil.	71
Imagen 44: Detalle del diseño del ala delantera.	74
Imagen 45: Ala delantera del sistema de hidrofoil.	74
Imagen 46: Análisis ala delantera: Tensiones de Von Mises.	75
Imagen 47: Análisis ala delantera: Desplazamiento máximo.	75
Imagen 48: Análisis ala delantera: Factor de seguridad.	76

Imagen 49: Detalle del diseño del ala trasera.	76
Imagen 50: Ala trasera del sistema de hidrofoil.	77
Imagen 51: Análisis ala trasera: Tensiones de Von Mises.	78
Imagen 52: Análisis ala trasera: Desplazamiento máximo.	78
Imagen 53: Análisis ala trasera: Factor de seguridad.	79
Imagen 54: Fuselaje del sistema de hidrofoil.	80
Imagen 55: Análisis fuselaje: Tensiones de Von Mises.	80
Imagen 56: Análisis fuselaje: Desplazamiento máximo.	81
Imagen 57: Desplazamiento máximo del fuselaje a escala real.	81
Imagen 58: Análisis fuselaje: Factor de seguridad.	82
Imagen 59: Mástil.	82
Imagen 60: Análisis mástil: Tensiones de Von Mises.	83
Imagen 61: Análisis mástil: Desplazamiento máximo.	83
Imagen 62: Desplazamiento máximo del mástil a escala real.	84
Imagen 63: Análisis mástil: Factor de seguridad.	84
Imagen 64: Script de Matlab.	96

Índice de tablas

Tabla 1: Medidas de los mástiles registrados en la IKA.	35
Tabla 2: Medidas de las alas delanteras registradas en la IKA.....	35
Tabla 3: Medidas de las alas traseras registradas en la IKA.....	36
Tabla 4: Medidas de los fuselajes registrados en la IKA.....	37
Tabla 5: Esbeltez de las alas delanteras de los modelos IKA.....	38
Tabla 6: Variables hipótesis.....	41
Tabla 7: Acrónimos variables.....	43
Tabla 8: Acrónimos variables.....	44
Tabla 9: Acrónimos variables.....	45
Tabla 10: Acrónimos variables.....	46
Tabla 11: Acrónimos variables.....	47
Tabla 12: Resultados cálculo de fuerzas.....	48
Tabla 13: Perfiles hidrodinámicos a estudiar.....	58
Tabla 14: Propiedades del agua de mar para una salinidad del 35% [14].	60
Tabla 15: Simetría perfiles hidrodinámicos.....	68
Tabla 7: Resumen de costes de fabricación.....	89
Tabla 8: Resumen costes de fabricación y precio de venta.....	90

1. Introducción

El hidrofoil es una nueva modalidad de navegación que se está haciendo cada vez más popular entre los deportes acuáticos, entre ellos el *kitesurf*.

Este sistema funciona bajo los mismos principios que las alas de un avión, pero en este caso, bajo el agua. El hidrofoil permite elevar la tabla o embarcación unos centímetros por encima del agua, de esta manera se disminuye la fricción con el agua, logrando velocidades de navegación mucho más elevadas con menores vientos.

El objetivo del presente documento es diseñar un hidrofoil para la práctica del *kitesurf* de competición, concretamente un hidrofoil capaz de competir en la categoría olímpica Fórmula Kite.



Imagen 1: Regata de la categoría Fórmula Kite.

2. Motivación

La motivación que lleva a la realización de este trabajo viene dada por el auge en el que se encuentra el deporte del *kitesurf* con foil actualmente. Como se ha comentado anteriormente, esta disciplina debutará como categoría olímpica en los Juegos Olímpicos de París 2024.

Desde que el Comité Olímpico tomó esa decisión, el *kitefoil* se ha popularizado entre navegantes y como consiguiente ha ofrecido un gran abanico de oportunidades para diseñadores, fabricantes y distribuidores de equipos de navegación. En la última década, los diseños de los hidrofoils y la tecnología empleada en su fabricación han evolucionado mucho ya que se busca maximizar las prestaciones de estos sistemas para optimizar la navegación.

La Asociación Internacional de *Kiteboarding* permite a los fabricantes de hidrofoil registrar sus hidrofoils para poder participar en las regatas de Fórmula Kite. Actualmente hay 10 modelos diferentes de distintos fabricantes que son considerados aptos para los Juegos Olímpicos de 2024. Todos los diseñadores y fabricantes intentan crear el mejor sistema de hidrofoil para que sus modelos ganen las regatas.

La motivación de este trabajo es conseguir diseñar un hidrofoil que sea apto para navegar en esta categoría y que tenga mejores prestaciones que los que hay actualmente y así poder destacar en las regatas de Fórmula Kite.

Además del *kitesurf*, la tendencia actual en el mundo de la vela de competición es introducir el foil en todas las categorías. Por lo tanto, la ingeniería aplicada al hidrofoil tiene mucho futuro en el mercado y por ello se considera interesante la realización de este proyecto.

3. Objetivos del proyecto

Los objetivos de este proyecto son los siguientes:

- Diseñar un hidrofoil adecuado para navegar en *kitesurf* y competir en la categoría Fórmula Kite. Además, se pretende que el hidrofoil diseñado consiga mantener velocidades más altas que los hidrofoils de esta categoría disponibles actualmente en el mercado.
- Realizar una propuesta de fabricación del hidrofoil y un estudio económico de todo el proyecto. Se pretende identificar los materiales y métodos de fabricación adecuados para mejorar las prestaciones de los hidrofoils actuales que se utilizan en las regatas de Fórmula Kite y fabricar un hidrofoil premium para esta categoría.
- Contribuir en los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por la Organización de las Naciones Unidas.

4. Metodología de Trabajo

La primera parte del proyecto consiste en realizar una descripción del *kitesurf* con hidrofoil, su funcionamiento y componentes. También se comentará la historia de los hidrofoils, sus orígenes y evolución.

Seguidamente, se realizará un estudio sobre los hidrofoils que hay actualmente en el mercado disponibles para competir en la categoría Fórmula Kite. Se estudiarán sus características, sus virtudes y sus aspectos a mejorar. A partir de este estudio se obtendrán los requisitos básicos y los objetivos para el nuevo diseño.

A continuación, se realizará el diseño del hidrofoil mediante SolidWorks y la simulación del modelo para comprobar que cumple con las especificaciones necesarias para su uso. Se evaluarán varios perfiles hidrodinámicos con el fin de conseguir el más adecuado para los objetivos del proyecto. Una vez decidido el modelo se desarrollará la documentación técnica correspondiente.

Por último, se realizará un estudio económico del proyecto, así como una propuesta de fabricación con sus respectivos costes.

A continuación, se muestra el cronograma previsto para la realización de cada una de las tareas:

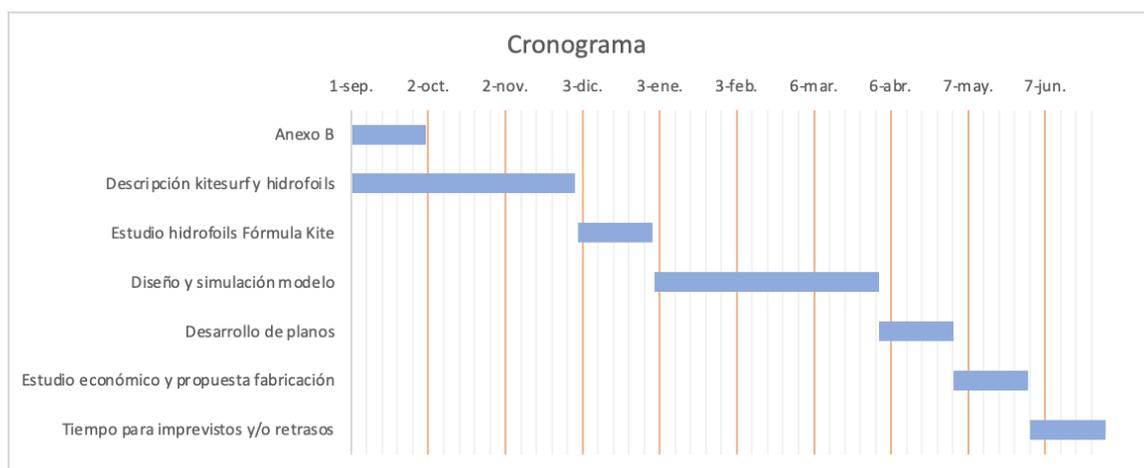


Imagen 2: Cronograma del proyecto.

5. Recursos a emplear

Principalmente se ha recurrido a internet para la búsqueda de información necesaria para el desarrollo de este trabajo. Se han consultado artículos, páginas web y otros trabajos de universidad que están referenciados al final de este documento.

Para el diseño del hidrofoil se utilizará la herramienta Solid Works, disponible en los ordenadores de la universidad. Para la simulación del diseño se ha previsto el uso de Ansys, una herramienta de análisis y simulación por elementos finitos.

Finalmente, se hará uso de las herramientas de Microsoft Office como Word, para la redacción de la memoria y Excel para el análisis de datos.

6. Estado de la cuestión

6.1 Estudio del kitesurf

6.1.1 Historia del kitesurf [1]

El *kitesurf* es un deporte acuático en el que el deportista se desliza sobre la superficie del mar encima de una tabla. El *kiter* consigue desplazarse gracias al manejo de una cometa que le permite aprovechar la fuerza del viento y propulsarse.

En el año 549 a.C. los filósofos chinos Mozi y Lu Ban volaron las primeras cometas a modo recreativo. Eran de papel, con forma rectangular y solían decorarse con dibujos de pájaros y dragones.



Imagen 3: Representación de los primeros usos de una cometa en China.

En 1800, el inglés George Pocock utilizó por primera vez cometas para propulsar barcos y carros consiguiendo que remontaran en la dirección del viento.

En 1977 el holandés Gijsbertus Adrianus Panhuisse, patentó el *kitesurf* como deporte acuático, sin embargo, no tuvo mucho éxito y no fue hasta el 1990 cuando se popularizó el uso de las cometas. Además, en 1984, los hermanos franceses Bruno y Dominique Legaignoux patentaron una cometa hinchable pensada para la práctica del *kitesurf*.

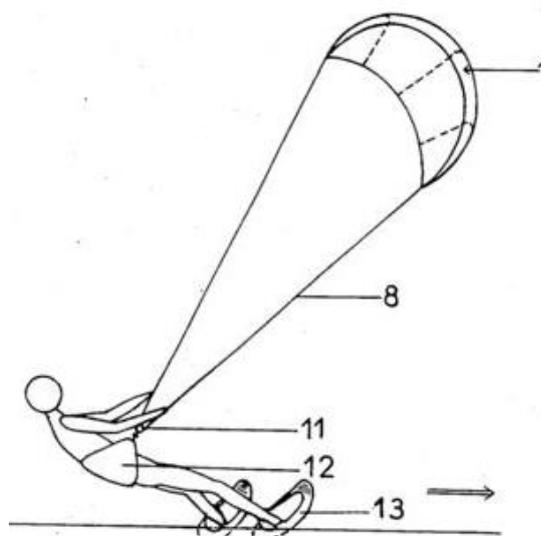


Imagen 4: Patente de los hermanos Legaignoux.

Bill Roeseler y su hijo Cory Roeseler diseñaron un sistema formado por una cometa tipo delta manejada a través de dos líneas montadas en una barra. Este diseño lo patentaron con el nombre de "KiteSki" y en 1994 estaba disponible en el mercado. Finalmente fue Cory Roeseler quien pasó de utilizar los dos skis en sus diseños a una sola tabla parecida a las de surf.

A partir de entonces los diseñadores de las cometas empezaron a mejorar sus diseños y el *kitesurf* se empezó a popularizar. Especialmente en la isla de Maui, Hawai, donde se llevó a cabo la primera competición de *kitesurf* en septiembre de 1998.

6.1.2 Componentes del kitesurf

El *kitesurf* es considerado un deporte de riesgo, por eso es muy importante disponer de un material adecuado y de calidad. Además, es muy importante conocer los sistemas de seguridad, asegurarse que están bien montados y en perfecto estado.

Un equipo básico de *kitesurf* consta de los siguientes elementos [2]:

6.1.2.1 Cometa

La cometa o *kite* es el elemento principal del *kitesurf*. Es la encargada de generar la potencia necesaria para propulsar al navegante y permitir que este se deslice sobre el mar encima de la tabla.

Hay muchos tipos de cometas y de diferentes tamaños. Según las condiciones meteorológicas y las características físicas del *rider* será más adecuado el uso de una

cometa o de otra. Las cometas más pequeñas generan menos potencia y por tanto su uso es más adecuado para días de mucho viento y *kitiers* más ligeros. Las cometas grandes son más apropiadas para días de poco viento y para *kitiers* más pesados.

Tradicionalmente las cometas utilizadas en la práctica del *kitesurf* presentan un borde de ataque y unas costillas hinchables. De esta manera se conserva la forma de la cometa y aumenta su flotabilidad. Las cometas hinchables son las más comunes y las más económicas. No obstante, presentan el riesgo de que una costilla o el borde de ataque se pinchen y la cometa pierda su forma dificultando así la navegación.



Imagen 5: Cometa hinchable para kitesurf.

Sin embargo, para la práctica del *kitesurf* con foil se utilizan las cometas tipo parapente. Éstas no presentan ni costillas ni borde de ataque hinchable. En su lugar tienen una serie de celdas intercomunicadas que se hinchan con el viento durante la navegación. Estas cometas suelen pesar menos por lo que son más fáciles de volar con poco viento y además no hay riesgo de pinchazos. Por otro lado, presentan menos flotabilidad que las cometas hinchables.

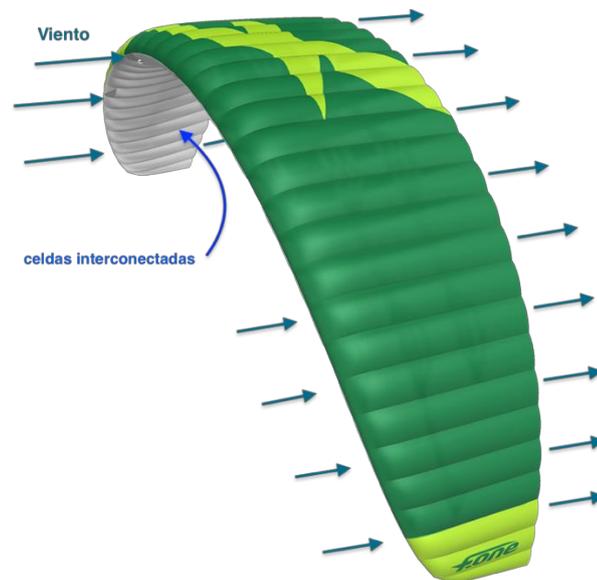


Imagen 6: Cometa parapente para kitesurf con foil.

6.1.2.2 Barra de dirección

La barra de dirección sirve para que el *kiter* controle y dirija la cometa. La barra es cilíndrica y está diseñada para que se pueda agarrar a ella cómodamente. Está conectada directamente a la cometa a través de las líneas y también al navegante mediante el arnés. El *kiter* sujeta la barra con las manos y variando la posición de esta es capaz de modificar la forma de la cometa y dirigirla hacia un lado determinado o darle más o menos potencia.

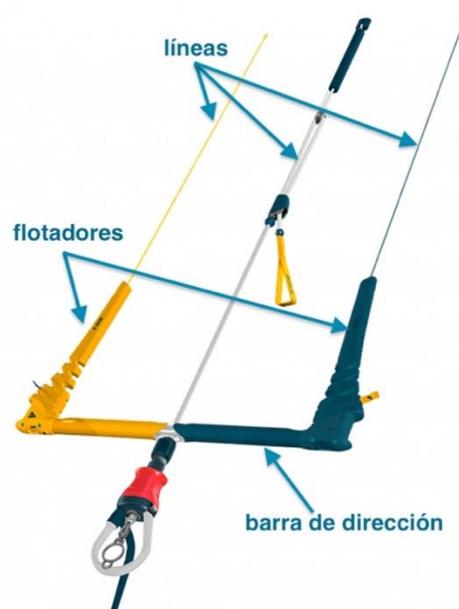


Imagen 7: Barra de dirección y líneas kitesurf.

6.1.2.3 Líneas

Las líneas unen la barra de dirección con el *kite* y se encargan de transmitir los movimientos que el *kiter* realiza con la barra a la cometa. Actualmente los sistemas suelen contar con cuatro líneas. Dos centrales que se encargan de transmitir la potencia y dos líneas exteriores que se encargan de dirigir la cometa.

Cuando el *kiter* acerca la barra a su pecho, tira de las líneas exteriores y hace que la cometa aumente su ángulo de ataque con respecto al viento, aumentando la fuerza producida y, por tanto, impulsando con más fuerza al regatista. Al separar la barra del regatista los extremos de la cometa se alejan y esta disminuye su ángulo de ataque con respecto al viento. De esta manera el viento se escapa más fácilmente del *kite* y, por tanto, la cometa no tira con tanta fuerza.

Las líneas de *kitesurf* son cabos de entre 1 y 2 mm de diámetro y entre 20 y 27 metros de longitud de un material llamado *dyneema* que es un polietileno de alta densidad. Hay que tener en cuenta que estas líneas soportan grandes tensiones y podrían provocar cortes graves si no se utilizan adecuadamente. En algunos casos, es más cómodo para el *kiter* dirigir la cometa directamente a través de una línea y no desde la barra. Para evitar accidentes, la parte inferior de las líneas (próxima a la barra) se cubre con unos flotadores y de esta manera se protegen las manos del navegante.

6.1.2.4 Tabla

La tabla es la encargada de soportar el peso del navegante sobre el agua y permite que este se mantenga de pie sobre ella. Puede llevar unos *foot straps* para colocar los pies y que esta sea más manejable. El *kiter* puede cambiar el sentido de la tabla ejerciendo presión sobre sus talones o los dedos de los pies y así inclinando la tabla.

Las tablas son elementos rectangulares y prácticamente planos que por si solas deslizarían por el agua en cualquier dirección sin ningún tipo de control. Para evitarlo y posibilitar la navegación, las tablas llevan cuatro quillas que se ofrecen estabilidad direccional y permiten que el *kiter* dirija la tabla y navegue en la dirección deseada.

La tabla más común es la llamada Twin Tip. Es una tabla bidireccional y por tanto se navegará de la misma manera en las dos direcciones sin necesidad de modificar la posición de los pies en ningún momento.



Imagen 8: Tabla de kitesurf Twin Tip.

Por otro lado, están las tablas direccionales que tienen proa y popa y por tanto hay que intercambiar la posición de los pies al cambiar la dirección de navegación. No suelen llevar *foot straps* para facilitar el cambio de posición de los pies y por ello este tipo de tablas también se llaman *strapless*. También se suelen llamar *surfboards* ya que las tablas direccionales se utilizan habitualmente para coger olas y se parecen a las tablas de surf.



Imagen 9: Tabla de kitesurf direccional.

Por último, están las tablas foil que son las que se estudiarán en este proyecto. Estas tablas son direccionales y llevan un sistema de hidrofoil acoplado en su parte inferior. No llevan quillas y pueden llevar o no *foot straps*. La navegación con estas tablas es muy distinta a la navegación con las tablas convencionales.



Imagen 10: Tabla de kite foil.

6.1.2.5 Arnés

El arnés es otro componente esencial para la práctica del *kitesurf*. Se coloca alrededor de la cintura del *rider* y además se une a la barra de dirección. De esta manera la potencia generada por la cometa se transmite directamente al navegante y permite levantarlo del agua y navegar. Además, el arnés mantiene unidos a la cometa y al navegante y evita que la cometa se aleje del *rider* después de una caída y éste no tenga forma de recuperarla.

6.1.2.6 Sistema de seguridad

Es habitual que, durante la práctica de *kitesurf*, el navegante sufra caídas al agua, o encuentros con otros *kitesurfistas*. Es posible que estos eventos supongan el descontrol de la cometa y que en determinadas situaciones sea necesario desprenderse del *kite* para no hacerse daño o hacer daño a otros. Por eso, es importante conocer los sistemas de seguridad del *kitesurf* y ser capaces de utilizarlo correctamente en caso de necesidad. El sistema de seguridad consta de los tres elementos siguientes:

1. Barra. El primer paso que se debe realizar en caso de descontrol es soltar completamente la barra de dirección. Esta se alejará automáticamente del navegante y la tensión de las líneas exteriores disminuirá. De esta manera la cometa se aplanará, perderá su potencia y dejará de tirar de nosotros.
2. *Chicken loop*. Este elemento de seguridad es el encargado de unir la barra al arnés del regatista. Si se acciona el *chicken loop* tanto este como la barra y tres de las líneas se dirigen hacia el *kite*. De esta manera la cometa perderá totalmente su presión y caerá lentamente al agua. La cuarta línea seguirá manteniendo la unión entre el *kiter* y la cometa.
3. *Leash*. El último elemento de seguridad es el *leash*. Si, una vez liberado el *chicken loop*, la cometa sigue tirando del *kiter* y este sigue en una situación de descontrol, deberá desconectar el *leash*. De esta manera se libera la última línea y el *kiter* se desprendería de la cometa totalmente.

En febrero del 2020, entró en vigor la norma ISO 21853:2020 que establece unos requisitos estándar de estos sistemas de seguridad. Los fabricantes deberán realizar una serie de pruebas a sus productos y estos deberán cumplir ciertos requisitos para incorporar una etiqueta que declare que cumplen esta norma. De esta manera, los deportistas podrán seleccionar su equipamiento con la certeza de que éste garantiza unos estándares mínimos de seguridad.

6.2 Estudio hidrofoil

6.2.1 Historia del hidrofoil [3] [4] [5] [6]

Los hidrofoils se han utilizado en embarcaciones de navegación, tanto a vela como a motor, desde hace más de 100 años. Desde entonces, han ido evolucionando a la par que la tecnología y su uso se ha ido extendiendo. Actualmente existen muchos tipos de

hidrofoil y su utilización ha cambiado totalmente la filosofía de navegación en las embarcaciones.

La primera aplicación de un hidrofoil en una embarcación fue llevada a cabo en 1869, mucho antes de que volase el primer avión (1903), por el parisino Emmanuel Denis Farcot. Adaptando a los costados y al fondo de una embarcación una serie de planos inclinados o piezas en forma de cuña conseguía que, al impulsar la embarcación hacia delante, esta se elevara en el agua y se redujese su calado.

Más adelante, en 1906, el ingeniero italiano Enrico Forlanini diseñó y construyó la una embarcación con hidrofoil de tipo ‘Escalera’. Consistía en varios puntales contruidos en la parte inferior de la embarcación y unidos entre ellos horizontalmente por una serie de alas. A medida que la velocidad aumentaba, las alas superiores salían del agua y la embarcación se elevaba sustentándose sobre las alas inferiores.

Una hélice convencional tenía el problema de que, al elevarse la embarcación, saldría del agua y perdería su funcionalidad. Es por eso que Forlanini utilizó dos hélices de aire contra rotantes. Con un motor de 60 cv que impulsaba dichas hélices, consiguió alcanzar velocidades de hasta 36,93 kn (68,39 km/h).



Imagen 11: Hidrofoil de Enrico Forlanini navegando en el Lago Mayor, Italia.

En 1919, Alexander Graham Bell y Casey Baldwin desarrollaron una embarcación llamada *Hydrodrome 4* (HD-4). Estaba basada en los diseños de Forlanini y logró alcanzar una velocidad de 60 nudos estableciendo así el récord de velocidad de una embarcación de hidrofoil. Este récord no fue superado hasta 40 años más tarde.

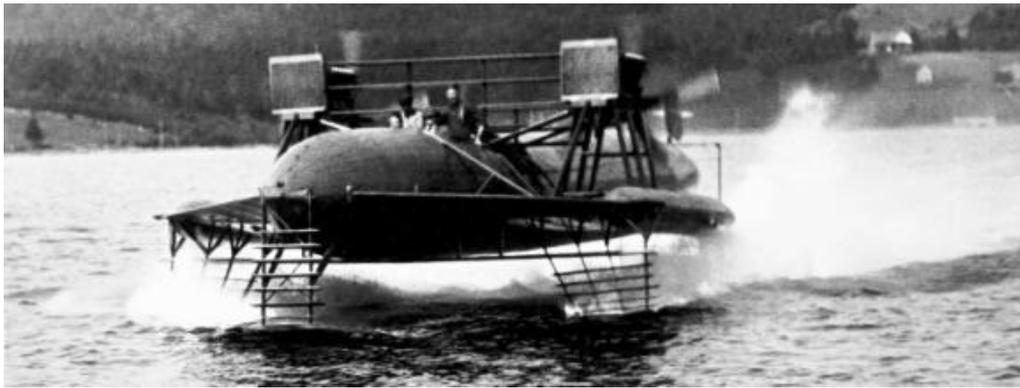


Imagen 12: Hydrodrome 4.

En la década de 1960, muchos países desarrollaron su propia versión de hidrofoil para sus ejércitos. También se construyeron las primeras versiones comerciales para pasajeros.

Hasta entonces, los hidrofoils se habían utilizado únicamente para el transporte marítimo. Fue en 1960 cuando el ingeniero aeronáutico Walter Woodward introdujo esta nueva tecnología en el mundo deportivo creando el primer esquí acuático con hidrofoil.

Desde entonces, los hidrofoils han ido ganando terreno rápidamente en el mundo deportivo. Muchas categorías presentan una modalidad con hidrofoil: *surf*, *windsurf*, *kitesurf*, *wakeboards*, *padel surf*, *catamaranes*, *monocascos*, entre otras.

El hidrofoil transforma la manera de navegar en cada una de estas categorías, permitiendo navegar en condiciones meteorológicas diferentes y dando al navegante experiencias y sensaciones nuevas encima de la tabla o embarcación.

6.2.2 Aplicación del hidrofoil al kitesurf [7]

Como en muchos otros deportes acuáticos, el *kitesurf* también ha incorporado el uso del hidrofoil. A principios de los años 2000, el hidrofoil se había probado ya en deportes como el *windsurf*, el esquí acuático o el *paddle surf*, pero todavía nadie lo había hecho con un *kitesurf*. El surfista Mango Carafino instaló por primera vez un hidrofoil en una tabla de *kitesurf* y consiguió navegar.

Desde entonces, la práctica del *kitesurf* con foil no ha cesado. Se han desarrollado nuevos diseños y tecnologías y hoy en día existen varias modalidades de *kitesurf* con foil muy populares. En los Juegos Olímpicos de París 2024 el *kitesurf* con foil debutará por primera vez como disciplina olímpica en formato de regata.

6.2.3 Componentes de un hidrofoil [8]

El hidrofoil está formado por una serie de componentes que permiten su correcto funcionamiento y la debida fijación de todo el sistema a la embarcación o tabla.

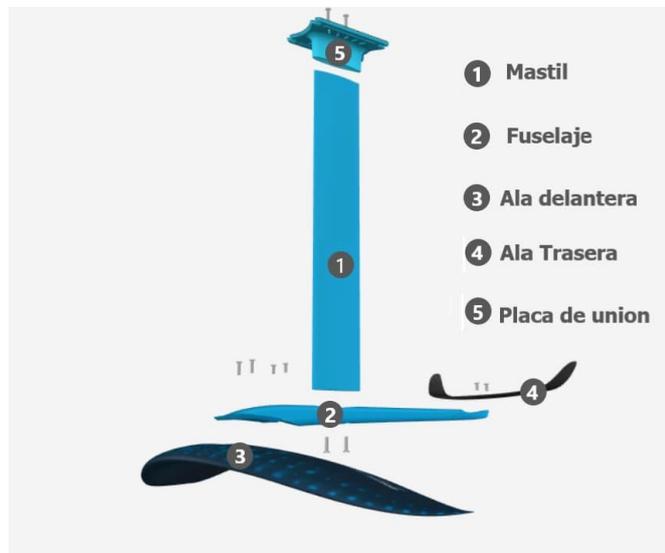


Imagen 13: Partes de un hidrofoil.

6.2.3.1 Mástil

El mástil es el elemento vertical que se encarga de unir el fuselaje con la tabla o embarcación. Su perfil debe ser muy hidrodinámico para ofrecer la menor resistencia posible al avanzar en el fluido.

Además, es el elemento responsable de resistir las fuerzas horizontales del conjunto y evitar la deriva de la embarcación, por lo que el perfil ha de ser el adecuado para soportar dichos esfuerzos.

La longitud del mástil determinará la altura máxima a la que podrá navegar la embarcación.

Un mástil corto dará más estabilidad a la tabla ya que la tabla estará más cerca del hidrofoil y, por tanto, más cerca del agua. Sin embargo, tendrá menor recorrido por lo que el conjunto saldrá con más facilidad del agua. Además, los mástiles cortos son más adecuados para los principantes ya que la tabla, y en consecuencia el navegante, están a menor altura de la superficie del mar. Por tanto, si el rider sufre una caída esta es más leve y menos peligrosa que si el sistema de foil llevara un mástil mucho más largo.

Un mástil largo comporta menos estabilidad, pero más recorrido y, por tanto, el hidrofoil tardará más en salir del agua. Si el hidrofoil sale del agua pierde toda la sustentación por lo que es probable que el navegante pierda la estabilidad y se caiga.

6.2.3.2 *Fuselaje*

El fuselaje es el elemento encargado de unir el mástil con las alas delantera y trasera y determina la distancia que hay entre ellas.

Un fuselaje largo comporta una mayor estabilidad, sin embargo, reduce la maniobrabilidad del hidrofoil y la estabilidad frente al cabeceo. Un fuselaje corto presenta más estabilidad frente al cabeceo y más maniobrabilidad, por lo que permitirá realizar giros más radicales.

6.2.3.3 *Ala delantera*

El ala delantera es el elemento encargado de sustentar todo el conjunto y sus dimensiones determinarán el comportamiento del hidrofoil.

Un ala con mayor superficie presentará mayor fuerza de sustentación, por lo que permitirá sustentar mayores cargas y presentará mayor estabilidad. Sin embargo, un ala con mucho volumen presentará mayor fuerza de arrastre por lo que hará que el hidrofoil sea más lento.

Cuanto menor sea la superficie del ala delantera, la sustentación será menor, por lo que se necesitará de más velocidad para levantar el hidrofoil. Por otro lado, presentará menor fuerza de arrastre y podrá alcanzar velocidades mucho mayores que un ala de mayor volumen.

Para decidir la superficie adecuada para el ala de un hidrofoil se estudiarán las fuerzas de sustentación y arrastre generadas tal y como se explica más adelante en el apartado 8.2.

6.2.3.4 *Ala trasera*

El ala trasera del hidrofoil, también llamada estabilizador, es imprescindible para la navegación.

Su función es encargarse de mantener el hidrofoil en las condiciones óptimas de navegación. Debe estar diseñada para que, cuando el hidrofoil está navegando en las condiciones óptimas, su ángulo de ataque sea de 0° y por tanto no produzca sustentación.

De esta manera, mantendrá la posición de navegación ideal y, además, realizará la menor fuerza de arrastre posible.

Por otro lado, cuando la posición del hidrofoil no sea la adecuada, el ala trasera debería experimentar una sustentación en la dirección adecuada para corregir el ángulo de ataque de todo el sistema y llevarlo de nuevo a su posición ideal de navegación.

Un estabilizador más grande proporcionará mayor estabilidad, pero reducirá la maniobrabilidad y aumentará el arrastre del conjunto. Un estabilizador de dimensiones menores permitirá navegar a mayores velocidades, aunque supondrá menor estabilidad y, por tanto, exigirá más precisión y técnica por parte del deportista.

6.2.3.5 *Placa de unión*

Algunos sistemas constan de una placa de unión que sirve para fijar el conjunto del hidrofoil a la tabla o embarcación.

Sin embargo, existen otras alternativas para realizar esta sujeción. Las tablas de Fórmula Kite suelen llevar el mástil del hidrofoil directamente encajado en una ranura de la tabla y asegurado con unos tornillos, por lo que no es necesaria la placa de unión.



Imagen 14: Hidrofoil sin placa de unión.

6.3 Estudio hidrofoils Fórmula Kite [9]

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo de este trabajo es el diseño de un hidrofoil rápido que pueda competir en las regatas de Fórmula Kite. Para ello se hará un estudio de los sistemas ya existentes para tener un punto de referencia a la hora de empezar el diseño.

Actualmente existen muchos diseñadores y fabricantes de cometas y tablas para la práctica del *Kitefoil*. En este apartado se han analizado las características de los diseños de hidrofoils existentes elegibles para las competiciones en Fórmula Kite para poder analizar los puntos en común y las diferencias entre ellos y así poder tener una base de diseño para la nueva propuesta de este proyecto.

Este estudio se ha realizado para cada componente del conjunto: mástiles, alas delanteras, alas traseras y fuselajes. Para poder competir en las regatas de esta categoría, todos los diseños han de cumplir con los requisitos establecidos por la Asociación Internacional de *Kiteboarding* (IKA, *International Kiteboarding Association*, en inglés).

6.3.1 Mástiles

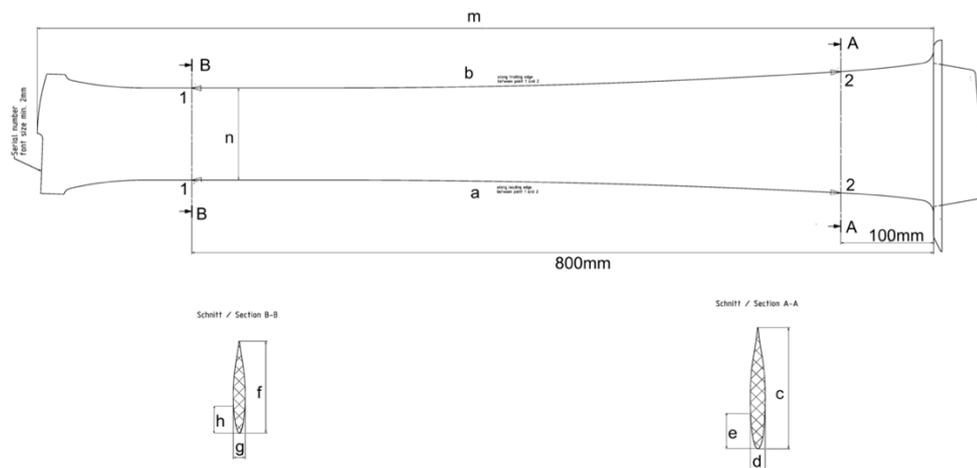


Imagen 15: Referencias para las medidas de los mástiles.

	Marca	Modelo	Longitud (mm)	Cuerda min. (mm)	Peso(gr)	Año	Enlace a hoja de medidas
1	Airush-Starboard	Gold	1110.7	109.9	2300	2020	click here
2	Chubanga	V3	1071.5	107.6	2040	2020	click here
3	Duotone	Daytona DOS	1098	102.5	1935	2020	click here
4	Enata	MG	1118	120	2050*	2017	click here
5	Flying Sardine	Race Mast 106	1075	114	1740	2020	click here
6	Flying Sardine	Race Mast 110	1114	114	1785	2020	click here
7	KFA	Mako 4	1118	120	2050*	2020	click here
8	Levitaz	R5 V1	1127	112	1800	2020	-
9	Levitaz	R5 V2	1127	112	1800	2020	click here
10	Moses/SABFoil	M-106	1060	113.5	1870	2020	click here
11	Taaroa	Sword 108	1082	117.5	2115	2020	click here

*El peso incluye el fuselaje.

Tabla 1: Medidas de los mástiles registrados en la IKA.

6.3.2 Alas delanteras

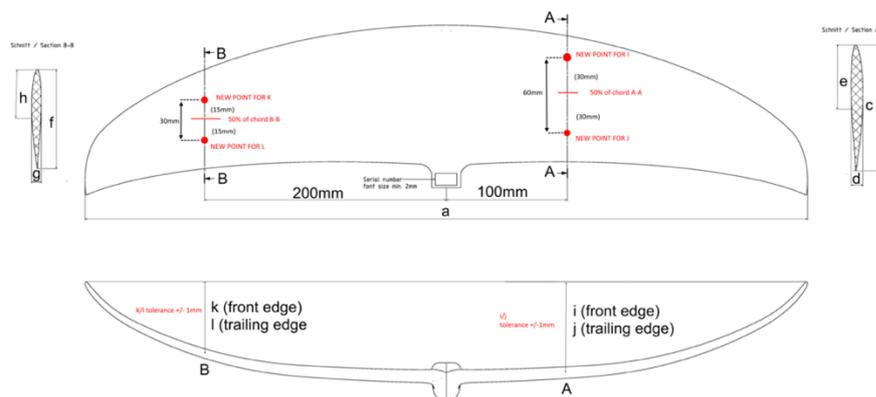


Imagen 16: Referencias para las medidas de las alas delanteras.

	Marca	Modelo	Envergadura (mm)	Peso (gr)	Año	Enlace a hoja de medidas
1	Airush-Starboard	Gold	700	1020*	2020	click here
2	Chubanga	V3	702	1040*	2020	click here
3	Duotone	Daytona DOS	661	1095*	2020	click here
4	Enata	Katana	680	932*	2020	click here
5	Flying Sardine	Haze	651	864*	2020	click here
6	Flying Sardine	Flow	684	883*	2020	click here
7	KFA	Mako 4	678	1031*	2020	click here
8	Levitaz	R5-S	691	1270**	2020	click here
9	Levitaz	R5	725	1240**	2020	click here
10	Moses/SABFoil	W-670	670.5	530	2020	click here
11	Taaroa	Sword 68 KF	680	460	2020	click here

* El peso incluye ala delantera, ala trasera y fuselaje.

** El peso incluye ala delantera y fuselaje.

Tabla 2: Medidas de las alas delanteras registradas en la IKA.

6.3.3 Alas traseras

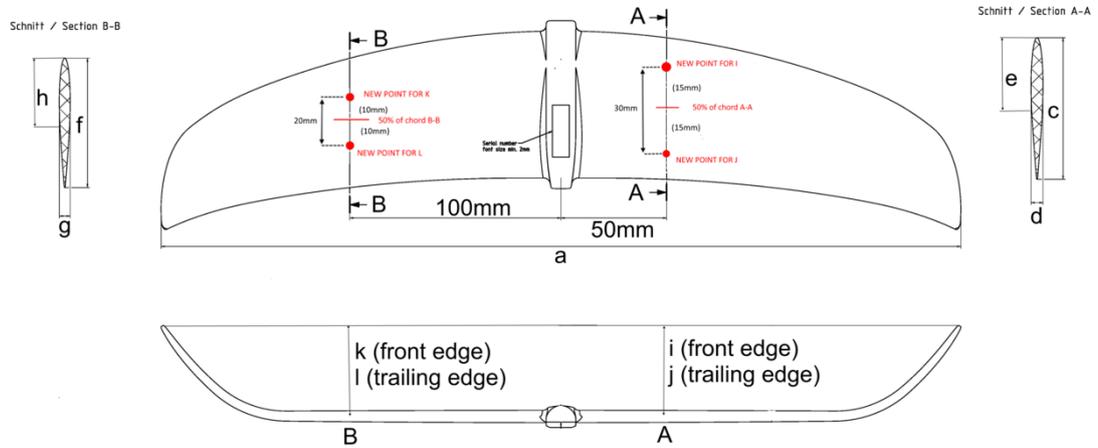


Imagen 17: Referencias para las medidas de las alas traseras.

	Marca	Modelo	Envergadura (mm)	Peso (gr)	Año	Enlace a hoja de medidas
1	Airush-Starboard	Gold	371	1020*	2020	click here
2	Chubanga	V3	382	1040*	2020	click here
3	Duotone	Daytona DOS	360	1095*	2020	click here
4	Enata	Katana	391	932*	2020	click here
5	Flying Sardine	Haze	389.4	864*	2020	click here
6	Flying Sardine	Flow	390	883*	2020	click here
7	KFA	Mako 4	363	1031*	2020	click here
8	Levitaz	R5	389	250	2020	click here
9	Levitaz	Bionic HW	380	111	2017	-
10	Moses/SABFoil	S-421	414	144	2020	click here
11	Moses/SABFoil	S-400	400	129	2020	click here
12	Taaroa	Sword 37 KF	372	103	2020	click here

*El peso incluye ala delantera, trasera y fuselaje.

Tabla 3: Medidas de las alas traseras registradas en la IKA.

6.3.4 Fuselajes

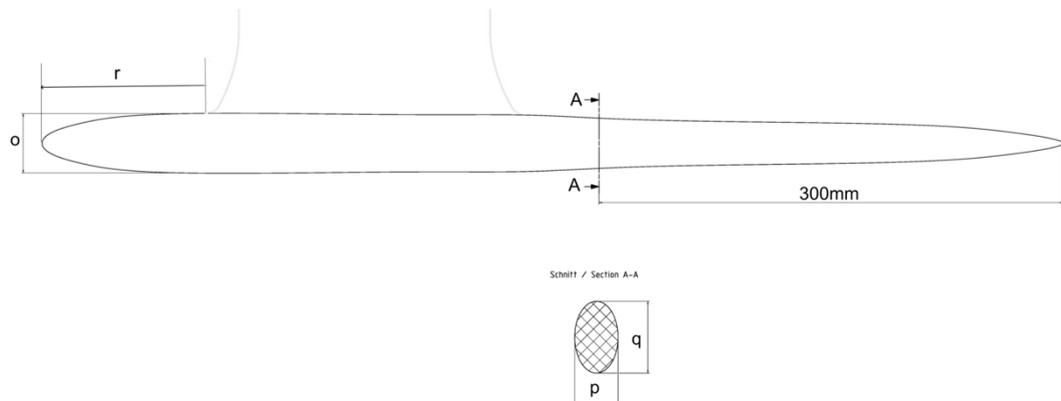


Imagen 18: Referencias para las medidas de los fuselajes.

	Marca	Modelo	Longitud (mm)	Diám. Máx. H (mm)	Diám. Máx. H (mm)	Peso (gr)	Año	Enlace a hoja de medidas
1	Airush-Starboard	Gold	575	28.6	32.2	1020*	2020	click here
2	Chubanga	V3	591	28.2	29.7	1040*	2020	click here
3	Duotone	Daytona DOS	571	29.5	33	1095*	2020	click here
4	Enata	Katana	585	24.9	30.8	932*	2020	click here
5	Flying Sardine	Haze	572	28	34.5	864*	2020	click here
6	Flying Sardine	Flow	578.6	28	34.3	883*	2020	click here
7	KFA	Mako 4	586.5	28.9	33.4	1031*	2020	click here
8	Levitaz	R5	575	25	25	1270**	2020	-
9	Levitaz	Bionic HW	556	20	20	1240**	2017	-
10	Moses/SABFoil	FKR-604	603.6	27	27	600	2020	click here
11	Taaroa	Sword 54 KF	540	26.7	25.8	764	2020	click here

*El peso incluye ala delantera, ala trasera y fuselaje.

** El peso incluye ala delantera y fuselaje.

Tabla 4: Medidas de los fuselajes registrados en la IKA.

6.3.5 Esbeltez

La esbeltez de las alas del hidrofoil es un factor muy determinante del comportamiento de este durante la navegación. Un ala con esbeltez muy grande tendrá menos sustentación pero podrá alcanzar mayores velocidades que un ala con poca esbeltez. Como el interés es diseñar un hidrofoil que maximice la velocidad nos interesa un sistema con alas que presenten una alta esbeltez.

La esbeltez es un parámetro adimensional y se calcula como la relación entre la envergadura del ala (a) y la cuerda en la sección máxima del ala (*chord*). Para calcular la cuerda de los perfiles a partir de los planos que facilita la IKA se ha realizado una relación de triángulos a partir de los parámetros c y f , que corresponden a la cuerda del perfil a una distancia de 100 y 200 mm de la línea de simetría del hidrofoil, respectivamente.

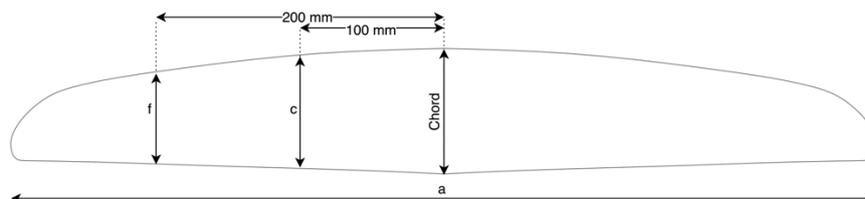


Imagen 19: Parámetros del ala delantera.

En la siguiente tabla se muestran los datos de dichos parámetros para cada perfil así como los datos calculados de la cuerda y de la esbeltez.

	Marca	Modelo	a [mm]	c [mm]	f [mm]	Cuerda [mm]	Esbeltez [mm]
1	Airush-Starboard	Gold	700,00	95,80	82,10	109,50	6,39
2	Chubanga	V3	702,00	99,34	79,40	119,28	5,89
3	Duotone	Daytona DOS	661,00	101,80	85,80	117,80	5,61
4	Enata	Katana	680,00	94,00	75,00	113,00	6,02
5	Flying Sardine	Haze	650,90	107,37	86,14	128,60	5,06
6	Flying Sardine	Flow	684,00	99,56	86,18	112,94	6,06
7	KFA	Mako 4	677,70	99,20	84,70	113,70	5,96
8	Levitaz	R5-S	690,60	90,40	72,50	108,30	6,38
9	Levitaz	R5	725,10	85,40	69,80	101,00	7,18
10	Levitaz	Bionic	641,00	101,00	-	110,00	5,83
11	Moses/SABFoil	W-670	670,50	107,00	88,00	126,00	5,32
12	Taaroa	Sword 68 KF	680,00	93,16	76,34	109,98	6,18

Tabla 5: Esbeltez de las alas delanteras de los modelos IKA.

Como se ha mencionado anteriormente, nos interesa escoger un perfil con alta esbeltez para maximizar la velocidad del sistema. Por tanto, para diseñar nuestro modelo utilizaremos los datos del hidrofoil Levitaz R5 ya que es el que presenta mayor esbeltez (7,18). Estos datos son: una envergadura de 725,10 mm y una cuerda de 101,00 mm.

Con estos datos se ha realizado un primer diseño en SolidWorks del área de sustentación del perfil del ala delantera. Como se puede ver en la siguiente imagen, el área de sustentación obtenido, A_D , es de 50347,56 mm² y la cuerda del perfil es de 97,64 mm.

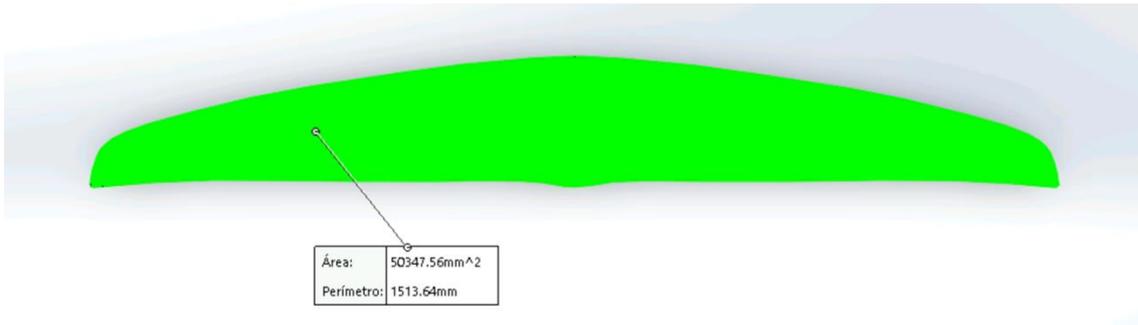


Imagen 20: Área del ala delantera.

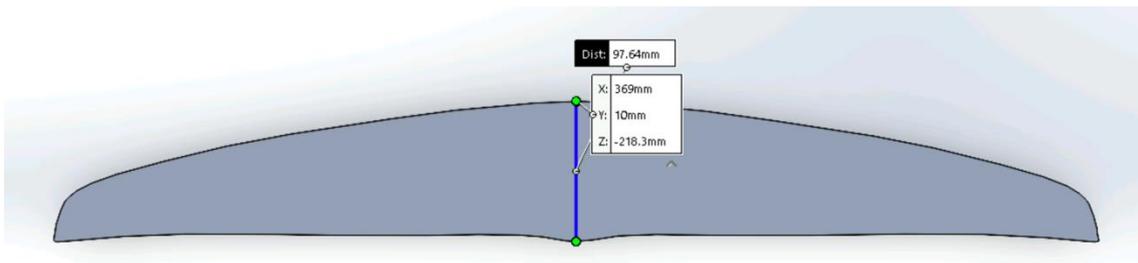


Imagen 21: Cuerda del ala delantera.

7. Cálculo de fuerzas en todo el sistema

7.1 Hipótesis

A continuación, se muestran los valores utilizados para los cálculos en la primera iteración. Como se ha mencionado anteriormente, la envergadura y la cuerda seleccionadas son las del modelo Levitaz R5. Para obtener el resto de las dimensiones y pesos de todo el sistema hidrofoil (alas delantera y trasera, mástil y fuselaje) se ha hecho la media de los valores de los sistemas que hay actualmente y que han sido aceptados por la IKA. Para los valores de longitud y peso de la tabla se han utilizado los de la tabla Race Pro Carbon de la marca F-One ya que es la más utilizada por los regatistas de Fórmula Kite.

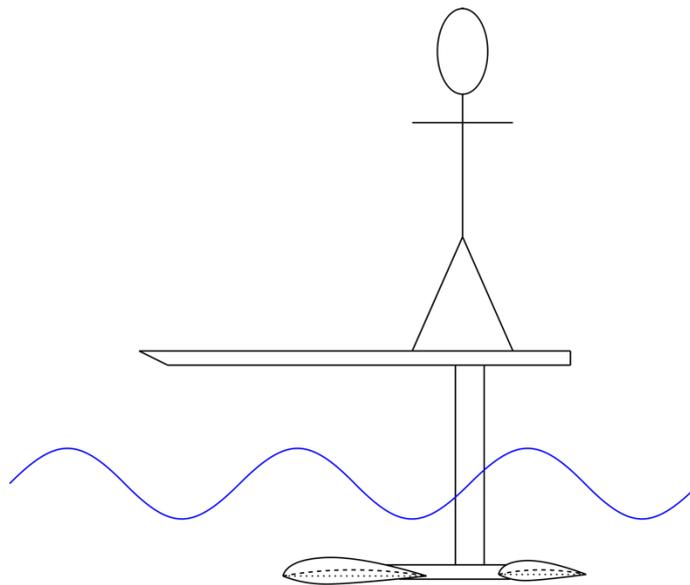


Imagen 22: Esquema del conjunto durante la navegación.

Se aproxima que la cometa transmite una fuerza de 250 N al arnés de *kiter* a través de las líneas. También se ha utilizado un ángulo de la cometa respecto al regatista de 45°. Por último, se ha considerado una velocidad de navegación media de 30 nudos.

Descripción	Variable	Valor	Unidades
Gravedad	g	9,81	m ² /s
Velocidad de navegación	v	30,00	nudos
Fuerza arrastre cometa	FAC	250,00	N
Ángulo cometa	ÁnguloCometa	45,00	°
Peso Navegante	PN	80,00	kg
Altura Regatista	AlturaRegatista	1,80	m
Peso Tabla (F one)	PT	3,05	kg
Longitud Tabla	LongTabla	1,40	m
Peso Mástil	PM	1,977	kg
Longitud Mástil	LongMástil	1,101	m
Peso Fuselaje	PF	0,682	kg
Longitud Fuselaje	LongFus	0,575	m
Peso Ala Delantera	PAD	0,520	kg
Peso Ala Trasera	PAT	0,15	kg

Tabla 6: Variables hipótesis.

Además, se considerarán una serie de hipótesis a la hora de realizar dichos cálculos:

1. La posición de los pies del navegante sobre la tabla será siempre la misma. Mantendrá los pies separados un metro entre ellos y el *foostrap* del pie trasero estará a la altura del mástil del hidrofoil.

$$\text{SeparaciónPies} = 1 \text{ metro}$$

2. El peso del navegante se repartirá por igual entre los dos pies.
3. La fuerza de tracción ejercida por la cometa recae sobre el arnés que lleva el navegante. El arnés va colocado en la cintura del navegante y su posición se aproxima como la mitad de la altura del regatista.
4. El mástil irá anclado en la parte trasera de la tabla a una distancia de 0,28 metros desde el final de la tabla. Esta distancia se ha aproximado como una quinta parte de la longitud de la tabla.

$$\text{PosMástilTabla} = \frac{\text{LongTabla}}{5} = 0,28 \text{ [m]}$$

5. El mástil irá anclado al fuselaje a una distancia de 0,1438 metros del principio del fuselaje. Esta distancia se ha aproximado como una cuarta parte de la longitud del fuselaje.

$$\text{PosMástilFuselaje} = \frac{\text{LongFus}}{4} = 0,1438 \text{ [m]}$$

Durante la navegación se asume que el mástil está sumergido hasta la mitad.

6. Se asume que ni el ala trasera, ni el fuselaje ni el mástil presentan arrastre ni sustentación.

La fuerza de arrastre de la cometa se puede descomponer de la siguiente manera en las tres coordenadas:

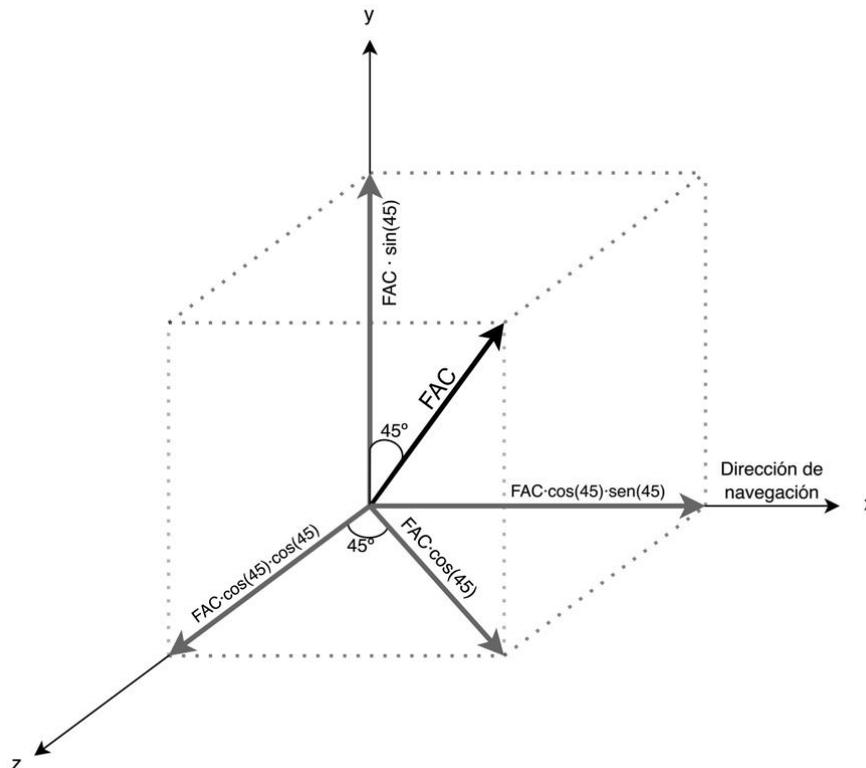


Imagen 23: Descomposición de la fuerza de arrastre de la cometa.

Los cálculos de las fuerzas del sistema se harán en el plano x-y, por lo que se tendrán en cuenta la componente de la fuerza de arrastre en la dirección de navegación y la componente vertical.

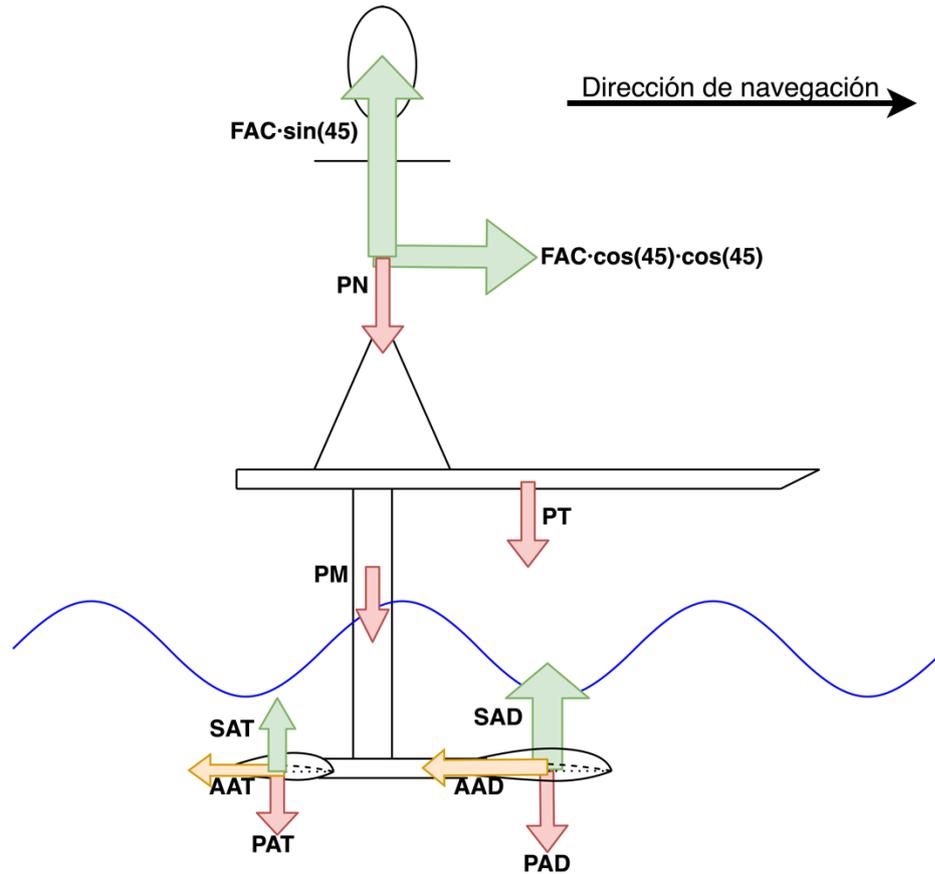


Imagen 24: Fuerzas que intervienen en todo el sistema durante la navegación.

Acrónimo	Descripción
PN	Peso navegante
PT	Peso tabla
PM	Peso mástil
PAD	Peso ala delantera
PAT	Peso ala trasera
FAC	Fuerza arrastre cometa
SAD	Sustentación ala delantera
SAT	Sustentación ala trasera
AAD	Arrastre ala delantera
AAT	Arrastre ala trasera
AP1	Arrastre Pie 1
AP2	Arrastre Pie 2
NP1	Normal Pie 1
NP2	Normal Pie 2

Tabla 7: Acrónimos variables.

7.2 Cálculos de fuerzas

Se ha estudiado las fuerzas que sufren cada elemento del conjunto.

7.2.1 Fuerzas sobre el navegante

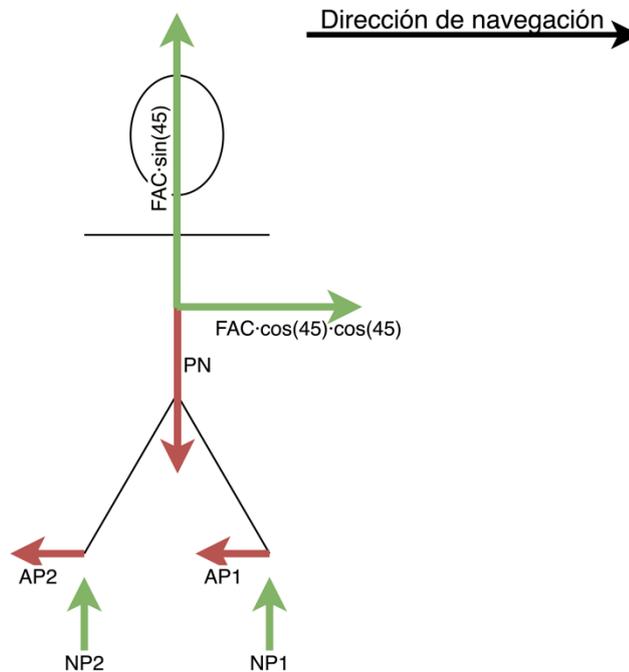


Imagen 25: Fuerzas que intervienen en el kiter durante la navegación.

Variable	Descripción
FAC	Fuerza Arrastre Cometa
PN	Peso Navegante
AP1	Arrastre Pie 1
AP2	Arrastre Pie 2
NP1	Normal Pie 1
NP2	Normal Pie 2

Tabla 8: Acrónimos variables.

Sumatorio de fuerzas:

$$FAC \cdot \cos 45 \cdot \cos 45 = AP1 + AP2$$

$$FAC \cdot \sin 45 + NP1 + NP2 = PN$$

Sumatorio de momentos en pie 2:

$$\begin{aligned}
 & FAC \cdot \cos 45 \cdot \cos 45 \cdot \frac{AlturaRegatista}{2} + PN \cdot \frac{DistanciaPies}{2} \\
 & = FAC \cdot \sin 45 \cdot \frac{DistanciaPies}{2} + NP1 \cdot DistanciaPies
 \end{aligned}$$

7.2.2 Fuerzas sobre la tabla

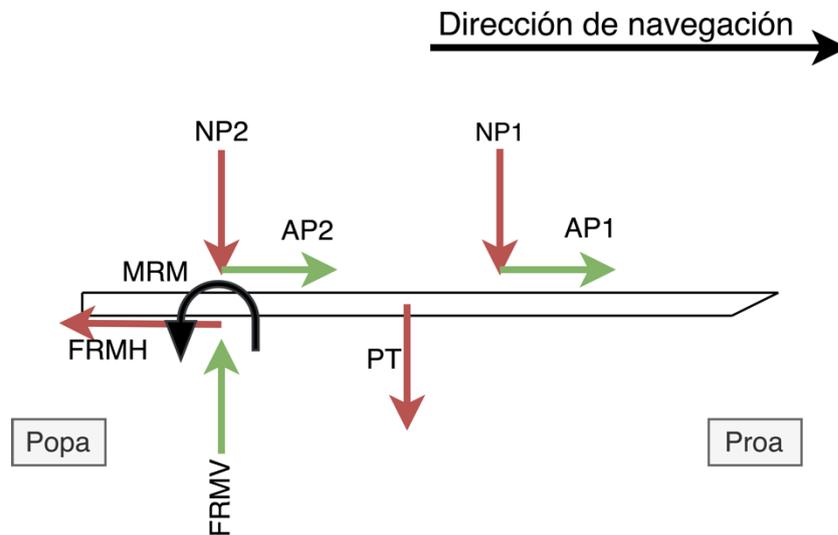


Imagen 26: Fuerzas que intervienen en la tabla durante la navegación.

Variable	Descripción
NP1	Normal Pie 1
NP2	Normal Pie 2
AP1	Arrastre Pie 1
AP2	Arrastre Pie 2
PT	Peso tabla
FRMH	Fuerza Reacción Mástil Horizontal
FRMV	Fuerza Reacción Mástil Vertical
MRM	Momento Reacción Mástil

Tabla 9: Acrónimos variables.

Sumatorio de fuerzas

$$NP1 + NP2 + PT = FRMV$$

$$AP1 + AP2 = FRMH$$

Sumatorio de momentos en la popa de la tabla

$$\begin{aligned}
 &MRM + FRMV \cdot PosMastilTabla \\
 &= NP2 \cdot PosMastilTabla + NP1 \\
 &\cdot (SeparaciónPies + PosMastilTabla) + PT \\
 &\cdot \frac{LongTabla}{2}
 \end{aligned}$$

7.2.3 Fuerzas sobre el mástil

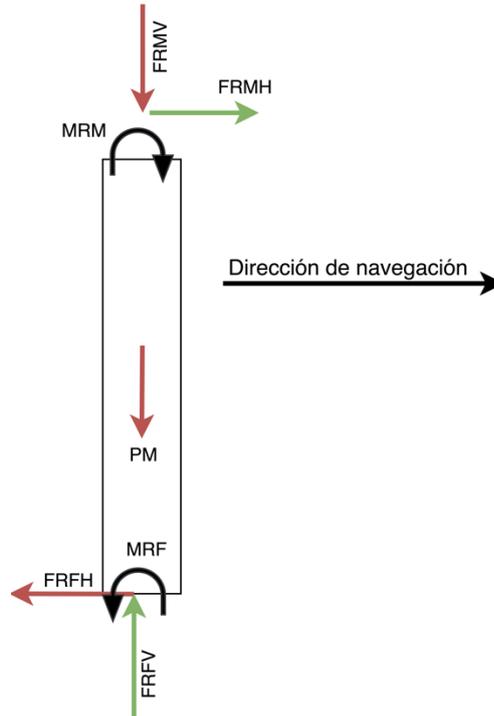


Imagen 27: Fuerzas que intervienen en el mástil durante la navegación.

Variable	Descripción
FRMH	Fuerza Reacción Mástil Horizontal
FRMV	Fuerza Reacción Mástil Vertical
MRM	Momento Reacción Mástil
PM	Peso Mástil
FRFH	Fuerza Reacción Fuselaje Horizontal
FRFV	Fuerza Reacción Fuselaje Vertical
MRF	Momento Reacción Fuselaje

Tabla 10: Acrónimos variables.

Sumatorio de fuerzas:

$$FRMV + PM = FRFV$$

$$FRMH = FRFH$$

Sumatorio de momentos en el punto superior del mástil:

$$MRM + FRFH \cdot LongMástil = MRF$$

7.2.4 Fuerzas sobre el fuselaje

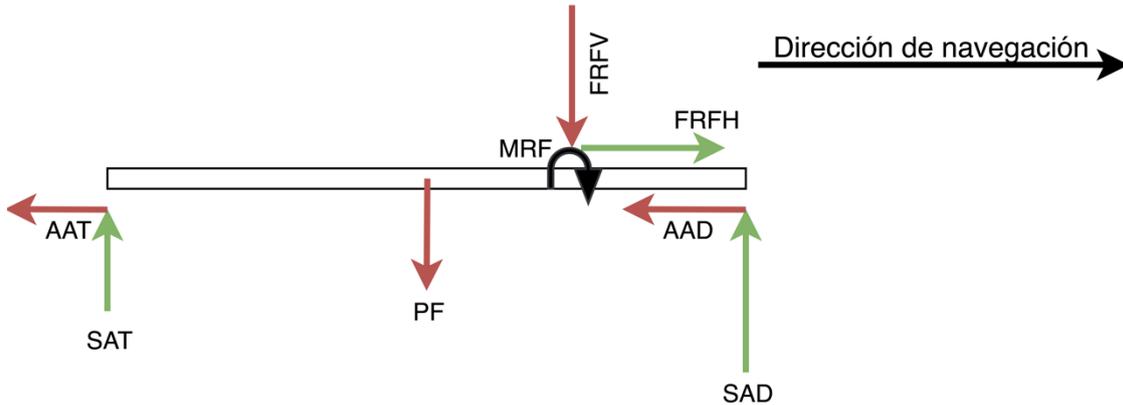


Imagen 28: Fuerzas que intervienen en el fuselaje durante la navegación.

Variable	Descripción
FRFV	Fuerza Reacción Fuselaje Vertical
FRFH	Fuerza Reacción Fuselaje Horizontal
MRF	Momento Reacción Fuselaje
SAD	Sustentación Ala Delantera
AAD	Arrastre Ala Delantera
PF	Peso Fuselaje
SAT	Sustentación Ala Trasera
AAT	Arrastre Ala Trasera

Tabla 11: Acrónimos variables.

Sumatorio de fuerzas:

$$FRFH = AAD + AAT$$

$$SAD + SAT = FRFV + PF$$

Sumatorio de momentos en la parte trasera del fuselaje:

$$MRM + FRFV \cdot (LongFuselaje - PosMástilFuselaje) + PF \cdot \frac{LongFuselaje}{2} = SAD \cdot LongFuselaje$$

Resolviendo mediante la herramienta Matlab el sistema de ecuaciones planteado obtenemos el valor de las siguientes variables:

Descripción	Variable	Valor	Unidades
NP1	Normal Pie 1	416,5	N
NP2	Normal Pie 2	191,5	N
FRMH	Fuerza Reacción Mástil Horizontal	125,0	N
FRMV	Fuerza Reacción Mástil Vertical	637,9	N
MRM	Momento Reacción Mástil	429,1	N·m
FRFH	Fuerza Reacción Fuselaje Horizontal	125	N
FRFV	Fuerza Reacción Fuselaje Vertical	657,3	N
MRF	Momento Reacción Fuselaje	566,7	N·m
SAD	Sustentación Ala Delantera	664,0	N
AAD	Arrastre Ala Delantera	125	N
SAT	Sustentación Ala Trasera	0	N
AAT	Arrastre Ala Trasera	0	N

Tabla 12: Resultados cálculo de fuerzas.

En los anexos se encuentra el detalle del script de Matlab donde aparecen las ecuaciones y cálculos para llegar a los resultados anteriores.

De los resultados obtenidos se deduce que el perfil del ala delantera como mínimo deberá generar una fuerza de sustentación de 664,03 N. Sin embargo, hay que tener en cuenta que este valor es solamente la componente vertical de la fuerza de sustentación. Como vemos en la siguiente imagen, durante la navegación, el hidrofoil va inclinado unos grados respecto a la superficie del mar. Este ángulo se ha aproximado como 45 ° y, por tanto, hay que corregir el valor final de la fuerza de sustentación del ala delantera:

$$SAD = SAD_x / \text{sen}(45) \rightarrow SAD = 939,0 \text{ N}$$

Por tanto, la sustentación total mínima que tiene que realizar el ala delantera es de 939 N. Este valor se utilizará posteriormente para la elección y el diseño del perfil alar.

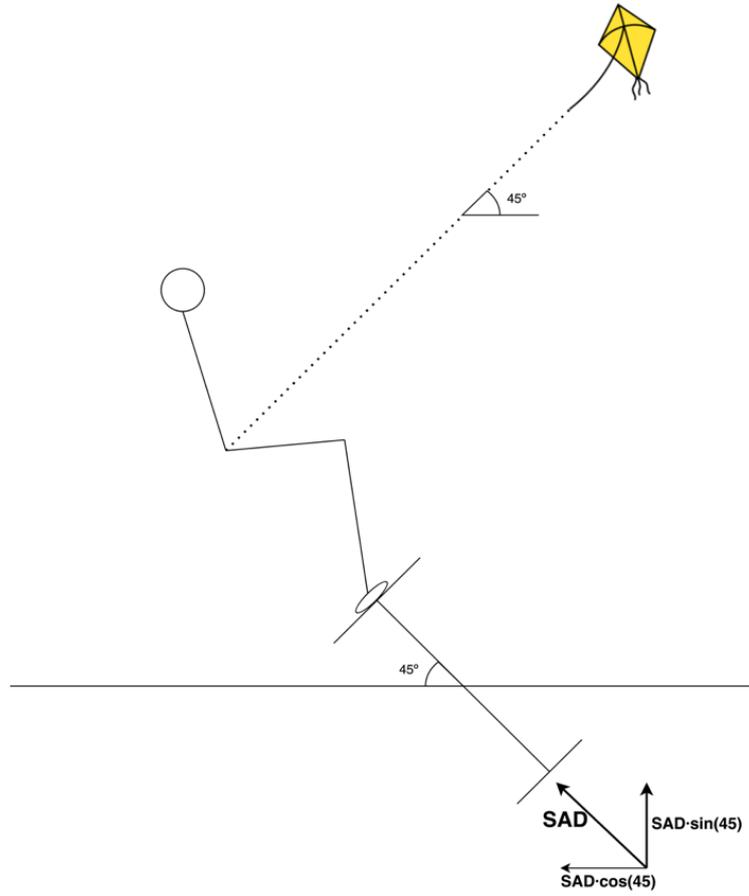


Imagen 29: Posición de navegación vista de perfil.

8. Perfil hidrodinámico

En este apartado se estudiarán las características de un perfil hidrodinámico y la relación que tiene con la sustentación y con el arrastre en un sistema de hidrofoil.

8.1 Parámetros de un perfil hidrodinámico

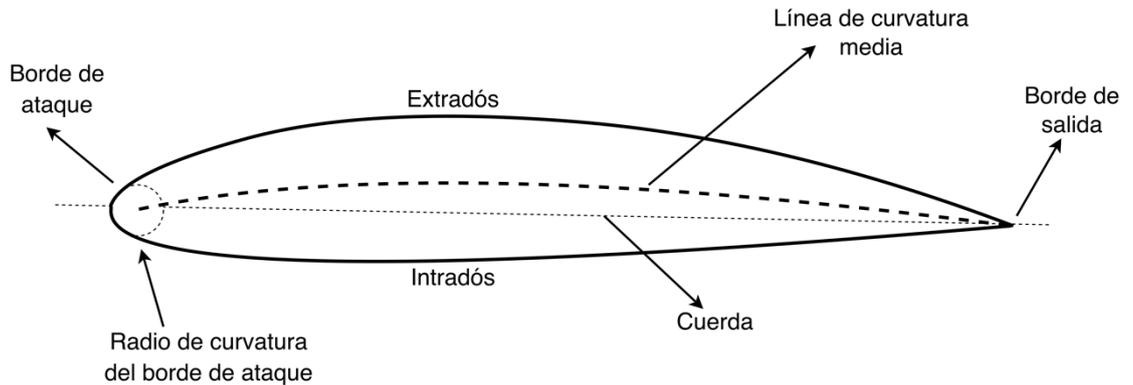


Imagen 30: Parámetros perfil alar.

- **Extradós:** Superficie superior del perfil hidrodinámico.
- **Intradós:** Superficie inferior del perfil hidrodinámico.
- **Espesor máximo, t :** Es la distancia máxima entre el extradós y el intradós.
- **Borde de ataque:** Es el punto delantero del ala, donde el fluido se separa y atraviesa el ala por el extradós o por el intradós.
- **Borde de fuga:** Es el punto final del ala. Donde el fluido que circula por el intradós y el que circula por el extradós coinciden. A partir de ese punto el fluido deja de estar en contacto con el perfil.
- **Cuerda, c :** Línea definida entre el borde de ataque y el borde de fuga. Esta distancia varía a lo largo de la longitud del ala.
- **Línea de curvatura media:** Es la línea media equidistante entre las líneas de extradós e intradós.
- **Envergadura, b :** Longitud del ala en el sentido de la manga (de estribor a babor).
- **Área de sustentación, A_L :** Es el área de la planta del perfil hidrodinámico (vista desde arriba) y se utiliza para calcular la capacidad de sustentación del ala. Se calcula como:

$$A_L = b \cdot c$$

- Área de arrastre, A_D : Es el área que se utiliza para calcular la resistencia al avance del ala. En el caso de los hidrofoils se calcula con la misma área de sustentación, por tanto:

$$A_D = A_L = b \cdot c$$

- Ángulo de ataque: Es el ángulo entre la cuerda y la dirección del fluido por el que circula el perfil. De este ángulo dependerá también la capacidad de sustentación y la resistencia al avance del ala.

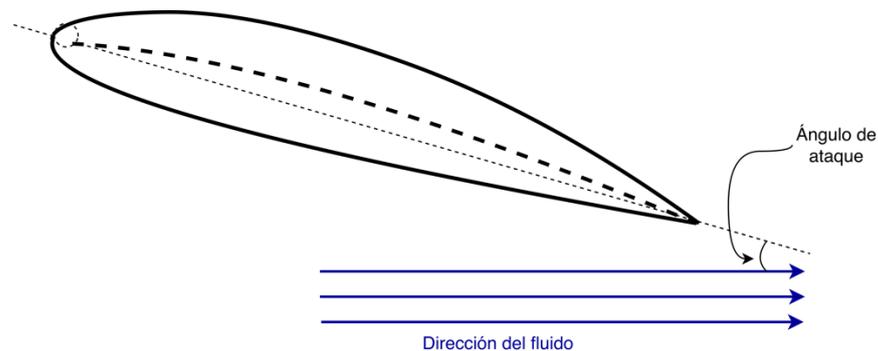


Imagen 31: Ángulo de ataque de un perfil hidrodinámico.

8.2 Principios de sustentación y resistencia al avance

Un hidrofoil está sometido a distintas fuerzas durante la navegación. Una fuerza de sustentación, una fuerza de arrastre debida a la fricción con el agua y al peso producido por la acción gravitatoria terrestre sobre todo el sistema (regatista, tabla, sistema de hidrofoil, cometa...). A continuación, se explicarán dichas fuerzas y los principios físicos básicos que rigen el comportamiento de un hidrofoil.

8.2.1 Teorema de Bernoulli [10]

La ecuación de Bernoulli, formulada por Daniel Bernoulli en 1738, describe el comportamiento de los fluidos en movimiento relacionando la diferencia de velocidad con la diferencia de presión. Esta ecuación estudia el comportamiento de flujos sin fricción y, sin embargo, los fluidos son viscosos y por tanto presentan fricción. Es por eso por lo que es necesario aplicar la fórmula de Bernoulli en situaciones en las que se pueda despreciar dicha fricción.

Según Bernoulli, la energía que posee un flujo ideal¹ y estacionario² permanece constante a lo largo de su recorrido. Esta energía consta de tres componentes:

- Energía cinética, E_C . Es la energía debida a la velocidad que posee el fluido. Viene definida por la siguiente ecuación donde m se corresponde a la masa del fluido y v a su velocidad:

$$E_C = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

- Energía potencial gravitatoria, E_P . Es la energía que posee el fluido por estar a una altura determinada. Viene definida por la siguiente ecuación donde m hace referencia a la masa del fluido, g a la constante de gravedad (9,81 m/s) y h a la altura del fluido:

$$E_P = m \cdot g \cdot h$$

- Energía de flujo, E_F . Es la energía correspondiente al flujo debida a la presión a la que se encuentra. Se formula con la siguiente ecuación donde P se refiere a la presión a la que se encuentra el fluido y V su volumen:

$$E_F = P \cdot V$$

Según el principio de conservación de la energía, siempre que no haya fricción, la energía de un sistema se mantiene constante por tanto la energía total inicial (i) será igual a la energía total final (f).

$$(E_C + E_P + E_F)_{inicial} = (E_C + E_P + E_F)_{final}$$

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_i^2 + m \cdot g \cdot h_i + P_i \cdot V = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_f^2 + m \cdot g \cdot h_f + P_f \cdot V$$

Si se divide la fórmula por el volumen del fluido, V , podemos trabajar con la densidad del fluido ($m = \rho \cdot V$):

$$\frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \cdot v_i^2 + \rho \cdot V \cdot g \cdot h_i + P_i \cdot V}{V} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \cdot v_f^2 + \rho \cdot V \cdot g \cdot h_f + P_f \cdot V}{V}$$

¹ Fluido ideal: Es aquel fluido que no presenta viscosidad y que es incompresible. No existen fluidos ideales, pero existen fluidos con tan poca fricción que esta es despreciable. A lo largo de este trabajo se tratará al agua como un fluido ideal.

² Flujo estacionario: la velocidad del fluido se mantiene constante.

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_i^2 + \rho \cdot g \cdot h_i + P_i = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_f^2 + \rho \cdot g \cdot h_f + P_f$$

El foil navega a una profundidad determinada por debajo de la superficie del mar que puede considerarse constante. Por tanto, la diferencia de altura del flujo se considera menospreciable y el término de la energía potencial desaparece de la ecuación.

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_i^2 + P_i = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_f^2 + P_f$$

Esta ecuación muestra que la energía del fluido que circula a través de un perfil, en este caso un hidrofoil, depende de la velocidad y de la presión de dicho fluido. Si aumenta la velocidad del fluido (energía cinética) disminuirá la presión (energía de flujo) y viceversa. Esta conclusión permite explicar por qué los aviones se sustentan en el aire o por qué un hidrofoil mantiene el peso de una tabla en el mar.

8.2.2 Fuerza de sustentación

La fuerza de sustentación (*lift*, en inglés) es la fuerza que hace que el hidrofoil se eleve y permite la navegación de la tabla por encima del nivel del mar. Es la misma fuerza que permite a los aviones volar o a los barcos de vela navegar en contra del viento. Existen varias conjunturas que intentan explicar cómo se genera esta fuerza de sustentación en los perfiles hidrodinámicos.

Una de las explicaciones más frecuentes está basada en el principio de Bernoulli. Para entender cómo se genera la fuerza de sustentación en el perfil hidrodinámico al atravesar el fluido, se puede pensar en dos partículas que inciden a la vez en el borde de ataque. Una circulará a través del perfil por el intradós y la otra por el extradós. Los hidrofoils están diseñados para que el recorrido a través del extradós sea más largo que el intradós. Como las dos partículas llegarán al borde de fuga al mismo tiempo, la que recorra el extradós tendrá que hacerlo más rápidamente que la que circule por el intradós. Como hemos visto anteriormente, el principio de Bernoulli establece que más velocidad significa menos presión y al revés. Por tanto, la presión en el extradós será menor que la presión en el intradós y esta diferencia de presión arriba y abajo del perfil generará la fuerza de sustentación.

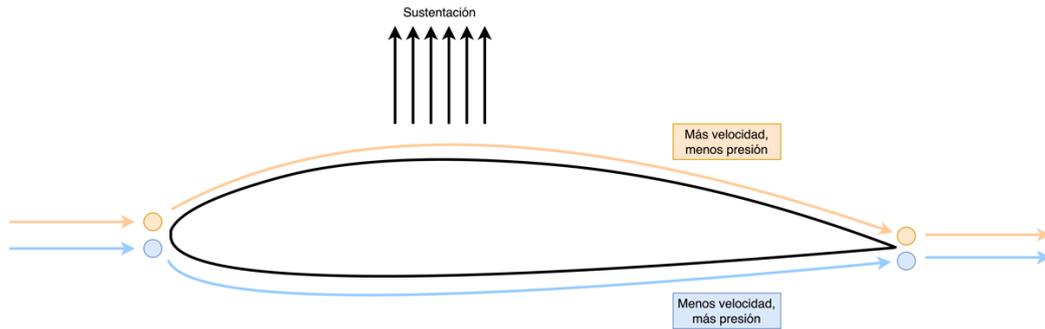


Imagen 32: Fuerza de sustentación perfil hidrodinámico. Conjetura Bernoulli.

Sin embargo, esta explicación no es correcta. Es cierto que las moléculas que circulan por el extradós lo hacen más rápido que por el intradós, pero, en realidad, dos partículas que inciden a la vez en el borde de ataque de un perfil hidrodinámico no llegan a la vez al borde de fuga. De hecho, las que circulan por el extradós llegan antes al borde de salida que las que circulan por el intradós.

En realidad, la fuerza de sustentación no viene determinada únicamente por el perfil alar si no por el ángulo de ataque de dicho perfil respecto al fluido al que atraviesa. La forma del ala condicionará el rendimiento del ala y la relación entre la sustentación y el arrastre, pero no es el elemento determinante para la generación de la fuerza de sustentación [11].

Un perfil alar que presente un ángulo de ataque distinto a 0° , modificará la dirección del flujo por el que circula hacia abajo, tal y como se puede ver en la siguiente imagen.

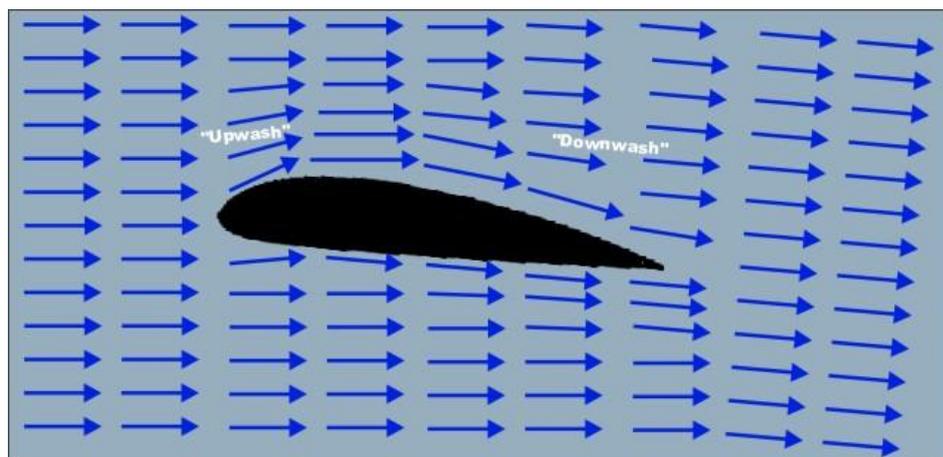


Imagen 33: Flujo perturbado por un perfil alar.

Esta modificación del flujo produce una fuerza de sustentación debido a la tercera ley de Newton, la ley de acción-reacción. El perfil alar provoca un cambio en la cantidad de movimiento del aire al desviar su dirección. Como consecuencia, se genera una fuerza reactiva del mismo valor, misma dirección y sentido opuesto. Esta es la fuerza de sustentación. Esta fuerza es directamente proporcional a la cantidad de aire desviado y al ángulo de ataque del perfil alar.

En el caso del sistema de hidrofoil, la fuerza de sustentación, F_L , es vertical y es la encargada de elevar la tabla de *kitesurf* por encima de la superficie del mar durante la navegación. Viene definida por la siguiente expresión:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_L \cdot C_L \cdot v^2 [N]$$

Donde:

- ρ : Densidad del fluido [kg/m^3]
- A_L : Área de sustentación [m^2]
- C_L : Coeficiente de sustentación [-]
- v : Velocidad del perfil hidrodinámico en el fluido [m^2/s]

8.2.3 Fuerza de arrastre

La fuerza de arrastre, F_D , es paralela al avance del hidrofoil en el medio y es la debida a la resistencia del agua a dicho avance del hidrofoil. Esta fuerza varía en función del ángulo de ataque del perfil. Se calcula según la siguiente expresión:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_D \cdot C_D \cdot v^2$$

Donde:

- ρ : Densidad del fluido [kg/m^3]
- A_D : Área frontal del perfil [m^2]
- C_D : Coeficiente de arrastre [-]
- v : Velocidad del fluido [m^2/s]

Como se ve en la fórmula anterior, la fuerza de arrastre es proporcional al coeficiente de arrastre C_D (*drag*, en inglés). Como el interés de este proyecto es diseñar un sistema de hidrofoil lo más rápido posible, interesa que la fuerza de arrastre sea lo

menor posible y, por tanto, disminuir el coeficiente de arrastre. Este coeficiente se calcula como la suma de dos parámetros [12]:

$$C_D = C_{D0} + C_{Di}$$

C_{D0} es el coeficiente de arrastre a elevación cero y depende del perfil hidrodinámico.

C_{Di} es el coeficiente de arrastre inducido determina la fuerza de arrastre inducida que surge en un perfil alar al aparecer la sustentación. El C_{Di} se calcula como:

$$C_{Di} = \frac{C_L^2}{\pi \cdot AR \cdot e}$$

Dónde:

- C_L es el coeficiente de sustentación.
- AR es la relación de aspecto (aspect ratio, en inglés) y es inversamente proporcional al coeficiente de arrastre inducido. Por tanto, para conseguir disminuir este coeficiente se deberá aumentar el AR que se calcula en función de la envergadura del ala, s (*span*, en inglés) y el área del ala, A .

$$AR = \frac{s^2}{A}$$

Por tanto, para disminuir el AR y aumentar la velocidad de navegación, convienen alas estrechas y alargadas.

- e es un factor de eficiencia que depende de la forma del perfil. Para una elipse $e = 1$ y en general, para los perfiles hidrodinámicos, $e < 1$.

8.2.4 Peso

El peso, P , es una fuerza vertical producida por la acción de la gravedad en el sistema del hidrofoil. Esta fuerza depende de las dimensiones del foil y debe ser contrarrestada por la fuerza de sustentación para que la navegación sea posible. Se calcula como:

$$P = m \cdot g$$

Donde:

- m : masa del sistema hidrofoil, tabla y regatista [kg]
- g : gravedad 9,81 [m/s]

8.3 Selección del perfil del ala delantera

Para la selección del perfil se utilizará la base de datos Airfoil Tools [12] donde se recogen las características de centenares de perfiles hidrodinámicos. El perfil seleccionado deberá cumplir con los requerimientos especificados por la IKA para que pueda ser utilizado en las competiciones de Fórmula Kite. No existen unas medidas determinadas que IKA exija para los hidrofoils, así que cada diseño puede ser diferente. Sin embargo, para un mismo diseño, las siguientes tolerancias tienen que cumplirse:

Weight		+/- 5%
Height / Length	m, a, b	+/- 2.00 mm
Chord	n, c, f	- 1.00 mm
Profile Thickness	d, g	+/- 0.50 mm
Profile Position	e, h	+/- 1.00 mm
Fuselage Thickness	n, o, p, q	+/- 0.50 mm
Span	a	+/- 1.00 mm
All other measurements	including i, j, k, l, r	+/- 1.00 mm

Imagen 34: Tolerancias a cumplir por los diseños aceptados por la IKA.

Para la elección de los perfiles alares a estudiar se ha acudido a la página web airfortools.com. Esta página contiene una base de datos de los perfiles alares existentes hoy en día que permitirá estudiar su comportamiento para distintas condiciones de navegación. Además, permite comparar distintos perfiles entre si y obtener las curvas de los coeficientes de sustentación y de arrastre para cada perfil.

Dicha página propone once perfiles para su uso en agua y, por tanto, estos son los 11 perfiles que se van a estudiar. Estos son:

1	EPPLER 817
2	EPPLER 818
3	EPPLER E836
4	EPPLER E837
5	EPPLER E838
6	EPPLER 874
7	EPPLER 904
8	EPPLER 908
9	YS 900
10	YS 915
11	YS 930

Tabla 13: Perfiles hidrodinámicos a estudiar.

8.3.1 Capa límite y número de Reynolds [14]

Para la elección del perfil alar se hará un estudio del comportamiento de cada perfil en las condiciones de navegación que se establezcan. Para ello es necesario calcular el número de Reynolds ya que influye en dicho comportamiento.

Cuando un objeto se mueve a través de un fluido, las moléculas del fluido cercanas al objeto se ven perturbadas. Cuando el hidrofoil navega, las moléculas de agua que están cerca del perfil alar se mueven alrededor de este y generan una serie de fuerzas aerodinámicas. Estas fuerzas dependerán de varios factores como la velocidad de navegación, la forma del hidrofoil, la masa del fluido y otras características del fluido como su viscosidad y compresibilidad.

A medida que el foil se mueve por el agua, las partículas de agua se adhieren a la superficie del perfil alar. Las moléculas de agua que circulan justo por encima de estas se ven frenadas debido a que chocan con las que están pegadas a la superficie. De la misma manera, ralentizan a las moléculas que circulan por encima suyo. Cuanto más lejos de la superficie estén las partículas menos se frenarán. Esto crea una capa de fluido alrededor de la superficie llamada capa límite que cambia la forma del perfil. Como se ve en la siguiente imagen, la capa límite puede ser laminar, si se mantiene pegada a la superficie del perfil alar, o turbulenta, si se despega de la superficie, y hay que tenerla en cuenta durante los cálculos.

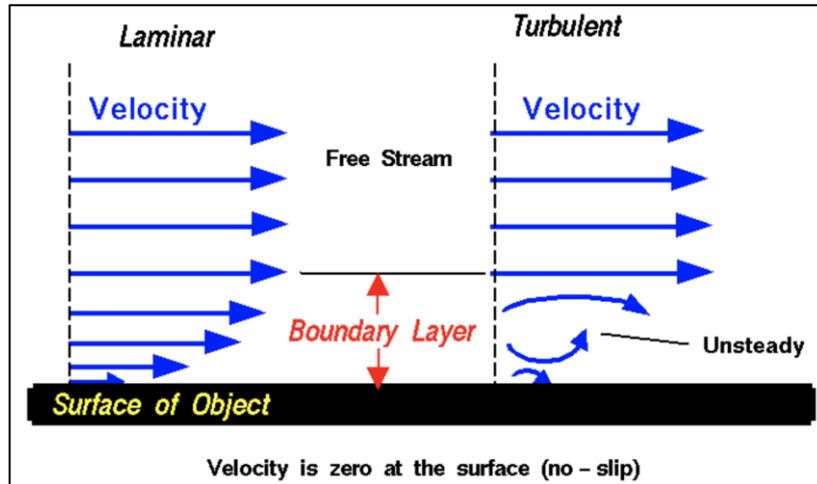


Imagen 35: Capa límite laminar (izquierda) y turbulenta (derecha).

Que la capa límite sea laminar o turbulenta depende del número de Reynolds. Para números de Reynolds bajos, la capa límite es laminar, y para números de Reynolds altos, la capa límite es turbulenta. Los efectos de la capa límite sobre el arrastre y la sustentación del hidrofoil están contenidos en el coeficiente de arrastre y sustentación, por lo que determinar el número de Reynolds será suficiente para realizar los cálculos correctamente.

El número de Reynolds es adimensional y relaciona las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas. Se calcula según la siguiente fórmula:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu}$$

Donde:

- ρ : Densidad del fluido sobre el que circula el perfil alar. En este caso dicho fluido es el agua del mar y su densidad depende de la temperatura y de la salinidad del agua. Se considerará una salinidad del 35% y una temperatura de 15°C por lo que, tal y como vemos en la Tabla 14, la densidad de agua será de 1026 kg/m³.
- v : Velocidad del fluido respecto al perfil alar, se considerará la velocidad de navegación de la primera iteración, 30 nudos que corresponden a 15,43 m/s.

- L : Cuerda del perfil alar. Se considera una cuerda de 97,84 mm ya que es la cuerda media de los perfiles existentes que se utilizan en las regatas de Fórmula Kite.
- μ : Coeficiente dinámico de viscosidad molecular. Al igual que la densidad, en el caso del agua de mar depende también de la temperatura y de la salinidad. Como puede verse en la Tabla 14, para las mismas condiciones comentadas anteriormente, es de 0,00122 kg/m·s.

Por tanto, el número de Reynolds será:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} = \frac{1026 \cdot 15,43 \cdot 0,09784}{0,00122} = 1.269.608$$

Temperature (°C) (deg F)	Saturation Pressure (bar) (psi)	Density - ρ - (kg/m ³) (lb/ft ³)	Specific Heat - c_p - (kJ/(kg K))	Absolute (Dynamic) Viscosity - μ - (Ns/m ² , Pa s)	Electrical Conductivity (S/cm)
0	0.00599	1028	4.000	0.00189	0.029048
1	0.00644	1028	4.000	0.00183	
2	0.00692	1028	4.000	0.00177	
3	0.00743	1028	4.000	0.00172	
4	0.00797	1028	4.001	0.00167	
5	0.00855	1028	4.001	0.00161	0.033468
6	0.00916	1028	4.001	0.00157	
7	0.00982	1027	4.002	0.00153	
8	0.01051	1027	4.002	0.00149	
9	0.01125	1027	4.002	0.00145	
10	0.01203	1027	4.003	0.00141	0.038103
11	0.01286	1027	4.003	0.00139	
12	0.01374	1027	4.003	0.00133	
13	0.01467	1026	4.004	0.00129	
14	0.01566	1026	4.004	0.00126	
15	0.01671	1026	4.005	0.00122	0.042933
16	0.01781	1026	4.005	0.00120	
17	0.01898	1026	4.006	0.00117	
18	0.02022	1025	4.006	0.00114	
19	0.02153	1025	4.007	0.00111	
20	0.02291	1025	4.007	0.00109	0.047934
21	0.02437	1025	4.007	0.00105	
22	0.02591	1024	4.008	0.00103	
23	0.02753	1024	4.008	0.00101	
24	0.02924	1024	4.009	0.00098	
25	0.03104	1023	4.009	0.00097	0.053088
26	0.03294	1023	4.009	0.00094	
27	0.03494	1023	4.010	0.00092	
28	0.03705	1022	4.010	0.00090	
29	0.03926	1022	4.011	0.00088	
30	0.04159	1022	4.011	0.00087	0.058373
35		1020			

Tabla 14: Propiedades del agua de mar para una salinidad del 35% [14].

Un fenómeno a tener en cuenta durante la elección de los perfiles alares es el desprendimiento de la capa límite. Como se ha mencionado anteriormente, las fuerzas de

sustentación y de arrastre dependen, entre otras cosas, del ángulo de ataque del perfil alar respecto al fluido que atraviesa. La fuerza de sustentación aumenta al aumentar el ángulo de ataque alcanzando un punto máximo. A partir de este punto, el coeficiente de sustentación disminuye rápidamente para ángulos de ataque mayores. Esto es debido a que, a partir de un cierto ángulo, las partículas de fluido se separan del contorno del ala y esto comporta una disminución drástica en la fuerza de sustentación generada. Se dice que el perfil ha entrado en pérdida.

8.3.2 Comparación de las curvas características de cada perfil

Para escoger el mejor perfil para los componentes del sistema de hidrofoil de entre los once posibles perfiles hidrodinámicos, se tendrán en cuenta los siguientes criterios:

- El objetivo principal de este diseño es maximizar la velocidad de navegación. Para ello el coeficiente de arrastre debe ser lo menor posible y, por tanto, este será el criterio principal a seguir durante la elección del perfil.
- El perfil debe generar la fuerza de sustentación necesaria para elevar la tabla por encima del nivel del mar y posibilitar la navegación. Para ello, el coeficiente de sustentación debe ser igual o mayor a aquel que genere la que la fuerza de 939 N calculada anteriormente.
- Durante las condiciones óptimas de navegación la tabla debe ir paralela al agua para que ofrezca la mínima resistencia al viento y no reduzca la velocidad de navegación. Por tanto, el ala delantera y el ala trasera deberán estar colocadas respecto a la tabla de tal manera que, cuando la tabla esté en horizontal, las alas presenten el ángulo de ataque correcto para garantizar las condiciones óptimas de navegación.

Para comparar los perfiles se han introducido los datos de la base de datos en Matlab y se han obtenido cuatro tablas representando los coeficientes de arrastre y sustentación y su variación en función del ángulo de ataque, α . En cada tabla se han representado los once perfiles.

En la Imagen 36 se ha comparado el coeficiente de arrastre en función del ángulo de ataque del perfil. Para ángulos entre 0° y 5° todos los perfiles tienen un coeficiente de arrastre bajo por lo que cualquiera de ellos sería correcto para nuestro proyecto. Cuánto más bajo sea el coeficiente, menor será el arrastre y por tanto mayor la velocidad posible

alcanzada. Para ángulos mayores a 5° se puede ver que los perfiles e836, e837 y e838 claramente tienen coeficientes de arrastre menores al resto de perfiles, sin embargo, esto solamente influiría en la arrancada ya que, durante la navegación, el ángulo de ataque se mantiene entre los 0° y los 5°.

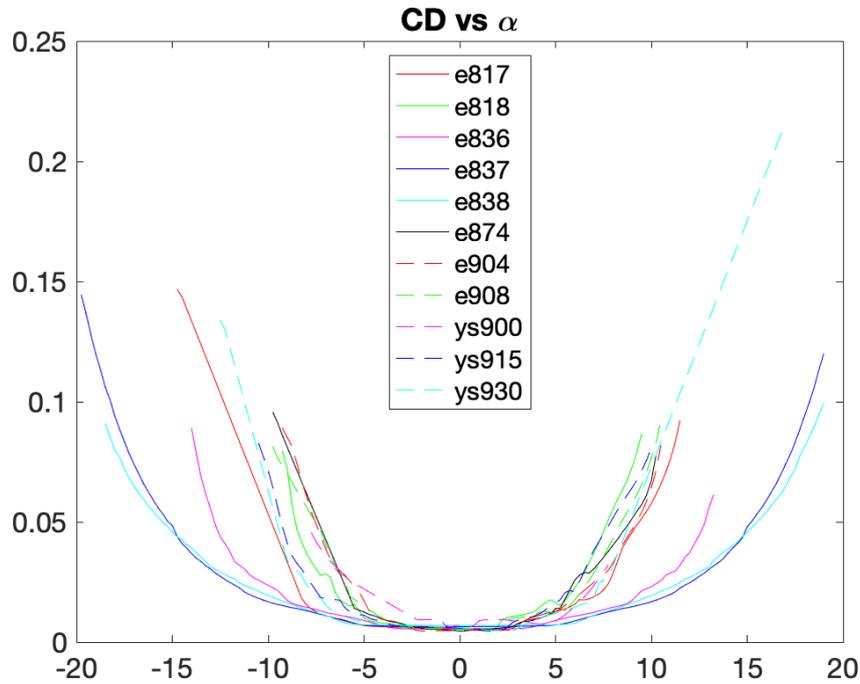


Imagen 36: Coeficiente de arrastre de los 11 perfiles en función de α .

En el siguiente gráfico se comprueba el rendimiento de cada perfil en función del ángulo de ataque. Podemos ver que, claramente, el perfil con mayor rendimiento es el perfil ys930, seguido por los perfiles e817 y e908. Los perfiles e836, e837 y e838 con bajo coeficiente de arrastre en este caso tienen peor rendimiento por lo que, en este caso, priorizaremos el rendimiento ya que las diferencias entre perfiles es más notoria que en la gráfica anterior.

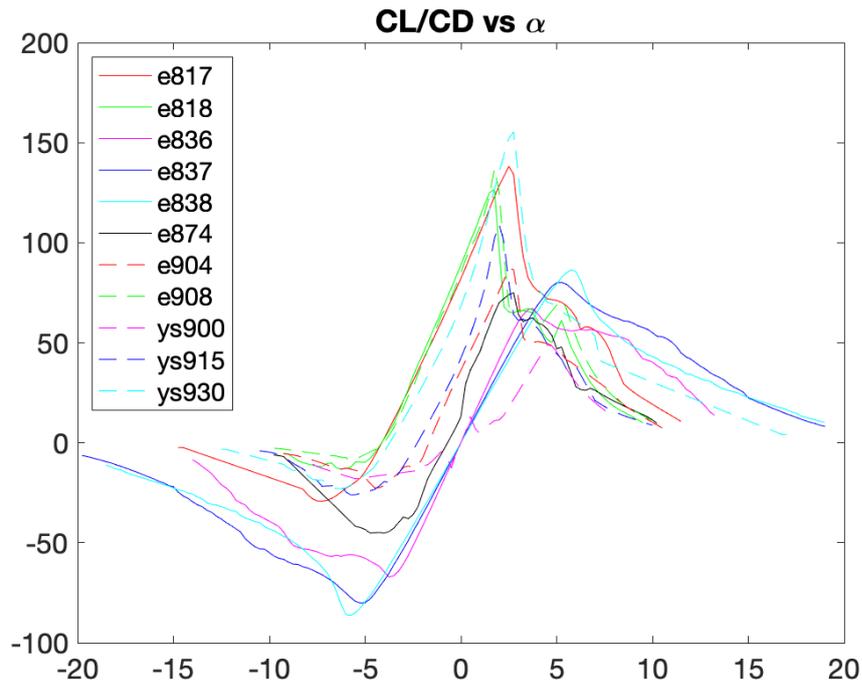


Imagen 37: CL/CD en función del ángulo de ataque, α .

En la Imagen 38 se compara el coeficiente de sustentación en función del ángulo de ataque. En este caso interesa que dicho coeficiente sea lo más grande posible para que la fuerza de sustentación pueda vencer al resto de fuerzas y, de esta manera, asegurar que la tabla de *kitesurf* se eleve por encima de la superficie del mar.

En este caso se tiene que mirar el comportamiento de los perfiles también para ángulos de ataque mayores ya que es importante que en la arrancada del *kitesurf* no falte sustentación. Para ángulos pequeños, el perfil con mayor sustentación es el perfil e817. Sin embargo, a partir de los 10 grados de ángulo de ataque la sustentación disminuye rápidamente ya que el perfil entra en pérdida, por lo que es posible que no sea suficiente durante la arrancada. Los perfiles e837 y e838 son los perfiles con mayor sustentación para ángulos grandes, sin embargo, para ángulos pequeños tienen bastante menos sustentación que los otros perfiles.

Un perfil intermedio sería el perfil ys930. Presenta ángulos de sustentación elevados para ángulos de ataque pequeños y, alrededor de los 8 grados, su sustentación disminuye, pero muy lentamente. Como se ha visto en las tablas anteriores, este perfil presenta un coeficiente de arrastre bajo y el rendimiento más elevado, por lo que se considera que de los once perfiles es el más adecuado para este proyecto.

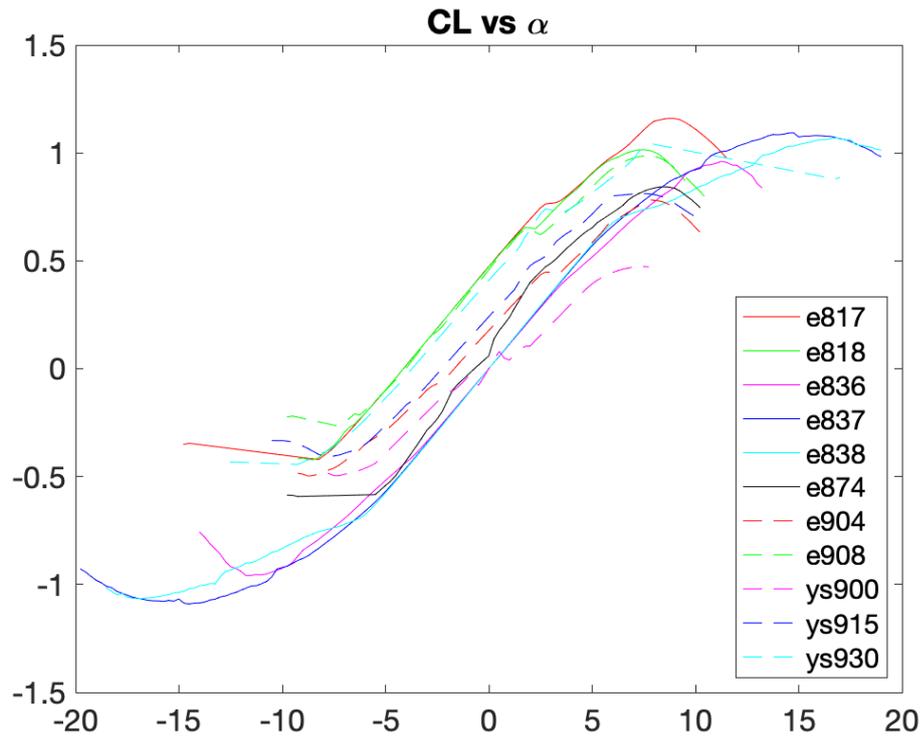


Imagen 38: Coeficiente de sustentación en función del ángulo de ataque, α .

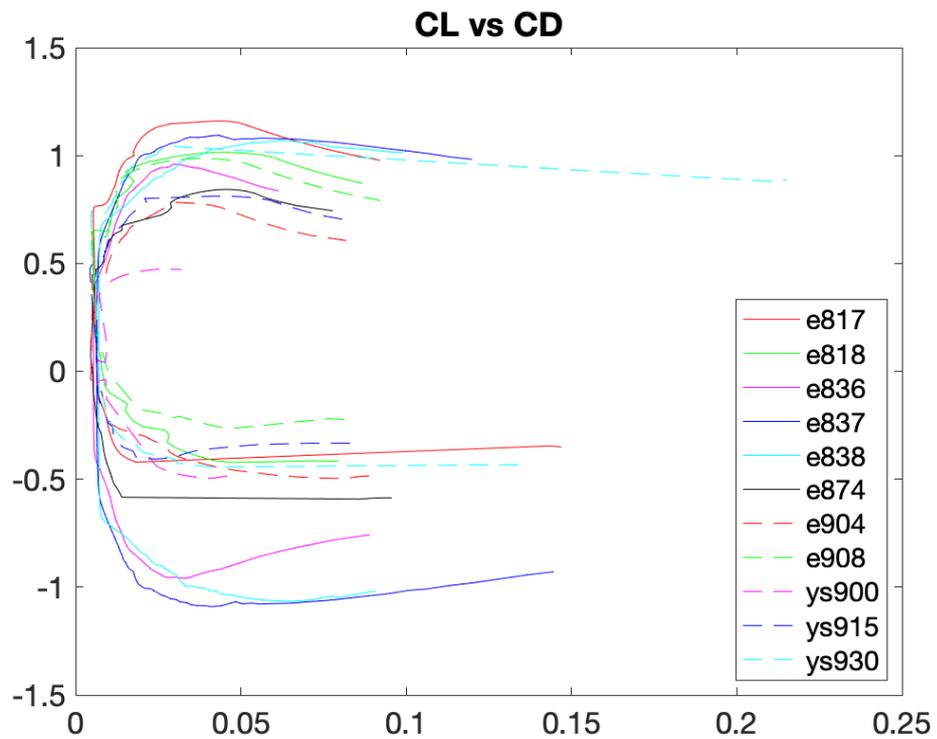


Imagen 39: Coeficiente de sustentación en función del coeficiente de arrastre.

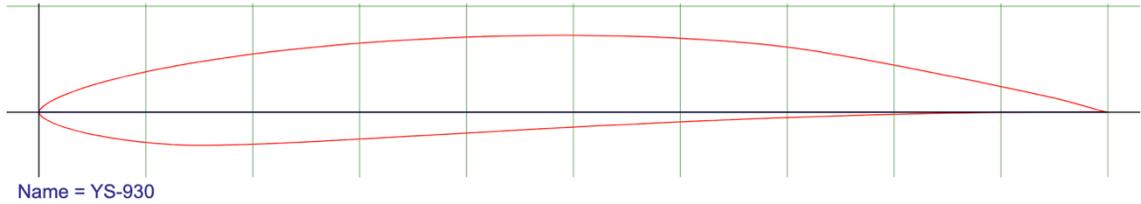


Imagen 40: Perfil aerodinámico ys930.

8.3.3 Comprobación perfil ys930

Para comprobar que el perfil seleccionado es adecuado para nuestra aplicación, éste tiene que generar una fuerza de sustentación suficiente para todas las condiciones de navegación. Para ello, se calculará la fuerza generada a plena velocidad durante la navegación y la fuerza generada durante el arranque.

En el primer caso, se comprueba que la fuerza generada durante la navegación a 30 nudos sea mayor a la fuerza mínima de 939 N calculada anteriormente. Para ello se calculará con la fórmula de la fuerza de sustentación:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_L \cdot C_L \cdot v^2 [N]$$

La fórmula anterior es la de la sustentación generada media ala delantera, como el ala delantera es simétrica, la fuerza generada será el doble. Por tanto:

$$F_L = \rho \cdot A_L \cdot C_L \cdot v^2 [N]$$

En este caso el coeficiente de sustentación utilizado es el obtenido en el punto de navegación óptimo del perfil ys930 que, según la Imagen 37, es para un ángulo de ataque de 2,75°. A este ángulo de ataque le corresponde un C_L de 0,7396, según la Imagen 38.

Con estos datos y para una velocidad de navegación de 30 nudos (15,43 m/s) se obtiene una fuerza de sustentación de 9096 N, que es mucho mayor que la mínima requerida. Por tanto, el perfil ys930 cumple para estas condiciones y además el área calculada es suficiente para generar la fuerza de sustentación necesaria. Sin embargo, en estas condiciones el sistema de hidrofoil saldría del agua y complicaría la navegación ya que la fuerza de sustentación generada es mucho mayor que la fuerza a vencer. Por ello, se calcula el ángulo de ataque necesario para generar exactamente 939 N durante la navegación. Para ello se despeja el coeficiente de sustentación de la ecuación anterior:

$$C_L = \frac{F_L}{\rho \cdot A_L \cdot v^2}$$

Para una fuerza de 939 N se obtiene un C_L de 0,076 que, según la Imagen 38, corresponde a un ángulo de ataque de -3° . Este punto no es el punto óptimo de navegación, pero es en el que se obtiene la sustentación necesaria para navegar y, tal y como se puede ver en la Imagen 36, el coeficiente de arrastre sigue siendo muy pequeño, por lo que cumple con nuestras condiciones de diseño.

Seguidamente se comprueba que el perfil genere la fuerza necesaria durante el arranque de la tabla. Para ello se considera que un regatista de Fórmula Kite consigue elevar la tabla a partir de los 10 nudos (5,14 m/s) de velocidad. Además, hay que tener en cuenta que, durante el arranque, el mástil no está inclinado 45° respecto la superficie del mar, si no que está totalmente vertical. Por tanto, la fuerza que tiene que superar el hidrofoil es simplemente la componente vertical de la fuerza total de sustentación, que son 664 N.

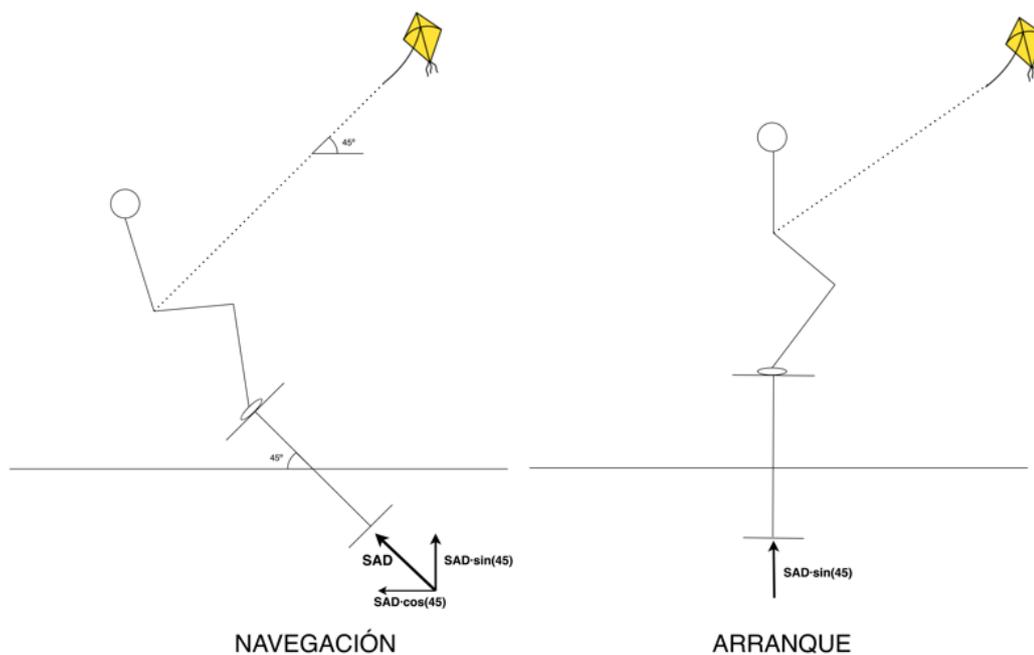


Imagen 41: Posición del sistema de hidrofoil durante la navegación y durante el arranque.

Para estos datos el C_L obtenido es de 0,487. A este resultado se le aplica un coeficiente de seguridad del 15 % para que el regatista tenga margen en el momento de iniciar la navegación. Aplicando dicho coeficiente, se obtiene un C_L necesario de 0,560 que, tal y como se ve en la Imagen 38, corresponde a un ángulo de ataque de $1,5^\circ$.

Por tanto, durante el arranque el regatista deberá inclinar más la tabla y aumentar el ángulo de ataque hasta los $1,5^\circ$. Si las condiciones de arranque cambian, el regatista puede variar más o menos este ángulo para conseguir más o menos fuerza de sustentación.

Según la Imagen 38, el punto de máxima sustentación se obtiene con un ángulo de ataque de $7,75^\circ$ que corresponde a un CL máximo de 1,044. Para ángulos mayores, el hidrofoil perderá sustentación de nuevo.

8.4 Selección del perfil del ala trasera

El ala trasera es la encargada de estabilizar el sistema cuando este se sale de las condiciones óptimas de navegación. Para ello, el ala tiene que estar a un ángulo de ataque de 0° en el punto óptimo de navegación y presentar un perfil simétrico que le permita mantenerse en esa posición. Como en las condiciones de navegación el ala delantera presenta un ángulo de -3° respecto a la dirección del fluido, el ala trasera tiene que estar 3 grados desfasada respecto al ala delantera par que esté en posición totalmente horizontal durante la navegación.

Por tanto, para el diseño del ala trasera se estudiarán solamente perfiles simétricos, estos perfiles presentan un diseño idéntico del intradós como del extradós. Además, el criterio para la elección del perfil seguirá siendo un coeficiente de arrastre mínimo para garantizar la máxima velocidad de todo el sistema.

De los 11 perfiles estudiados para el ala delantera, solamente 4 son simétricos:

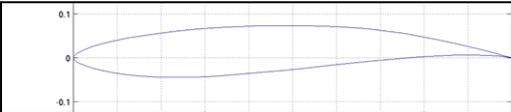
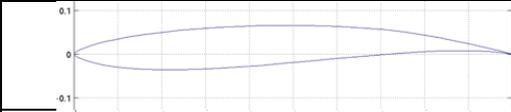
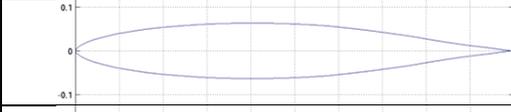
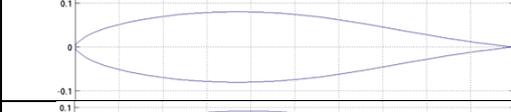
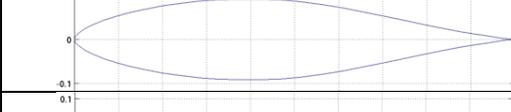
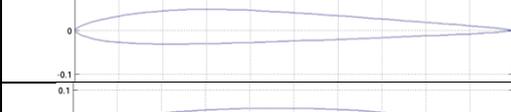
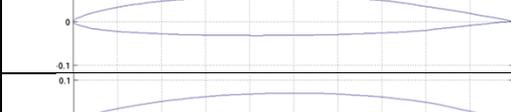
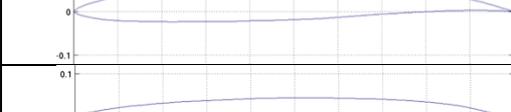
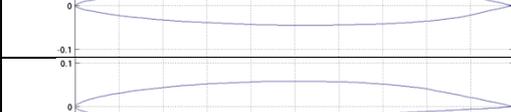
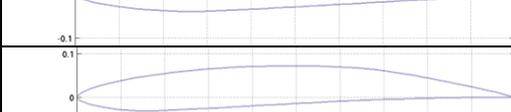
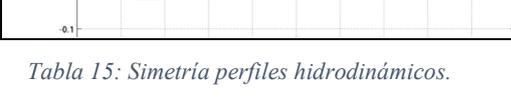
		Perfil	Simetría
1	EPPLER 817		No
2	EPPLER 818		No
3	EPPLER 836		Si
4	EPPLER 837		Si
5	EPPLER 838		Si
6	EPPLER 874		No
7	EPPLER 904		No
8	EPPLER 908		No
9	YS 900		Si
10	YS 915		No
11	YS930		No

Tabla 15: Simetría perfiles hidrodinámicos.

Por tanto, se introducen los datos de los perfiles perfiles eppler 836, eppler 837, eppler 838 y ys 900 en Matlab y se obtienen las siguientes curvas de coeficiente de arrastre en función del ángulo de ataque para cada perfil:

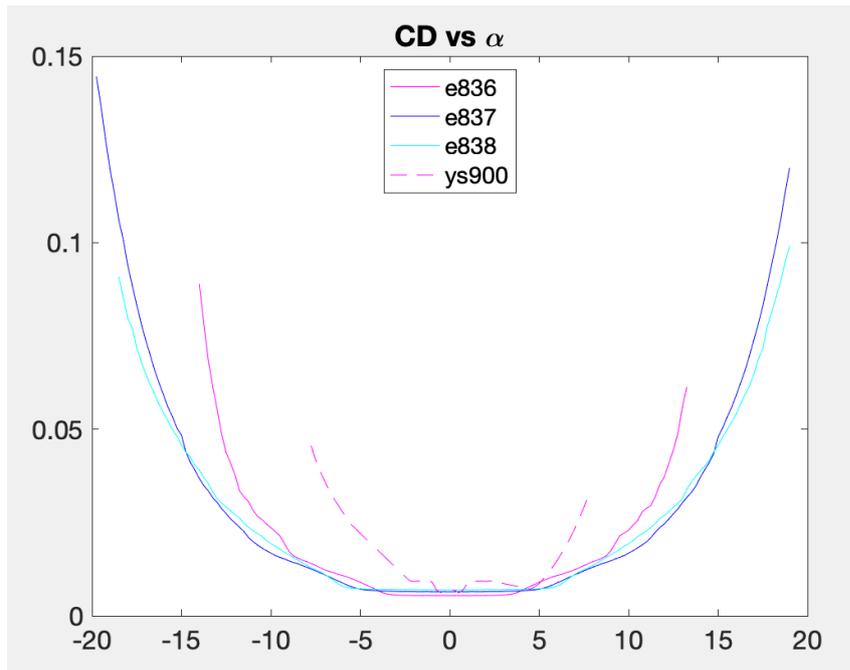


Imagen 42: Coeficiente de arrastre en función de α para los 4 perfiles simétricos.

Como se ve en la imagen anterior, todos los perfiles presentan un coeficiente de arrastre bajo para ángulos de ataque cercanos a 0 grados. Sin embargo, el perfil ys900 aumenta su arrastre al alejarse de los 0 grados y el perfil e836 también lo hace al salirse del intervalo de $(-4^\circ, +4^\circ)$.

Como se ha visto anteriormente, el ángulo de ataque durante la navegación es de -3° , por lo que el perfil ys900 no interesa y el perfil e836 le dá poco margen al regatista. Por tanto, se estudiarán los otros dos perfiles.

Los perfiles e837 y e838 tienen un comportamiento similar, su coeficiente de arrastre varia lo mismo con el ángulo de ataque, pero para ángulos cercanos a 0° , el perfil e837 es el que presenta menos C_D . Por tanto, este será el seleccionado para el diseño del ala trasera.

Al igual que en el caso del ala delantera, se utilizarán los datos del hidrofoil Levitaz R5 para modelar el ala trasera en Solid Works.

8.5 Selección del perfil del mástil

Para el diseño del mástil se estudiarán solamente perfiles simétricos para que no se genere ninguna fuerza lateral durante la navegación. Al igual que para el ala trasera, el criterio para la elección del perfil seguirá siendo un coeficiente de arrastre mínimo para garantizar la máxima velocidad de todo el sistema. Por tanto, se utilizará el perfil e837 que es el que presenta menor arrastre en las condiciones de navegación del sistema.

9. Diseño, materiales y cálculo de tensiones

9.1 Diseño

Una vez escogidos los perfiles que se van a emplear para cada componente del sistema de hidrofoil, se hace el diseño de los elementos mediante SolidWorks. Los planos 2D con el detalle se encuentran en el anexo y serán utilizados para la fabricación y ensamblaje de dichos componentes.

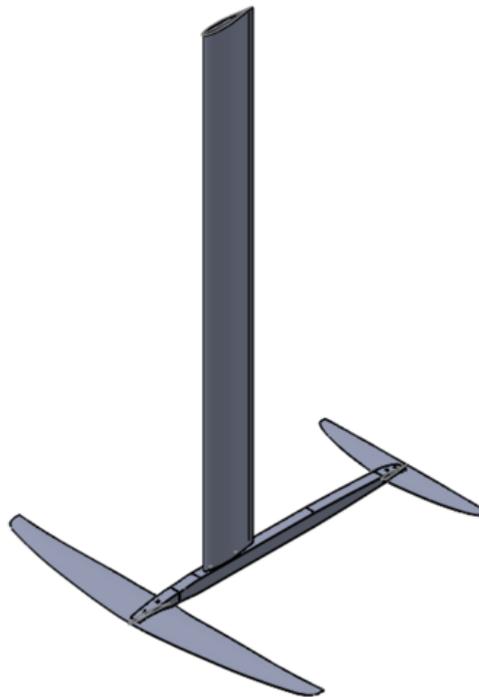


Imagen 43: Diseño del sistema de hidrofoil.

9.2 Materiales

Para la fabricación de los elementos se utilizará fibra de carbono ya que es un material muy ligero y resistente, perfecto para las competiciones de alto rendimiento. Las propiedades de este material permiten diseñar un hidrofoil muy aerodinámico y pequeño que permita alcanzar velocidades muy elevadas, pero a la vez, lo suficientemente resistente como para soportar las fuerzas a las que será sometido durante la navegación.

La fibra de carbono se utiliza como reforzante en materiales compuestos al combinarse con resinas epoxi.

Para escoger entre los distintos tipos de fibra de carbono se utiliza el módulo elástico. Este módulo, también llamado módulo de Young, es una constante que determina la deformación de un material al verse sometido a una tensión. La fibra de carbono se puede clasificar de la siguiente manera [15], según su módulo de Young, E:

- Ultra alto módulo, UHM (*Ultra High Modulus*, en inglés): $E > 450$ GPa.
- Alto modulo, HM (*High Modulus*, en inglés): $350 < E < 450$ GPa.
- Módulo intermedio, IM (*Intermediate Modulus*, en inglés): $200 < E < 350$ GPa.
- Módulo estándar, SM (*Standard Modulus*, en inglés): $E < 200$ GPa.

Como nos interesa que el sistema se deforme lo mínimo posible, escogeremos una fibra con módulo de Young elevado, por tanto, UHM o HM.

Finalmente se ha seleccionado la fibra de carbono M46J del fabricante TORAY para realizar los primeros cálculos. La hoja de características de este material se encuentra en el Anexo. Las propiedades principales de este material y que se deben introducir en Solidworks para realizar la simulación son las siguientes:

- Densidad = 1840 kg/m^3
- Módulo de elasticidad = 436 GPa
- Límite elástico = 4200 MPa

La fibra de carbono no presenta deformación plástica por lo que se considera que el límite elástico coincide con el límite de rotura. Esta fibra de carbono se utiliza junto con resina epoxy formando un material compuesto con las siguientes características:

- Proporción de fibra de carbono = 60 %
- Módulo de elasticidad = 267 GPa
- Límite elástico = 2190 MPa

En el diseño de Solid Works se ha establecido una capa de fibra de carbono de 1 mm para todos los elementos del sistema de hidrofoil.

9.3 Cálculo de tensiones

Se realiza un análisis estructural mediante la simulación de SolidWorks para calcular las tensiones a las que se someten los componentes y las deformaciones que sufren según el material escogido. Mediante el cálculo de las tensiones de von Mises, los

desplazamientos máximos y el factor de seguridad se decidirá si el diseño cumple con las condiciones requeridas.

9.3.1 Tensiones de *Von Mises*

Para el análisis estructural se utilizará el criterio de máxima tensión de von Mises. Este criterio establece que un material dúctil empieza a deformarse cuando la tensión de von Mises alcanza el límite elástico del material utilizado [17]. Como la fibra de carbono no presenta deformación plástica, el límite elástico coincide con el límite de rotura

9.3.2 Desplazamientos máximos

Durante el análisis estructural del sistema, se han simulado los desplazamientos máximos que sufriría el diseño al someterse a las fuerzas que aparecen durante la navegación. Estos desplazamientos no pueden ser excesivos ya que, en ese caso, la funcionalidad y la estabilidad del diseño se verían comprometidas. Si el diseño presenta deformaciones excesivas puede complicar la navegación al kitesurfista haciéndola muy inestable o incluso impidiendo que el foil haga su función y la tabla se eleve.

9.3.3 Factor de seguridad

El factor de seguridad es la relación entre el límite elástico del material y la tensión límite de diseño. Esta última se refiere a la tensión máxima a la que se someterá el material, en este caso la tensión de von Mises comentada en el apartado anterior. Por tanto, para cada componente del sistema de hidrofoil se comparará el límite elástico de material empleado con respecto a la tensión de von Mises.

Si el factor de seguridad es menor a 1, el material fallará y perderá su funcionalidad, ya que la tensión máxima es mayor que el límite elástico. Por tanto, para garantizar un buen diseño el factor de seguridad tiene que ser siempre mayor a la unidad. Sin embargo, en este proyecto se establecerá un factor de seguridad mínimo de 1,5, para tener margen y no llevar a los materiales al límite.

9.4 Ala delantera

El ala delantera se ha diseñado de tal manera que durante la navegación esté a -3° respecto a la dirección del flujo (agua de mar), por lo tanto, la cuerda del ala debe estar a -3° respecto al eje del fuselaje tal y como podemos ver en la Imagen 44. Además, el ala debe estar a $+1,5^\circ$ durante el arranque, tal y como se ha calculado anteriormente.

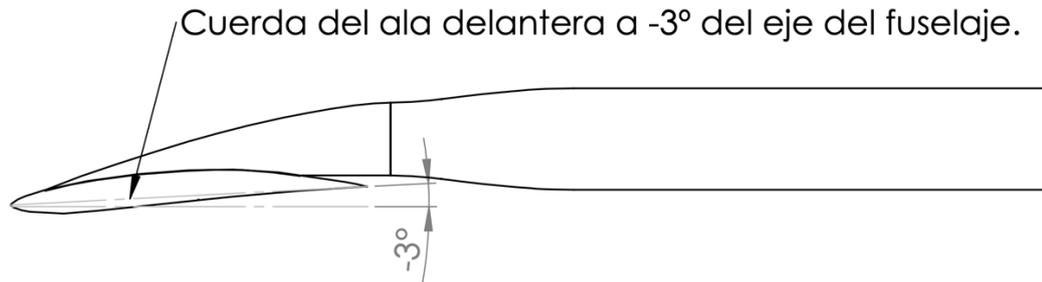


Imagen 44: Detalle del diseño del ala delantera.

El ala delantera presenta dos taladros en el centro del ala que servirán para realizar la unión con el fuselaje mediante unos tornillos de 5 mm de diámetro.

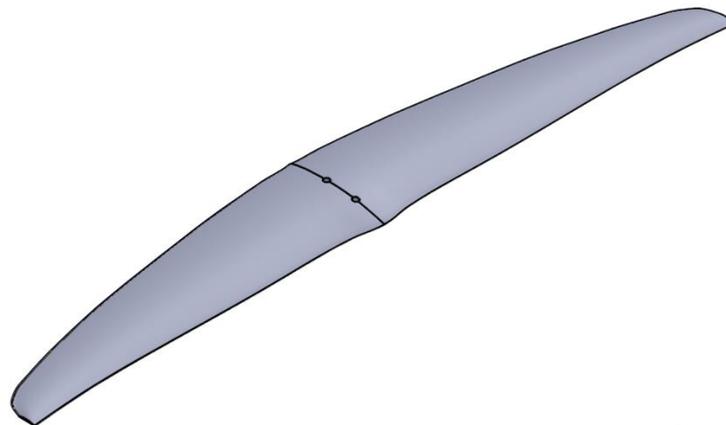


Imagen 45: Ala delantera del sistema de hidrofoil.

Durante el arranque el ala está sometida a una fuerza de sustentación de 664 N mientras que durante la navegación esta incrementa hasta 939 N debido a la inclinación de la tabla con respecto a la superficie de mar. Para realizar el análisis estructural se ha utilizado el valor máximo, 939 N. Además, se ha analizado media ala para la fuerza de sustentación correspondiente (469,5 N). Se ha hecho de esta manera para poder utilizar el centro del ala como superficie fija del perfil durante la simulación.

Además, el ala también está sometida a una fuerza de arrastre durante la navegación que también se tiene en cuenta al realizar el cálculo de esfuerzos. La fuerza de arrastre obtenida es de:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_L \cdot C_D \cdot v^2 = 37,1 \text{ N}$$

Dónde:

- $\rho = 1026 \text{ kg/m}^3$
- $A_L = 0,050348 \text{ m}^2$
- $C_D = 0,00689 (\alpha = 0^\circ)$
- $v = 14,43 \text{ m/s}$

Los resultados obtenidos son los siguientes:

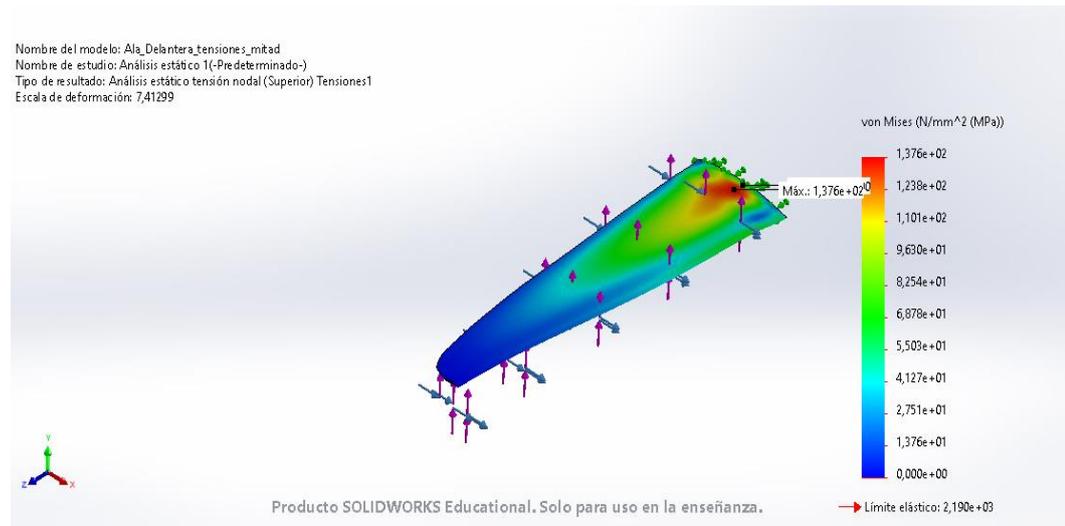


Imagen 46: Análisis ala delantera: Tensiones de Von Mises.

Tal y como se muestra en la imagen anterior, la tensión máxima a la que se somete el ala delantera es de 137,6 MPa. Esto ocurre en los puntos de estrés máximo que están próximos a la cuerda del ala.

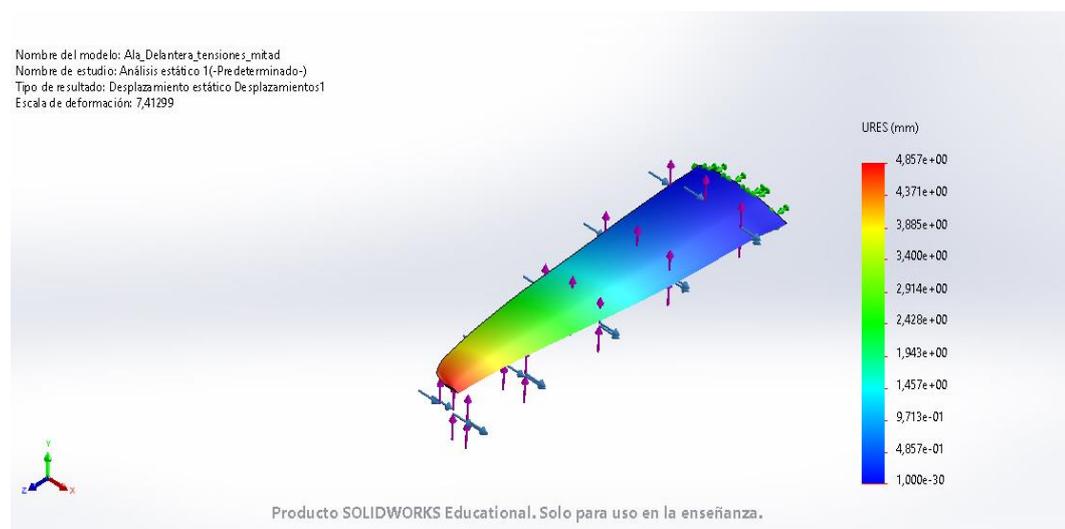


Imagen 47: Análisis ala delantera: Desplazamiento máximo.

El desplazamiento máximo obtenido bajo las condiciones de trabajo comentadas anteriormente es de 4,86 mm, en los extremos del ala.

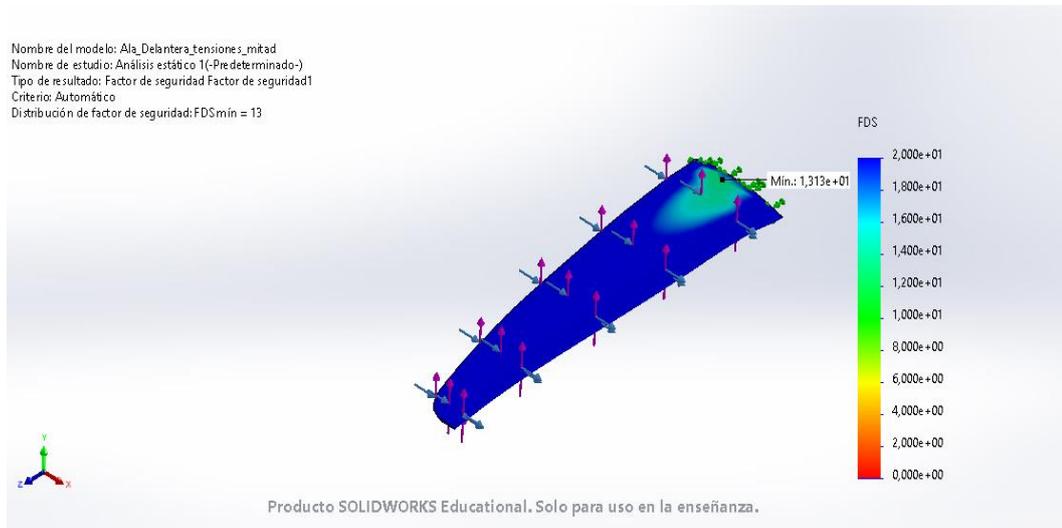


Imagen 48: Análisis ala delantera: Factor de seguridad.

Por último, se ha calculado el factor de seguridad mínimo del ala bajo dichas condiciones y se obtiene un valor de 13,13, superior al 1,5 mínimo establecido. Por tanto, el ala delantera soporta las fuerzas durante la navegación y el material es adecuado para dicha aplicación.

9.5 Ala trasera

En el caso del ala trasera, ésta se ha diseñado para mantener un ángulo de 0° respecto a la dirección del flujo durante la navegación, tal y como se ve en la siguiente imagen.

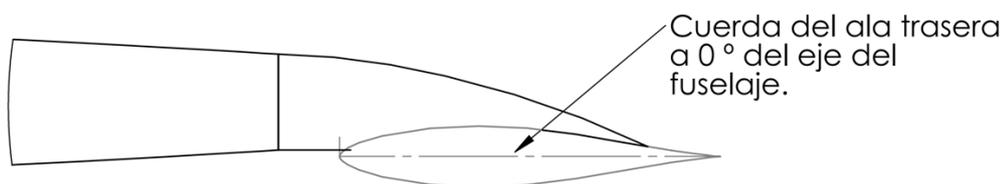


Imagen 49: Detalle del diseño del ala trasera.

Además, el ala trasera presenta dos taladros en el centro del ala que servirán para realizar la unión con el fuselaje mediante unos tornillos de 5 mm de diámetro.



Imagen 50: Ala trasera del sistema de hidrofoil.

Al ser un perfil simétrico, para ese ángulo el ala no genera sustentación. Sin embargo se ha calculado la fuerza de sustentación generada durante el arranque ya que, en ese caso, el ángulo de ataque del ala trasera es de $4,5^\circ$ y, por tanto, si genera sustentación.

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_L \cdot C_L \cdot v^2$$

Dónde:

- $\rho = 1026 \text{ kg/m}^3$
- $A_L = 0,016896 \text{ m}^2$
- $C_L = 0,5155 (\alpha = 0^\circ)$
- $v = 5,14 \text{ m/s}$

Para estos datos se ha obtenido una fuerza de sustentación generada por media ala trasera de 118 N.

Igual que en el caso del ala delantera, se ha calculado la fuerza de arrastre a la que se ve sometida media ala trasera tanto en las condiciones de arranque como en las condiciones de navegación óptima. En el primer caso se se ha obtenido una fuerza de arrastre de 1,57 N. Para las condiciones de navegación, la fuerza de arrastre a la que se ve sometida durante las condiciones óptimas de navegación es mayor, de 13,2 N. Se ha utilizado esta última para el cálculo de tensiones.

Los resultados obtenidos en la simulación son los siguientes:

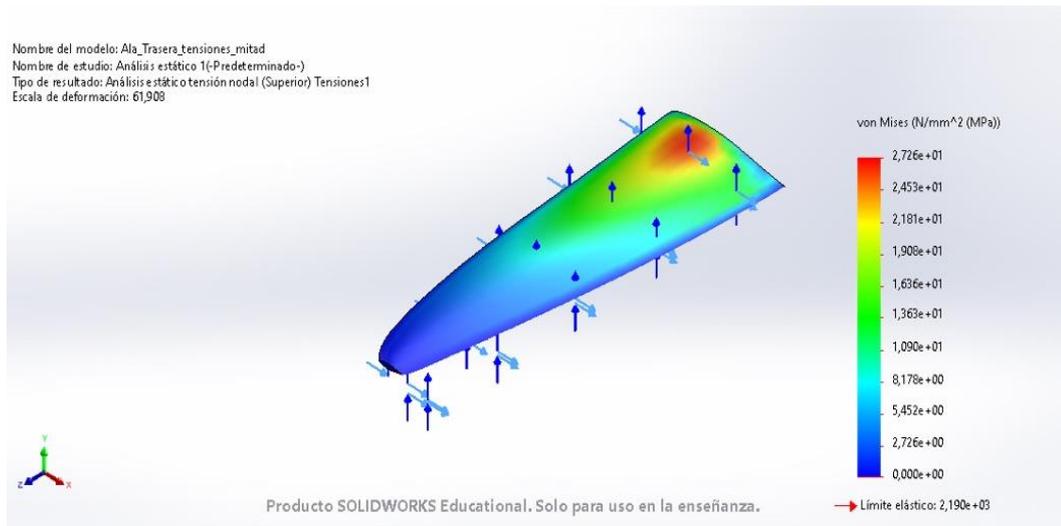


Imagen 51: Análisis ala trasera: Tensiones de Von Mises.

Tal y como se muestra en la imagen anterior, la tensión máxima a la que se somete el ala trasera es de 27 MPa. Al igual que en el caso del ala delantera, esto ocurre en los puntos de estrés máximo que están próximos a la cuerda del ala.

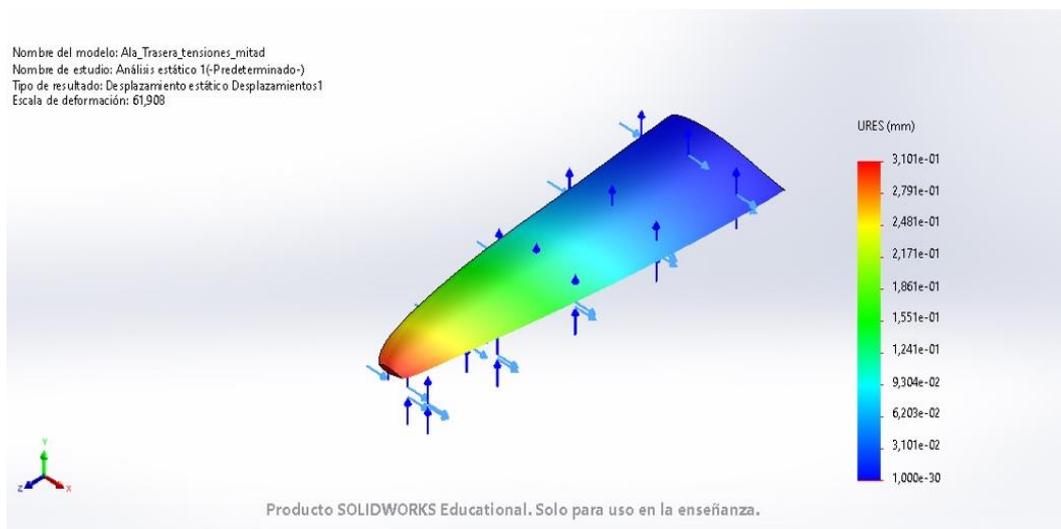


Imagen 52: Análisis ala trasera: Desplazamiento máximo.

El desplazamiento máximo obtenido bajo las condiciones de trabajo comentadas anteriormente es de 0,31 mm, en los extremos del ala.

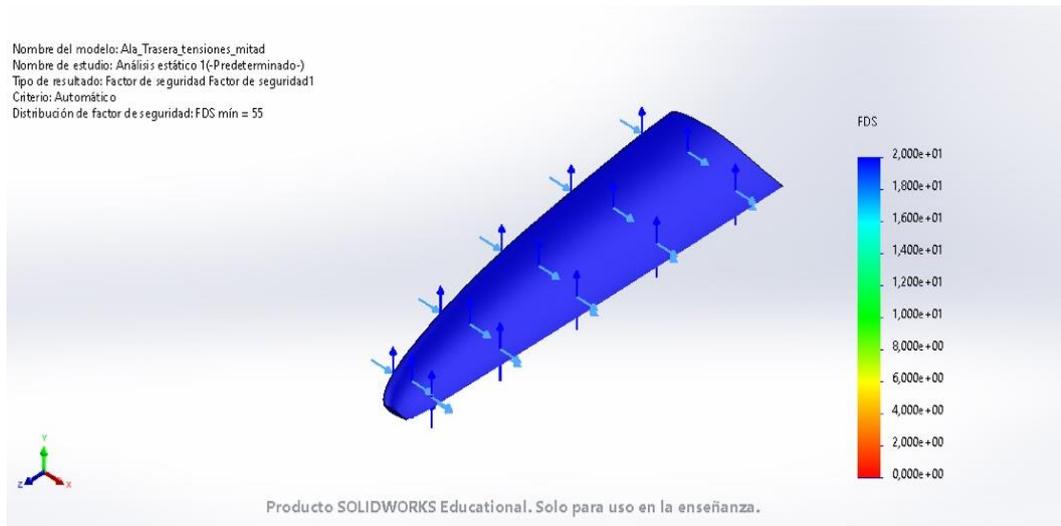


Imagen 53: Análisis ala trasera: Factor de seguridad.

Por último, se ha calculado el factor de seguridad mínimo del ala bajo dichas condiciones y se obtiene un valor de 55,1 superior al 1,5 mínimo establecido. Por tanto, el ala trasera también soporta las fuerzas durante la navegación y el material es adecuado para dicha aplicación.

9.6 Fuselaje

El fuselaje se ha diseñado como un tubo rectangular de fibra de carbono de un espesor de 1 mm con una longitud de 0,575 m. Además, se ha diseñado de tal manera que se adapte perfectamente a los perfiles de las alas delantera y trasera y que imponga sus ángulos de ataque correspondiente. (Poner foto fuselaje con ala delantera y trasera).

Además, el fuselaje presenta 6 taladros, dos en la proa del fuselaje, dos en el centro y dos en la popa, que servirán para realizar la unión con el ala delantera, el mástil y el ala trasera, respectivamente. Esta unión se hará mediante 6 tornillos de 5 mm de diámetro.

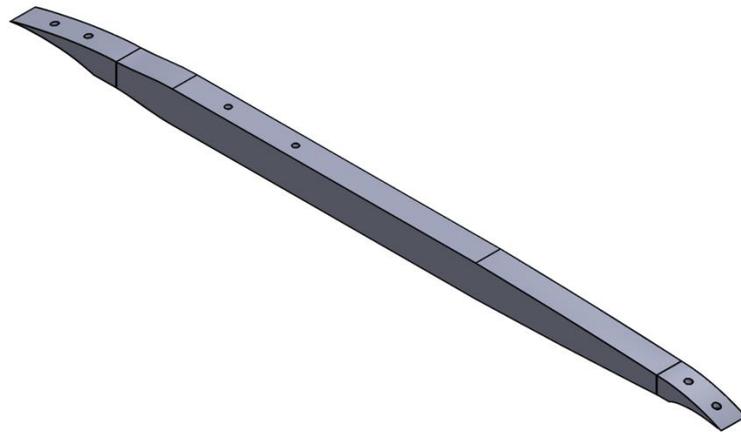


Imagen 54: Fuselaje del sistema de hidrofoil.

Para el cálculo estructural del fuselaje, se han considerado las fuerzas máximas de sustentación y arrastre a las que se ve sometido, tanto del ala delantera como del ala trasera, y que se han calculado en los apartados anteriores. En este caso, al evaluar el fuselaje entero, las fuerzas serán las generadas por las alas enteras y no por media.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

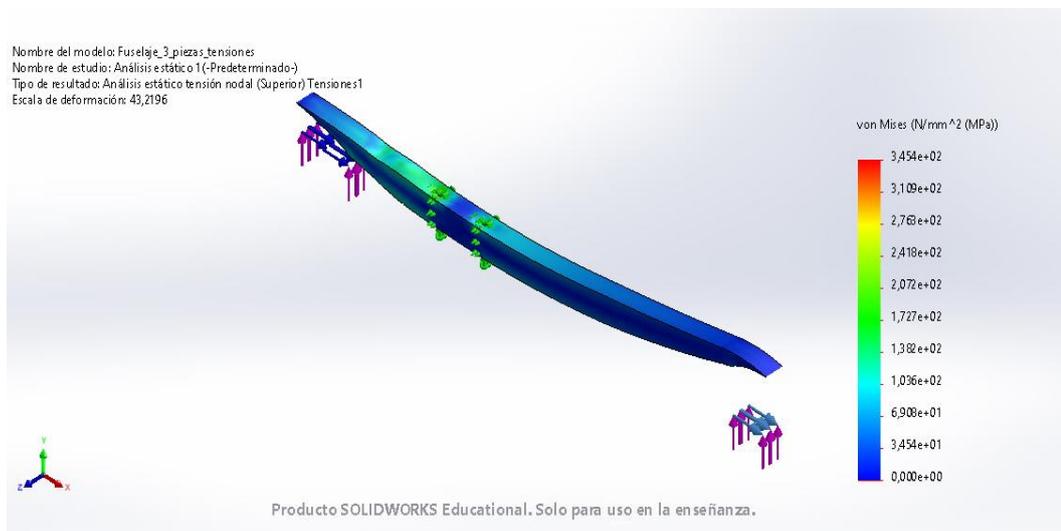


Imagen 55: Análisis fuselaje: Tensiones de Von Mises.

En la imagen anterior se observa que la tensión máxima a la que se somete el fuselaje es de 345,4 MPa. Esto ocurre en los puntos de estrés máximo que están en el centro del fuselaje, en la zona de anclaje con el mástil.

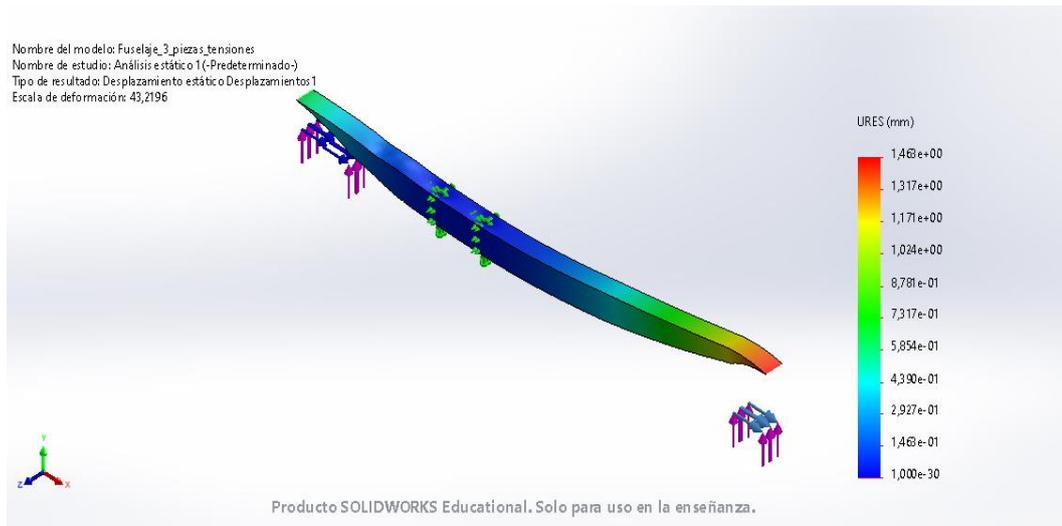


Imagen 56: Análisis fuselaje: Desplazamiento máximo.

El desplazamiento máximo obtenido bajo las condiciones de trabajo comentadas anteriormente es de 1,46 mm, en la popa del fuselaje. En la imagen anterior, la escala de deformación es de 43. El programa de simulación aumenta la escala automáticamente para ver en qué zonas del componente se producen los desplazamientos máximos. La siguiente imagen está a escala real de deformación y se observa que el desplazamiento es suficientemente pequeño como para no comportar un cambio en el ángulo de ataque de las alas.

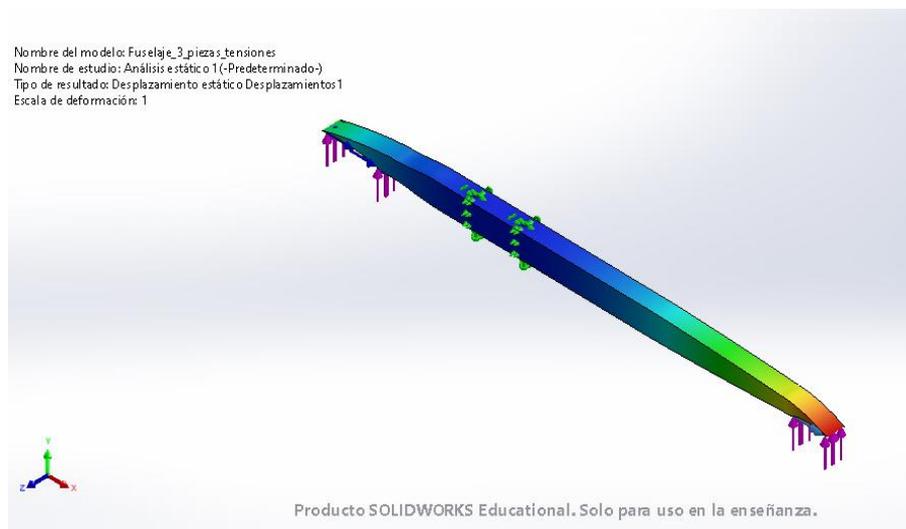


Imagen 57: Desplazamiento máximo del fuselaje a escala real.

Por último, se ha calculado el factor de seguridad mínimo del fuselaje bajo dichas condiciones y se obtiene un valor de 6,3 superior al 1,5 mínimo establecido. Por tanto, el

fuselaje también soporta las fuerzas durante la navegación y el material es adecuado para dicha aplicación.

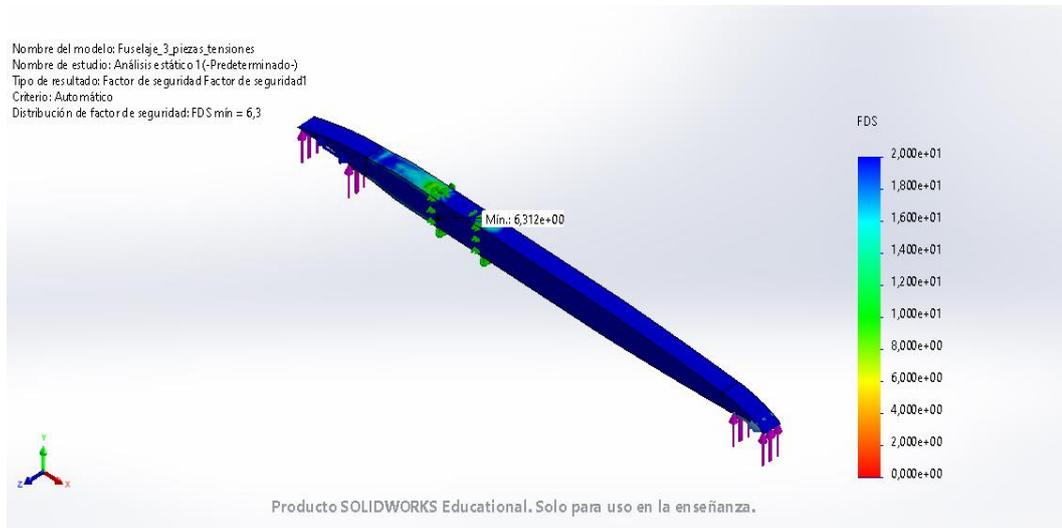


Imagen 58: Análisis fuselaje: Factor de seguridad.

9.7 Mástil

El diseño del mástil se ha hecho a partir del perfil e837 y se le ha asignado una cuerda de 115,6 mm y una longitud de 1,101 m.

El mástil presenta dos taladros en la cara inferior que servirán para realizar la unión con el fuselaje mediante unos tornillos de 5 mm de diámetro.

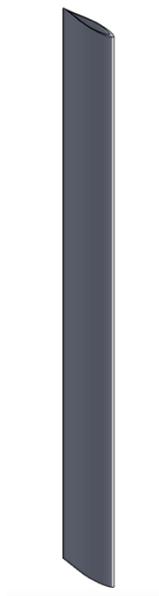


Imagen 59: Mástil.

Se ha fijado la cara superior, que es la que va fija a la tabla de kitesurf. En la cara inferior se le han aplicado las fuerzas a las que se ve sometido durante la navegación/arranque. Se ha realizado la simulación y se han obtenido los siguientes resultados:

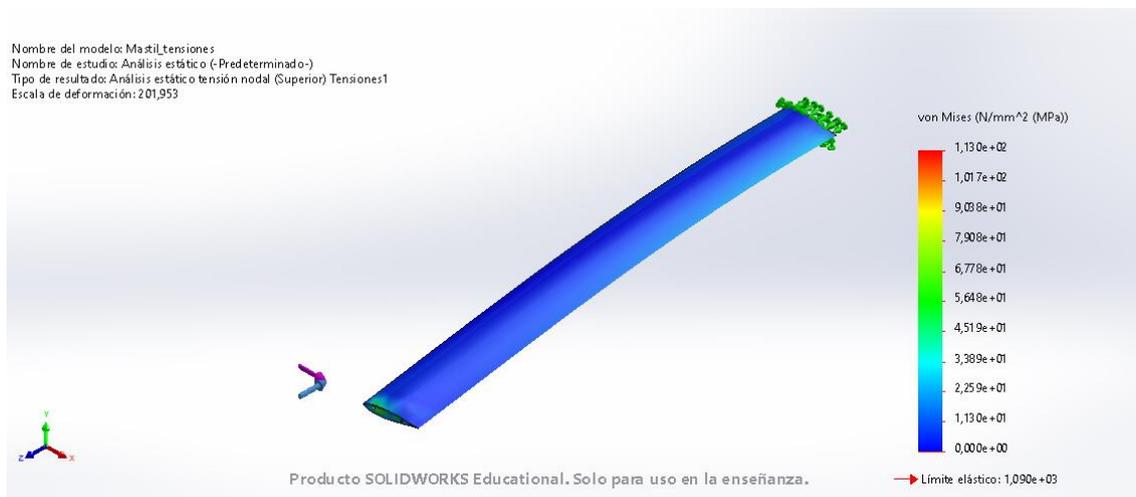


Imagen 60: Análisis mástil: Tensiones de Von Mises.

Tal y como se muestra en la imagen anterior, la tensión máxima a la que se somete el mástil es de 113,0 MPa. Esto ocurre en los puntos de estrés máximo que están la cara inferior del mástil, en la zona de anclaje con el fuselaje.

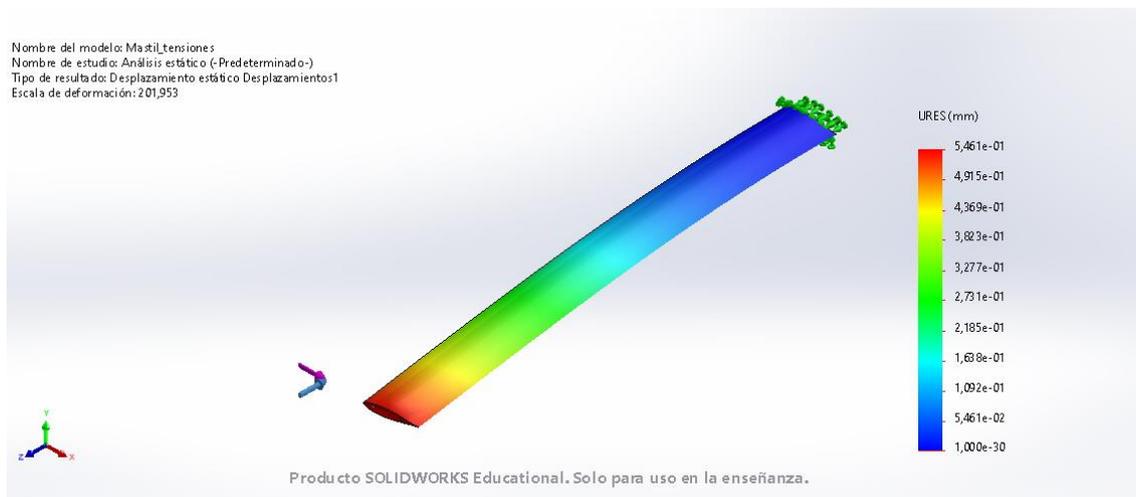


Imagen 61: Análisis mástil: Desplazamiento máximo.

El desplazamiento máximo obtenido bajo las condiciones de trabajo comentadas anteriormente es de 0,55 mm, en la cara inferior del mástil. Al igual que en el fuselaje, los desplazamientos de la imagen anterior están escalados. La siguiente imagen muestra las deformaciones producidas en el mástil a escala real.

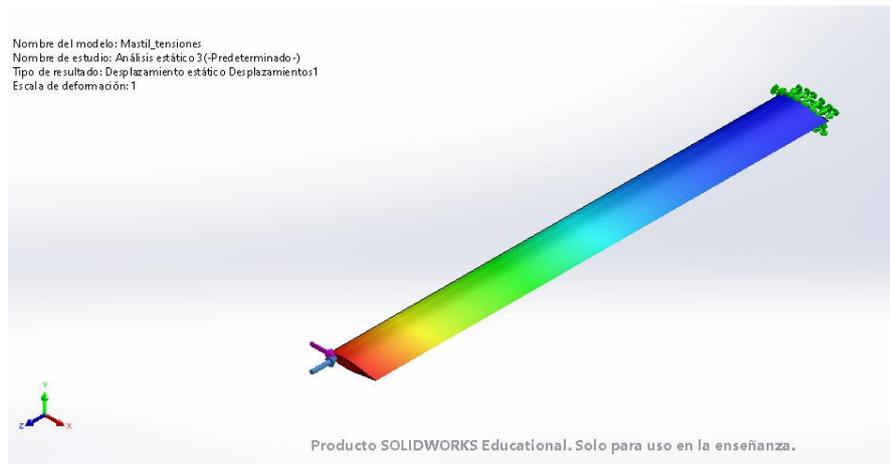


Imagen 62: Desplazamiento máximo del mástil a escala real.

Por último, se ha calculado el factor de seguridad mínimo del mástil bajo dichas condiciones y se obtiene un valor de 8,6 superior al 1,5 mínimo establecido. Por tanto, el mástil también soporta las fuerzas durante la navegación y el material es adecuado para dicha aplicación.

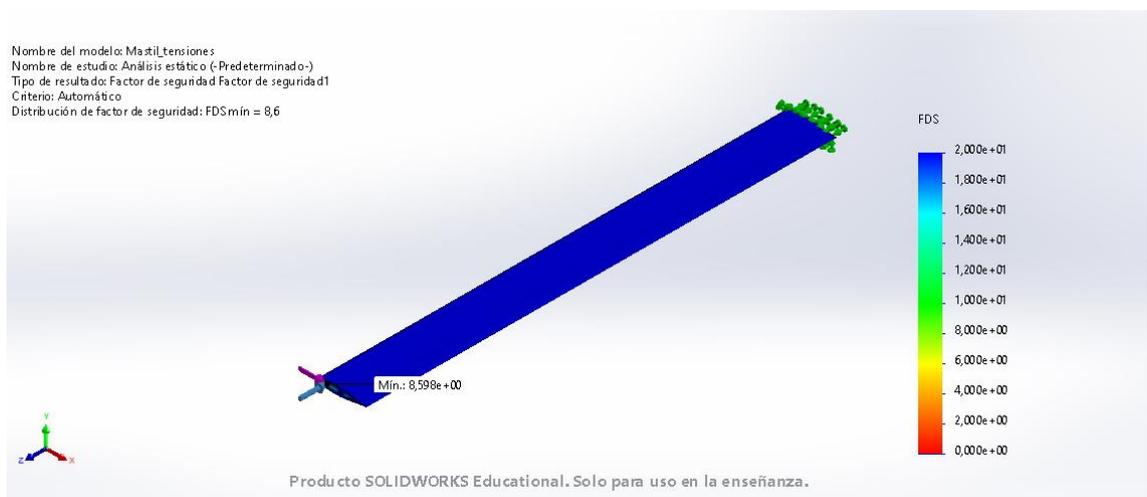


Imagen 63: Análisis mástil: Factor de seguridad.

10. Propuesta de fabricación

Todo el sistema de hidrofoil se ha diseñado para fabricarse con fibra de carbono en una matriz de resina epoxy, debido a sus propiedades como alta resistencia y ligereza. A la hora de hacer el diseño también hay que tener en cuenta el proceso de fabricación. Tiene que ser factible y que cumpla con las tolerancias de diseño.

El primer paso para la fabricación de una pieza hecha con fibra de carbono y resina es la obtención de un molde. El molde puede ser de distintos materiales, se recomiendan moldes de acero mazizo para hacer series de fabricación largas, ya que el mismo molde puede utilizarse varias veces. Sin embargo, estos moldes son muy caros y como el objetivo principal no es hacer muchas unidades se escoge un molde de aluminio. Los moldes de aluminio no se pueden reutilizar para series largas, pero son mucho más baratos. Para obtener un acabado fino y preciso, los moldes se suelen mecanizar con máquinas de control numérico. Para facilitar el desmolde de la pieza, se deben preparar correctamente, limpiándolos y aplicando un agente desmoldante antes de cada uso.

Seguidamente, se debe recortar el tejido de fibra de carbono necesario para fabricar la pieza. La fibra de carbono está formada por miles de filamentos por lo que no es isotrópica, puede ser unidireccional, bidireccional o multiaxial. En este proyecto se utiliza una fibra de carbono biaxial por lo que se cortarán varias láminas en diferentes direcciones para garantizar que el material aguante en todas las direcciones y no falle en ningún punto.

El siguiente paso es colocar las láminas de fibra de carbono en los moldes y proceder a incorporar la resina. Para hacerlo, se dispondrá de una bolsa de vacío y unas mangueras por donde se introducirá la resina de epoxy. Una vez colocadas las láminas de fibra correctamente, se cerrarán los moldes, se introducirá la resina por las mangueras y con la ayuda de una bomba de aire y la bolsa de vacío, se ejercerá la presión adecuada para que la resina impregne toda la fibra y ambos componentes se adecuen perfectamente al molde y formen las piezas.

Una vez termina el proceso de vaciado, se tiene que dejar reposar la resina un tiempo determinado que varía en función del tipo de resina. También se puede introducir el molde en un horno a temperatura elevada para acelerar la cura de la resina. La

incorporación de este horno al proceso de fabricación aumentará los costes del proceso, pero acelerará la producción, por lo que es decisión de los fabricantes utilizarlo o no. En este caso, se introducirá el hidrofoil en un horno a 130° ya que es lo que recomienda el proveedor Toray para curar la resina de epoxy junto con la fibra de carbono M46J.

Una vez la resina se ha curado y la pieza está lista se procede a desmoldarla. La pieza ya estará lista para pulirla, pintarla y ensamblar con el resto de los componentes.

Otra alternativa a este método de fabricación es la utilización de prepregs. Los prepregs o preimpregandos son láminas de carbono que ya incorporan la resina no curada. Este material se consigue sumergiendo la fibra en epoxy obteniendo una estructura sólida que se puede colocar en el molde con la ayuda de un rodillo sin necesidad de manipular de nuevo con resinas. Esto facilita y acelera el proceso de fabricación, sin embargo, hay que tener en cuenta que el material tiene que procesarse rápidamente después de haberse adquirido para que la resina no se endurezca a temperatura ambiente.

Este método de fabricación permite realizar piezas de gran calidad y acabados finos. Por eso, este método de fabricación es perfecto para garantizar un buen funcionamiento del hidrofoil, conseguir un acabado superficial bueno que maximice la velocidad de navegación y cumplir con las tolerancias establecidas por la IKA.

Como todo proceso de fabricación, deberá someterse a un último paso de control de calidad para ver que los productos finales cumplen con los requisitos de diseño y no se ha cometido ningún fallo durante la producción.

11. Estudio económico

Se realizará un cálculo de los costes asociados a la fabricación de este diseño. Para ello se han consultado a profesionales del sector y a la tienda online de Mel Composites que han permitido asignar unos valores aproximados a los costes de los materiales, procesos y mano de obra.

Para la fabricación del ala delantera, ala trasera, mástil y fuselaje se requieren 4 moldes de aluminio mecanizados con una máquina de control numérico. Los costes a asumir para la obtención de los moldes se dividen en:

- Diseño de los moldes: Para el diseño de cada molde será necesario el trabajo de un ingeniero y la licencia de un programa de diseño como SolidWorks. Se ha estimado un total de 100 horas para el diseño de los cuatro moldes. Dichas horas se facturan a un precio de 40 euros por lo que el coste total de diseño es de los moldes es de 4.000 €.
- Materiales y mecanizado moldes: Algunas de las grandes empresas que fabrican componentes de carbono hacen sus propios moldes, sin embargo, es habitual enviar los diseños y comprar los moldes a empresas que se dedican a la fabricación de estos. Aproximadamente, los moldes para las alas delantera y trasera pueden costar 2.000€, mientras que, para el mástil y el fuselaje, entorno a los 1.000€. Estos costes incluyen los materiales, la codificación de la máquina de control numérico y el precio de las horas que esta trabaja sobre cada molde.
- A pesar de que no es el objetivo del proyecto, se va a realizar un cálculo de costes adicional por si se decidiesen fabricar muchas unidades de hidrofoils para comercializarlo. Para ello, tal y como se ha comentado anteriormente, lo adecuado es utilizar moldes de acero macizo ya que pueden reutilizarse. Estos moldes cuestan diez veces más que los de aluminio, 20.000 € para cada ala y 10.000€ tanto para el mástil como para el fuselaje. Un molde de dichas características puede soportar series de entre 1.000 y 1.500 unidades. En este caso, el precio de los moldes repercutirá más o menos en el precio final del hidrofoil según el número de unidades fabricadas.

Para los costes de materiales de los componentes se tiene en cuenta lo siguiente:

- El precio de las láminas de fibra de carbono de alto módulo es de 60 €/m². Para calcular el coste total de la fibra se ha multiplicado dicho factor por el área de superficie de cada componente y por el número de capas de fibra necesarias. El precio final de la fibra de carbono requerida para la fabricación de un hidrofoil es de 644,8 €.
- La resina necesaria para el laminado se aproxima como 1,5 veces el peso de fibra utilizada. El precio total de la resina necesaria para la fabricación de una unidad asciende a 32 €.

Será necesaria mano de obra para el recorte de la fibra, la laminación de los elementos, el mecanizado de los taladros de cada componente, la colocación del sistema de vaciado, la introducción de los moldes al horno y su posterior extracción y el desmolde de las piezas. Para este cálculo se tiene en cuenta lo siguiente:

- Para el laminado del hidrofoil se contratará a un profesional del sector para que haga la laminación lo mejor posible y garantizar así que el resultado sea el óptimo. El precio asciende a 100€ la hora trabajada y el tiempo de mano de obra dedicado para un hidrofoil es de 6 horas. Por tanto, el precio de mano de obra es de 600 €.
- Se calcula también cuánto serían estos costes en el caso de querer comercializar el producto y hacer series largas. El precio de la mano de obra en España se aproxima a 25€ la hora y el tiempo de mano de obra dedicado para cada hidrofoil es de 6 horas. Por tanto, el precio de mano de obra por unidad es de 150€.

Para el cálculo de costes del tratamiento térmico hay que tener en cuenta el precio del horno.

- Un horno de curado industrial profesional con sistema de vacío tiene un precio de 2.600 €. Al igual que en el caso de los moldes, este precio repercutirá en cada unidad más o menos dependiendo de las unidades fabricadas.

- Se utiliza una bolsa de vacío en la fabricación de cada componente del hidrofoil. El precio de una bolsa de vacío es de 4 €, por lo que para cada unidad de hidrofoil ascenderá a un coste de 16 €.

Para el ensamblaje de los componentes se suministrará la tornillería necesaria. Esta será de un material que se oxide y corroa lo mínimo con el agua de mar. Se ha decidido utilizar tornillería de titanio que tiene un coste de que se ha estimado tener un coste de 34,24 € por hidrofoil.

Con la información anterior se ha obtenido un coste de fabricación de **13.915 €**.

Además, se ha calculado cuál sería el coste unitario para series de 1.500 unidades, 20.000 y 50.000 unidades por si el hidrofoil llegase a comercializarse. Para ello se han multiplicado los costes variables mencionados por el número de unidades y se ha hecho la corrección adecuada para los costes fijos. Los costes fijos son los costes del horno de curado y el diseño y costes de fabricación de los cuatro moldes de acero. A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

Unidades	1.500	22.500	45.000
Costes totales [€]	1.364.113,8	20.369.306,4	40.732.012,8
Costes totales por unidad [€]	909,4	905,3	905,2

Tabla 16: Resumen de costes de fabricación.

Tal y como se muestra en la tabla anterior, el precio unitario para una serie de 1.500 unidades es de 909,4 €. Para series mucho más grandes, el precio unitario prácticamente no disminuye siendo de 905,3 y 905,2 para 22.500 y 45.000 unidades, respectivamente. Esto se debe a que el coste fijo mayor es el de los moldes. Como cada 1.500 unidades hay que adquirir nuevos moldes, este coste no se reparte para series más grandes y por tanto el precio no varía sustancialmente.

Una opción para reducir costes para series más grandes sería reduciendo el precio de la mano de obra. Para ello se podría adquirir una máquina que corte las telas de fibra y automatice más el proceso. Otra solución podría ser utilizar *prepregs* para agilizar el proceso y reducir el tiempo de laminado.

Para calcular el precio de venta se deberían tener en cuenta otros factores adicionales como el trabajo de ingeniería, los equipos necesarios para llevarlo a cabo, alquiler del lugar de trabajo, costes energéticos, entre otros. Sin embargo, para hacer un cálculo aproximado de cuál podría ser dicho coste se multiplica el coste de fabricación

por tres. Teniendo esto en cuenta, los costes de fabricación y de venta serían los siguientes:

Unidades	1.500	22.500	45.000
Costes totales por unidad [€]	909,4	905,3	905,2
Precio de venta [€]	2.728,2	2.715,9	2.715,5

Tabla 17: Resumen costes de fabricación y precio de venta.

Los cálculos detallados se encuentran en el anexo al final de este documento.

12. Conclusiones

Durante la realización de este trabajo se ha conseguido cumplir con el objetivo principal de diseñar un sistema de *hidrofoil*, para participar en las regatas de la categoría Fórmula Kite, que sea lo más rápido posible. A la hora de la toma de decisiones durante el diseño de dicho sistema siempre se ha utilizado el criterio de maximizar la velocidad; durante la elección de los perfiles y materiales a utilizar y la elección de las dimensiones del sistema de *hidrofoil*.

Para la consecución de dicho objetivo se ha realizado un estudio de los componentes del sistema de *hidrofoil*: ala delantera, ala trasera, fuselaje y mástil; y se han calculado las fuerzas a las que se ven sometidos dichos componentes durante la navegación estableciendo unas condiciones de trabajo iniciales. A partir de los resultados obtenidos, se han calculado las fuerzas de sustentación mínima generada por el ala delantera del *hidrofoil* necesaria para vencer dichas fuerzas y posibilitar la navegación del *kitesurfer*. Esta fuerza es de 939 N durante la navegación y de 664 durante el arranque del *kitesurf*.

Seguidamente, se han estudiado los 11 perfiles alares recomendados para aplicaciones en agua. Mediante el análisis de la sustentación y arrastre generados por dichos perfiles, se ha escogido utilizar el perfil ys930 para el ala delantera y el perfil e837 para el ala trasera y para el mástil. Una vez escogidos los perfiles, se ha decidido el ángulo de ataque que tienen que mantener respecto a la dirección del fluido durante el arranque y la navegación del *kitesurf* para hacerlo de la manera óptima. Para ello se ha establecido un ángulo determinado de cada ala respecto al eje del fuselaje.

Una vez calculadas las fuerzas y decididos los perfiles, se ha escogido el material de los componentes: un composite de fibra de carbono M46J y resina de epoxy. Para comprobar que este material es adecuado para la aplicación de este proyecto, se ha realizado el cálculo estructural mediante la simulación de SolidWorks. Se han calculado las tensiones de Von Mises, el desplazamiento máximo de los componentes y el factor de seguridad. Se ha concluido que el material es adecuado para dicha aplicación.

Por último, se ha realizado un cálculo de los costes de fabricación del sistema de hidrofoil obteniendo un precio unitario de 13.915 €. Además, se ha realizado el cálculo

de costes para series de 1.500, 22.500 y 45.000 unidades para el caso en que se comercialice adecuando los materiales de los moldes y de mano de obra para la fabricación en serie. Se han calculado los costes fijos y los costes variables obteniendo un coste de fabricación unitario de alrededor de 905 €, para los tres casos. El precio de venta se estima de 2.730 €, que es similar al precio de venta de los sistemas de hidrofoil que se comercializan actualmente para las regatas de Fórmula Kite.

13. Referencias

- 1] [J. Raney, «The History of Kitesurfing,» Julio 2019. [En línea]. Available: <https://www.groovewatersports.com/blog/history-of-kitesurfing>. [Último acceso: Septiembre 2021].
- 2] [H. Kitesurf, «Equipo de Kitesurf,» Octubre 2019. [En línea]. Available: <https://helloworldkitesurf.com/equipo-kitesurf/>. [Último acceso: Enero 2022].
- 3] [U. S. H. Association, «Hidrofoiling History,» Julio 2015. [En línea]. Available: <http://www.hydrofoil.org/history.html>. [Último acceso: Septiembre 2021].
- 4] [A. G. B. Foundation, «Hidrofoil History,» Junio 2017. [En línea]. Available: <https://agbfoundation.ca/hydrofoil/>. [Último acceso: Septiembre 2021].
- 5] [J. A. Marfà, «TFG: Diseño hidrodinámico de hidrofoils para embarcaciones deportivas ligeras a remo,» Junio 2018. [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/125957>. [Último acceso: Septiembre 2021].
- 6] [S. R. Farré, «TFG: Hydrofoils Applications to Windsurfing,» Enero 2016. [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/98075>. [Último acceso: Septiembre 2021].
- 7] [T. K. B. (TKB), «Foils: The future or just fad?,» Junio 2014. [En línea]. Available: <https://www.thekiteboarder.com/2014/06/04/foils-the-future-or-just-a-fad/>. [Último acceso: Septiembre 2021].
- 8] [H. info, «Blog Hidrofoil,» Octubre 2020. [En línea]. Available: <https://hydrofoil.info/>. [Último acceso: Septiembre 2021].

- 9] [F. K. O. Kiteboarding, «Registered Series Production Hydrofoils 2020-2024,» Mayo 2020. [En línea]. Available: <https://formulakite.org/equipment/eligible-equipment/hydrofoils-2020-2024>. [Último acceso: Septiembre 2021].
- 10] [F. M. White, Mecánica de fluidos, Mc Graw Hill, 2008.
- 11] [A. Cantó, «La pizarra de Yuri,» Diciembre 2016. [En línea]. Available: <http://lapizarradeyuri.com/2010/12/16/asi-vuela-un-avion/>. [Último acceso: Junio 2022].
- 12] [N. Hall, «National Aeronautics and Space Administration,» Mayo 2021. [En línea]. Available: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/induced.html>. [Último acceso: Febrero 2022].
- 13] [«Airfoil Tools,» Enero 2013. [En línea]. Available: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=e387-il>. [Último acceso: Enero 2022].
- 14] [N. G. R. Center, «Reynolds Number,» Mayo 2012. [En línea]. Available: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/reynolds.html>. [Último acceso: Marzo 2022].
- 15] [E. T. Box, «Seawater Properties,» 2005. [En línea]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/sea-water-properties-d_840.html. [Último acceso: Marzo 2022].
- 16] [C. y. t. Fibracero, Agosto 2020. [En línea]. Available: <https://fibracerotec.com/fibra-de-carbono/>. [Último acceso: Junio 2022].
- 17] [D. Systems, «Ayuda de Solidworks,» Septiembre 2013. [En línea]. Available:

https://help.solidworks.com/2018/spanish/SolidWorks/cworks/r_maximum_von_mises_stress_criterion.htm. [Último acceso: Junio 2022].

[18] U. Nations, «Sustainable Development Goals,» Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>. [Último acceso: Septiembre 2021].

14. Anexos

Anexo A: Script Matlab cálculo mecánico

```
% CÁLCULO MECÁNICO DEL CONJUNTO

clc
clear all

%Definición de variables

g = 9.81; % Gravedad [m/s]
v_knots = 30; % Velocidad de navegación [nudos]
FAC = 250; % Fuerza de arrastre de la cometa [N]
PN = 80; % Peso navegante [kg]
AlturaRegatista = 1.80; % Altura del regatista [m]
PT = 3.05; % Peso de la tabla [kg]
LongTabla= 1.4; % Longitud de la tabla [m]
PM = 1.977; % Peso del mástil [kg]
LongMastil = 1.101; % Longitud del Mástil [m]
PF = 0.682; % Peso fuselaje [kg]
LongFus = 0.575; % Longitud del fuselaje [m]
PAD = 0.52; %Peso ala delantera [kg]
PAT = 0.15; %Peso ala trasera [kg]
SeparacionPies = 1; % Separación entre los pies del regatista (foostraps) [m]
PosMastilTabla = 0.28; % Distancia entre el mástil y el final de la tabla [m]
PosMastilFuselaje = 0.1438; % Distancia entre el mástil y el inicio del
fuselaje [m]
AnguloCometa=45;
% Hipótesis de sustentación y de arrastre

AAT = 0;
SAT = 0;

% Cambio de unidades de [kg] a [N]

PN=PN*g;
PT=PT*g;
PM=PM*g;
PF=PF*g;
PAD=PAD*g;
PAT=PAT*g;

%Cambio de unidades de [kn] a [m/s]

v= v_knots*1852/3600;

%Ecuaciones

NP1 =
(FAC*cosd(AnguloCometa)*cosd(AnguloCometa)*AlturaRegatista/2+PN*SeparacionPies
/2-FAC*sind(AnguloCometa)*SeparacionPies/2)/SeparacionPies;
NP2 = PN-NP1-FAC*sind(AnguloCometa);
FRMH = FAC*cosd(AnguloCometa)*cosd(AnguloCometa);
FRMV = NP1+NP2+PT;
MRM = NP2*PosMastilTabla+NP1*(SeparacionPies+PosMastilTabla)+PT*LongTabla/2-
FRMV*PosMastilTabla;
FRFV = PM+FRMV;
FRFH = FRMH;
MRF = MRM+FRFH*LongMastil;
AAD = FRFH-AAT;
```

SADx = FRFV+PF-SAT; %Componente vertical de la fuerza de sustentación del ala delantera [N].

SAD= SADx/cosd(45); %Fuerza de sustentación total del ala delantera [N].

Anexo B: Análisis perfiles hidrodinámicos

Script Matlab

```
clc

clear all

T_e817=readtable("polares_e817.txt");
%T_e817.CDp=[];
%T_e817.CM=[];
%T_e817.Top_Xtr=[];
%T_e817.Bot_Xtr=[];
division_e817= T_e817.CL./T_e817.CD;
T_e817 = addvars(T_e817,division_e817);

T_e818=readtable("polares_e818.txt");
division_e818= T_e818.CL./T_e818.CD;
T_e818 = addvars(T_e818,division_e818);

T_e836=readtable("polares_e836.txt");
division_e836= T_e836.CL./T_e836.CD;
T_e836 = addvars(T_e836,division_e836);

T_e837=readtable("polares_e837.txt");
division_e837= T_e837.CL./T_e837.CD;
T_e837 = addvars(T_e837,division_e837);

T_e838=readtable("polares_e838.txt");
division_e838= T_e838.CL./T_e838.CD;
T_e838 = addvars(T_e838,division_e838);

T_e874=readtable("polares_e874.txt");
division_e874= T_e874.CL./T_e874.CD;
T_e874 = addvars(T_e874,division_e874);

T_e904=readtable("polares_e904.txt");
division_e904= T_e904.CL./T_e904.CD;
T_e904 = addvars(T_e904,division_e904);

T_e908=readtable("polares_e908.txt");
division_e908= T_e908.CL./T_e908.CD;
T_e908 = addvars(T_e908,division_e908);

T_ys900=readtable("polares_ys900.txt");
division_ys900= T_ys900.CL./T_ys900.CD;
T_ys900 = addvars(T_ys900,division_ys900);

T_ys915=readtable("polares_ys915.txt");
division_ys915= T_ys915.CL./T_ys915.CD;
T_ys915 = addvars(T_ys915,division_ys915);

T_ys930=readtable("polares_ys930.txt");
division_ys930= T_ys930.CL./T_ys930.CD;
T_ys930 = addvars(T_ys930,division_ys930);

figure(1);
plot(T_e817.CD,T_e817.CL,'red');
```

```

hold on;
plot(T_e818.CD,T_e818.CL, 'green');
hold on;
plot(T_e836.CD,T_e836.CL, 'magenta');
hold on;
plot(T_e837.CD,T_e837.CL, 'blue');
hold on;
plot(T_e838.CD,T_e838.CL, 'cyan');
hold on;
plot(T_e874.CD,T_e874.CL, 'black');
hold on;
plot(T_e904.CD,T_e904.CL, 'red--');
hold on;
plot(T_e908.CD,T_e908.CL, 'green--');
hold on;
plot(T_ys900.CD,T_ys900.CL, 'magenta--');
hold on;
plot(T_ys915.CD,T_ys915.CL, 'blue--');
hold on;
plot(T_ys930.CD,T_ys930.CL, 'cyan--');
title('CL vs CD')
ax=gca;
ax.FontSize=16;
legend({'e817', 'e818', 'e836', 'e837', 'e838', 'e874', 'e904', 'e908', 'ys900', 'ys915', 'ys930'}, 'Location', 'southeast');

figure(2);
plot(T_e817.alpha,T_e817.CL, 'red');
hold on;
plot(T_e818.alpha,T_e818.CL, 'green');
hold on;
plot(T_e836.alpha,T_e836.CL, 'magenta');
hold on;
plot(T_e837.alpha,T_e837.CL, 'blue');
hold on;
plot(T_e838.alpha,T_e838.CL, 'cyan');
hold on;
plot(T_e874.alpha,T_e874.CL, 'black');
hold on;
plot(T_e904.alpha,T_e904.CL, 'red--');
hold on;
plot(T_e908.alpha,T_e908.CL, 'green--');
hold on;
plot(T_ys900.alpha,T_ys900.CL, 'magenta--');
hold on;
plot(T_ys915.alpha,T_ys915.CL, 'blue--');
hold on;
plot(T_ys930.alpha,T_ys930.CL, 'cyan--');
title('CL vs \alpha')
ax=gca;
ax.FontSize=16;
legend({'e817', 'e818', 'e836', 'e837', 'e838', 'e874', 'e904', 'e908', 'ys900', 'ys915', 'ys930'}, 'Location', 'southeast');

figure(3);
plot(T_e817.alpha,T_e817.CD, 'red');
hold on;
plot(T_e818.alpha,T_e818.CD, 'green');
hold on;
plot(T_e836.alpha,T_e836.CD, 'magenta');
hold on;
plot(T_e837.alpha,T_e837.CD, 'blue');
hold on;
plot(T_e838.alpha,T_e838.CD, 'cyan');
hold on;

```

```
plot(T_e874.alpha,T_e874.CD,'black');
hold on;
plot(T_e904.alpha,T_e904.CD,'red--');
hold on;
plot(T_e908.alpha,T_e908.CD,'green--');
hold on;
plot(T_ys900.alpha,T_ys900.CD,'magenta--');
hold on;
plot(T_ys915.alpha,T_ys915.CD,'blue--');
hold on;
plot(T_ys930.alpha,T_ys930.CD,'cyan--');
title('CD vs \alpha')
ax=gca;
ax.FontSize=16;
legend({'e817','e818','e836','e837','e838','e874','e904','e908','ys900','ys915',
', 'ys930'},'Location','north');

figure(4);
plot(T_e817.alpha,T_e817.division_e817,'red');
hold on;
plot(T_e818.alpha,T_e818.division_e818,'green');
hold on;
plot(T_e836.alpha,T_e836.division_e836,'magenta');
hold on;
plot(T_e837.alpha,T_e837.division_e837,'blue');
hold on;
plot(T_e838.alpha,T_e838.division_e838,'cyan');
hold on;
plot(T_e874.alpha,T_e874.division_e874,'black');
hold on;
plot(T_e904.alpha,T_e904.division_e904,'red--');
hold on;
plot(T_e908.alpha,T_e908.division_e908,'green--');
hold on;
plot(T_ys900.alpha,T_ys900.division_ys900,'magenta--');
hold on;
plot(T_ys915.alpha,T_ys915.division_ys915,'blue--');
hold on;
plot(T_ys930.alpha,T_ys930.division_ys930,'cyan--');
title('CL/CD vs \alpha')
ax=gca;
ax.FontSize=16;
legend({'e817','e818','e836','e837','e838','e874','e904','e908','ys900','ys915',
', 'ys930'},'Location','northwest');
```

Polares perfil e837

alpha	CL	CD
-19.750	-0.9292	0.14448
-19.500	-0.9436	0.13667
-19.250	-0.9632	0.12795
-19.000	-0.9809	0.11993
-18.750	-0.9924	0.11336
-18.500	-10.090	0.10605
-18.250	-10.153	0.10078
-18.000	-10.322	0.09391
-17.750	-10.411	0.08854
-17.500	-10.500	0.08331
-17.250	-10.588	0.07837
-17.000	-10.646	0.07395
-16.750	-10.685	0.06994
-16.500	-10.738	0.06587
-16.250	-10.757	0.06241
-16.000	-10.762	0.05917
-15.750	-10.784	0.05588
-15.500	-10.744	0.05336
-15.250	-10.770	0.05027
-15.000	-10.677	0.04846
-14.750	-10.871	0.04391
-14.500	-10.904	0.04108
-14.250	-10.860	0.03909
-14.000	-10.857	0.03680
-13.750	-10.816	0.03490
-13.500	-10.720	0.03351
-13.250	-10.688	0.03163
-13.000	-10.580	0.03039
-12.750	-10.538	0.02867
-12.500	-10.442	0.02740
-12.250	-10.372	0.02598
-12.000	-10.267	0.02484
-11.750	-10.170	0.02369
-11.500	-10.070	0.02258
-11.250	-10.058	0.02095
-11.000	-0.9967	0.01990
-10.750	-0.9861	0.01898
-10.500	-0.9645	0.01817

-10.250	-0.9283	0.01747
-9.750	-0.9147	0.01614
-9.500	-0.9030	0.01565
-9.250	-0.8890	0.01526
-9.000	-0.8792	0.01473
-8.750	-0.8675	0.01430
-8.500	-0.8496	0.01397
-8.250	-0.8338	0.01346
-8.000	-0.8154	0.01303
-7.750	-0.7974	0.01254
-7.500	-0.7795	0.01203
-7.250	-0.7602	0.01153
-7.000	-0.7414	0.01099
-6.750	-0.7217	0.01047
-6.500	-0.7018	0.00991
-6.250	-0.6820	0.00934
-6.000	-0.6613	0.00881
-5.750	-0.6398	0.00827
-5.500	-0.6177	0.00779
-5.250	-0.5943	0.00742
-5.000	-0.5694	0.00713
-4.750	-0.5429	0.00694
-4.500	-0.5156	0.00684
-4.250	-0.4880	0.00678
-4.000	-0.4600	0.00669
-3.750	-0.4318	0.00662
-3.500	-0.4032	0.00661
-3.250	-0.3751	0.00657
-3.000	-0.3463	0.00653
-2.750	-0.3177	0.00649
-2.500	-0.2888	0.00650
-2.250	-0.2604	0.00648
-2.000	-0.2313	0.00646
-1.750	-0.2025	0.00643
-1.500	-0.1738	0.00643
-1.250	-0.1447	0.00646
-1.000	-0.1159	0.00641
-0.750	-0.0869	0.00641
-0.500	-0.0578	0.00644
-0.250	-0.0291	0.00642
0.000	0.0000	4520 0.

0.250	0.0291	0.00642
0.500	0.0578	0.00644
0.750	0.0868	0.00641
1.000	0.1159	0.00641
1.250	0.1447	0.00646
1.500	0.1737	0.00643
1.750	0.2025	0.00643
2.000	0.2312	0.00646
2.250	0.2604	0.00648
2.500	0.2888	0.00650
2.750	0.3177	0.00649
3.000	0.3462	0.00653
3.250	0.3750	0.00657
3.750	0.4317	0.00663
4.000	0.4600	0.00669
4.250	0.4880	0.00678
4.500	0.5155	0.00684
4.750	0.5429	0.00694
5.000	0.5694	0.00712
5.250	0.5943	0.00742
5.500	0.6176	0.00779
5.750	0.6398	0.00827
6.000	0.6612	0.00881
6.250	0.6820	0.00934
6.500	0.7018	0.00991
6.750	0.7217	0.01047
7.000	0.7414	0.01099
7.250	0.7604	0.01151
7.500	0.7794	0.01204
7.750	0.7972	0.01254
8.000	0.8153	0.01303
8.250	0.8336	0.01347
8.500	0.8498	0.01396
8.750	0.8675	0.01430
9.000	0.8795	0.01472
9.250	0.8898	0.01523
9.500	0.9028	0.01566
9.750	0.9148	0.01614
10.250	0.9288	0.01745
10.500	0.9647	0.01819
10.750	0.9864	0.01898

11.000	0.9981	0.01982
11.250	10.058	0.02096
11.500	10.085	0.02249
11.750	10.171	0.02369
12.000	10.299	0.02463
12.250	10.383	0.02592
12.500	10.455	0.02733
12.750	10.549	0.02861
13.000	10.601	0.03025
13.250	10.680	0.03172
13.500	10.783	0.03302
13.750	10.845	0.03468
14.000	10.839	0.03701
14.250	10.863	0.03910
14.500	10.918	0.04100
14.750	10.933	0.04337
15.000	10.734	0.04793
15.250	10.773	0.05029
15.500	10.771	0.05315
15.750	10.802	0.05578
16.000	10.796	0.05889
16.250	10.777	0.06226
16.500	10.768	0.06562
16.750	10.716	0.06964
17.000	10.655	0.07392
17.250	10.613	0.07815
17.500	10.530	0.08303
17.750	10.423	0.08854
18.000	10.313	0.09421
18.250	10.220	0.09982
18.500	10.102	0.10605
18.750	0.9930	0.11348
19.000	0.9817	0.12004

Polares perfil ys930

alpha	CL	CD
-12.500	-0.4340	0.13383
-12.250	-0.4327	0.13010
-9.250	-0.4439	0.04089
-9.000	-0.4326	0.03417
-8.750	-0.4238	0.03047
-8.500	-0.4064	0.02982
-8.250	-0.3974	0.02747
-7.750	-0.3790	0.02080
-7.500	-0.3608	0.01913
-7.250	-0.3384	0.01827
-7.000	-0.3225	0.01543
-6.750	-0.3033	0.01364
-6.500	-0.2825	0.01236
-6.250	-0.2606	0.01133
-6.000	-0.2372	0.01053
-5.750	-0.2119	0.01002
-5.500	-0.1880	0.00917
-5.250	-0.1620	0.00880
-5.000	-0.1355	0.00850
-4.750	-0.1112	0.00787
-4.500	-0.0870	0.00728
-4.250	-0.0594	0.00718
-4.000	-0.0317	0.00711
-3.750	-0.0037	0.00706
-3.500	0.0243	0.00703
-3.250	0.0517	0.00696
-3.000	0.0793	0.00689
-2.750	0.1070	0.00683
-2.500	0.1347	0.00677
-2.250	0.1625	0.00671
-2.000	0.1902	0.00664
-1.750	0.2181	0.00658
-1.500	0.2458	0.00652
-1.250	0.2737	0.00647
-1.000	0.3015	0.00643
-0.750	0.3285	0.00633
-0.500	0.3554	0.00623
-0.250	0.3823	0.00612

0.000	0.4092	0.00599
0.250	0.4361	0.00584
0.500	0.4628	0.00572
0.750	0.4872	0.00549
1.000	0.5115	0.00525
1.250	0.5350	0.00502
1.500	0.5668	0.00484
1.750	0.6095	0.00480
2.000	0.6451	0.00478
2.250	0.6812	0.00473
2.500	0.7185	0.00472
2.750	0.7396	0.00476
3.000	0.7364	0.00550
3.250	0.7287	0.00672
3.500	0.7266	0.00790
3.750	0.7316	0.00894
4.000	0.7446	0.00967
4.250	0.7612	0.01025
4.500	0.7762	0.01105
4.750	0.7966	0.01146
5.000	0.8155	0.01200
5.250	0.8329	0.01268
5.500	0.8510	0.01331
5.750	0.8706	0.01378
6.000	0.8881	0.01452
6.250	0.9067	0.01535
6.500	0.9270	0.01603
6.750	0.9487	0.01702
7.000	0.9708	0.01817
7.250	10.045	0.02441
7.500	10.247	0.02564
7.750	10.441	0.02678
16.750	0.8792	0.21102
17.000	0.8857	0.21509

Anexo C: Detalle cálculos coste de fabricación

Costes de fabricación para una unidad con moldes de aluminio.

Unidades					1
Horno de curado					2.600,0
Diseño moldes					4.000,0
Molde ala delantera					2.000,0
Molde ala trasera					2.000,0
Molde fuselaje					1.000,0
Molde mástil					1.000,0
Fibra de carbono	Área de superficie [mm ²]	Precio fibra [€/m ²]	Capas		
Ala delantera	101.868,2	60,0	16,0	97,8	
Ala trasera	34.645,4	60,0	16,0	33,3	
Fuselaje	57.957,6	60,0	16,0	55,6	
Mástil	477.162,7	60,0	16,0	458,1	
Total fibra de carbono					644,8
Resina					32,0
Mano de obra					600,0
Bolsa de vacío					4,0
Tornillería					34,2
Costes totales [€]					13.915,0

Costes de fabricación para series con moldes de acero.

Unidades				1.500	22.500	45.000
Costes fijos [€]						
Horno de curado				2.600,0	2.600,0	2.600,0
Diseño moldes				4.000,0	4.000,0	4.000,0
Molde ala delantera				20.000,0	300.000,0	600.000,0
Molde ala trasera				20.000,0	300.000,0	600.000,0
Molde fuselaje				10.000,0	150.000,0	300.000,0
Molde mástil				10.000,0	150.000,0	300.000,0
Costes fijos totales				66.600,0	906.600,0	1.806.600,0
Costes variables [€]						
Fibra de carbono	Área de superficie [mm ²]	Precio fibra [€/m ²]	Capas			
Ala delantera	101.868,2	60,0	16	146.690,2	2.200.352,9	4.400.705,8
Ala trasera	34.645,4	60,0	16	49.889,3	748.340,2	1.496.680,4
Fuselaje	57.957,6	60,0	16	83.458,9	1.251.883,3	2.503.766,6
Mástil	477.162,7	60,0	16	687.114,3	10.306.715,0	20.613.429,9
Total fibra de carbono				967.152,8	14.507.291,4	29.014.582,8
Resina				48.000,0	720.000,0	1.440.000,0
Mano de obra				225.000,0	3.375.000,0	6.750.000,0
Bolsa de vacío				6.000,0	90.000,0	180.000,0
Tornillería				51.360,0	770.400,0	1.540.800,0
Costes variables totales				1.297.512,8	19.462.691,4	38.925.382,8
Costes totales [€]				1.364.113,8	20.369.306,4	40.732.012,8
Costes totales por unidad [€]				909,4	905,3	905,2
Precio de venta [€]				2.728,2	2.715,9	2.715,5

Anexo D: Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible [15]

En septiembre de 2015, la Organización de las Naciones Unidas estableció un conjunto de objetivos llamados Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) u Objetivos Mundiales con el fin de afrontar los problemas globales de la actualidad. Erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad son los objetivos principales que se pretende conseguir, cada uno de ellos con sus propias metas específicas.

Son 17 objetivos y se pretenden alcanzar durante los próximos años, antes del 2030. Para ello, es necesaria la colaboración del sector privado, la sociedad civil y los ciudadanos.

El desarrollo de este proyecto está alineado con 3 de los 17 objetivos:

El objetivo de **Salud (ODS 3)** consiste en garantizar una vida sana y promover el bienestar de las personas en todas las edades. Es fundamental fomentar hábitos saludables, entre ellos el ejercicio, para cumplir este objetivo.

Practicar periódicamente un deporte al aire libre como el *kitesurf* es beneficioso para nuestra salud tanto física como mentalmente. Aumenta la resistencia cardiovascular, mejora la fuerza y resistencia de los músculos, reduce el estrés... entre muchos otros beneficios.

Además, la práctica del deporte a nivel competitivo, como en la categoría Fórmula Kite, es una buena manera de ocupar el tiempo libre de las personas, especialmente los jóvenes. Responsabilidad, constancia, trabajo en equipo y superación son algunos de los muchos valores que se fomentan al realizar un deporte a alto nivel.

Por otro lado, este proyecto también está relacionado con el objetivo de **Igualdad de género y empoderamiento de la mujer (ODS 5)**. A pesar de los logros conseguidos hasta el día de hoy, todavía existen muchas dificultades y desigualdades para las mujeres.

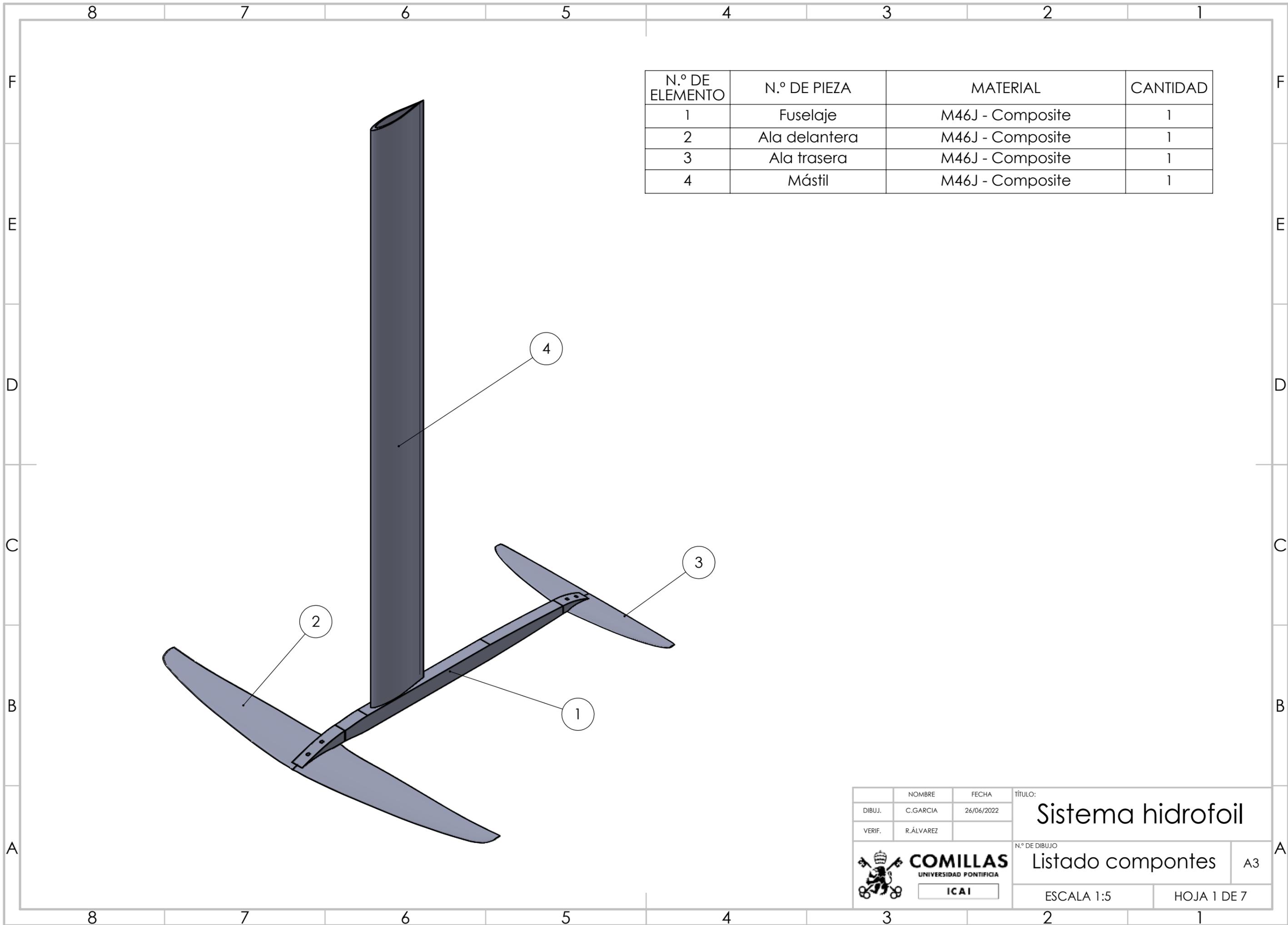
Muchos deportes de alta competición, especialmente en el mundo de la vela, están pensados para hombres, ya que requieren de una complejidad física muy concreta y muchas categorías son masculinas. Las organizaciones están cambiando este aspecto para que en las competiciones haya cada vez más representación de mujeres y se iguale a la de los hombres.

La categoría Fórmula Kite es mixta, tanto hombres como mujeres pueden competir en ella. En las olimpiadas de París 2024, está previsto que haya una representación igual tanto de hombres como de mujeres en esta categoría por lo que supondrá un gran avance en la vela femenina.

Por último, el objetivo de **Industria, innovación e infraestructura (ODS 9)** también está presente en este proyecto. La industria sostenible, la innovación y la infraestructura promueven el desarrollo de nuevas tecnologías y el uso eficiente de los recursos además de generar nuevos empleos e ingresos.

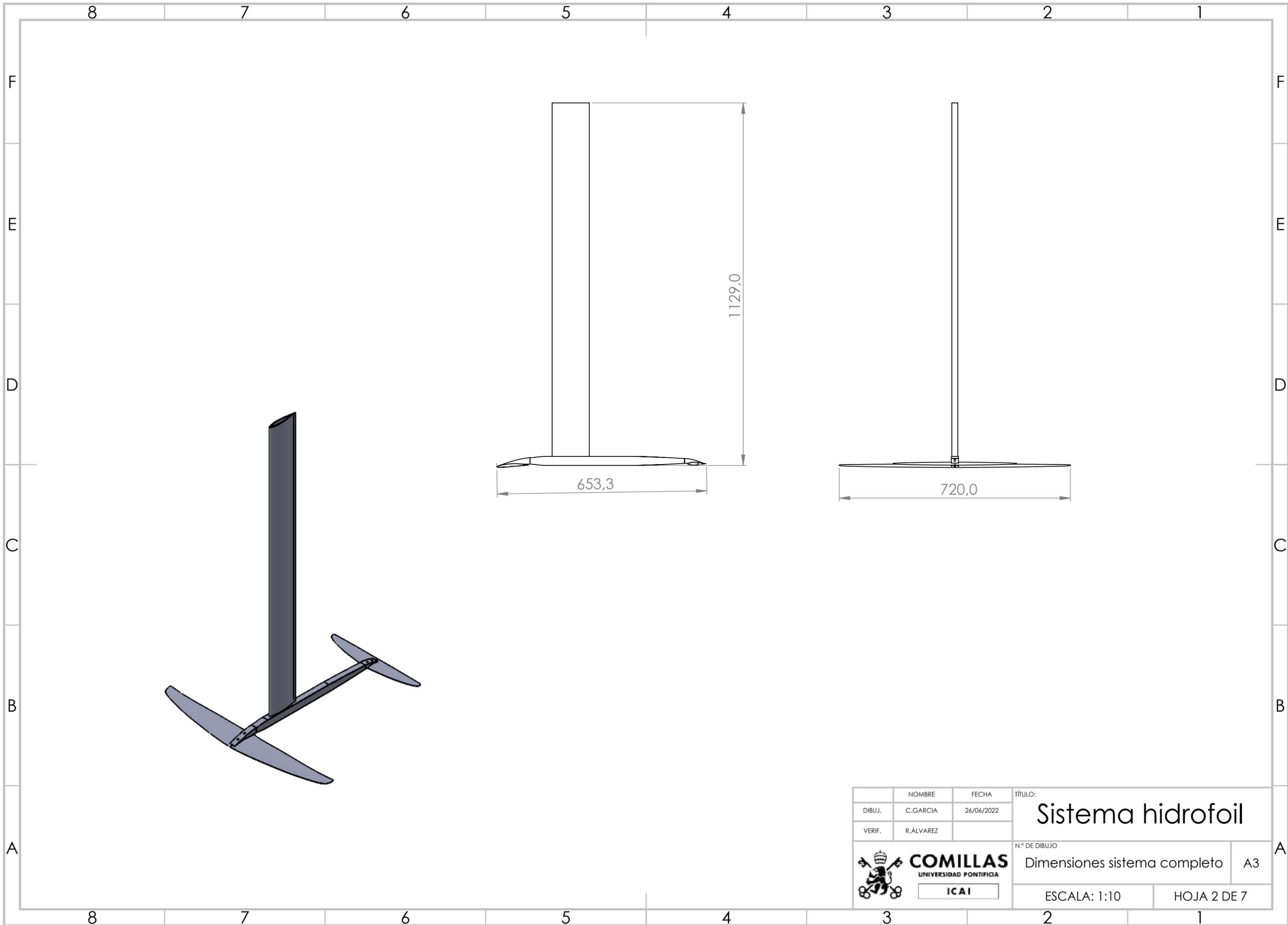
Este proyecto está alineado con el ODS 9 ya que cada vez son mayores las investigaciones en los diseños de los hidrofoils, así como las inversiones en las nuevas tecnologías para mejorar los procesos de fabricación de sus componentes y reducir el impacto medioambiental.

Anexo E: Planos 2D

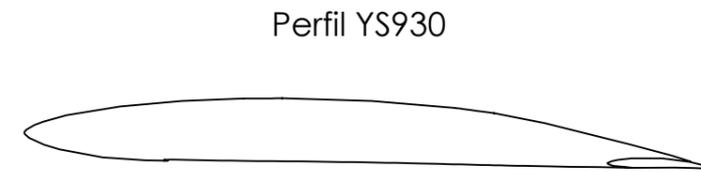
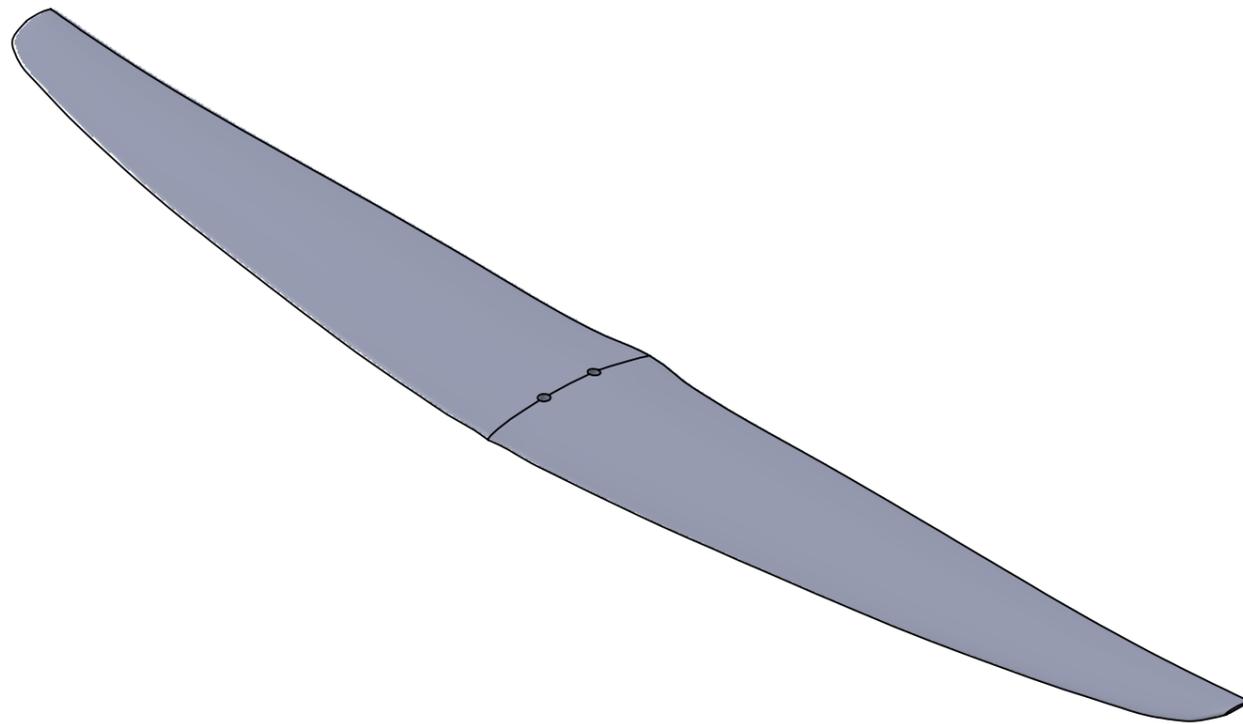
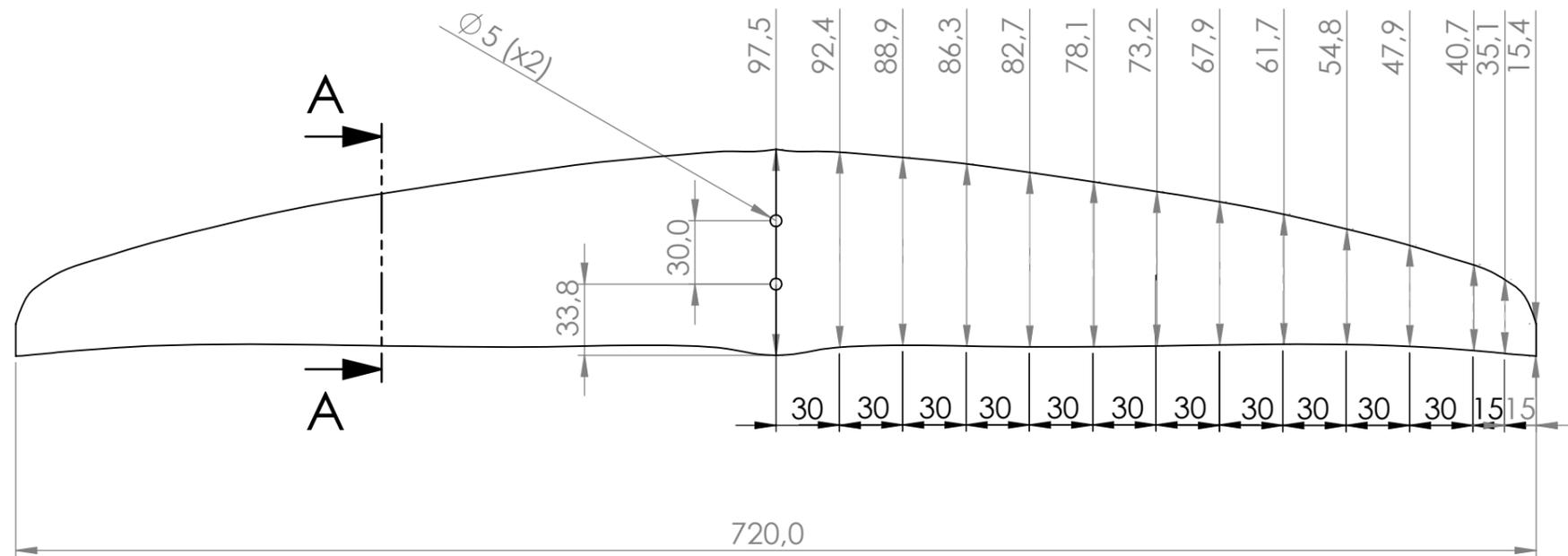


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	MATERIAL	CANTIDAD
1	Fuselaje	M46J - Composite	1
2	Ala delantera	M46J - Composite	1
3	Ala trasera	M46J - Composite	1
4	Mástil	M46J - Composite	1

	NOMBRE	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.	C.GARCIA	26/06/2022	Sistema hidrofoil	
VERIF.	R.ÁLVAREZ		N.º DE DIBUJO	
 COMILLAS UNIVERSIDAD PONTIFICIA 			Listado compontes	A3
			ESCALA 1:5	HOJA 1 DE 7

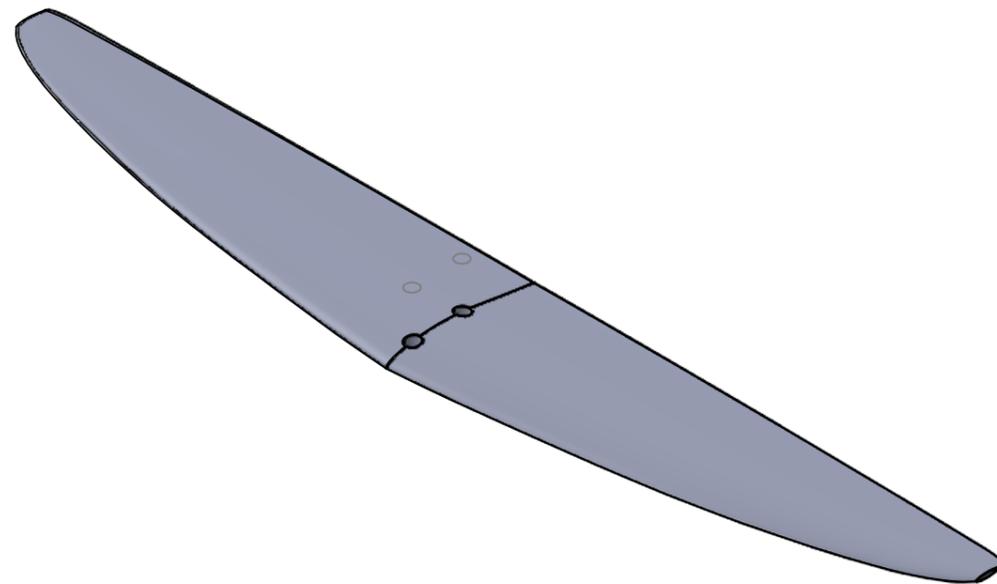
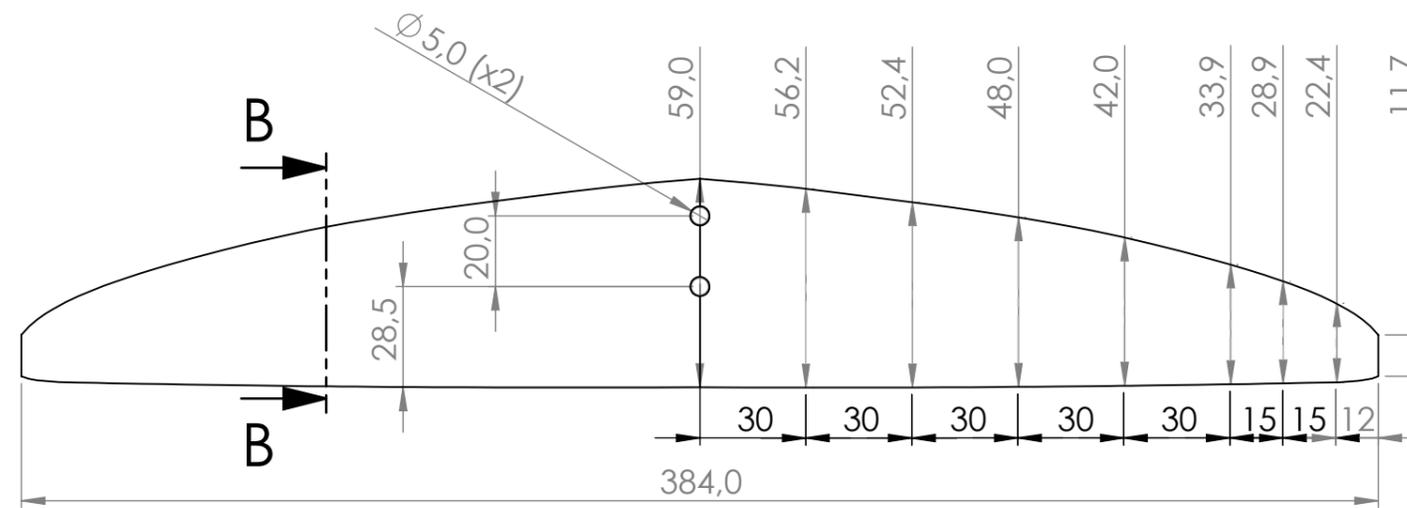


	NOMBRE	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.	C.GARCIA	26/06/2022	Sistema hidrofoil	
VERIF.	R.ÁLVAREZ		N.º DE DIBUJO	
 COMILLAS UNIVERSIDAD PONTIFICIA ICAI			Dimensiones sistema completo	
			A3	
			ESCALA: 1:10	HOJA 2 DE 7



SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 1

	NOMBRE	FECHA	TÍTULO:
DIBUJ.	C.GARCIA	26/06/2022	Sistema hidrofoil
VERIF.	R.ÁLVAREZ		
			N.º DE DIBUJO
			Ala delantera A3
ESCALA: 1:3		HOJA 3 DE 7	



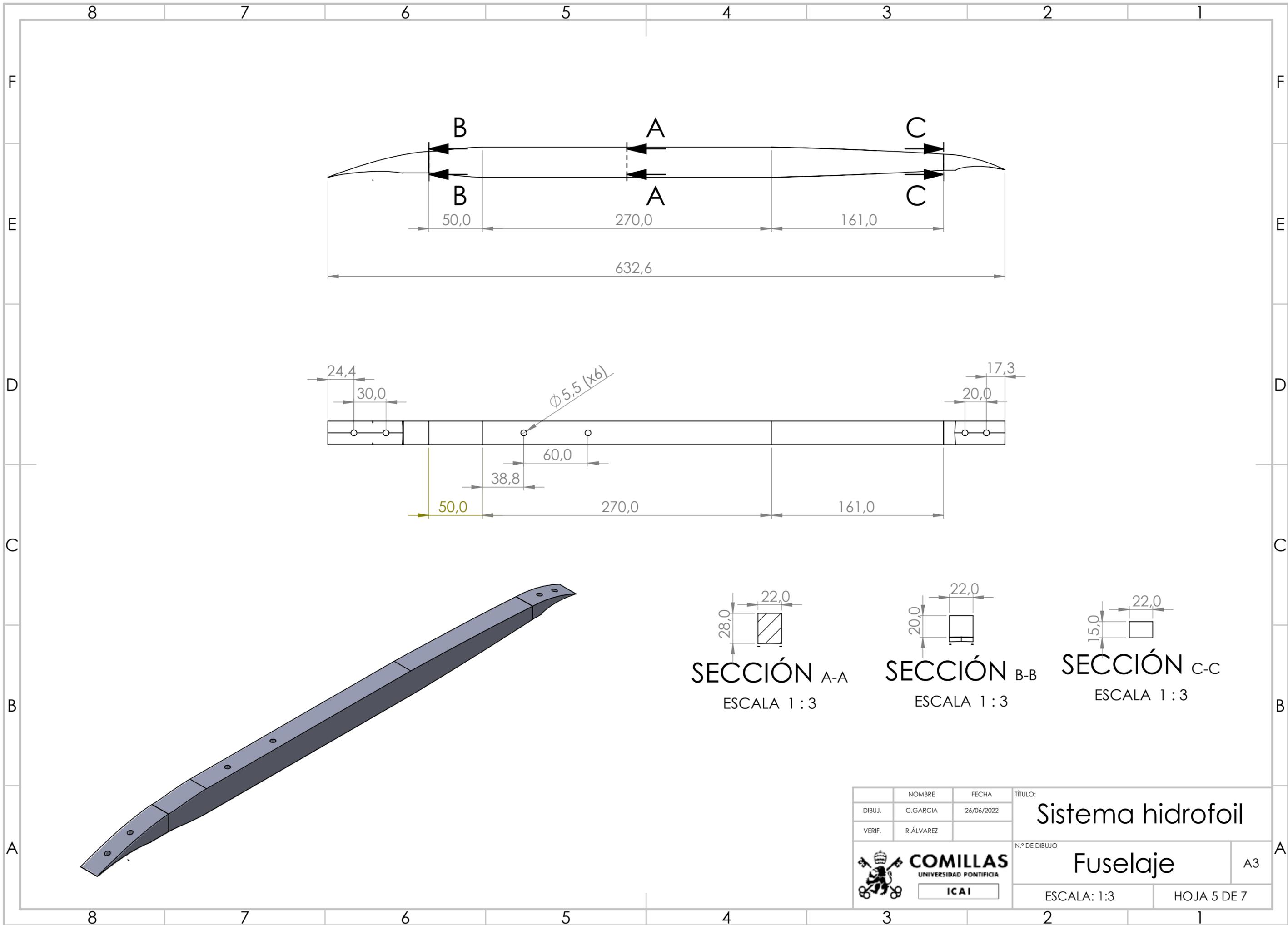
Perfil E837



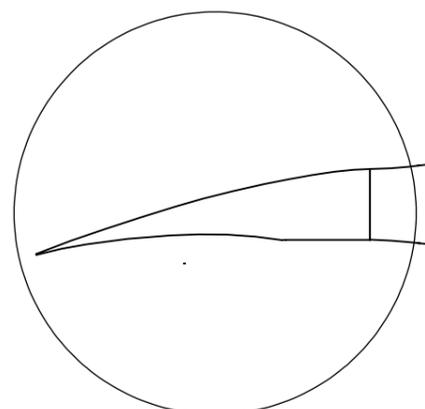
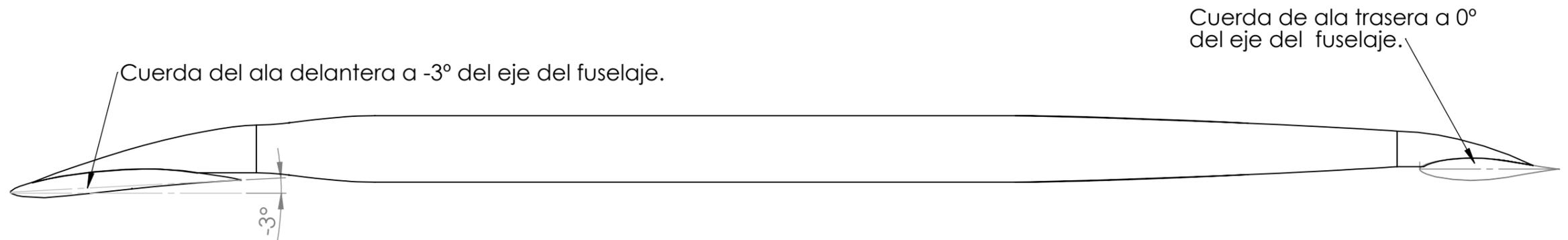
SECCIÓN B-B

ESCALA 1 : 1

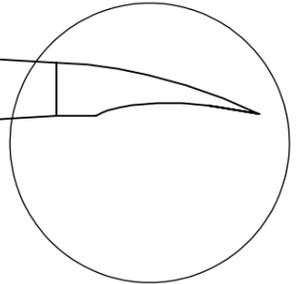
	NOMBRE	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.	C.GARCIA	26/06/2022	Sistema hidrofoil	
VERIF.	R.ÁLVAREZ		N.º DE DIBUJO	
			A3	
			ESCALA: 1:2	HOJA 4 DE 7



	NOMBRE	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.	C.GARCIA	26/06/2022	Sistema hidrofoil	
VERIF.	R.ÁLVAREZ		N.º DE DIBUJO	A3
			Fuselaje	
			ESCALA: 1:3	HOJA 5 DE 7



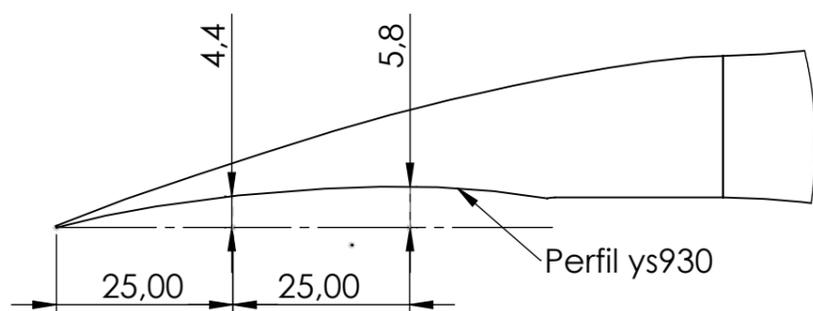
A



B

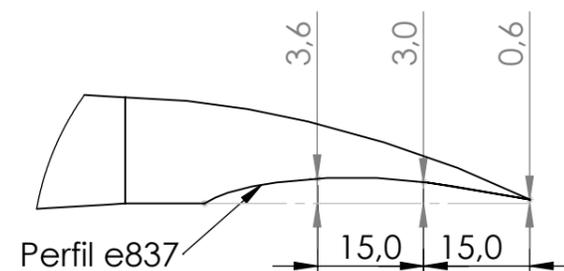
DETALLE A

ESCALA 1:1

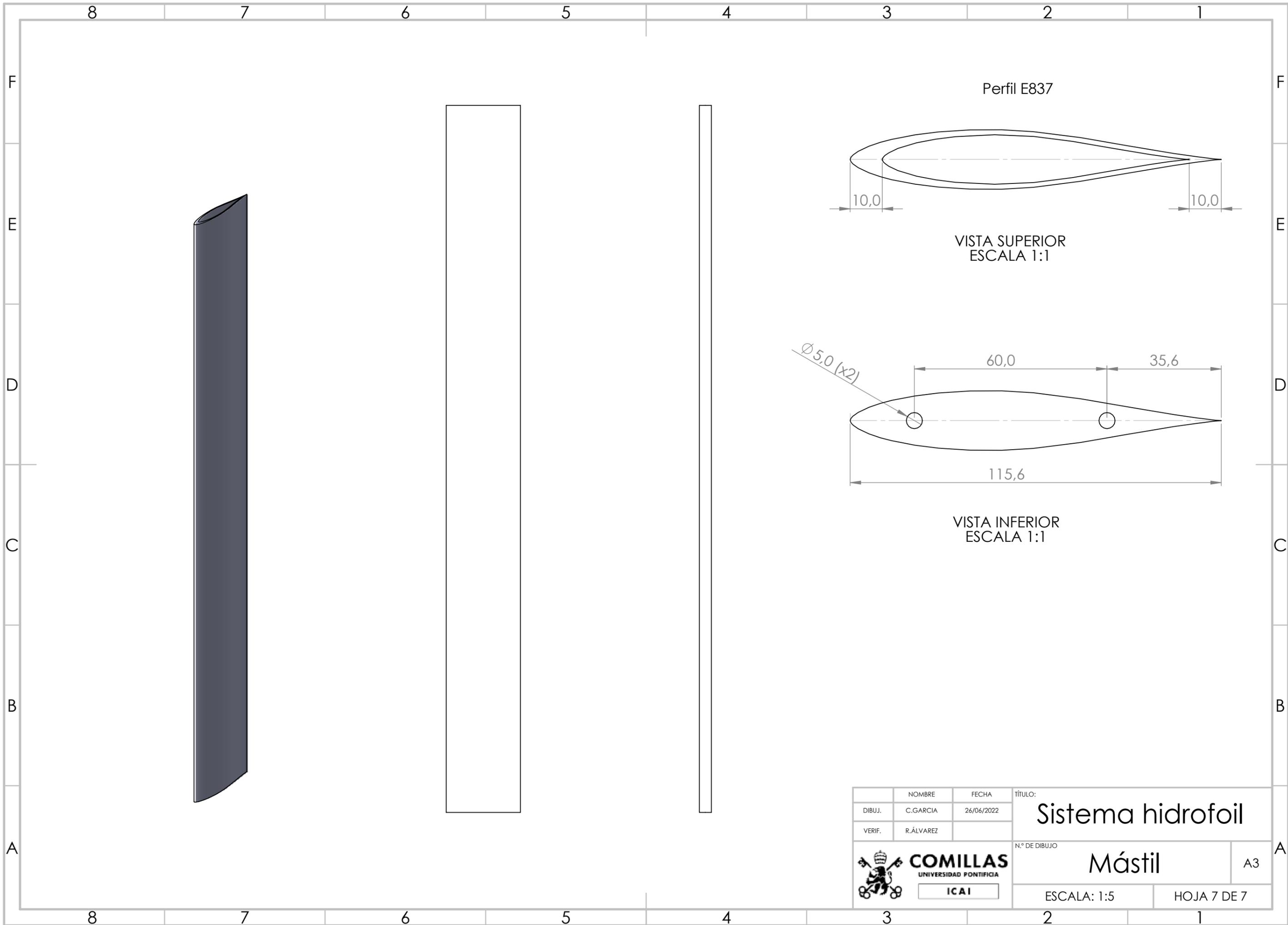


DETALLE B

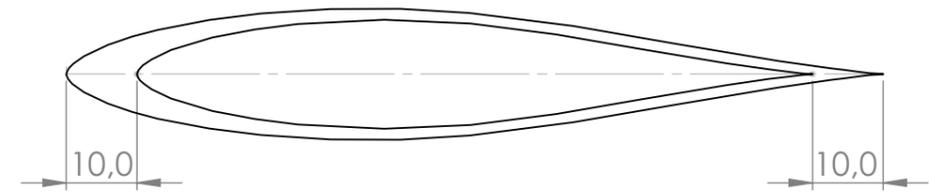
ESCALA 1:1



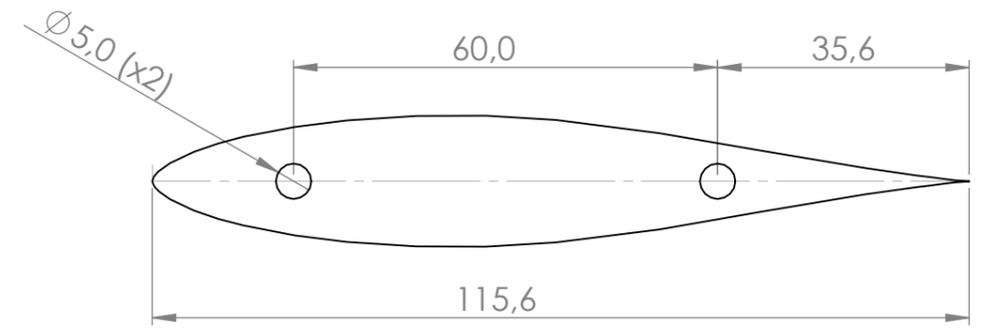
	NOMBRE	FECHA	TÍTULO:
DIBUJ.	C.GARCIA	26/06/2022	Sistema hidrofoil
VERIF.	R.ÁLVAREZ		
			N.º DE DIBUJO
			Posición alas respecto fuselaje
			A3
			ESCALA: 1:2
			HOJA 6 DE 7



Perfil E837



VISTA SUPERIOR
ESCALA 1:1



VISTA INFERIOR
ESCALA 1:1

	NOMBRE	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.	C.GARCIA	26/06/2022	Sistema hidrofoil	
VERIF.	R.ÁLVAREZ		N.º DE DIBUJO	
			Mástil	
			A3	
			ESCALA: 1:5	HOJA 7 DE 7