



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO DISEÑO DE BICICLETA ELÉCTRICA PARA NAVEGACIÓN DE RECREO

Autor: Joaquín Rubio Fernández

Director: Juan Norverto Moriñigo

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

Diseño de bicicleta eléctrica para navegación de recreo

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2021/22 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.: Joaquín Rubio Fernández

Fecha: 07/07/ 2022

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Juan Norverto Moriñigo

Fecha: 07/ 07/ 2022



COMILLAS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO DISEÑO DE BICICLETA ELÉCTRICA PARA NAVEGACIÓN DE RECREO

Autor: Joaquín Rubio Fernández

Director: Juan Norverto Moriño

Madrid

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer la gran labor ejercida por mi director del proyecto, Juan Norberto Moriñigo. La confianza depositada, junto con la ayuda rápida y constante han sido el motivo por el que hemos podido desarrollar esa idea tan ambiciosa que me contabas en un aula por octubre.

En segundo lugar, agradecer a mis amigos de Madrid, que desde el primer día en esta nueva ciudad han sabido ayudarme en los momentos más difíciles. En especial agradecer a, Manuel Ramos Gavilán, por la ayuda ofrecida en el análisis de perfiles alares.

Por último, agradecer a mis padres y hermana el apoyo ofrecido durante estos 4 años de carrera y toda mi vida, sin ellos nada hubiera sido posible. Sin duda, me gustaría agradecer a María Balbana Palau su ayuda incondicional en todos estos años y por estar en los momentos más duros.

DISEÑO DE BICICLETA ELÉCTRICA PARA NAVEGACIÓN DE RECREO

Autor: Rubio Fernández, Joaquín.

Director: Norverto Moriñigo, Juan.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

Palabras clave: perfil alar, hydrofoil, sustentación, resistencia, navegación, despegue, mástil.

1. Introducción

Este proyecto de fin grado tiene como objetivo principal el diseño de un vehículo de navegación, propulsado de manera eléctrica y que navegue mediante la sustentación generada por sus hydrofoils. Los puntos claves que se desarrollan en este trabajo son la obtención de los parámetros claves de los perfiles alares, el cálculo de la sustentación, de la resistencia al avance, la potencia de propulsión necesaria y el peso del prototipo.

2. Definición del proyecto

Este proyecto surge a partir de la observación de vehículos recreativos que navegan sustentados mediante foils. En los últimos años estos elemento se han introducido en vehículos como tablas de surf o kitesurf. Permitiendo que los usuarios alcance velocidades muy superiores a las que se consiguen en sus versiones más tradicionales.

La idea de crear una bicicleta acuática sustentada por el mismo principio surge con la intención de acercar estas modalidades a personas con condiciones físicas menos deportivas, lo cual permitirá que sea una práctica deportiva para un mayor número de individuos.

Lo primero que hay que describir son las condiciones de funcionamiento de nuestro vehículo. Se estudiará el caso en el que la navegación se realiza en el medio marino sin oleaje, para simplificar en gran medida los cálculos. La velocidad media de navegación será de 10 km/h (2'78m/s) y la punta será de 20 km/h (5'56m/s). Estos parámetros son de vital importancia para el cálculo de los números de Reynolds y de Mach.

En el proceso de diseño se deberán analizar una gran número de perfiles alares para ver cuál es el idóneo para generar la sustentación requerida, junto con su ángulo de ataque. Este análisis se realizará mediante el programa Xfoil 6.99, el cual permite obtener los coeficientes

de sustentación y resistencia al avance según el ángulo de ataque del perfil para unos números de Reynolds y de Mach determinados. Una vez seleccionado el perfil de las alas se pasará al análisis de los perfiles que serán utilizados para la fabricación de los mástiles que unen las alas con el vehículo. Estos perfiles serán simétricos, ya que, se buscará la menor resistencia al avance posible y anular casi por completo la sustentación que generen.

Una vez seleccionados ambos perfiles, se pasará a la estimación de pesos iniciales, para calcular la sustentación que deberán generar los foils y poder así dimensionarlos. Con esta primera aproximación se empieza el diseño del prototipo en SolidWorks

Una vez se desarrollan cada uno de los elementos de los que constará el prototipo, mediante el SolidWorks podremos seleccionar el material del que este fabricado, y así poder obtener su masa mediante la herramienta de medir las propiedades físicas de la pieza. Una vez conocidas las masas de todos los elementos ya se puede conocer el peso total y por ello la sustentación necesaria que deberán ejercer las alas del vehículo. Y conocida este valor final, se puede dimensionar de manera exacta la envergadura de nuestras alas.

3. Descripción del prototipo

En esta sección se expondrá la versión final del prototipo. En primer lugar, se explican los elementos estructurales del vehículo. El chasis es un perfil rectangular de 120x80mm con las aristas exteriores redondeadas, su material es aluminio 6083, y presenta un espesor de 6mm. Su rigidez es más que suficiente para las cargas que aguantará la embarcación. En el chasis se encuentran diferentes pletinas de aluminio de 5 y 6 mm de espesor, las cuales sirven para anclar la caja de baterías y los foils. Las uniones de dichas pletinas se realizarán mediante soldadura TIG, el requerimiento de espesores similares se cumple, por lo que su soldadura no será un inconveniente, ya que ni la geometría ni los espesores son difíciles. Por otro lado, se fabricarán en ABS diferentes elementos de unión entre componentes, como son el mástil de unión entre el manillar y el chasis, o el que une el sillín con el chasis, o el enganche del foil del mástil con el chasis. Se elije el ABS como material de fabricación de dichos elementos debido a su gran calidad y la baja responsabilidad estructural de dichas piezas. Es el plástico más utilizado en la fabricación de vehículos.

Por último, la fabricación de los foils se realizará en fibra de vidrio de tipo E, la cual es la más utilizada en la fabricación de elementos estructurales en el sector naval. Su fabricación se realizará mediante moldes permanentes y por laminación manual.

Una vez acabadas las fases de diseño y fabricación se comienza con el dimensionamiento del sistema de propulsión. Para ello se realiza el cálculo de resistencia al avance en las condiciones más críticas. Una vez es conocido se analiza la potencia requerida por el sistema y se sobredimensiona para estar seguro de que nuestro vehículo responde. Una vez se conocen esos valores se comienza a investigar en proveedores que puedan tener estos componentes a un precio razonable. Una vez seleccionado el motor se buscará una batería del mismo voltaje y que su capacidad permita operar durante el tiempo que se desea. Para acabar se buscará un controlador y un potenciómetro que permite controlar el comportamiento del vehículo.

4. Resultados

En este trabajo de fin de grado se han obtenido resultados de diferentes aspectos, a continuación, se desarrollarán cuáles han sido.

En primer lugar, se obtienen los perfiles alares que se utilizarán como alas sustentadoras y los mástiles de unión. Como ala sustentadora se utilizará un perfil Eppler 556, el cual ha demostrado ser el que presenta un comportamiento más uniforme, en el rango de 4 a 8 de ángulo de ataque. Esto le permite aportar la sustentación suficiente y sin producir excesivas pérdidas. En cambio, para los perfiles utilizados como mástiles se usaran los NACA 0015, perfil simétrico que se ha visto que con un ángulo de ataque 0 ejerce un coeficiente de sustentación casi nulo, y de resistencia al avance de los más pequeños que se pueden conseguir. Todos los parámetros obtenidos mediante Xfoil 6.99 y tratados con Excel están adjuntos en los anexos de este documento.

Por otro lado, mediante SolidWorks se ha obtenido la masa final del prototipo, siendo un total de 64'4 kg. Añadiendo la masa del tripulante de 80 kg, queda un total 144'4kg . EL valor de todas las masas se puede ver en la tabla adjunta en los anexos.

Por último, se calcula el valor de la resistencia al avance en la condición de velocidad máxima, que es cuando dicha fuerza resistiva será mayor. EL valor obtenido a la velocidad de 5'5m/s es de: $D = 20N$, si se multiplican estos dos valores se obtiene la potencia que necesita el vehículo, sale un valor de 110 vatios. Por ello el motor seleccionado como mínimo debe dar está potencia.

Para ello se selecciona un motor de corriente continua de 24 voltios, 28'5 amperios y 500 vatios de potencia. Esta selección del motor se debe a que de esta manera el motor no

trabajará en su régimen máximo, y tendrá para y potencia suficiente en caso de que las condiciones requieran potencia extra. Para la conexión de este motor, se utilizará una batería de 24 voltios y de 30 amperios hora de capacidad, lo que permitirá que el prototipo disponga de un autonomía de dos horas a velocidad máxima. La batería que se instalará viene con un cargador externo para cargarla de manera externa.

Por último, se selecciona un controlador de 24 voltios y una potencia máxima de 350 vatios, el cual limitará el funcionamiento de nuestro motor, dejando que la potencia máxima que pueda ejercer sea al menos 3 veces mayor que la requerida, pero sin necesidad de que llegue a sus 500 vatios de potencia máxima. Se incluirá un display que muestre la carga de la batería restante y un potenciómetro en el puño derecho para regular la potencia que demande el usuario.

El resultado final del prototipo es el siguiente:



Ilustración 1. Versión final del prototipo. (Elaboración propia)

5. Conclusiones

Las conclusiones que se obtienen en este proyecto son las siguientes:

1. Los perfiles obtenidos en el análisis de fluidos son los óptimos para las condiciones de funcionamiento de la embarcación.
2. La estructura final del prototipo es demasiado pesada. En la tabla adjunta de masas se puede observar como la mayor parte de este es generada por los elementos

sustentadores. Aportan la mitad del peso. Se podría aligerar si perder propiedades físicas empleando fibra de carbono, la cual es la que emplea la marca Manta5 en su prototipo, el problema que surge es el encarecimiento de las piezas. Este peso no es problema para la navegación ya que con la sustentación es compensado, solo que dificultara el transporte, en el que se necesitarán dos personas lo más seguro.

3. Se ha conseguido una reducción grande del presupuesto del prototipo, ya que la fabricación de los componentes en ABS es relativamente barata una vez se amortizan los moldes, y el chasis y las pletinas solo necesitan doblado y soldadura, evitando así el mecanizado, que es el proceso más costoso. Y en cuanto a los componentes comerciales, se ha conseguido proveedores con grandes ofertas y garantías de un año. El mayor coste de fabricación será la fibra de vidrio, la cual necesita muchas horas de mano de obra.

DESIGN OF ELECTRIC BICYCLE FOR RECREATIONAL NAVIGATION

Author: Rubio Fernández, Joaquín.

Supervisor: Norverto Moriñigo, Juan.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

ABSTRACT

Keywords: wing profile, hydrofoil, lift, resistance, navigation, takeoff, mast.

1. Introduction

This final grade project has as its main objective the design of a navigation vehicle, powered electrically and navigating through the lift generated by its hydrofoils. The key points that are developed in this work are the obtaining of the key parameters of the wing profiles, the calculation of the lift, the resistance to the advance, the necessary propulsion power, and the weight of the prototype.

2. Definition of the Project

This project arises from the observation of recreational vehicles that sail supported by foils. In recent years, these elements have been introduced in vehicles such as surfboards or kitesurfing. Allowing users to reach speeds much higher than those achieved in its more traditional versions.

The idea of creating a water bike supported by the same principle arises with the intention of bringing these modalities to people with less sporting physical conditions, which will allow it to be a sports practice for a greater number of individuals.

The first thing to describe are the operating conditions of our vehicle. The case where navigation is conducted in the marine environment without waves will be studied, to simplify calculations. The average speed of navigation will be 10 km/h (2'78m/s) and the tip will be 20 km/h (5'56m/s).

These parameters are of vital importance for the calculation of Reynolds and Mach numbers. In the design process, a large number of wing profiles must be analyzed to see which is ideal to generate the required lift, along with its angle of attack. This analysis will be conducted using the Xfoil 6.99 program, which allows obtaining the coefficients of lift and resistance to advance according to the angle of attack of the profile for some Reynolds and Mach

numbers determined. Once the profile of the wings has been selected, the analysis of the profiles that will be used for the construction of the masts that join the wings with the vehicle will be conducted. These profiles will be symmetrical, as they will seek the least resistance to advance possible and completely nullify the support they generate. Once both profiles have been selected, the initial weight estimate will be used to calculate the support that the foils should generate and thus be able to size them. With this first approach begins the design of the prototype in SolidWorks.

Once each of the elements of which the prototype will consist of are developed, through SolidWorks we will be able to select the material from which it is manufactured, and thus be able to obtain its mass by means of the tool to measure the physical properties of the part. Once the masses of all the elements are known, it is possible to know the total weight and therefore the necessary support that the wings of the vehicle must exert. And knowing this final value, you can accurately size the wingspan of our wings.

3. Description of the prototype

This section will present the definitive version of the prototype. First, the structural elements of the vehicle are explained. The chassis is a rectangular profile of 120x80mm with rounded outer edges, its material is 6083 aluminum, and has a thickness of 6mm. Its rigidity is more than enough for the loads that the boat will support. In the chassis there are different 5- and 6-mm thick aluminum plates, which serve to anchor the battery box and foils. The joints of said plates will be made by TIG welding, the requirement of similar thicknesses is met, so their welding will not be an inconvenience, since neither the geometry nor the thicknesses are difficult. On the other hand, different connecting elements between components will be manufactured in ABS different connecting elements between components, such as the connecting mast between the handlebar and the chassis, or the one connecting the saddle to the chassis, or the coupling of the mast foil to the chassis. ABS is chosen as the manufacturing material for these elements due to its high quality and low structural responsibility of said parts. It is the most commonly used plastic in vehicle manufacturing.

Finally, the foils will be manufactured in E-type fiberglass, which is the most used in the manufacture of structural elements in the naval sector. It shall be manufactured by means of permanent molds and by manual lamination.

Once the design and manufacturing phases have been completed, the design of the propulsion system begins. To do this, the advance resistance calculation is performed in the

most critical conditions. Once it is known the power required by the system is analyzed and oversized to be sure that our vehicle responds. Once these values are known, research begins on suppliers who may have these components at a reasonable price. Once selected the engine will look for a battery of the same voltage and its ability to operate for as long as desired. Finally, a controller and a potentiometer will be found to control the behavior of the vehicle.

4. Results

In this work of end of degree have been obtained results of various aspects, then they will be developed what have been.

First, the wing profiles to be used as support wings and connecting masts are obtained. An Eppler 556 profile will be used as a support wing, which has been shown to exhibit a more uniform behavior, in the range of 4 to 8 of angle of attack. This allows it to provide sufficient support and without producing excessive losses. Instead, for the profiles used as masts, the NACA 0015 will be used, a symmetrical profile that has been seen that with an angle of attack zero exerts a coefficient of almost zero lift, and of resistance to the advance of the smallest that can be achieved. All parameters obtained using Xfoil 6.99 and treated with Excel are attached in the annexes of this document. On the other hand, SolidWorks has obtained the final mass of the prototype, being a total of 64'4 kg. Adding the mass of the crew of 80 kg, a total of 144'4kg remains . The value of all masses can be seen in the attached table in the annexes.

On the other hand, SolidWorks has obtained the final mass of the prototype, being a total of 64'4 kg. Adding the mass of the crew of 80 kg, a total of 144'4kg remains . The value of all masses can be seen in the attached table in the annexes. Finally, the value of the advance resistance in the maximum speed condition is calculated, which is when the maximum resistive force will be higher. The value obtained at the speed of 5'5m/s is $D=20N$, if you multiply these two values you get the power needed by the vehicle, a value of 110 watts comes out. Therefore, the selected engine must at least give this power.

A 24-volt, 28.5-amp, 500-watt DC motor is selected. This selection of the engine is due to the fact that in this way the engine will not work at its maximum speed and will have for and sufficient power in case the conditions require extra power. For the connection of this engine, a battery of twenty-four volts and thirty amps of capacity will be used, which will allow the prototype to have an autonomy of two hours at maximum speed. The battery to be installed comes with an external charger to charge it externally.

Finally, a controller of twenty-four volts and a maximum power of 350 watts is selected, which will limit the operation of our engine, leaving the maximum power it can exert is at least three times higher than required, but no need for it to reach its five hundred watts of maximum power. A display showing the charge of the remaining battery and a potentiometer on the right hand will be included to regulate the power required by the user.



Ilustración 2. Final design (Elaboración propia)

5. Conclusions

The conclusions reached in this project are as follows:

1. The profiles obtained in the fluid analysis are optimal for the operating conditions of the vessel.
2. The final structure of the prototype is too heavy. In the attached table of masses, it can be seen how the largest bearing of this is generated by the supporting elements. They provide half the weight. It could be lightened if losing physical properties using carbon fiber, which is the one used by the Manta5 brand in its prototype, the problem that arises is the increase in the cost of parts. This weight is not a problem for navigation since with the lift it is compensated, only that it will hinder the transport, in which two people will be needed the safest.
3. A substantial reduction in the prototype budget has been achieved, as the production of components in ABS is inexpensive once the molds are amortized, and the chassis and plates only need bending and welding, thus avoiding machining, which is the

most expensive process. And as for the commercial components, suppliers have been obtained with great offers and guarantees of one year. The highest manufacturing cost will be fiberglass, which needs many hours of labor.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Memoria descriptiva	9
1.1 Motivación del proyecto	9
Capítulo 2. Tecnologías empleadas.....	11
2.1 XFoil 6.99	11
2.2 SolidWorks	11
2.3 Excel	12
2.4 Airfoiltools.....	12
Capítulo 3. Estado de la Cuestión	13
Capítulo 4. Aspectos básicos	19
4.1 Objetivos	19
4.2 Metodología.....	20
Capítulo 5. Alas sustentadoras	22
5.1 Fundamentos teóricos	22
5.1.1 Introducción	22
5.1.2 Perfil aerodinámico.....	22
5.1.3 Principio de Bernoulli	24
5.1.4 Sustentación.....	26
5.1.5 Resistencia al avance	27
5.1.6 Capa límite	28
5.1.7 Cavitación	29
5.2 Análisis de fuerzas	30
5.2.1 Fuerzas sobre perfil.....	30
5.2.2 Condiciones de funcionamiento.....	31
Capítulo 6. Selección de perfiles y estimación dimensiones foils.....	35
6.1 Introducción	35
6.2 Selección perfiles y explicación método de cálculo	35
6.3 Comparación entre perfiles	36
6.4 Estimación foils proa y popa.....	44

Capítulo 7. Análisis mástil-foil.....	46
7.1 Introducción.....	46
7.2 Selección perfil mástil.....	46
7.3 Selección material	49
Capítulo 8. Primeras consideraciones de diseño.....	51
8.1 Introducción.....	51
8.2 Estimación de peso prototipo.....	51
8.3 Configuración y disposición de los foils.....	53
Capítulo 9. Diseño del vehículo	61
9.1 Introducción.....	61
9.2 Diseño final del vehículo.....	61
Capítulo 10. Cálculo sistema de propulsión	69
10.1 Introducción.....	69
10.2 Cálculo resistencia al avance.....	69
10.3 Cálculo potencia necesaria	72
10.4 Selección motor.....	73
10.5 Selección baterías	75
10.6 Selección controlador y potenciómetro	76
10.7 Diseño circuito eléctrico	78
Capítulo 11. Conclusiones y análisis económico	79
Bibliografía.....	84
ANEXO I.....	87

Índice de figuras

Figura 1. Hidroala fabricada por Enrico Forlanini en el lago Maggiore.(www.CampelloCharter.com).....	13
Figura 2. Boceto del HD-4, embarcación diseñada por Bell que batió el récord de velocidad.(www.vadebarcos.net)	14
Figura 3. FHE-400 Bras d’Or navegando a alta velocidad. (www.vadebarcos.net)	15
Figura 4. Componentes que conforman un eFoil. (www.hydrofoil.net)	16
Figura 5. Usuario haciendo uso de un eFoil con mando radio control. (www.windpirate.es)	17
Figura 6. Manta 5 Hydrofoiler XE-1, primer prototipo fabricado.(www.híbridosyelectricos.com)	17
Figura 7. Geometría básica de un perfil aerodinámico.(www.wikiwand.com).....	22
Figura 8. Distribución presiones en perfil aerodinámico.(TFG Miguel Ángel Restoy Pérez)	26
Figura 9. Explicación del viento relativo. (www.manualvuelo.es)	27
Figura 10. Distribución de la capa límite alrededor de perfil alar. (www.thermal-engineering.com).....	29
Figura 11. Fuerzas que actúan sobre perfil alar. (www.wikiwand.com).....	30
Figura 12. Momento de arranque de la Manta 5 Hydrofoiler. (www.ingeniovirtual.com). 33	
Figura 13. Funcionamiento Manta 5 Hydrofoiler a velocidad de crucero. (www.ingeniovirtual.com).....	34
Figura 14. Rendimiento hidrodinámico de todos los perfiles frente a ángulos de ataque. (Elaboración propia).....	38
Figura 15. Rendimiento hidrodinámico de la 1ª selección frente ángulo de ataque. (Elaboración propia).....	39
Figura 16. Rendimiento hidrodinámico de los 4 perfiles resultantes frente a ángulos. (Elaboración propia).....	40
Figura 17. Coeficientes de sustentación frente a ángulos de ataque. (Elaboración propia) 41	

Figura 18. Coeficientes de resistencia al avance frente a ángulos de ataque. (Elaboración propia)	41
Figura 19. Coeficiente de cabeceo frente a ángulos de ataque. (Elaboración propia).....	42
Figura 20. Barco de competición con foils en la parte trasera.(www.gacetanautica.es).....	45
Figura 21. Coeficientes de resistencia de perfiles simétricos frente ángulos. (Elaboración propia).....	47
Figura 22. Coeficientes de resistencia de los 4 perfiles simétricos frente ángulos. (Elaboración propia).....	48
Figura 23. Gráfica del coeficiente de sustentación del Eppler 556 frente al ángulo de ataque. (Elaboración propia).....	56
Figura 24. Gráfica del coeficiente de resistencia del Eppler frente al ángulo de ataque. (Elaboración propia).....	56
Figura 25. Gráfica del rendimiento hidráulico del Eppler 556 frente al ángulo de ataque. (Elaboración propia).....	57
Figura 26. Chasis definitivo del prototipo diseñado. (Elaboración propia).....	62
Figura 27. Vista lateral del enganche del mástil al chasis. (Elaboración propia).....	63
Figura 28. Vista de planta del enganche el mástil al chasis. (Elaboración propia).....	63
Figura 29. Vista frontal del foil delantero del prototipo. (Elaboración propia).....	65
Figura 30. Vista isométrica del foil delantero del prototipo. (Elaboración propia).....	65
Figura 31. Vista isométrica del foil trasero. (Elaboración propia).....	66
Figura 32. Vista frontal del mástil de unión del chasis con el manillar. (Elaboración propia)	67
Figura 33. Vista frontal del mástil de unión entre el chasis y el asiento. (Elaboración propia)	67
Figura 34. Vista frontal del manillar completo del prototipo. (Elaboración propia).....	68
Figura 35. Motor de corriente continua de 24 voltios y más de 500 vatios de potencia. (www.Alamor.com).....	74
Figura 36. Conjunto de baterías más BMS del prototipo. (www.Egosun.com).....	76
Figura 37. Sistema de controlador más pantalla de servicio. (www.Tbest.com).....	77
Figura 38. Potenciómetro que se va a utilizar. (www.Headerbs.com).....	77

Figura 39. Circuito eléctrico del prototipo. (Elaboración propia)	78
Figura 40. Prototipo final sin carcasa. (Elaboración propia).....	80
Figura 41. Prototipo final con carcasa. (Elaboración propia).....	80
Figura 42. Tabla de costes de la fabricación. (Elaboración propia)	83
Figura 43. Datos del perfil DAE31 (Elaboración propia)	87
Figura 44. Datos del perfil Eppler 211. (Elaboración propia).....	87
Figura 45. Datos del perfil Eppler 555. (Elaboración propia).....	88
Figura 46. Datos del perfil Eppler 556. (Elaboración propia).....	88
Figura 47. Datos del perfil Eppler 557. (Elaboración propia).....	89
Figura 48. Datos del perfil Eppler 1210. (Elaboración propia).....	89
Figura 49. Datos del perfil N-11. (Elaboración propia)	90
Figura 50. Datos del perfil Naca 2410. (Elaboración propia)	90
Figura 51. Datos del perfil Naca 4412. (Elaboración propia)	91
Figura 52. Datos del perfil Naca 4418. (Elaboración propia)	91
Figura 53. Datos del perfil Naca 63412. (Elaboración propia)	92
Figura 54. Datos del perfil Naca 63415. (Elaboración propia)	92
Figura 55. Datos del perfil Naca 64212. (Elaboración propia)	93
Figura 56. Grafica del rendimiento hidráulico de todos los perfiles sustentadores. (Elaboración propia).....	93
Figura 57. Rendimiento hidráulico de los perfiles tras primera eliminación. (Elaboración propia).....	94
Figura 58. Rendimiento hidráulico de los perfiles tras la última eliminación. (Elaboración propia).....	94
Figura 59. Coeficiente de sustentación de los últimos perfiles. (Elaboración propia)	95
Figura 60. Coeficiente de resistencia de los perfiles restantes. (Elaboración propia).....	95
Figura 61. Datos del perfil Naca 0015. (Elaboración propia)	96
Figura 62. Datos del perfil Naca 0018. (Elaboración propia)	96
Figura 63. Datos del perfil Naca 0024. (Elaboración propia)	97
Figura 64. Datos del perfil Naca 63015A. (Elaboración propia).....	97
Figura 65. Datos del perfil Naca 64015 A. (Elaboración propia).....	98

Figura 66. Datos del perfil Naca 64008 A. (Elaboración propia).....	98
Figura 67. Grafica del coeficiente de resistencia de los perfiles. (Elaboración propia)	99
Figura 68. Grafica del coeficiente de resistencia de los perfiles restantes. (Elaboración propia).....	99
Figura 69. Chasis del prototipo. (Elaboración propia)	100
Figura 70. Unión del manillar del prototipo. (Elaboración propia).....	100
Figura 71. Manillar del prototipo. (Elaboración propia)	101
Figura 72. Unión del sillín el prototipo. (Elaboración propia)	101
Figura 73. Conjunto mástil-foil delantero. (Elaboración propia)	102
Figura 74. Conjunto mástil-foil trasero. (Elaboración propia)	102
Figura 75. Anclaje chasis y foil. (Elaboración propia).....	103
Figura 76. Motor de corriente continua de 24V, 28'5A y 500W. (www.Alamor.com)	103
Figura 77. Batería de 24V y 30Ah. (www.Egosun.com)	104
Figura 78. Especificaciones técnicas del paquete de baterías empleado. (www.Egosun.com)	104
Figura 79. Esquema eléctrico del prototipo. (Elaboración propia).....	105
Figura 80. Imagen del prototipo final. (Elaboración propia).....	105

Índice de tablas

Tabla 1. Valores de referencia en el diseño del prototipo. (Elaboración propia)	31
Tabla 2. Resultados clasificación de perfiles alares. (Elaboración propia)	43
Tabla 3. Tabla de propiedades físicas y mecánicas. (Elaboración propia)	49
Tabla 4. Lista de componentes que se consideran en la estimación del peso. (Elaboración propia)	51
Tabla 5. Lista de pesos y materiales de los componentes del prototipo. (Elaboración propia)	68
Tabla 6. Área frontal de los foils delantero y trasero según su perfil alar. (Elaboración propia)	70
Tabla 7. Valores de los parámetros en el cálculo de la resistencia al avance. (Elaboración propia)	71
Tabla 8. Pesos de los componentes. (Elaboración propia)	106
Tabla 9. Costes de fabricación. (Elaboración propia)	106
Tabla 10. Cálculo resistencia al avance. (Elaboración propia)	107

CAPÍTULO 1. MEMORIA DESCRIPTIVA

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

La idea de realizar este proyecto surge de la observación de tablas de surf con un hydrofoil. Esta práctica deportiva se ha ido popularizando de tal manera durante los últimos años, que muchas marcas de tablas de surf tradicionales han decidido empezar a comercializar estos nuevos prototipos. Al no dejar de ser una modalidad del surf, la exigencia física de dichos aparatos no es menos elevada que su homólogo sin hydrofoil. De esta idea es de la que realmente nace este trabajo de fin de grado, poder realizar un vehículo, capaz de sustentarse en el agua mediante foils, y que pueda ser usado por personas de cualquier condición física.

Una vez comenzadas las investigaciones sobre prototipos similares, se encontró que, ya existía un prototipo similar a una bicicleta y que se sustentaba mediante foils. Es por ello por lo que se decide cambiar algunos aspectos iniciales de este proyecto. El vehículo existente se encuentra a la venta en el mercado por un valor cercano a los 7.000€, lo que se buscará es intentar desarrollar a priori una bicicleta acuática propulsada eléctricamente con un coste no superior a 2.000€.

Es un proyecto ambicioso ya que la tecnología que hay detrás de estos prototipos es elevada, lo que hace que el coste de producción suba. Se buscará reducir el precio de los productos que haya que comprar, así como en la selección de los elementos empleados en la fabricación.

No solo se busca que sea un proyecto meramente deportivo, la idea de que sea un vehículo propulsado por un motor eléctrico busca innovar y reflejar la importancia de cuidar el medio ambiente. En los últimos años, se ha visto como han ido apareciendo vehículos acuáticos propulsados eléctricamente, pero no es lo habitual. Es un sector complicado, la presencia de agua hace que se necesiten sistemas más elaborados para prevenir la entrada de esta en los sistemas, otro punto negativo es la recarga de sus baterías cuando realizan largas travesías.

Es por ello por lo que el desarrollo de vehículos acuáticos eléctricos, aunque sean los destinados al ocio, tendrán un beneficio para el medio ambiente, en especial para los mares y océanos.

CAPÍTULO 2. TECNOLOGÍAS EMPLEADAS

Para el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado las herramientas de cálculos han sido muy variadas, debido al gran número de ámbitos que se desarrollan en este.

Los programas y aplicaciones utilizados han sido los siguientes:

- XFOIL 6.99
- SOLIDWORKS
- EXCEL

2.1 XFOIL 6.99

Para el estudio de los diferentes perfiles alares, ya sea para la elección de estos o para el cálculo de sus coeficientes de sustentación y de resistencia al avance, se ha usado un programa informático llamado XFOIL 6.99. Este programa fue creado por Mark Drela en el MIT, en la década de 1980. Es un programa interactivo desarrollado para el estudio de perfiles aerodinámicos aislados. Es capaz de desarrollar la distribución de presiones alrededor del perfil introduciendo únicamente el número de Reynolds y el de Mach. Mediante esta distribución de presiones puede obtener los coeficientes de sustentación y de resistencia al avance (C_L y C_D , respectivamente), en las condiciones de trabajo deseadas. (MIT, 2013)

2.2 SOLIDWORKS

Para el diseño del CAD del prototipo se ha utilizado una de las herramientas de ingeniería más potentes del mercado, SolidWorks. Software utilizado por un gran número de empresas, para el desarrollo de piezas en 3 dimensiones. Esta herramienta ha sido utilizada para diseñar todas las piezas del vehículo, así como su ensamblaje final y obtener posteriormente los planos de todos los elementos.

2.3 EXCEL

Herramienta conocida por su gran capacidad de realizar de cálculo. Se ha utilizado para el tratamientos de los datos de todo el proyecto. Con ella ha sido posible obtener un gran número de gráficas que favorecen la interpretación y el análisis de los datos obtenidos en otras herramientas como puede ser Xfoil 6.99.

2.4 AIRFOILTOOLS

Airfoiltools es un repositorio de perfiles aerodinámicos. Es un sitio web en el cual podemos encontrar un gran número de información relacionada con los perfiles alares. Podemos encontrar sus coeficientes de sustentación y de resistencia al avance para un gran variedad de números de Reynolds. Además, se puede encontrar el archivo de coordenadas polares de los perfiles, lo cual ha sido vital para el desarrollo de este proyecto, ya que esos archivos una vez han sido tratados y ordenados de la forma correcta han podido ser utilizados para simular los perfiles en las condiciones deseadas y poder así obtener los parámetros de sustentación y resistencia que se buscaban.

CAPÍTULO 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

El uso de hidroalas (o hydrofoils en inglés), no es algo realmente nuevo. Desde mediados del siglo XIX, científicos de Europa y América comenzaban a preguntarse si el principio por el que los aviones vuelan podría aplicarse a vehículos acuáticos.

A finales de este siglo, Enrico Forlanini, ingeniero italiano de gran prestigio que aportó grandes innovaciones en el mundo aeronáutico, comenzó a diseñar un buque con alas en la parte inferior.

Figura 1. Hidroala fabricada por Enrico Forlanini en el lago Maggiore.



Figura 1. Hidroala fabricada por Enrico Forlanini en el lago Maggiore. (www.CampelloCharter.com)

Es a principios del siglo siguiente cuando el inventor Alexander Graham Bell comienza a interesarse por los hidroalas. Este hecho es debido a un artículo que leyó en la revista Scientific American escrito por William E. Mechanan, en el que se hablaba sobre el principio básico que rige el funcionamiento de estos vehículos. Es a partir de este momento cuando Graham Bell junto con su ingeniero jefe Casey Baldwin empezaron a experimentar con sus propios diseños basados en los trabajos de Forlanini.

En 1908 Bell seguirá mejorando sus diseños batiendo cada vez más retos de velocidad, es en 1919 cuando establece una marca que perdurará durante 20 años, en la que consigue que su buque “vuele” a una velocidad cercana a los 114 km/h.

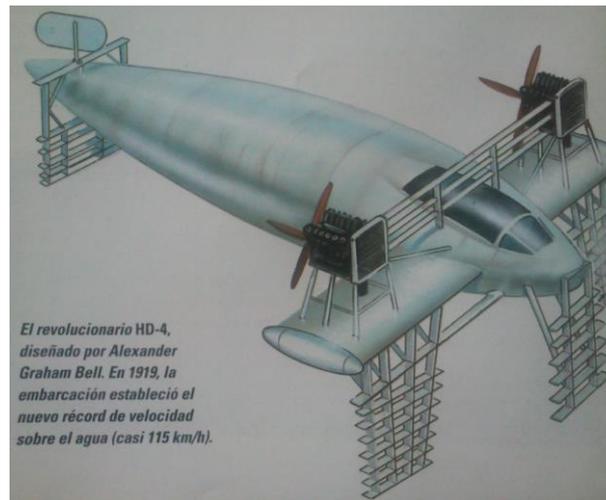


Figura 2. Boceto del HD-4, embarcación diseñada por Bell que batió el récord de velocidad.(www.vadebarcos.net)

A partir de los años 40 del siglo XX es cuando los hidroalas comienzan a popularizarse, es el sector militar el primero en ver futuro a este tipo de naves. La Royal Canadian Navy, por estos años comienza a desarrollar su primer prototipo, el R-103, el cual es acabado de fabricar en 1957. Al comprobar que fue todo un éxito por las velocidades alcanzadas y la reducción de gasto de combustible que habían experimentado, decidieron seguir con el desarrollo de este tipo de naves para protegerse frente a submarinos que pudieran estar cercanos a sus costas.

Es por ello por lo que en 1964 comienzan la fabricación del FHE-400 Bras D'Or. Este nuevo prototipo constaba de innovaciones que pensaban que mejorarían el comportamiento del vehículo. La idea más destacable fue la de disponer el sistema de foils de tal manera que el que estaba situado en la parte trasera de la embarcación produjera el 90% de la sustentación, mientras que el que estaba situado en la proa, produjera el 10% restante. Esta nueva aportación dio los resultados que buscaban, ya que el FHE-400 Bras d'Or fue el buque de guerra más rápido de su época, alcanzando los 63 nudos de velocidad máxima.



Figura 3. FHE-400 Bras d'Or navegando a alta velocidad. (www.vadebarcos.net)

Después del que el sector militar se interesará por este tipo de buques, el sector deportivo fue el siguiente. Es a finales de los años 60 cuando países como Estados Unidos de América, Noruega, Japón, entre otros deciden invertir en este tipo de embarcaciones para el transporte de pasajeros. Es durante estos años, donde la popularidad de este tipo de embarcaciones crece bastante rápido. Son naves utilizadas para trayectos entre 5 y 200 millas náuticas, las velocidades que alcanzaban y el ahorro de combustible que generaban, las hacía competir con las aerolíneas de la época.

En los últimos años, el uso de foils en vehículos acuáticos se está viendo más en naves de uso recreativo. Como pueden ser embarcaciones de rígidas de pequeña eslora, o las tablas de surf, windsurf o kitesurf.

En este tipo de embarcaciones, el uso del foil, principalmente, es para reducir la resistencia al avance que sufren estas embarcaciones y poder aumentar la velocidad máxima, para un mayor disfrute del usuario. Las embarcaciones rígidas que utilizan estos aparatos pueden alcanzar velocidades cercanas a los 49,1 nudos (90 km/h).

En los últimos años uno de los deportes que más se está popularizando es el surf, y junto a él todas sus modalidades, windsurf, kitesurf, paddle surf, entre otras. Es por ello por lo que la innovación se está interesando en ellas, buscando nuevas formas de optimizar el esfuerzo físico de los usuarios que practican estos deportes. Una de las mejores formas de aprovechar

el medio en el que se realizan estas modalidades es con la incorporación de foils a sus respectivas tablas.

Como se ha explicado anteriormente, la incorporación de foils en las embarcaciones, permiten que la superficies de éstas no estén en contacto con el agua, permitiendo así que la embarcación no se vea frenada por el rozamiento y la resistencia que ejerce esta sobre la embarcación. El uso del foil, no solo está haciendo que se alcancen nuevas velocidades que nunca se habían alcanzado en estos deportes, sino que también está creando nuevas modalidades, más de práctica recreativa que deportiva a nivel profesional.

Esto es debido a la incorporación de sistemas de propulsión en las tablas, la presencia del mástil y del ala submarina aportan un localización ideal para la disposición de un motor eléctrico de pequeño tamaño. Esta nueva incorporación aporta la potencia extra al vehículo para poder practicar la modalidad que se quiera, sin necesidad de una preparación física excelente o si las condiciones meteorológicas no son las indicadas, como puede ser la falta de viento para la práctica del kitesurf o del windsurf.

Los nuevos prototipos han incorporado a su funcionamiento la posibilidad de controlar estos sistemas de propulsión mediante mandos de control remoto, lo cual permite al deportista o al usuario la posibilidad de controlar la potencia que quiere o necesita en cada momento. Estas innovaciones hacen que cada vez se busquen sistemas más eficientes, que reduzcan el peso de los dispositivos, que tengan una capacidad más elevada y que pueden suministrar más potencia con menos peso.



Figura 4. Componentes que conforman un eFoil. (www.hydrofoil.net)

El uso de este tipo de vehículos está haciendo que incremente considerablemente sus ventas en los últimos años, ya que la posibilidad de poder practicar deportes acuáticos sin importar las condiciones meteorológicas es algo que nunca se había alcanzado con anterioridad.



Figura 5. Usuario haciendo uso de un eFoil con mando radio control. (www.windpirate.es)

La innovación más reciente en este ámbito es la que está íntimamente relacionada con este Trabajo de Fin de Grado. Hace apenas 5 años una empresa neozelandesa lanzó al mercado la primera bicicleta provista de hidroalas que permitía a los usuarios practicar el ciclismo por encima del agua. Una vez la Covid-19, permitió que las producciones de los países volvieran a la normalidad, la empresa ha decidido desarrollar una gama completa de este tipo de bicicletas debido a la gran popularidad que han experimentado.



Figura 6. Manta 5 Hydrofoiler XE-1, primer prototipo fabricado.(www.híbridosyelectricos.com)

Actualmente este prototipo, es lo mejor que hay en el mercado, sus alas están fabricadas en fibra de carbono, su carcasa es de aluminio de la serie 6000. Tiene un peso de unos 31 kg, la envergadura del foil trasero es de 2m, su velocidad máxima es de 21 km/h y una velocidad media de crucero de unos 11-13 km/h. Consta de un motor eléctrico de 460 W, además viene provista de una caja de 7 velocidades que el usuario puede ir cambiando, dependiendo de la potencia que él quiera ejercer y de la que necesite para ir a la velocidad deseada. La caja de baterías tiene una protección IPX8 la cual le permite sumergirse hasta una profundidad de unos 3m. Tiene una capacidad de 882 WH, lo que se traduce en una duración de 60 minutos si se usa el modo en el que el motor aporta mayor potencia o de unos 80 minutos si usa el modo más ligero. Es extraíble lo que permite cargarla en casa, o tener una de repuesto si se quiere estar usando más de una hora seguida.

Todas estas cualidades no dejan de ser sorprendentes y muy innovadoras, pero se traducen en un gran coste económico, ya que el precio medio de esta bicicleta acuática ronda los 8.000€ en Europa y los 9.000\$ en América. Este elevado coste se debe a la calidad de los materiales utilizados, ya que son de última generación, el uso de unas baterías eléctricas que aporten tal autonomía sin aumentar en exceso el peso del prototipo, y la comodidad y seguridad de ser extraíbles de una manera rápida, sencilla y segura.

El objetivo de este Proyecto de Fin De Grado no es otro que el desarrollo desde sus inicio de un prototipo sustentado por el mismo principio físico, pero que sea apto para la economía de un mayor número de personas.

Es por ello por lo que se va a buscar materiales que abaraten su fabricación, sin descuidar los requisitos mínimos. Se intentará optimizar al máximo en el sector de la propulsión eléctrica del vehículo sin descuidar los ámbitos de la seguridad y la autonomía.

CAPÍTULO 4. ASPECTOS BÁSICOS

4.1 OBJETIVOS

En este proyecto de fin carrera se persiguen diferentes objetivos en cuanto al diseño del vehículo de navegación propulsado de manera eléctrica. Se pueden clasificar en objetivos primarios y secundarios.

La lista de objetivos primarios es la siguiente:

1. Diseñar un vehículo de navegación que sea capaz de sustentarse mediante foils.
2. Análisis de perfiles hidrodinámicos, y obtención de sus parámetros en las condiciones que se desean.
3. Diseño sencillo pero funcional.
4. Diseño circuito eléctrico óptimo.

Por otro lado, los objetivos secundarios que se desean conseguir son los siguientes:

1. Diseñar un prototipo que no cueste más de 2.000€.
2. Encontrar la manera más sencilla de unión entre las piezas. Optimizando geometrías y materiales.
3. Conocer proveedores del mundo naval con componentes con una relación calidad precio adecuada.
4. Estudio del sistema de propulsión, valorar si es eficiente la necesidad de que el tripulante tenga que pedalear o la potencia que genera es muy pequeña para el aumento de peso que supondría.

4.2 METODOLOGÍA

En cuanto a la metodología que se seguirá para el desarrollo de este proyecto de fin de grado se deberá diferenciar de la sección en la que estemos. Ya que, en este trabajo se desarrollan diferentes ámbitos, mecánica de fluidos, resistencia de materiales, electrónica y máquinas eléctricas.

En cuanto a la mecánica de fluidos se refiere se trabajará analizando diferentes perfiles alares, para la selección de los que serán los foils y los mástiles. Para ello se deberá estudiar las diferentes condiciones de trabajo en las que estaremos. Es necesario conocer la densidad del fluido, su temperatura media, la velocidad a la que se irá, la velocidad del sonido en el medio, etc. Con estos parámetros se podrá obtener los números de Reynolds y de Mach. Vitales para la obtención de los coeficientes de sustentación y resistencia al avance de los perfiles. Una vez obtenidos se compararán los valores para elegir el que presente un mejor comportamiento en un mayor rango de funcionamiento. Una vez seleccionados los perfiles, calcularemos las secciones de las alas necesarias para poder sustentar la embarcación.

Una vez sacada la envergadura de las alas se pasará al diseño final del prototipo. Mediante SolidWorks se desarrollará cada uno de los componentes del vehículo. También obtendremos las masas de cada uno de ellos, lo que permitirá afinar la estimación de pesos realizada anteriormente.

Una vez diseñado se calculará mediante el programa Fluent de SolidWorks el coeficiente de resistencia de la embarcación en cada modo de funcionamiento, para poder así calcular la potencia necesaria que deberá ejercer el motor. Una vez conocida se seleccionará un motor que cumpla las especificaciones de potencia de salida necesarias y que se ajuste al presupuesto. Por último, se buscará unas baterías que al conectar en serie y paralelo den el voltaje y la potencia de entrada necesaria para el funcionamiento correcto del motor.

Una vez conocidas las masas del motor y la batería, ya se sabe el peso final del prototipo, por lo que es posible dimensionar de manera adecuada las envergaduras de las alas.

Por último, se desarrollarán las conclusiones obtenidas y se realizará la estimación económica del proyecto, viendo si se ajusta al presupuesto inicial.

CAPÍTULO 5. ALAS SUSTENTADORAS

5.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

5.1.1 INTRODUCCIÓN

Un perfil alar o perfil aerodinámico no es más que una forma plana que al desplazarse por un fluido (típicamente aire en los aviones) es capaz de crear a su alrededor una distribución de presiones que genere sustentación. El estudio de estos perfiles es fundamental para el diseño de alas de aviones o palas de hélices o de motores. En los siguientes apartados se explicarán los conceptos básicos en los que se fundamenta el diseño de vehículos sustentado por alas. (Academic, 2018)

5.1.2 PERFIL AERODINÁMICO

A pesar de estar diseñando un vehículo que se desplazará por el agua, los perfiles que se utilizarán para dar la sustentación necesaria han sido diseño para la fabricación de alas de aviones. Esto no es ningún inconveniente, ya que, el mecanismo de funcionamiento es el mismo en ambos casos. A continuación, se expondrá la geometría básica de un perfil, junto con su importancia en el proceso.

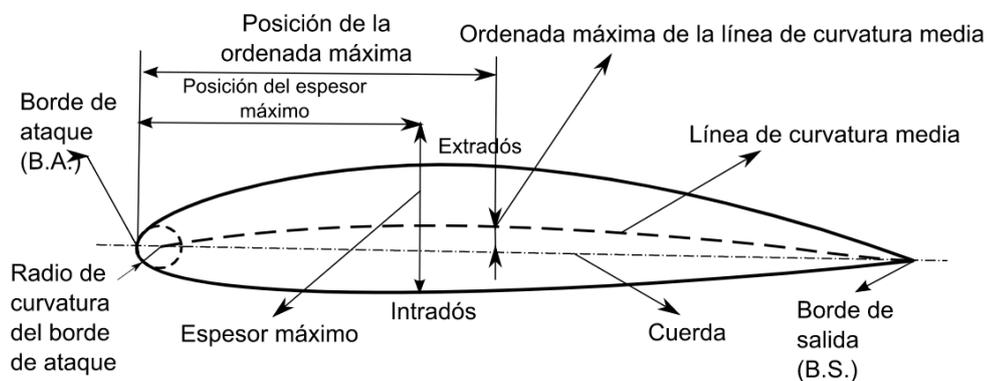


Figura 7. Geometría básica de un perfil aerodinámico.(www.wikiwand.com)

Las características de los perfiles que vamos a estudiar son de perfiles alares diseñados para un régimen subsónico, ya que, los perfiles necesarios para vuelos supersónicos varían considerablemente, buscando superficies más planas, sin tener tanta consideración en el desprendimiento de la capa límite.

Lo primero que hay que analizar es el borde de ataque y el borde de salida del perfil de la Figura 7. El borde de ataque es la parte delantera del perfil, la que primero entra en contacto con el fluido. Es de vital importancia, ya que es la que produce la separación del fluido, un borde demasiado agresivo puede hacer que la distribución del fluido no sea la que buscamos. El borde de salida tiene una geometría más suavizada para evitar un desprendimiento de la capa límite demasiado brusco.

Los siguientes parámetros que nos llaman la atención son el extradós y el intradós. Ambos términos hacen referencias a las superficies superior e inferior, respectivamente. La curvatura de estas superficies varía considerablemente entre diferentes perfiles. La diferencia principal se encuentra en perfiles simétricos y asimétricos. En un perfil simétrico, el intradós y el extradós tienen una curvatura simétrica (es decir, idéntica especularmente). Mientras que en los asimétricos esto no ocurre. Esta diferenciación es de vital importancia, ya que provee al perfil de cualidades totalmente distintas. Un perfil simétrico con un ángulo de ataque de 0° casi no produce sustentación, al igual que su resistencia al avance también es muy reducida. En cambio, un perfil asimétrico, con ángulo de ataque 0° , genera sustentación, pero su resistencia al avance también crece. En el desarrollo de este TFG se utilizarán perfiles simétricos en los mástiles que unan el prototipo con las alas, que serán perfiles asimétricos. Lo que se busca es que la sustentación sea generada por el foil, y que el mástil que es el que sustenta el peso no produzca demasiada resistencia.

El siguiente término para analizar es la cuerda (c), es la línea imaginaria que conecta el borde de ataque del perfil con el borde de salida. El ángulo que forma esta línea con la dirección de la corriente del flujo es el que denominamos ángulo de ataque (angle of attack, AOA).

Otros dos parámetros importantes son el espesor (t), que se define como la distancia entre el extradós y el intradós, medidos en la perpendicular a la cuerda. Y el espesor relativo, que es la relación entre el espesor del perfil y su cuerda.

Por último, tres parámetros que definen el comportamiento del perfil, envergadura, área de sustentación y el área de resistencia al avance. La envergadura (b) es la longitud perpendicular a la cuerda del ala. El área de sustentación del perfil es la relación entre la envergadura y la cuerda del ala, su fórmula es: $A_L = b * c$. En cambio, el área de resistencia al avance relaciona la envergadura del ala con su espesor, su fórmula es: $A_D = b * t$.

5.1.3 PRINCIPIO DE BERNOULLI

El principio que el científico suizo Daniel Bernoulli describe en su libro *Hidrodinámica*, 1737, está basado en el comportamiento de un fluido que se mueve a través de un sistema cerrado. El principio está definido para fluidos ideales, por lo que estos deben cumplir ciertas características. Además, se considera no existe ni rozamiento ni viscosidad. Es importante tener en cuenta que como consideramos un recinto cerrado, la energía permanece constante en todo el recorrido. (Xnomind, 2019)

Este teorema trabaja con tres tipos de energía: cinética, potencial y de presión. La cinética hace referencia a la velocidad que posee el fluido, la potencial está relacionada con la altitud de este y por último la de presión mide la energía del fluido como resultado de la presión a la que está sometido.

El principio de Bernoulli se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1}{2g} + z_1 + H_m = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2}{2g} + z_2 + h_f$$

- γ : peso específico ($\gamma = \rho * g$). Se considera constante debido a que el fluido es incompresible.
- H_m : es el trabajo externo que se le aporta al fluido (+) o que se extrae del fluido (-) por unidad del caudal másico.

- H_f : disipación por fricción a través del recorrido.
- Los subíndices 1 y 2 indican si los valores están tomados al inicio o al final del volumen de control.
- $g = 9'81 \text{ m/s}^2$.
- $z \rightarrow$ altura del fluido.

Como se puede observar la ecuación de Bernoulli traduce la energía que tiene un fluido (cinética, potencial, de presión) a una altura, comparándola con la de un segundo punto.

Si aplicamos esta ecuación en el estudio de perfiles aerodinámicos, tenemos que realizar diferentes consideraciones. La primera es que da igual que sea flujo de aire o corrientes de agua, el número de Reynolds será muy elevado, por lo que se puede considerar una viscosidad nula para el flujo más alejado del perfil, no obstante, el flujo que circula en contacto con el perfil alar (capa límite), presenta numerosas fuerzas viscosas. Para aplicar dicha ecuación necesita un flujo incompresible, permanente y no viscoso, condiciones que se cumplen en el flujo exterior de dicha capa.

Además, teniendo en cuenta que la diferencia de alturas: $z_1 - z_2 \cong 0$, es decir despreciable. Y que no hay intercambio de energía con el exterior: $h_f = H_m = 0$. Se tiene que la expresión de Bernoulli queda tal que así:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

De esta expresión podemos determinar que la energía del fluido que rodea al perfil solo va a depender de su energía cinética (es decir su velocidad relativa) y de su energía de presión. Podemos determinar que, si la velocidad aumenta en un punto, su presión en este disminuye y viceversa.

Este principio es el culpable de que las alas de los aviones funcionen como herramientas de sustentación, debido a la curvatura de los perfiles aerodinámicos, cuando el flujo de aire entra en contacto con ellos se divide en dos. El que circula por el extradós (parte superior del perfil) debe circular a mayor velocidad ya que la curvatura extra de éste hace que haya

mayor distancia a recorrer. Este aumento de velocidad produce un descenso en la presión, lo que hace que la presión producida en el intradós sea superior, lo que hace que la fuerza sustentadora eleve al avión.

A continuación, en la figura 8 se puede observar cómo se lleva a cabo esa nueva distribución de presiones a través del perfil aerodinámico.

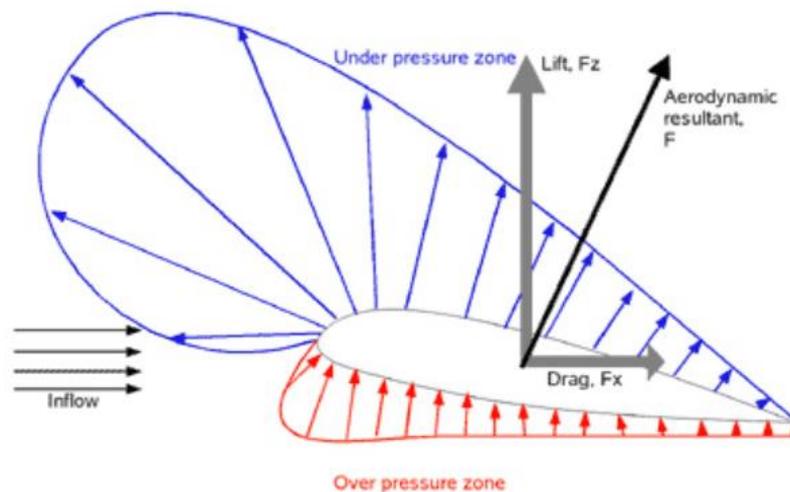


Figura 8. Distribución presiones en perfil aerodinámico.(TFG Miguel Ángel Restoy Pérez)

5.1.4 SUSTENTACIÓN

Es una fuerza desarrollada por un perfil alar moviéndose por un fluido. Dicha fuerza empuja el perfil, y con él, al resto de la estructura hacia arriba. Como se ha explicado anteriormente, esta fuerza es la que se pretende aumentar con la geometría del perfil. Esta fuerza es la que se genera mediante el Principio de Bernoulli, ya que la diferencia de presiones producida alrededor del perfil alar da como resultado una fuerza perpendicular a la trayectoria del vehículo.

Esta fuerza se desarrolla por el fluido entrante, lo que se conoce como viento relativo. En el cual la velocidad con la que incide no es la misma que el perfil está notando. Esto se debe a la velocidad propia del vehículo, ya que si ambos van en direcciones opuestas (trayectoria y

corriente del fluido) el viento relativo que experimenta el perfil alar aumentará. En la figura 10 es posible observar este fenómeno. (Aman Bhargava, 2018)

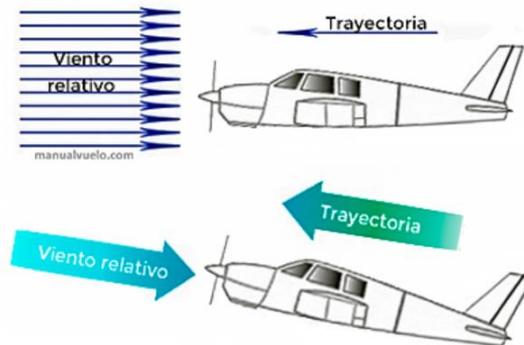


Figura 9. Explicación del viento relativo. (www.manualvuelo.es)

5.1.5 RESISTENCIA AL AVANCE

La resistencia al avance es una de las otras fuerzas generadas mediante el perfil alar. Dicha fuerza es una de las que más problemas genera a la hora del dimensionamiento del sistema propulsor. La resistencia al avance produce una fuerza en dirección opuesta a la que el vehículo sigue, se opone a su movimiento. Esto quiere decir que cuanto menor sea el valor de esta fuerza más aerodinámico o hidrodinámico será el prototipo. Estos dos términos hacen referencia a vehículos o estructuras con una geometría que permiten reducir de manera importante el valor de su resistencia al avance.

En el diseño de cualquier vehículo esto es muy importante, ya que necesitaremos menos potencia para que se pueda mover por el fluido deseado, ya sea aire o agua. Es por ello por lo que el momento de selección de perfiles alares se buscan aquellos que reduzcan dicho valor. El problema surge cuando al intentar reducirlo lo que se está consiguiendo es reducir del mismo modo la sustentación generada. Es por ello por lo que lo hay que buscar es un equilibrio entre las dos fuerzas, ya que utilizar un perfil con bajo coeficiente de resistencia, puede hacer que su sustentación también lo sea, haciendo que se necesite un perfil más grande, lo que aumentaría ambos coeficientes y encarecería el precio. O en su lugar utilizar un perfil sacrificando un poco de resistencia, pero ganado sustentación sin necesidad de sobredimensionar el perfil.

5.1.6 CAPA LÍMITE

Este término hace referencia al conjunto de capas del fluido que ven alteradas su velocidad debido a las interacciones de las partículas que la forman con el vehículo en cuestión. La velocidad de la primera capa, que es la que está en contacto con el vehículo, tiende a cero, es decir, tiende a estar pegada al vehículo. Esto es debido a la viscosidad del fluido, la cual hace que dependiendo del tipo de fluido en el que se esté desplazando el prototipo, vea más o menos resistencia. A partir de esta, el resto de las capas verán un aumento progresivo de la velocidad hasta llegar a un punto en el que el desplazamiento del vehículo no altere al comportamiento de dichas partículas. A partir de esa línea, la capa límite se acaba.

La importancia de dicho fenómeno es vital para el comportamiento de nuestro prototipos, ya que entran en juego dos términos que todavía no se han citado, el flujo laminar y el flujo turbulento. El flujo laminar hace referencia a la forma en que las partículas de un fluido se mueven. En dicho flujo, estas partículas se desplazan de manera ordenada, paralelas entre ellas, sin generar agitación, mientras que en un flujo turbulento las partículas no siguen ninguna línea, hay un gran desorden.

En las simulaciones utilizadas para el dimensionamiento de este prototipo se ha considerado un flujo turbulento, esto es debido a que el número de Reynolds que calculamos con los datos de navegación da un valor lo suficientemente grande como para poder considerarlo. De hecho, esto es casi requisito indispensable para el desarrollo de fuerzas de sustentación en los perfiles alares. Ya que, si el flujo fuera laminar, las partículas seguirían las trayectorias de los perfiles de manera casi perfecta, lo que haría que la sustentación y la resistencia se vieran reducidas drásticamente, lo cual hace que se esté como en los casos anteriores, mejorando en un aspecto, pero empeorando uno vital. (Plaza, 2022)

A continuación, en la figura 10 se verá cómo se desarrolla la capa límite alrededor de un perfil alar.

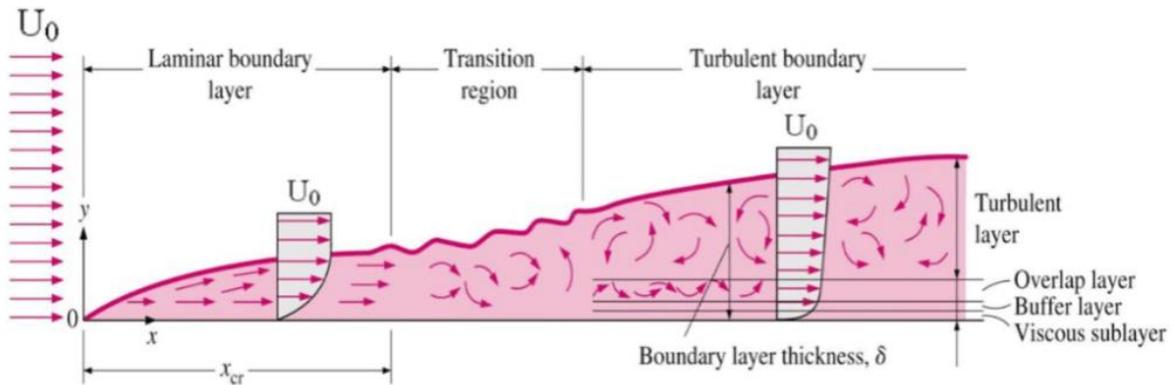


Figura 10. Distribución de la capa límite alrededor de perfil alar. (www.thermal-engineering.com)

5.1.7 CAVITACIÓN

Este fenómeno es de vital importancia en la mecánica de fluidos, ya que es el causante de un gran número de averías, tanto en tuberías como en hélices de barcos. La cavitación se produce en líquidos sometidos a unos condiciones determinadas. Consiste en la formación de burbujas de vapor del líquido, esto es debido a cambios bruscos de presión o de velocidad.

Estas burbujas aparecen en las zonas donde el fluido experimenta un mayor aumento de velocidad y la presión disminuye notablemente, esto produce el paso del fluido de estado líquido a gaseoso. Estas burbujas viajarán a las zonas del fluido con mayor presión, lo que hará que implosionen, haciendo que vuelvan a su estado líquido.

Estas implosiones, pueden generar turbulencias que impidan un paso del fluido y en el peor de los casos pueden dañar las piezas con las que están en contacto en el momento de las implosiones. (HelloAuto, 2022)

En el caso estudiado en este proyecto, las presiones que más se tendrán en cuenta serán la atmosférica y la que genera el propio fluido a una profundidad determinada. Lo que se hará una vez este diseñado el prototipo es ver que no presenta ningún indicio de que pudiera generarse cavitación en ninguna de las condiciones de diseño presentadas.

5.2 ANÁLISIS DE FUERZAS

5.2.1 FUERZAS SOBRE PERFIL

Al someter el perfil alar a través de un flujo experimenta una serie de fuerzas, llamadas fuerzas aerodinámicas (llamadas así porque normalmente estos perfiles se usan en el campo de la aerodinámica). Estas son un conjunto de 4 fuerzas: sustentación, peso, empuje y arrastre. La sustentación y el peso son las componentes verticales, y el empuje y el arrastre las horizontales. En la siguiente figura se observa la dirección y el sentido de dichas fuerzas en el funcionamiento del perfil.

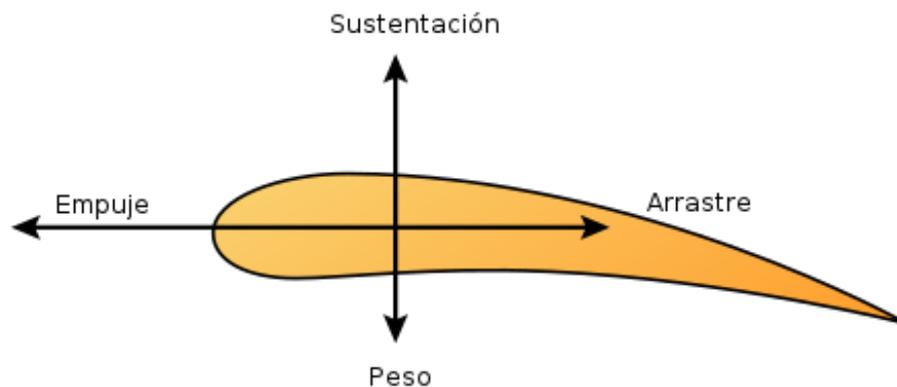


Figura 11. Fuerzas que actúan sobre perfil alar. (www.wikiwand.com)

En el desarrollo de este proyecto las fuerzas que mayor significación tendrán serán el arrastre y la sustentación generada, ya que ambas componentes serán las que determinarán que perfiles y de que dimensiones serán los foils que se utilizarán.

En cambio, el peso generado por los foils no es una fuerza de grandes dimensiones ya que los materiales que se buscarán para su fabricación serán de densidades relativamente bajas. Y el empuje generado será despreciado en este proyecto ya que sus valores son casi nulos.

5.2.2 CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO

Para el diseño de este prototipo se tendrán diferentes consideraciones en cuanto a su funcionamiento. En primer lugar, se fijará nuestra velocidad media de navegación, la velocidad máxima, la densidad del agua, el número de Reynolds, el número de Mach y la viscosidad cinemática de la agua. En segundo lugar, se tomarán dos estados de comportamiento: navegación a velocidad de crucero y despegue o arranque.

Los valores que se utilizarán para el desarrollo de este prototipo son los siguientes

Velocidad media navegación	10 km/h → 2'78 m/s
Velocidad máxima de navegación	20 km/h → 5'56 m/s
Velocidad despegue	3'6 km/h → 1 m/s
Densidad del agua	1.025 kg/m ³
Número de Reynolds vel. media	2.445.030
Número de Mach vel. media	0'002
Viscosidad cinemática (ν)	1'137 * 10 ⁻⁶ m ² /s
Velocidad del sonido en agua	1.467'5 m/s

Tabla 1. Valores de referencia en el diseño del prototipo. (Elaboración propia)

Los valores del número de Reynolds y el del número de Mach se han obtenido de la siguiente manera:

Los valores de Reynolds obtenidos están calculados para una cuerda unitaria, esto se debe a que son valores con los que vamos a realizar la comparativa entre los perfiles, no son los valores finales de diseño.

$$Re_{vel\ media} = \frac{v_{media}}{v} = \frac{2'78}{1'137 * 10^{-6}} = 2.445.030$$

$$Ma_{vel\ media} = \frac{v_{media}}{v_{sonido\ en\ agua}} = \frac{2'78}{1.467'5} = 0'002$$

Hay que hacer esta distinción ya que el flujo de agua en ambos casos no son nada similares. En el caso de la navegación de crucero, la velocidad con la que incide el viento relativo será mucho mayor que en el caso del despegue, es por ello por lo que se generará una mayor sustentación en el primer caso sin un excesivo ángulo de ataque, mientras que en el arranque será necesario incrementar dicho ángulo para conseguir el exceso de sustentación que permita al prototipo elevarse por encima del agua.

5.2.2.1 Arranque

Como se ha explicado anteriormente, en esta condición de funcionamiento lo que ocurre es que la velocidad del viento relativo es baja. Por ello la sustentación generada es inferior que cuando se navega a una velocidad de crucero.

Esto es realmente un problema, porque es justo en esta etapa cuando se busca un exceso de sustentación, es decir que sea superior al peso de el tripulante y del prototipo, para que ambos se eleven. A continuación, se observa la fórmula de la sustentación:

$$L = \frac{1}{2} * C_L * \rho * v^2 * A$$

Es posible ver como dicha fuerza depende de 4 valores, la constante de sustentación (C_L), la densidad del fluido (ρ), la velocidad del viento relativo (v) y la superficie alar (A). Son los

cuatro parámetros que determinarán cuanta sustentación genera el perfil en esas condiciones. Una vez el perfil está instalado, su geometría no se puede variar, por lo que el área no es variable, la densidad del fluido no se puede controlar, por lo que tampoco es variable. La velocidad del viento relativo en este estado es baja, es por ella por la que surge el problema, por estas razones el único término que se puede alterar para conseguir ese extra de sustentación es el coeficiente de sustentación. Como se ha explicado anteriormente, dicho coeficiente depende de la geometría del perfil, del ángulo de ataque y del fluido en el que se encuentre. Como la geometría del perfil no es variable y el fluido tampoco, lo único que se puede alterar es el ángulo de ataque. Por este motivo en el despegue se tendrá que inclinar el prototipo de una determinada forma para que la incidencia del fluido sobre el perfil sea con el ángulo deseado.



Figura 12. Momento de arranque de la Manta 5 Hydrofoiler. (www.ingeniovirtual.com)

Este aumento del ángulo genera un aumento del coeficiente de sustentación, pero a la vez del coeficiente de resistencia al avance, es por ello por lo que el despegue es el momento en el que el vehículo necesitará un mayor aporte de potencia.

Uno de los mayores problemas que se pueden generar con este aumento del ángulo de ataque, es sobrepasar el máximo, lo que provocaría que el perfil entrara en pérdidas y no generara nada de sustentación. Este es el momento en el que el tripulante necesitará hacer uso de una mayor habilidad para encontrar el punto de equilibrio justo.

5.2.2.2 *Velocidad de crucero*

En este estado de funcionamiento el vehículo se encontrará por encima del agua, estando únicamente sumergidos los foils y parte de los mástiles de unión. Es por ello por lo que debido a la poca superficie en contacto con el agua y al diseño de los perfiles la resistencia al avance que encuentre el prototipo sea baja. Esto permitirá que se necesite una menor cantidad de potencia para alcanzar las velocidades requeridas por el piloto en cada instante.

En este momento la sustentación que deberán ejercer los foils será igual al peso del prototipo y al del tripulante, ya que no será necesario que sigan elevando a ambos.



Figura 13. Funcionamiento Manta 5 Hydrofoiler a velocidad de crucero. (www.ingeniovirtual.com)

CAPÍTULO 6. SELECCIÓN DE PERFILES Y ESTIMACIÓN

DIMENSIONES FOILS

6.1 INTRODUCCIÓN

En esta parte de la memoria se explicará cómo se ha seleccionado los perfiles utilizados para los foils, así como su método de cálculo, dimensionamiento y distribución. Como se ha explicado anteriormente en el apartado de tecnologías empleados, una de las herramientas que han posibilitado el correcto cálculo de los perfiles ha sido el programa Xfoil 6.99, repositorio de perfiles NACA y herramienta de simulación para perfiles tanto NACA como del resto de tipos.

6.2 SELECCIÓN PERFILES Y EXPLICACIÓN MÉTODO DE CÁLCULO

Para la selección de perfiles se ha tenido en consideración diferentes aspectos de los valores obtenidos, porque como se ha explicado anteriormente el objetivo es buscar perfiles que en nuestra condiciones funcionamiento generen un alto coeficiente de sustentación y bajo de resistencia al avance.

Para la selección de la primera lista de perfiles se ha buscado información de los más utilizados por fabricantes y en otros proyectos de fin de grado que han desarrollado prototipos de barcos, tablas de surf y kitesurf con foils (Imbernón, 2018). La lista inicial de la que partimos ha sido la siguiente:

- DAE 31
- Eppler 211
- Eppler 555
- Eppler 556
- Eppler 557
- Eppler 1210
- N-11
- NACA 2410
- NACA 4412
- NACA 4418

- NACA 63412
- NACA 63415
- NACA 64212

Una vez seleccionados los perfiles con los que se va a trabajar, lo siguiente es utilizar la herramienta Xfoil 6.99 para obtener los datos necesarios para su comparativa. Como se ha explicado en la sección 5.2.2 Condiciones de funcionamiento, el programa para la correcta simulación necesita los valores del número de Reynolds y de Mach. Es por ello por lo que para realizar la selección del perfil utilizaremos los valores calculados para la velocidad media. En este caso:

$$Re = 2.445.030$$

$$Ma = 0.002$$

Una vez introducidos estos valores en el programa, deberemos seleccionar un valor para el número de iteraciones que se desea, por ello en este caso se seleccionará 100. Ya que no sobrecarga el sistema y los datos obtenidos son lo suficientemente correctos. Por último, se seleccionara la escala de ángulos alfa para los que se quieren obtener valores, para este estudio se sacará una escala de valores para $0^\circ - 15^\circ$. Con ello se desea generar una idea de los perfiles que tienen un correcto comportamiento con ángulos de ataque bajo (condición de navegación) y un admisible comportamiento con ángulos mayores (para la condición de despegue).

6.3 COMPARACIÓN ENTRE PERFILES

Una vez descargados, tratados y ordenados todos los archivos polares de los perfiles que se desean simular, el siguiente paso es introducirlos en el programa Xfoil 6.99. Una vez cargados en él, se introducen los valores de Reynolds, Mach y de iteraciones que se desea. Y por último el rango de ángulos de ataque con su respectivo incremento. En este caso como se ha dicho anteriormente el rango de ángulos irá de $0^\circ - 15^\circ$, con saltos de 1° .

La 1ª y 2ª selección se hará teniendo en cuenta el valor del rendimiento hidrodinámico, respecto al ángulo de ataque de cada. El rendimiento hidrodinámico es el cociente entre los coeficientes de sustentación y de resistencia al avance.

$$\eta = \frac{C_L}{C_D}$$

- C_L : coeficiente de sustentación.
- C_D : coeficiente de resistencia al avance.

El criterio a seguir para la selección o eliminación de perfiles será el siguiente:

- El rendimiento hidrodinámico debe ser máximo entre los $0^\circ - 6^\circ$.
- El rendimiento hidrodinámico debe tener un crecimiento y decrecimiento constante, evitando los saltos bruscos que puedan generar pérdidas excesivas.
- EL rendimiento hidrodinámico debe mantener un valor constante lo máximo posible.

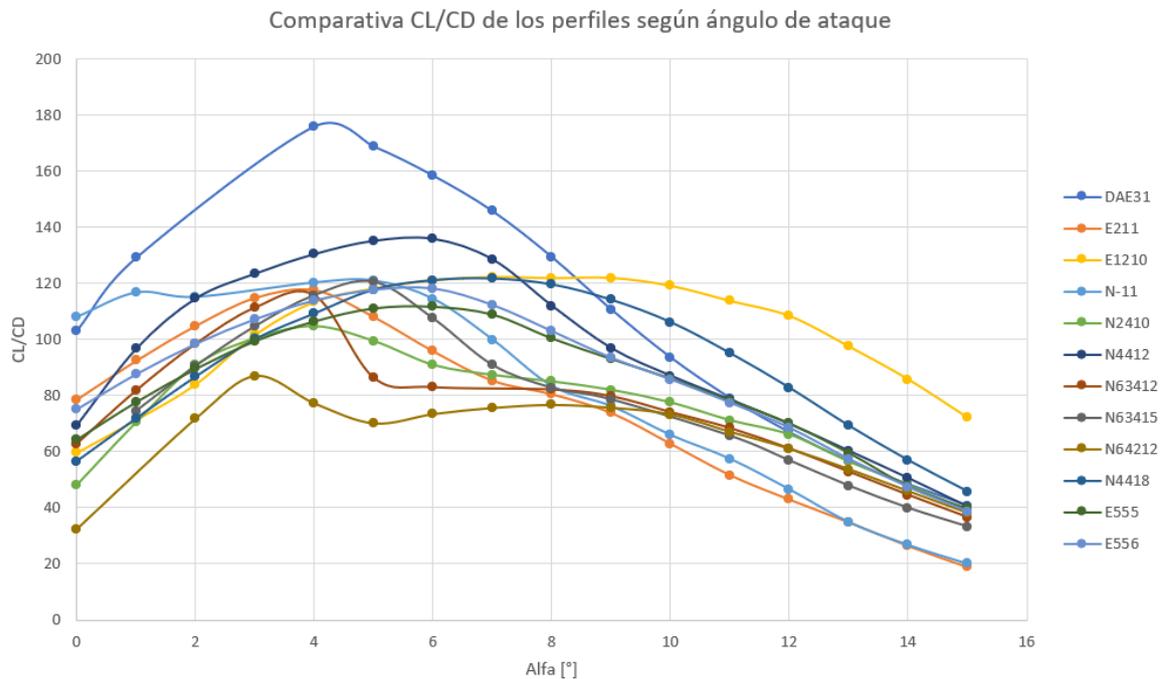


Figura 14. Rendimiento hidrodinámico de todos los perfiles frente a ángulos de ataque. (Elaboración propia)

A continuación, se explicará que perfiles se eliminarán:

- N-11: Por la caída brusca que sufre el rendimiento a partir de los 6°.
- Naca 2410: El valor del rendimiento a partir de los 4° es demasiado bajo.
- Naca 63412: El rendimiento sufre una caída brusca a partir de los 4°.
- Naca 63415: El rendimiento sufre una caída brusca a partir de los 5°.
- Naca 64212: El rendimiento tiene un comportamiento irregular entre los 3° y 8°.

A continuación, comparamos los perfiles restantes:

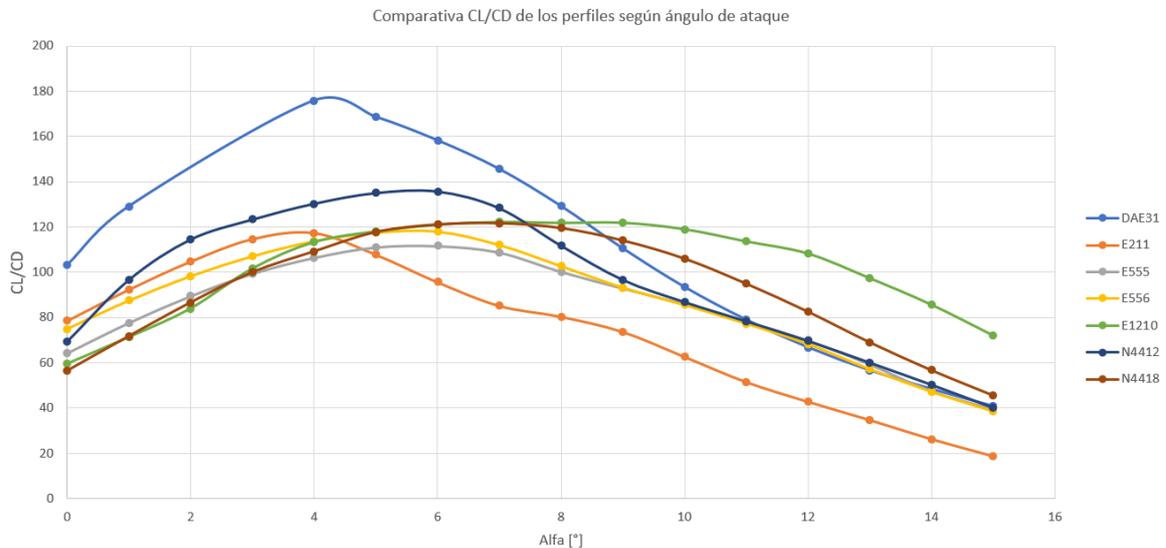


Figura 15. Rendimiento hidrodinámico de la 1ª selección frente ángulo de ataque. (Elaboración propia)

Los perfiles que se van a eliminar son los siguientes:

- DAE 31: El rendimiento tiene un valor muy bueno en la zona deseada pero la caída es demasiado grande en los valores finales.
- Eppler 211: Presenta una caída irregular desde los 4°.
- Naca 4418: La variación que presenta el rendimiento en todo el rango de ángulos es demasiado grande.

Por último, compararemos todos los parámetros de los 4 perfiles resultantes:

Eppler 1210

Eppler 556

Eppler 555

Naca 4418

Los criterios de selección para el perfil del foil serán los siguientes:

- El coeficiente de sustentación deberá ser el máximo para un mayor número de ángulos.
- El coeficiente de resistencia deberá ser el mínimo para un mayor número de ángulos.
- Cuando el rendimiento hidrodinámico sea máximo el coeficiente de cabeceo (C_M) deberá ser mínimo.

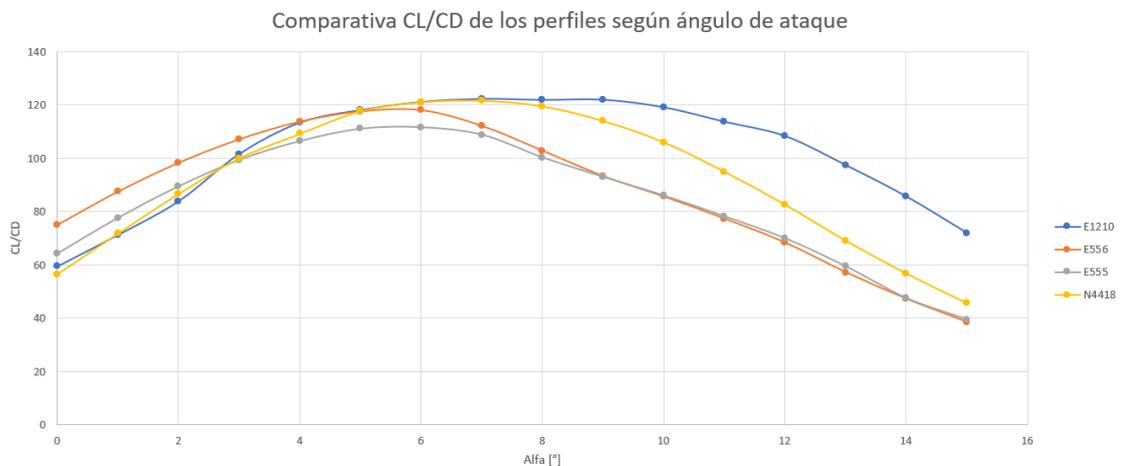


Figura 16. Rendimiento hidrodinámico de los 4 perfiles resultantes frente a ángulos. (Elaboración propia)

Como se puede observar, todos los perfiles resultantes tienen un comportamiento similar en cuanto a su rendimiento hidrodinámico, es por ello por lo que se buscará mayores diferencias entre ellos comparando sus coeficientes de sustentación y resistencia al avance en todo el rango de ángulos.

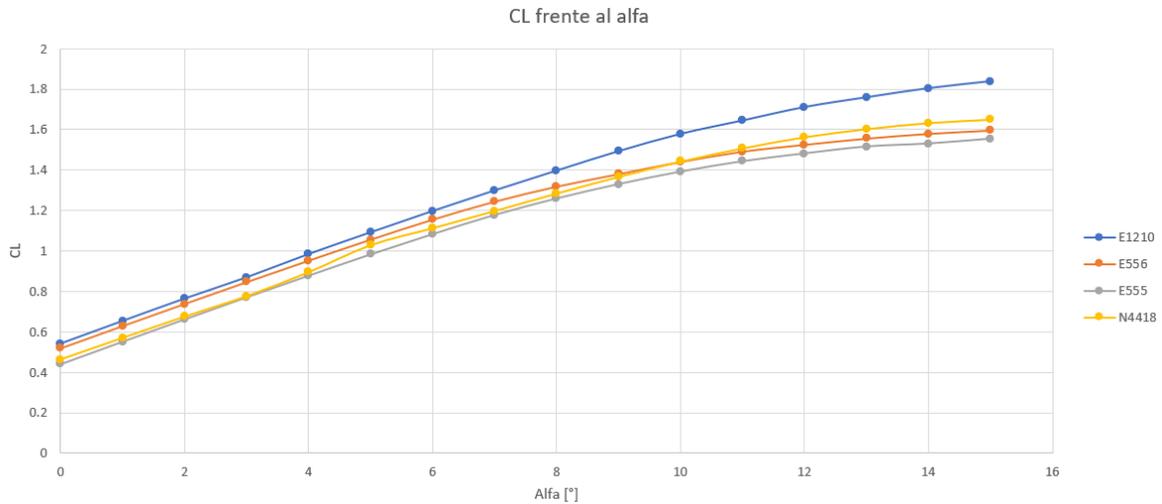


Figura 17. Coeficientes de sustentación frente a ángulos de ataque. (Elaboración propia)

En este caso es posible observar con el perfil Eppler 1210 tiene un mayor coeficiente de sustentación que el resto, esto se hace notar de mayor manera en los mayores ángulos. Esto puede ser una ventaja para la condición de despegue. Estos datos no son suficientes para tomar una decisión, es preciso comparar del mismo modo los coeficientes de resistencia.

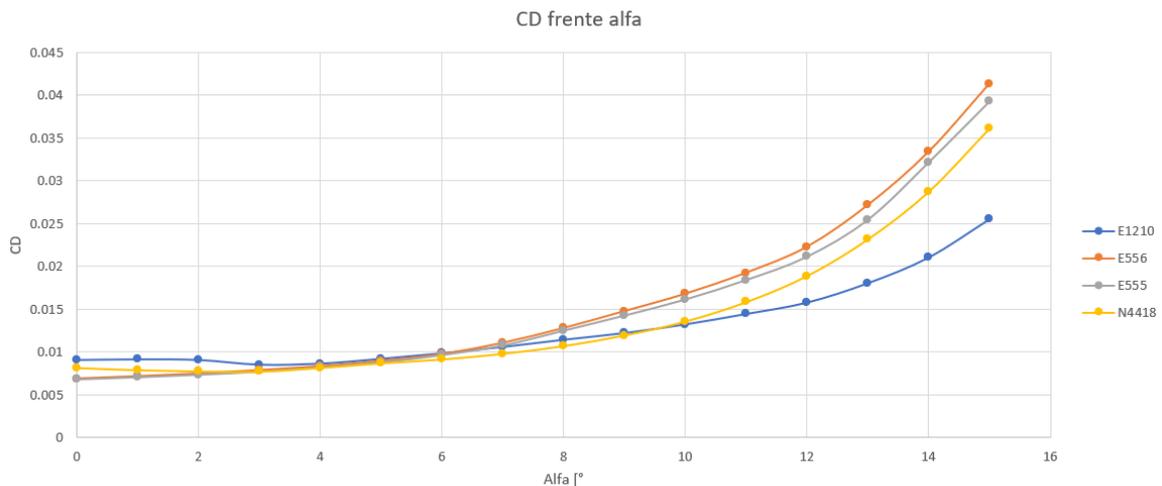


Figura 18. Coeficientes de resistencia al avance frente a ángulos de ataque. (Elaboración propia)

En este gráfico se puede observar que, en ángulos bajos el Eppler 556 presenta cierta ventaja frente al resto de perfiles, en cambio la ventaja del Eppler 1210 se presenta nuevamente en los ángulos superiores, ya que es inferior al resto de perfiles, lo que hará que en la condición

de despegue la potencia necesaria para hacer avanzar al vehículo no se incrementa demasiado por este perfil.

A continuación, se estudiará la gráfica del coeficiente de cabeceo:

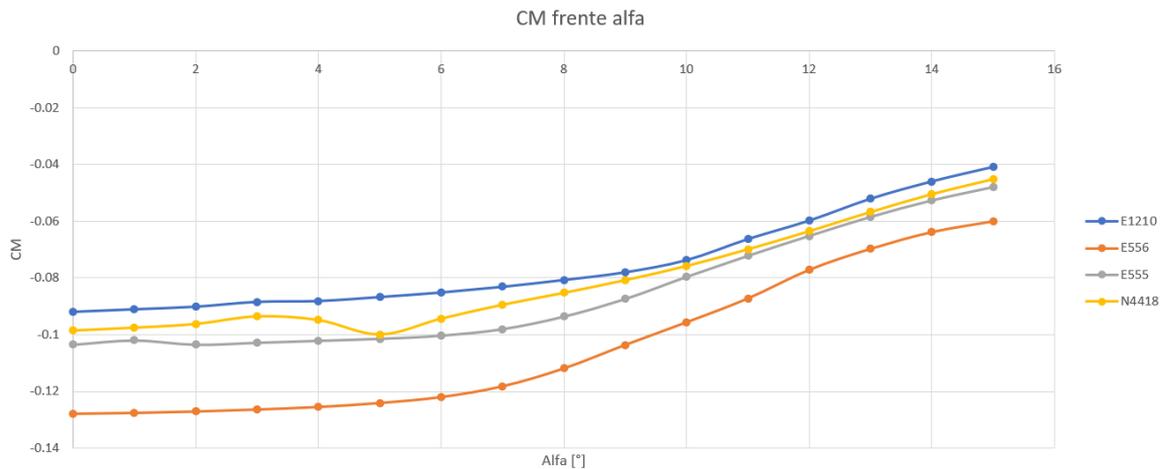


Figura 19. Coeficiente de cabeceo frente a ángulos de ataque. (Elaboración propia)

En esta gráfica se puede observar cómo los mínimos valores los presenta el perfil Eppler 556, es el mínimo de manera muy holgada lo que le da clara ventaja en este punto.

A continuación, se valorará cada perfil por separado, ordenando cuál es su clasificación en cada aspecto y finalmente se tomará la decisión.

El perfil Eppler 1210, presenta el mayor coeficiente de sustentación entre todos los perfiles durante todo el rango de ángulos estudiados, es por ello por lo que se le coloca en cabeza en este ámbito. En cuanto al coeficiente de resistencia al avance, presenta el valor más bajo en 6 puntos de la gráfica, pero en los valores iniciales es ligeramente superior al resto por ello se le coloca en 2ª posición. Por último, en el coeficiente de cabeceo presenta el valor más elevado de todos los perfiles en todos los ángulos, por ello se le coloca en la última posición.

El perfil Eppler 556, presenta un coeficiente de sustentación muy similar al del Eppler 1210 en los ángulos pequeños, pero un poco menor a este cuando llegamos a los ángulos superiores. A pesar de ello se encuentra en la 2ª posición en esta categoría. En cuanto al

coeficiente de resistencia, presenta el valor más bajo en los ángulos cercanos a cero, pero el mayor en los ángulos finales, como la condición de despegue será con ángulo de ataque cercano a 10, en este rango su coeficiente no difiere tanto del resto por ello lo colocamos en la 1ª posición. Su coeficiente de cabeceo es el menor con gran diferencia para todo el rango de ángulos, por ello también logra el primer lugar en esta clasificación.

El perfil Eppler 555, es el que peor clasificación global presenta. En cuanto al coeficiente de sustentación, consigue la última posición, debido a que presenta los valores más bajos en todo el rango de ángulos. En cuanto al coeficiente de sustentación presenta mejores valores en los ángulos pequeños que en los grandes por ello consigue la 3ª posición. Por último, el coeficiente de cabeceo que presenta es de los mejores que hemos estudiado ya que solo está por debajo del perfil Eppler 556, clasificando en el número 2.

Por último, el perfil Naca 4418, presenta un coeficiente de sustentación no demasiado bueno (3). Un coeficiente de resistencia más alto que los dos perfiles anteriores en ángulos bajos y, además, siendo de los más elevados en los ángulos superiores (4). En cuanto al coeficiente de cabeceo, presente valores no muy elevados, pero presenta irregularidades que hace que se descarte (3).

A continuación, se presenta una tabla resumen en la cual se suma la puntuación obtenido para la seleccionar el perfil que mejor clasificación haya obtenido. Para ello se sumará la puntuación dada, y el que tenga un valor menor será el seleccionado.

	Eppler 1210	Eppler 556	Eppler 555	Naca 4418
C_L	1	2	4	3
C_D	2	1	3	4
C_M	4	1	2	3
Total	7	4	9	10

Tabla 2. Resultados clasificación de perfiles alares. (Elaboración propia)

Como se puede ver en la tabla anterior, el perfil con menor puntuación y por tanto con una mejor clasificación es el perfil Eppler 556. El cuál es el seleccionado para ser el perfil de los foils sustentadores del prototipo.

6.4 ESTIMACIÓN FOILS PROA Y POPA

En las embarcaciones que utilizan foils para su sustentación es de vital importancia conocer la disposición del centro de gravedad del conjunto, vehículo más tripulante. La importancia de esta idea es tan grande porque de ella depende la disposición de los foils a lo largo de la embarcación, no se pueden disponer de igual manera para embarcaciones donde la mayor parte del peso esté en la parte delantera como para otras donde esté en la trasera. Este conocimiento de la posición del centro de masas permitirá optimizar al máximo el tamaño de los foils, ya que si de antemano se sabe cuanta fuerza debe ejercer cada uno de los foils se podrá optimizar el tamaño de envergadura, lo que significa la utilización de menos material, que da lugar a un ahorro significativo de dinero.

Hablando de estas distribuciones de pesos tenemos 3 grandes grupos: Conventional, Canard y Tandem. La disposición Conventional de pesos establece que el centro de masas del conjunto debe estar entre la parte inicial de la embarcación y el primer 35% de embarcación ($0 < x/L < 0.35$). La disposición Tandem es la distribución de pesos que establece que el centro de gravedad tiene que estar entre el 35% y el 65% de la longitud de la embarcación ($0.35 < x/L < 0.65$). Y por último la disposición Canard es la que establece que el centro de pesos tiene que estar en la parte final de la embarcación, entre el 65% y el 100% de la longitud de esta ($0.65 < x/L < 1.0$).

En nuestro caso debido a que el tripulante, que es la mayor parte del peso, el motor y la caja de baterías se van a disponer en la parte trasera, tendremos una distribución de pesos de tipo Canard. Lo cual hace que en la parte trasera dispongamos de un foil con el 80% del área total, el cual generará la sustentación necesaria para soportar el 65% del peso total. En cambio, en la parte delantera dispondremos de un foil más pequeño, el cual constará con el 20% del área restante y generará una fuerza sustentadora del 35% del peso.

A continuación, en la siguiente imagen se puede ver en una embarcación real como es la distribución de tipo Canard y como es la disposición de los foils.



Figura 20. Barco de competición con foils en la parte trasera.(www.gacetanautica.es)

CAPÍTULO 7. ANÁLISIS MÁSTIL-FOIL

7.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se realizará un estudio similar al anterior en cuanto a la selección de perfiles para el mástil. La gran diferencia que se tiene es que en esta ocasión lo que se busca son perfiles que en las condiciones de funcionamiento generen la menor resistencia al avance posible, además de una nula o casi nula sustentación ya que es provocaría momentos flectores en la estructura que podrían dañar o hacer que hay que sobredimensionar dicho elemento. Como en la sección anterior se utilizará el programa Xfoil 6.99 para la obtención de los parámetros que se desean de los perfiles.

7.2 SELECCIÓN PERFIL MÁSTIL

Para el estudio de los perfiles que se estudiaran como posibles mástiles, se usarán perfiles simétricos, ya que su coeficiente de sustentación con ángulos de ataques bajos es nulo o casi nulo. Lo cual es lo que se está buscando, ya que buscamos que sean elementos de unión entre los foils y la estructura pero que ejerzan las mínimas fuerzas posible, ya sean de resistencia al avance o de sustentación. Esta última, como se ha comentado antes, podría provocar que los mástiles flectaran o soportarán cargas excesivas, por ello hay que intentar anularlas.

Los mástiles son los elementos que más cargas sufren de todo el vehículo ya que sobre el descansa todo el peso del prototipo, por ello hay que evitar inducirle más fuerzas innecesarias.

Para este estudio se ha escogido 6 perfiles NACA simétricos utilizados por fabricantes y que han sido utilizados en otros proyectos de TFG para el análisis de posibles mástiles, los cuales han sido ensayados en el programa Xfoil 6.99 con las condiciones de funcionamiento de velocidad media:

$$Re = 2.445.030$$

$$Ma = 0.002$$

La lista de perfiles seleccionados ha sido la siguiente:

- Naca 0015
- Naca 0018
- Naca 0024
- Naca 63015 A
- Naca 642015 A
- Naca 64008 A

Una vez seleccionado que perfiles se van a estudiar, hay que volver a utilizar Xfoil 6.99. Cargamos las coordenadas polares de nuestro perfil en el programa, introducimos nuestros valores de Reynolds, Mach, el número de iteraciones (100), y el rango de ángulos de ataque y su salto (de 0° a 8°, en salto de 1°).

Para la eliminación de los primeros perfiles se tendrá en cuenta el coeficiente de resistencia al avance, ya que en este elemento lo que queremos es reducirlo al máximo. Por ello se buscará perfiles con el mínimo coeficiente y que su crecimiento sea lo más suavizado posible. A continuación, se analiza la gráfica obtenida mediante Excel.

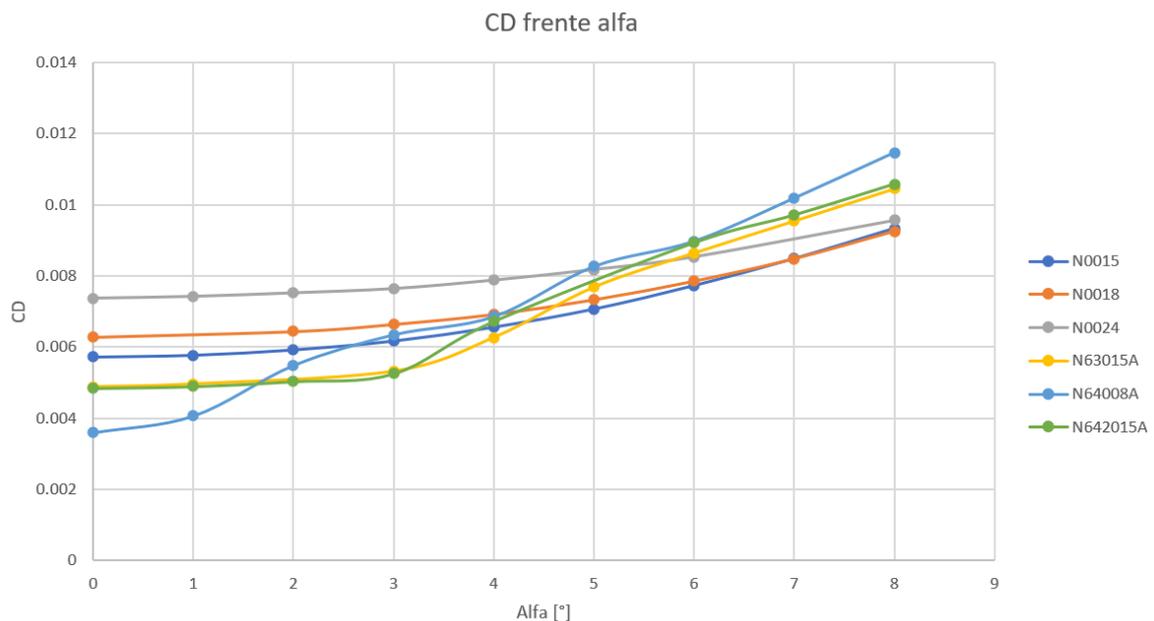


Figura 21. Coeficientes de resistencia de perfiles simétricos frente ángulos. (Elaboración propia)

Los perfiles que se van a descartar serán: el Naca 44008-A y el Naca 63015-A. El motivo es que ambos perfiles presentan un crecimiento muy poco suavizado, ya que presentan valores bastante buenos pero su irregularidad hace que no se puedan utilizar, debido al riesgo de aumento de la resistencia en diferentes condiciones.

A continuación, se analiza la gráfica de los coeficientes de resistencia de los 4 perfiles restantes.

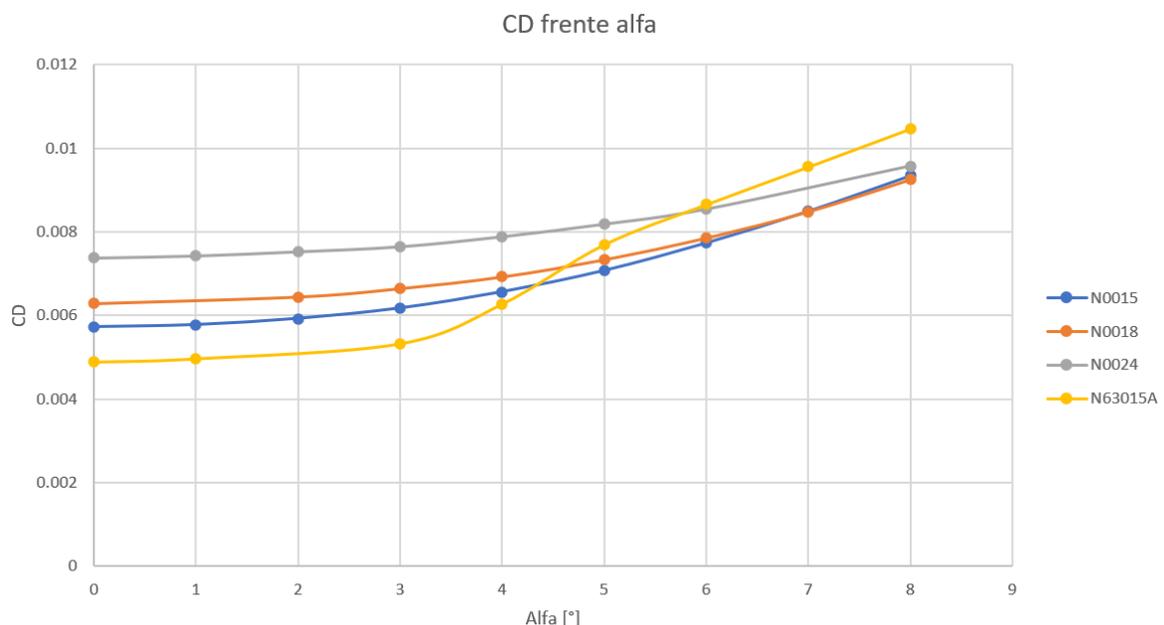


Figura 22. Coeficientes de resistencia de los 4 perfiles simétricos frente ángulos. (Elaboración propia)

Por último, debemos realizar una selección entre los 4 perfiles restantes. Como se puede observar el Naca 63015-A presenta el valor más bajo para los ángulos más pequeño, pero por otro lado presenta un crecimiento mucho más drástico que el resto. Esto hace pensar que ante cualquier imprevisto (como cambios de la dirección de corrientes o giros bruscos) podría incrementar de manera significativa la resistencia al avance. Por este motivo se descarta este perfil.

Si se analiza el resto de los perfiles, es fácil ver como en los mayores ángulos los valores son muy similares, lo cual no induce al descarte de ningún perfil. El crecimiento de todos también es muy similar y suavizado, lo cual es lo que se busca. La única característica que

diferencia realmente a estos perfiles es su valor en los ángulos más pequeños. Como se puede observar el perfil Naca 0015 posee el valor más bajo de coeficientes de resistencia en el 90% de los puntos de la gráfica. Esto hace que sea el perfil seleccionado para los mástiles de nuestro prototipo.

7.3 SELECCIÓN MATERIAL

Para la selección del material utilizado en la fabricación de los mástiles y los foils se analizarán diferentes opciones. Los elementos estructurales, es decir los que deben resistir grandes cargas en vehículos suelen ser fabricados en aceros al carbono, aluminio estructural, fibra de carbono o fibra de vidrio. En ocasiones se utilizan otros tipos de materiales, como pueden ser fundiciones, pero los 4 anteriores son los más empleados.

Cada material representa sus ventajas y desventajas, actualmente se hablarán de ellas para realizar la selección del material óptimo. Para el análisis de sus propiedades se analizarán diferentes propiedades físicas de cada material, entre ellas: densidad, módulo de Young, límite elástico, coste por kilogramo de material, oxidación en medio marino.

A continuación, se analizará dichos datos en una tabla comparativa:

Materiales	Propiedades				
	Densidad (kg/m ³)	Módulo de Young (Gpa)	Límite Elástico (Mpa)	Coste (€/kg)	Oxidación medio marino
Fibra de carbono	1750	500	2500	21.56	Muy baja, óptima para este medio
Fibra de vidrio	2600	72	700	1.80	Muy baja, óptima para este medio
Aluminio 6083	2710	70	130	2.07	Baja, tras anonizado
Acero S275	7850	210	275	2.20	Alta, necesita tratamiento

Tabla 3. Tabla de propiedades físicas y mecánicas. (Elaboración propia)

Como es posible observar el acero estructural analizado no tiene sentido que se utilice para el moldeo de perfiles aerodinámicos. Ya que, habría que mecanizarlo, lo cual significa mucho dinero, su peso sería desmesurado, las cargas que se soportan no requieren tanta rigidez y por último el acero en un medio marino sufriría de óxido o necesitaría mantenimientos de manera recurrente. (Esmeralda, 2021)

Por otro lado, el aluminio presenta unos valores de densidad y de módulo de Young aceptables. Pero por otro lado la fabricación de piezas con la forma de perfiles alares en aluminio puede encarecer las piezas, ya que sería necesario mecanizar. (Teknika4, s.f.) Y para evitar el óxido habría que realizar un tratado de anodizado, el cual no es muy caro, pero es un proceso extra. (R.P.M., 2008)

Ahora se pasará a analizar las dos fibras, de carbono y de vidrio, los materiales compuestos presentan grandes ventajas frente a los metales tradicionales, ya que, permiten aligerar de manera significativa la masa de las piezas. Otro punto importante es la posibilidad de fabricar geometrías complejas de una manera más sencilla y económica que con otros materiales.

En cuanto a la fibra de carbono, si se observan los datos es posible ver como presenta las mejores propiedades mecánicas de todos los materiales, junto con la menor densidad. Lo que hace que sea el material por excelencia a nivel estructural ya que aporta la rigidez necesaria aligerando los prototipos. (Material properties, s.f.) También presenta un comportamiento adecuado frente al medio marino. (Cordis, s.f.) Es por ello por lo que es el material rey actualmente, siempre y cuando se esté dispuesto a pagar su precio, ya que en la tabla se ve como es el material más caro de la lista. Lo cual si se quiere realizar un prototipo económico no se puede utilizar este material.

Por último, si se analiza la fibra de vidrio se observa que presenta un módulo de Young similar a una densidad ligeramente inferior a la del aluminio y un límite elástico muy superior al del acero. Esto hace que mecánicamente sea la segunda opción más factible. Su comportamiento en el medio acuático es fantástico, ya que, es el material rey en la fabricación de cascos rígidos de barcos. (Fiberdowels, s.f.) Además, si se observa el precio, se observa que es el más barato de todos. Este bajo coste y su gran comportamiento físico y mecánico hace que sea el material elegido para la fabricación de los conjuntos mástil-foil del prototipo. (Mexican Fibers, 2021)

CAPÍTULO 8. PRIMERAS CONSIDERACIONES DE DISEÑO

8.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se explicarán cuáles son las condiciones básicas que se deben asumir para el desarrollo de este prototipo. Además, se hablará de los componentes que forman parte del vehículo, su estimación de pesos, de los materiales de los que está fabricado entre otros aspectos.

Es de vital importancia la estimación de pesos, ya que es necesario un primer valor para estipular un valor mínimo de los foils que se van a utilizar en el prototipo. En esta sección se pensará la lista de todos los elementos, y en el capítulo 9 se desarrollará la disposición y sus dimensiones finales.

8.2 ESTIMACIÓN DE PESO PROTOTIPO

Para la estimación del peso hay que tener en cuenta todos los componentes del sistema, por ello a continuación se hará una lista de las partes con las que consta nuestro prototipo.

Partes para considerar en la estimación del peso:

Chasis	Caja baterías
Mástiles	Motor
Foils	Tripulante

Tabla 4. Lista de componentes que se consideran en la estimación del peso. (Elaboración propia)

A continuación, se estimarán los pesos iniciales de cada componente. En cuanto a los pesos de elementos que se van a comprar, se buscará información en páginas de proveedores para

establecer un valor para cada componente. Para el peso del tripulante se estimará un peso estándar.

A continuación, se presenta la fórmula de la masa total:

$$M_{Total} = M_{Chasis} + M_{Mástiles} + M_{Foil\ trasero} + M_{Foil\ delantero} + M_{Baterías} + M_{Motor} + M_{Tripulante}$$

La estimación de pesos ha sido la siguiente:

$$M_{Tripulante} = 80kg$$

$$M_{Chasis} = 15kg$$

$$M_{Foil\ trasero} = 9kg$$

$$M_{Foil\ delantero} = 5kg$$

$$M_{Baterías} = 5kg$$

$$M_{Motor} = 3kg$$

La estimación del peso de la caja de baterías y del motor se ha realizado teniendo en cuenta valores comerciales. En primer lugar, se ha buscado motores para embarcaciones de características similares, en las que el peso total y la potencia requerida, sean similares. Otro aspecto importante es la necesidad de emplear motores de vehículos submarinos, ya que la mayoría de las embarcaciones de estas dimensiones están provistos de motores fuera borda, lo cual nos delimita en el número de fabricantes disponibles. Como uno de los objetivos de este proyecto es el desarrollo de la embarcación de la manera más económica posible, se deberá buscar proveedores asiáticos, o empresas de productos a bajo coste. Por otro lado, el peso estimado de la caja de baterías se ha calculado en base al peso de las cajas de vehículos con voltaje y potencia de entrada del motor similares.

Todos estos valores generan un peso total:

$$M_{TOTAL} = 117kg$$

Una vez se ha estimado el peso total del dispositivo es posible calcular las fuerzas sustentadoras que son necesarias para cada una de las condiciones de funcionamiento: despegue y navegación.

El peso resultante en la estimación de masas es ligeramente superior al que se puede observar en el prototipo diseñado por la empresa Manta5. En la hoja de especificaciones exponen que el peso de su vehículo está entorno a los 31 kg. Esto puede ser debido a la utilización de fibra de carbono para un gran número de elementos, lo cual les permite optimizar el peso de muchas piezas. Al ser un elemento de gran calidad para elementos estructurales, les permite reducir en gran medida las dimensiones de sus piezas.

Otra razón puede ser la optimización del conjunto de baterías, ya que pueden haber subcontratado a empresas especializadas que les hagan diseños optimizados, lo cual permite emplear baterías de gran calidad, con la geometría deseada y con los valores de potencia y voltaje específicos.

8.3 CONFIGURACIÓN Y DISPOSICIÓN DE LOS FOILS

Como se ha explicado en el apartado anterior, es necesario calcular el peso total de nuestro dispositivo para saber cuál va a ser la fuerza sustentadora necesaria para el funcionamiento correcto del prototipo.

La masa resultante ha sido de 117kg. Para el cálculo de las fuerzas se debe transformar a Newtons. Por ello:

$$P = M_{Total} * g$$

Para el cálculo de todas las fuerzas durante el desarrollo de este trabajo se tomará un valor de gravedad igual a:

$$g = 9'81 \text{ m/s}^2$$

Por ello el peso resultante es el siguiente:

$$P = M_{Total} * g$$

$$P = 117 * 9'81 = 1147'77N$$

Una vez conocida dicha fuerza, para el cálculo de la sustentación hay que diferenciar entre los dos modos de funcionamiento. En el modo de navegación la sustentación necesaria debe ser igual al peso total del prototipo, así el vehículo se encontrará en un equilibrio de fuerzas en la componente vertical, por lo tanto, no habrá desplazamiento en este eje, que es el objetivo. En cambio, en el modo de despegue, la fuerza sustentadora deberá ser superior a este peso total. Con esto se conseguirá que la fuerza resultante vertical que sufre la embarcación tenga sentido ascendente, haciendo que el vehículo sobresalga del agua una vez se alcanza la velocidad específica.

Explicado de manera más gráfica es algo así:

- Modo de navegación

$$L = P$$

$$L = 1147'77N$$

Siendo L: la fuerza de sustentación.

Siendo P: peso resultante calculado previamente.

- Modo de despegue

$$L > P$$

$$L > 1147'77N$$

Una vez conocidos estos valores, lo que se debe realizar es el dimensionamiento de los foils. Como se explicó en el capítulo 6.4, al tener un vehículo en el que la disposición del centro de masas se encuentra en la parte posterior, se opta por una localización de los foils en la que el 80% del área total de estos se encuentra en el foil trasero, y el 20% restante en el

delantero. Para realizar este cálculo se hará en dos pasos. El primero consiste en calcular el área total con el que se consigue la fuerza sustentadora necesaria, una vez es conocido este valor, se multiplicará por sus respectivos valores para obtener el área delantera y trasera.

Con estos datos, lo que se ha conseguido no es más que el área, el cual es producto de la cuerda y de la envergadura de las alas. Por ello, para el dimensionamiento correcto, se debe estudiar cual es la envergadura resultante. Para ello el proceso que se va a seguir es estudiar valores típicos de cuerdas utilizadas, y calcular su envergadura asociada.

Los cálculos realizados han sido los siguientes:

$$L = \frac{1}{2} * C_L * \rho * v^2 * A_L$$

Siendo:

- C_L : coeficiente de sustentación del perfil.
- P : densidad del fluido.
- V : velocidad del viento relativo.
- A_L : área de sustentación.

En primer lugar, se calculará el coeficiente de sustentación del perfil para cada uno de los modos de funcionamiento. Como se expuso en el capítulo 5, el perfil seleccionado para las alas es el Eppler 556. Como se ha estudiado, es el que mejor prestaciones da en el rango de funcionamiento deseado. Si se observa las siguientes gráficas se puede observar el valor de los coeficientes de sustentación y resistencia que genera el perfil en las condiciones de funcionamiento de navegación. Para ello se buscará el ángulo alfa que permita obtener un coeficiente de sustentación lo más alto posible y que no incremente el demasiado el valor del coeficiente de resistencia.

En las dos siguientes figuras se pueden analizar dichos valores:

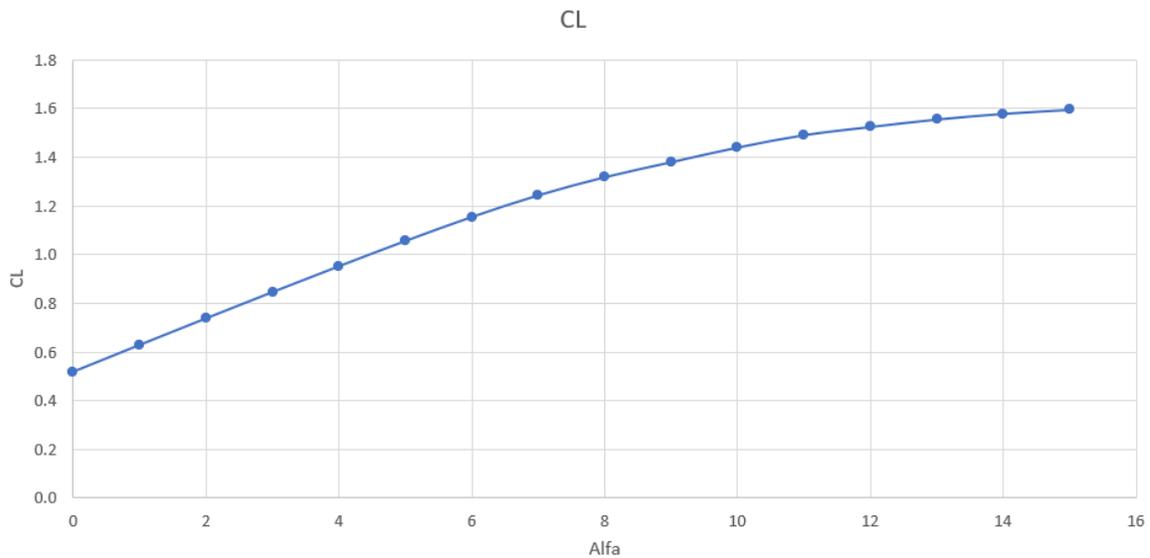


Figura 23. Gráfica del coeficiente de sustentación del Eppler 556 frente al ángulo de ataque. (Elaboración propia)

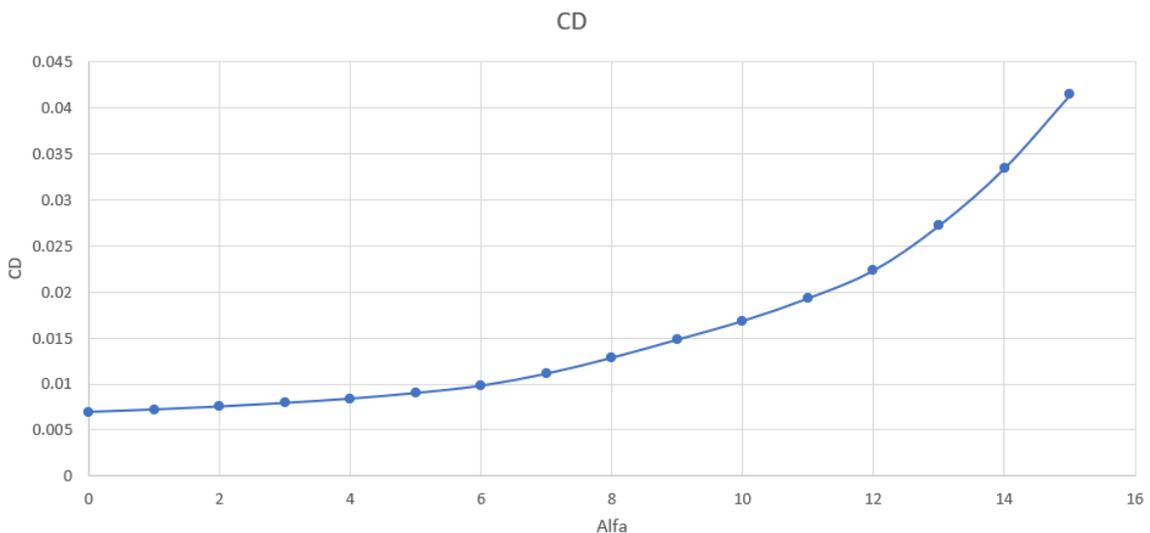


Figura 24. Gráfica del coeficiente de resistencia del Eppler frente al ángulo de ataque. (Elaboración propia)

Como es posible observar en las figuras 23 y 24, el comportamiento de ambos coeficientes es relativamente distinto. En la gráfica del coeficiente de sustentación se puede observar cómo presenta una pendiente mucho más pronunciada en la zona de ángulos de ataque más

baja, mientras que la gráfica del coeficiente de resistencia presenta una zona más plana en dichos ángulos. Este comportamiento de los coeficientes del perfil es lo que se busca para este modo de funcionamiento. Ya que la inclinación suavizada del perfil permitirá ganar sustentación sin necesidad de incrementar de manera desmesurada la resistencia al avance. Para obtener el valor del ángulo de ataque que más se ajuste, se realizará una comparativa de los rendimientos hidráulicos en cada ángulo.

En la siguiente figura es posible observar el análisis del rendimiento:

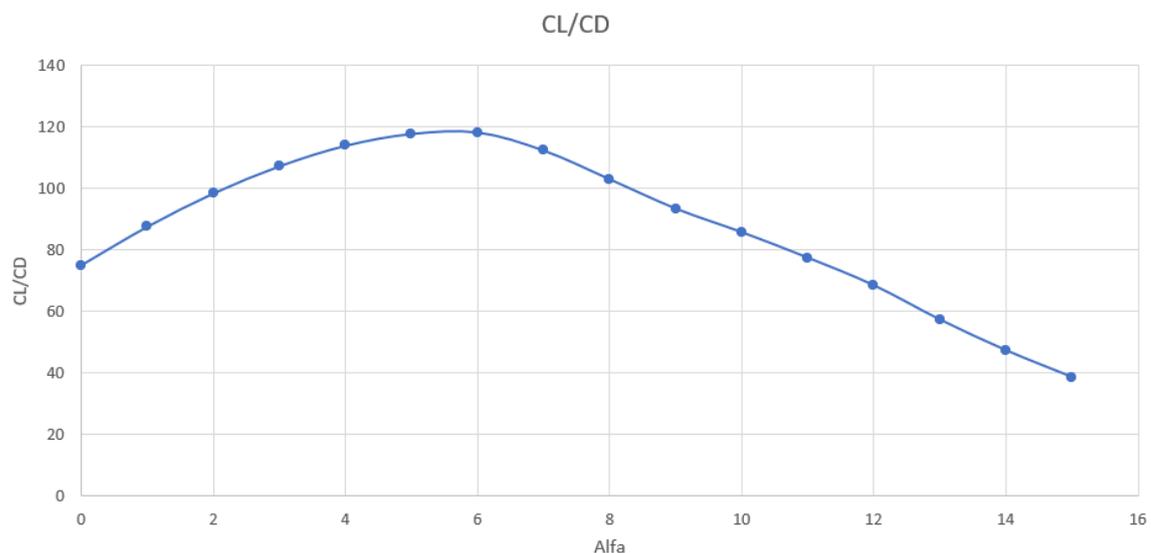


Figura 25. Gráfica del rendimiento hidráulico del Eppler 556 frente al ángulo de ataque. (Elaboración propia)

Se observa como el máximo rendimiento se obtiene para un ángulo de ataque de 6°. Por ello este será el valor de alfa que se utilizará en el diseño de los foils. Al saber que ángulo se usará, ya es posible obtener los coeficientes de sustentación y resistencia.

Del estudio realizado en Xfoil 6.99 obtenemos que el valor del coeficiente de sustentación para el Eppler 556 con un ángulo de ataque de 6° y en las condiciones de navegación presentadas en capítulos anteriores es:

$$C_L = 1'1551$$

Del mismo estudio realizado en el perfil Eppler 556 también se obtiene el coeficiente de resistencia al avance para las condiciones anteriormente citadas:

$$C_D = 0'00978$$

Una vez se han obtenido dichos componentes es posible calcular el área de sustentación necesaria para generar la fuerza.

Como se ha explicado anteriormente la manera de obtener dicho valor es:

$$L = \frac{1}{2} * C_L * \rho * v^2 * A_L$$

Donde los valores son:

$$L = 1147'77N$$

$$C_L: 1'1551$$

$$\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$$

$$v = 2'78 \text{ m/s}$$

Por ello el área de sustentación resultante es:

$$A_L = \frac{2 * L}{C_L * \rho * v^2} = \frac{2 * 1147'77}{1'1551 * 1025 * 2'78^2} \rightarrow A_L = 0'6974 \text{ m}^2$$

El resultado obtenido del área hace referencia a un área teórica en la cual solamente existiera un único foil. Como en la disposición que se desea hay 2 alas, se debe repartir dicha área. Retomando lo citado anteriormente, esa distribución no se hace a partes iguales, debido a la localización del centro de masas. Es por ello por lo que el ala trasera tendrá un 80% del total y la delantera el 20% restante.

A continuación, se calculan dichos valores:

$$A_{L\text{Trasera}} = A_L * 0'80$$

$$A_{L\text{Trasera}} = 0'55792 \text{ m}^2$$

$$A_{L\text{Delantera}} = A_L * 0'20$$

$$A_{L\text{Delantera}} = 0'13948 \text{ m}^2$$

Una vez es conocido el valor del área de cada foil, se puede conocer la envergadura de las alas a utilizar una vez sea decidida la cuerda de los perfiles.

La selección de dicha cuerda será basada en la experiencia previa descrita por persona que han desarrollado proyectos de fin de grado estudiando vehículos con foils (García, 2020) (Imbernón, 2018) y las dimensiones utilizadas por la empresa Manta5.

La cuerda utilizada en el prototipo de la empresa neozelandesa es de uno 29 cm, mientras que las longitudes empleadas en otros vehículos están alrededor de los 20 cm. Por ello se ha decidido utilizar una cuerda de valor 25cm.

El valor de la cuerda es:

$$c = 0'25m$$

Con este valor es posible calcular la envergadura de cada foil.

$$Env_{Trasera} = \frac{A_{L\text{Trasera}}}{c} = \frac{0'55792}{0'25} \rightarrow Env_{Trasera} = 2'24m$$

$$Env_{Delantera} = \frac{A_{L\text{Delantera}}}{c} = \frac{0'13948}{0'25} \rightarrow Env_{Delantera} = 0'56m$$

Una vez calculados los valores envergadura, se comienza a diseñar el prototipo mediante SolidWorks. En el siguiente capítulo se incluirán los criterios de diseño y la explicación de los materiales seleccionados para cada una de las partes.

En la siguiente sección calcularemos los valores reales de envergadura necesarios para navegar con la masa real del prototipo.

CAPÍTULO 9. DISEÑO DEL VEHÍCULO

9.1 INTRODUCCIÓN

En esta nueva sección se expondrá el diseño final del prototipo, teniendo en cuenta las geometrías, los materiales, y los elementos que se han de comprar.

La geometría básica del vehículo se ha basado en diferentes modelos, ya sea el prototipo elaborado por Manta5 o una simple bicicleta de calle. Esta geometría está pensada principalmente para que el usuario pueda tener una posición cómoda y estable durante la navegación.

9.2 DISEÑO FINAL DEL VEHÍCULO

En este punto se expondrá cual ha sido el criterio tomado para el diseño estructural del prototipo, cuáles son los puntos clave, por qué se ha elegido los materiales, la necesidad de tratamientos superficiales y el modo de fabricación.

En primer lugar, se hablará del chasis. El cual ha sido conformado mediante un tubo normalizado de aluminio 6063 de 120x80mm, de un espesor de 6mm. La conformación del eje central del chasis se ha realizado mediante el doblado de este perfil. La longitud necesaria de aluminio es de 2267'6mm. Por qué se ha seleccionado este perfil, se debe a que presenta un espesor suficiente para aguantar las cargas que sufrirá el prototipo durante el funcionamiento. La elección del aluminio 6063 se debe a que es uno de los más comunes en la fabricación de perfiles normalizados, ya que sus características físicas ofrecen un gran resistencia, junto con la posibilidad de generar las formas deseadas con prensas convencionales.

Al ser un vehículo que va a funcionar en el mar y el océano, hay que tratar superficialmente a todos los metales que se utilicen, y en especial al aluminio. Para ello se ha buscado

información sobre proveedores de este tipo de pinturas y la que destaca por su relación de calidad precio es la marca Proa, la cual presenta un larga lista de pinturas para diferentes ámbitos. (Proa, s.f.)

A continuación, se presenta un imagen del chasis definitivo con la pintura anticorrosión.

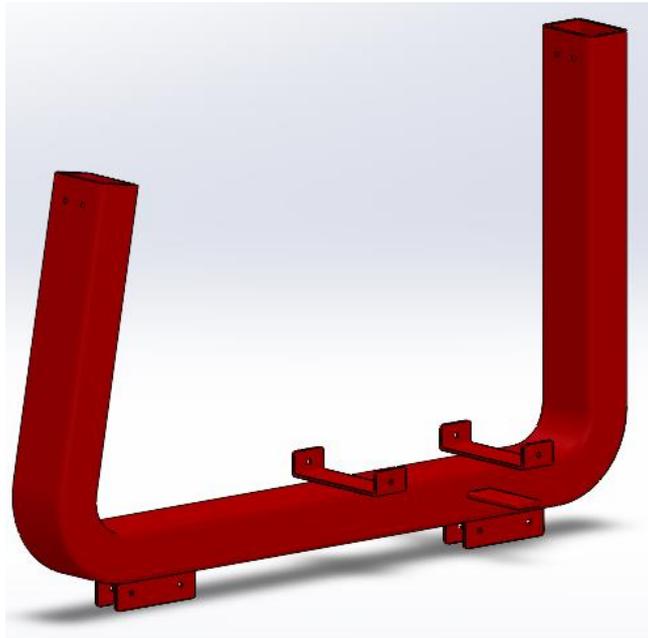


Figura 26. Chasis definitivo del prototipo diseñado. (Elaboración propia)

En la figura anterior es posible observar diferentes apéndices. Los cuales presentan tres tipos de funcionalidades diferentes.

Las dos pletinas inferiores son las encargadas de la unión del chasis con los foils. En ellas se dispondrán unos anclajes con los que se unirán los mástiles de los foils. En las pletinas superiores, irá colocada la caja de baterías. La cual estará cubierta de un pequeño carenado que impida la entrada de agua. Por último, las dos pletinas laterales, hacen la función de apoyo para los pies. Todas estas pletinas irán soldadas mediante tecnología TIG, la cual no será difícil de hacer ya que todos los espesores son similares (5-6mm) y no presentan geometrías difíciles.

Para el cálculo de la masa se utiliza la opción de SolidWorks que nos calcula las masas de las piezas diseñadas una vez se ha seleccionado el material del que están fabricadas. En cuanto a la masa del chasis resultante es de 14'88kg.

La siguiente pieza que se explicará, es la que ha sido citada anteriormente, el anclaje de los foils al chasis. Esta pieza es de vital importancia ya que es la que permite una perfecta unión entre los mástiles y el chasis. Esta unión no es fácil de conseguir debido a la geometría curva que presentan los mástiles, ya que siguen la curva del perfil Naca 0015. Para ello este elemento es fabricado en plástico, consiguiendo en su cara interna la forma del perfil naca, lo que permite encajar el mástil a la perfección. Y, por otro lado, su cara exterior es totalmente plana para encajar en las pletinas del chasis.

En las siguientes figuras se puede observar la geometría de la pieza citada.

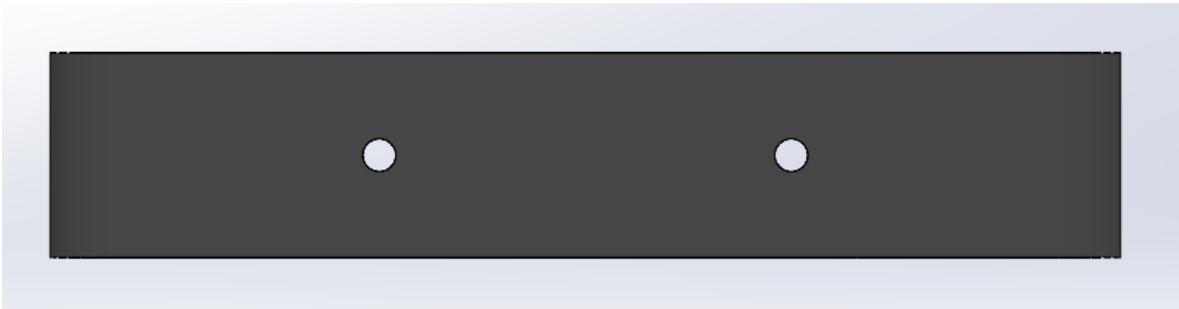


Figura 27. Vista lateral del enganche del mástil al chasis. (Elaboración propia)

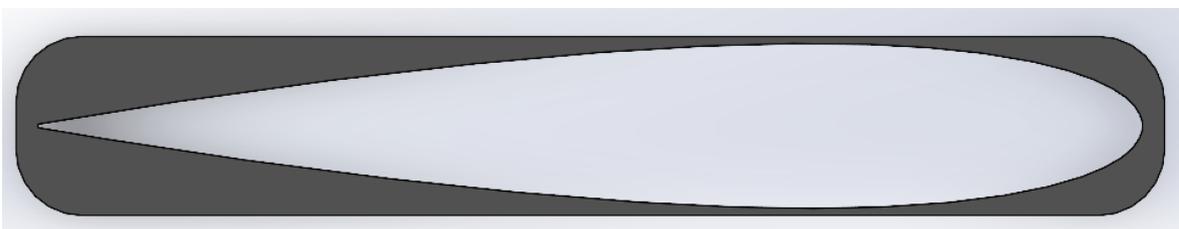


Figura 28. Vista de planta del enganche del mástil al chasis. (Elaboración propia)

En la figura 28 se observa perfectamente como en la cara interna del enganche se consigue la geometría del perfil utilizado en el mástil. Por otro lado, en la cara externa se ven 2

agujeros de diámetro 8 mm, por el que pasarán 2 tronillos M8 que permitirán la unión de todos los componentes.

Las dimensiones exteriores de esta pieza son: un ancho de 45mm, una longitud de 260mm y un espesor de 50mm. La masa de los dos componentes suma un total de 0'4kg.

El siguiente elemento que conforma el prototipo es el foil delantero. Ambos foils van a estar fabricados en fibra de vidrio del tipo E. La utilización de la fibra de vidrio para estos elementos se debe a que son los que más esfuerzos van a sufrir de todo el prototipo. Para economizar en la fabricación del modelo se opta por este material y no por la fibra de carbona, la que actualmente es utilizada en la fabricación de vehículos en los que se busca optimizar al máximo el peso. Este cambio producirá un reducción en el precio, pero aumentará el peso.

Dentro de las fibras vidrio hay de diferentes tipos, la que se utilizada habitualmente en el sector náutico, en la fabricación de cascos de embarcaciones es la del tipo E. La cual presenta características físicas suficientes para esta función.

La fabricación de los mástiles y los foils será la parte más complicada del proceso, ya que se realizará por laminación manual en moldes. Se crearán moldes permanentes con las formas de perfiles Naca 0015 para el mástil y el Eppler 556 para las alas.

Como se ha dicho anteriormente los mástiles de las alas serán las piezas que más sufran las cargas ya que en ellos estará concentrada toda la carga a compresión, producida por el peso del prototipo y la fuerza sustentadora generada en las alas.

A continuación, se puede observar el foil delantero diseñado:

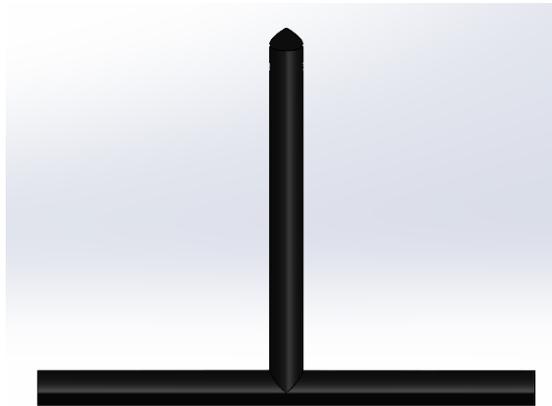


Figura 29. Vista frontal del foil delantero del prototipo. (Elaboración propia)

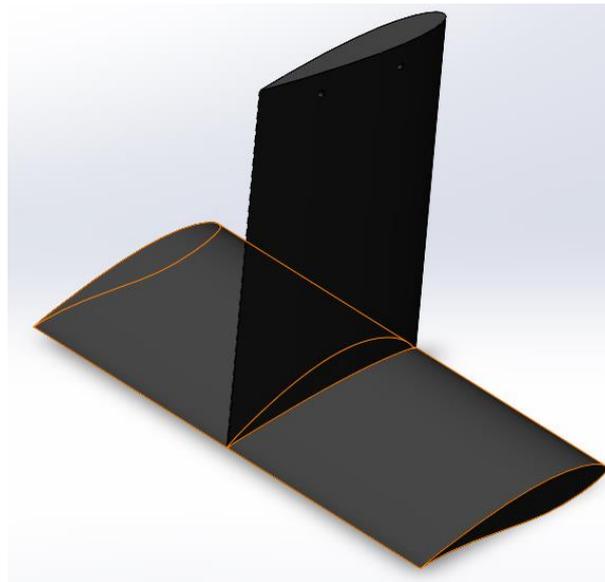


Figura 30. Vista isométrica del foil delantero del prototipo. (Elaboración propia)

En la figura 30 es posible observar el perfil Naca 0015 (perfil simétrico) haciendo de mástil del prototipo, y el Eppler 556, en la parte inferior como ala sustentadora.

Al conjunto se le dará una capa protectora de pintura para evitar la corrosión producida por el agua marina.

Las dimensiones del foil son: una longitud vertical de 390mm, y una profundidad de los perfiles de 250 mm. La envergadura final del ala delantera es 560mm. Su masa resultante es 16'18kg.

A continuación, se explicará el foil trasero. Esta pieza es la que generará el 80% de la sustentación, por ello su envergadura será mucho mayor, 2240mm. La altura y la profundidad son iguales que en el foil delantero. Otra diferencia que presenta frente al delantero es la existencia de una cavidad en la zona baja del mástil. En ella introduciremos el motor con la hélice para la propulsión del prototipo.

Para conectar el motor con la batería se deberá hacer un pequeño orificio por el interior del mástil para realizar el cableado interno. El orificio superior tendrá un junta alrededor de dichos cables para evitar que el agua pase por el agujero. La masa resultante es 17'25kg.

A continuación, se presentará el diseño del foil trasero:

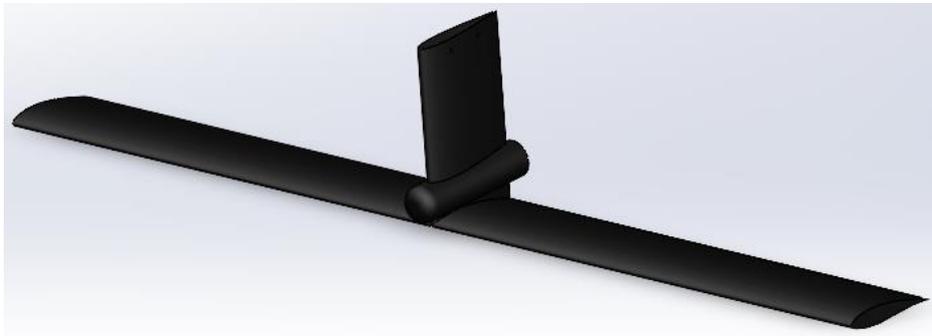


Figura 31. Vista isométrica del foil trasero. (Elaboración propia)

Las siguientes piezas que se estudiarán son el mástil de unión del manillar y el sillín con el chasis. Ambas piezas serán fabricadas en plástico ABS, el cual es utilizado ampliamente en la industria del automóvil para la fabricación de piezas que no tengan gran importancia en el ámbito estructural. Son dos componentes que permiten una unión sencilla, fáciles de fabricar mediante moldes, y que sus recambios en caso de rotura no son caros. Además, permiten reducir el peso del prototipo.

Las dimensiones de ambos mástiles son las del perfil de aluminio utilizado para el chasis, ya que queremos uniformidad en la parte exterior, para evitar arañazos o pellizcos. En la parte interior los mástiles encajan perfectamente en el tubo de aluminio, además se unen al chasis mediante dos tornillos M8. El mástil de unión del manillar presenta un orificio en la parte superior para introducir el tubo vertical del manillar. La longitud de este soporte es de 400mm. Su masa es de 4'29kg

A continuación, se muestra una imagen de la pieza:



Figura 32. Vista frontal del mástil de unión del chasis con el manillar. (Elaboración propia)

En cambio, la longitud del mástil de unión de chasis con el sillín presenta una longitud de 100mm. Su masa es de 1'31kg. En la figura 33 se verá la imagen de esta pieza:

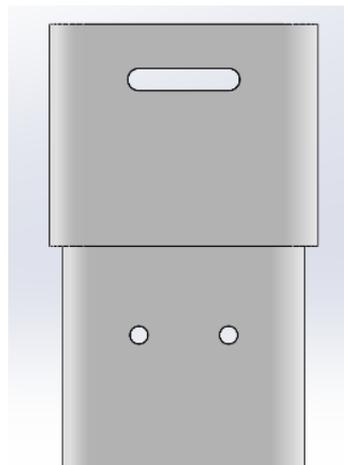


Figura 33. Vista frontal del mástil de unión entre el chasis y el asiento. (Elaboración propia)

El último elemento estructural del que se hablará es del manillar, el cual está conformado por una serie de tubos huecos de aluminio 6063 de 40 mm de diámetro exterior. Además, en

la parte final del mismo presenta dos puños de caucho para un mejor agarre, incluso con las manos mojadas. Al ser un elemento de aluminio se le debe dar el mismo tratamiento superficial que al chasis, con la pintura naval explicada anteriormente. El ancho total del manillar es de 550 mm. Su masa total es de 1'76kg. En la siguiente figura se puede ver cuál es su geometría:

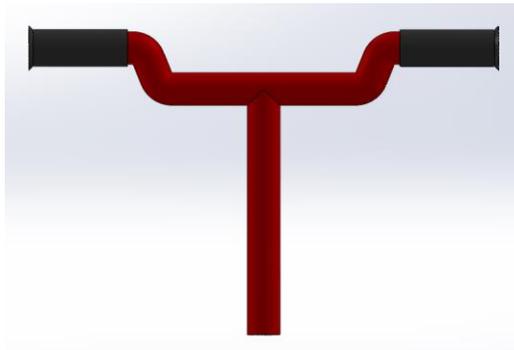


Figura 34. Vista frontal del manillar completo del prototipo. (Elaboración propia)

Los siguientes elementos que faltan por desarrollar son la caja de baterías, el motor y el controlador. Estos elementos serán seleccionados en el capítulo 10. Se puede estimar un peso del motor y las baterías de unos 3 y 7kg, respectivamente.

Es por ello por lo que la masa final del prototipo queda algo así:

Piezas	Pesos (kg)	Material
Chasis	14.88	Aluminio 6063
Foil trasero	17.25	Fibra de vidrio - E
Foil delantero	16.18	Fibra de vidrio - E
Anclaje foils	0.2	ABS
Anclaje foils	0.2	ABS
Mástil sillín	1.31	ABS
Mástil manillar	4.29	ABS
Manillar	1.62	Aluminio 6063
Puños	0.144	Goma SH-15
Baterías	7	
Motor	3	
Sillín	2.44	Neopreno
TOTAL PROTOTIPO	68.514	
Tripulante	80	
TOTAL	148.514	

Tabla 5. Lista de pesos y materiales de los componentes del prototipo. (Elaboración propia)

CAPÍTULO 10. CÁLCULO SISTEMA DE PROPULSIÓN

10.1 INTRODUCCIÓN

En el siguiente capítulo se desarrollará el sistema de propulsión utilizado por la embarcación. Para el cálculo de la potencia necesaria es necesario analizar la resistencia al avance que sufrirá el vehículo. Una vez conocida dicha fuerza se podrá multiplicar por la velocidad que lleve para obtener la potencia necesaria que ha de ejercer el motor para desplazar el prototipo en las condiciones deseadas.

Una vez sean conocidos todos los parámetros anteriores, se buscarán proveedores que puedan suministrar las baterías y los motores que cumplan las especificaciones técnicas y que se ajusten al presupuesto.

10.2 CÁLCULO RESISTENCIA AL AVANCE

Para el cálculo de resistencia al avance es necesario conocer diferentes parámetros. Como se ha explicado en capítulos anteriores la fórmula de la resistencia al avance es la siguiente:

$$D = \frac{1}{2} * \rho * A_D * C_D * v^2$$

Donde:

- ρ : densidad del agua marina $\rightarrow \rho = 1025 \text{ kg/m}^3$
- A_D : hace referencia al área frontal que choca con el fluido.
- C_D : es el coeficiente de resistencia al avance que genera el área anterior.
- v : velocidad del viento relativo.

El problema de este cálculo es el coeficiente de resistencia al avance del fluido, ya que depende de diferentes condiciones. Por ello, para simplificar este cálculo, se supondrá el caso en el que dicha fuerza de resistencia sea máxima, que, si se observa la fórmula, se ve

que será cuando se circule a velocidad máxima. Por ello este será el valor en que se utilizará en la velocidad.

Como se mencionó en el apartado 5.2.2. de condiciones de funcionamiento, la velocidad máxima que alcanzará el prototipo será de unos 5'56 m/s o lo que es lo mismo unos 20km/h. Una vez se navegue a esta velocidad el vehículo estará flotando por encima del agua debido a la fuerza sustentadora de las alas, que será la única parte sumergida, además de la pequeña porción de mástil que deberá de estar sumergido para que el motor también lo esté. Es por esto por lo que el área frontal que se enfrenta a la resistencia al avance es bastante sencilla de calcular mediante SolidWorks.

Si se analiza con detenimiento se observa que dichas áreas proyectadas son rectángulos, por lo que dibujándolos en el programa y utilizando el comando de medición se obtiene el valor de las áreas. Al ser dos tipos de perfiles se debe distinguir entre sus áreas, ya que los coeficientes de sustentación son diferentes. Por ello se separara entre las áreas frontal y trasera de los foils y además entre el área producida por el perfil NACA 0015 Y la producida por el EPPLER 556. En la siguiente tabla se pueden observar los valores obtenidos.

	Eppler 556	Naca 0015
Áreas Delantero (mm ²)	24483.2	4564.26
Áreas Trasero (mm ²)	97946.2	6816.2

Tabla 6. Área frontal de los foils delantero y trasero según su perfil alar. (Elaboración propia)

Una vez se conocen los valores de las áreas, analizamos las gráficas de los respectivos perfiles alares para sacar sus coeficientes de resistencia al avance según su ángulo de ataque. Como se explicó en el apartado del diseño final del vehículo el ángulo de ataque que se utiliza en el perfil Eppler 556 es de 6°, por ello su coeficiente de resistencia es:

$$C_L = 0'00978$$

Por otro lado, el coeficiente de resistencia generado por los perfiles NACA 0015 es:

$$C_L = 0'00572$$

Como se puede apreciar la resistencia producida por el perfil NACA 0015 será inferior, lo que confirma que nuestros valores tienen sentido, ya que estos perfiles están diseñados para ello.

Una vez conocidos dichos valores no quedan más que calcular la resistencia producida bajo nuestras condiciones. A continuación, se adjunta una tabla con los valores de los parámetros:

	Eppler 556	Naca 0015
Áreas Delantero (mm ²)	24483.20	4564.26
Áreas Trasero (mm ²)	97946.20	6816.20
Coefficiente resistencia (alfa=6°)	0.00978	0.00572
Velocidad máxima (m/s)	5.56	5.56
Densidad (kg/m ³)	1025	1025
Resistencia avance	18.97	1.03
TOTAL (N)	20.00	

Tabla 7. Valores de los parámetros en el cálculo de la resistencia al avance. (Elaboración propia)

Los cálculos realizados han sido los siguientes:

$$D = \frac{1}{2} * \rho * A_D * C_D * v^2$$

$$D_{Eppler556} = \frac{1}{2} * \rho * C_{D Eppler} * v^2 * (A_{Eppler delantero} + A_{Eppler trasero})$$

$$D_{Eppler556} = \frac{1}{2} * 1025 * 0'00978 * 5'56^2 * (0'0244832 + 0'0979462) = 18'97N$$

$$D_{NACA} = \frac{1}{2} * \rho * C_{D NACA} * v^2 * (A_{NACA delantero} + A_{NACA trasero})$$

$$D_{NACA0015} = \frac{1}{2} * 1025 * 0'00572 * 5'56^2 * (0'004564 + 0'0068162) = 1'03N$$

$$D_{TOTAL} = D_{Eppler} + D_{NACA} = 18'97 + 1'03 = 20N$$

La resistencia al avance que afectará a la embarcación en el momento en el que navegue a máxima velocidad será de 20 N. Este parámetro es el que se analizará en el cálculo de la potencia necesaria.

10.3 CÁLCULO POTENCIA NECESARIA

El cálculo de la potencia necesaria es vital para el correcto dimensionamiento del motor. Ya que, si el motor no es lo suficientemente potente como para mover la embarcación a la velocidad necesaria, no podrá despegar ni sustentarse en el aire.

El cálculo de la potencia necesaria es realmente sencillo una vez es conocida la fuerza de resistencia al avance. Ya que retomando fórmulas de física la potencia no es más que una fuerza por la velocidad. Por ello, si se conoce la fuerza que se experimenta a una determinada velocidad, el cálculo de la potencia es algo trivial.

La fórmula citada anteriormente es:

$$P = F * v$$

Donde:

P: es la potencia [W].

F: es la fuerza experimentada [N].

V: es la velocidad a la que se mueve el cuerpo o en este caso el viento relativo [m/s].

En el caso que se estudia el cálculo quedaría algo así:

$$P = F * v$$

$$P = 20 * 5'56 = 111'2W$$

Como se puede observar la potencia necesaria para desplazar el vehículo a máxima velocidad, no es realmente alta, por lo que con un pequeño motor eléctrico de corriente continua se podrá llevar a cabo. En el siguiente capítulo, se analizarán los parámetros del motor.

10.4 SELECCIÓN MOTOR

En cuanto a la selección de motor se refiere, el parámetro primordial es la potencia que puede dar. Analizando la potencia requerida por el vehículo (100 vatios) se ha optado por sobredimensionar el motor, por diferentes causas. La primera de ellos es la prevención de posibles fallos en el cálculo o en la obtención de los parámetros, como los coeficientes de resistencia. Otro motivo importante, es para que el usuario tenga la posibilidad de despegar a velocidades bajas si se encuentra parcialmente sumergido. Al ir a menores velocidades, esta resistencia se verá considerablemente reducida, pero para evitar posibles fallos se colocará un motor que aporte potencia extra. Por último, el tercer motivo para dimensionar de esta manera el sistema de propulsión, es la de no llevar al límite los componentes eléctricos, buscando mejores rendimientos de autonomía, así como evitar sobrecalentamientos por circulaciones extremas de corriente.

En la búsqueda de motores de corriente continua, se ha optado por elegir aquellos que trabajen a una tensión nominal de 24 voltios. Esto se debe a la búsqueda de la reducción del amperaje que circula por el circuito. Ya que, con mayor potencial eléctrico, es necesaria menos corriente para hacer llegar la misma cantidad de potencia eléctrica al motor. Analizando diferentes proveedores se ha visto que los valores en los que se suelen mover estos componentes suelen ser los 12 y 24 voltios. Por la razón explicada anteriormente se decide escoger el motor de 24 voltios.

Una vez se ha elegido la tensión en la que trabajará el motor, es hora de elegir entre aquellos que presenten las mejores cualidades. Para ello como se ha dicho se sobredimensionará la potencia a la que trabajará el motor. Por ello si la potencia máxima teórica que necesitará el motor es de 100 vatios, se utilizará un motor que supere por más del doble dicha potencia,

por ello se usará un motor de 250 vatios de potencia. El motor que mejor se ha adapta a las condiciones que buscamos es el siguiente:



Figura 35. Motor de corriente continua de 24 voltios y más de 500 vatios de potencia. (www.Alamor.com)

Es un motor el cual trabaja los 24 voltios que se buscan. Además, presenta una potencia de 500 vatios, la cual es la que se busca. Se ha encontrado en un proveedor asiático, se sabe que estos elementos, normalmente, no son de buena calidad cuando el fabricante no es alguien con renombre. Pero la necesidad de reducir costes hace que se busquen estas oportunidades.

EL precio de venta de este producto es de 136.06€ un buen precio teniendo en cuenta que hay motores mucho más pequeños y de menor potencia que duplican este precio. En cuanto a su peso, está entorno a uno 3'5 kg, el cual es la mitad de lo que se había estimado. (Alamor, s.f.)

Por último, en cuanto al sistema de propulsión, se quiere comentar que se ha decidido descartar la posibilidad de incluir unos pedales para que el usuario aporte potencia extra al sistema debido a que para ello sería necesario un sistema de transmisión, lo cual generaría un aporte extra de peso, que haría necesario aumentar el tamaño de las alas, aumentando superficie frontal, lo que haría necesaria más potencia para el desplazamiento. Al final lo que se gana por un lado se puede perder de otras maneras. El método que se quiere implementar simplifica en gran medida el prototipo, así como lo aligera.

10.5 SELECCIÓN BATERÍAS

En cuanto a la selección de las baterías que necesita este vehículo, depende de la autonomía que se busque. Es obvio que el voltaje debe ser igual al del motor, pero su capacidad, es la que determinará la duración de esta. Es por ello por lo que es necesario analizar la duración máxima que queramos en una condiciones precisas.

Si a máxima potencia (100 vatios) queremos una duración de 2 horas, se deberá realizar el siguiente cálculo:

$$C = A * \%P * t$$

Donde:

A: el amperaje con el que trabaja el motor.

P: tanto por ciento de potencia que está usando el motor de en comparación con la que dispone.

T: el tiempo que duraría en esas condiciones.

Como queremos hallar la capacidad que necesita nuestra batería para soportar dos horas de trabajo a máxima potencia, quedaría algo así:

$$C = 28'5 * 0'5 * 2 = 28'5Ah$$

Al necesitar esa capacidad, se buscará unas baterías que tengan un valor cercano pero superior. Se ha encontrado unas baterías de ion litio de 24 voltios y 30Ah. Las cuales se adaptan perfectamente a lo que se está buscando. Poseen sistema de BMS integrado, el cual permite un control de la salud y la seguridad de las baterías mucho más exhaustivo. Su peso ronda 1'5kg. Y su precio es de 138€, algo asequible debido a la reducción de peso que se ha visto. En el capítulo de las primeras condiciones de diseño se supuso un peso de unos 7 kg en baterías, el cual actualmente es más de 3 veces menos. (Grandado, s.f.)

Las dimensiones de las baterías son: 270x68x40mm. A continuación, se puede ver una imagen del conjunto:



Figura 36. Conjunto de baterías más BMS del prototipo. (www.Egosun.com)

10.6 SELECCIÓN CONTROLADOR Y POTENCIÓMETRO

En esta sección se comentará que controlador se instalará y que potenciómetro. El controlador es una pieza clave en cualquier vehículo de propulsión eléctrico. Ya que es el que se encarga de unir de manera segura la batería y el motor. Permite que haya una comunicación entre ambos dispositivos, además con su instalación se tiene la posibilidad de introducir interruptores más precisos, como es el caso de los potenciómetros, en los que las entradas no son todo o nada. Dichos dispositivos, permiten al usuario manejar la potencia que quiere solicitar de manera segura, este lo traslada al controlador y por último el controlador manda la orden al motor eléctrico.

Buscando en proveedores se ha encontrado una oferta en la que viene controlado más display, que es la pantalla donde se muestra carga de batería, velocidad y algún que otro modo si se codifica. Se ha asegurado que el controlador sirve para sistemas de 24 voltios,

por otro lado, limitará la potencia que le llegue al motor en unos 350 vatios. Son más que suficientes para nuestro sistema. El sistema escogido ha sido el siguiente:



Figura 37. Sistema de controlador más pantalla de servicio. (www.Tbest.com)

Es vendido por la marca Dewin, presenta un precio de 62€ y un peso total de 332g. Es una gran oportunidad para aportar calidad al prototipo.

El potenciómetro que se comprará será uno de puño, que funcionará como el de las Scooter eléctricas, ya que el grado de giro de este determinará la demanda de potencia. El modelo que se va a incluir en el prototipo es este:



Figura 38. Potenciómetro que se va a utilizar. (www.Headerbs.com)

El precio que tiene es de uno 18€. Es inevitable su uso para que el usuario controle la embarcación.

10.7 DISEÑO CIRCUITO ELÉCTRICO

EL diseño del circuito es bastante simple, se conecta la batería al controlador, el controlador al motor y por último el potenciómetro al controlador. Quedaría algo así:

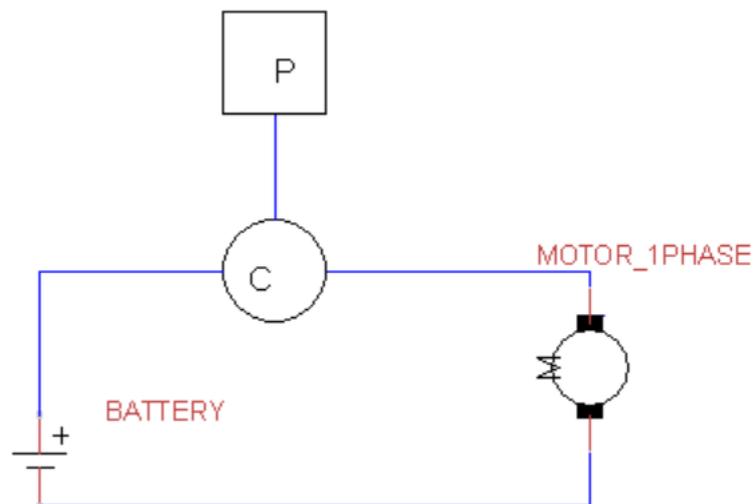


Figura 39. Circuito eléctrico del prototipo. (Elaboración propia)

Donde:

P: es el potenciómetro.

C: hace referencia al controlador.

M: es el motor de corriente continua.

Battery: es el conjunto de baterías.

CAPÍTULO 11. CONCLUSIONES Y ANÁLISIS

ECONÓMICO

Las conclusiones obtenidas en el desarrollo de este proyecto han sido las siguientes:

1. Los perfiles obtenidos en el análisis de fluidos son los óptimos para las condiciones de funcionamiento de la embarcación.
2. La estructura final del prototipo es demasiado pesada. En la tabla adjunta de masas se puede observar como la mayor parte de este es generada por los elementos sustentadores. Aportan la mitad del peso. Se podría aligerar si perder propiedades físicas empleando fibra de carbono, la cual es la que emplea la marca Manta5 en su prototipo, el problema que surge es el encarecimiento de las piezas. Este peso no es problema para la navegación ya que con la sustentación es compensado, solo que dificultara el transporte, en el que se necesitarán dos personas lo más seguro.
3. Se ha conseguido un reducción grande del presupuesto del prototipo, ya que la fabricación de los componentes en ABS es relativamente barata una vez se amortizan los moldes, y el chasis y las pletinas solo necesitan doblado y soldadura, evitando así el mecanizado, que es el proceso más costoso. Y en cuanto a los componentes comerciales, se ha conseguido proveedores con grandes ofertas y garantías de un año. El mayor coste de fabricación será la fibra de vidrio, la cual necesita muchas horas de mano de obra.

El prototipo final obtenido ha sido el siguiente:

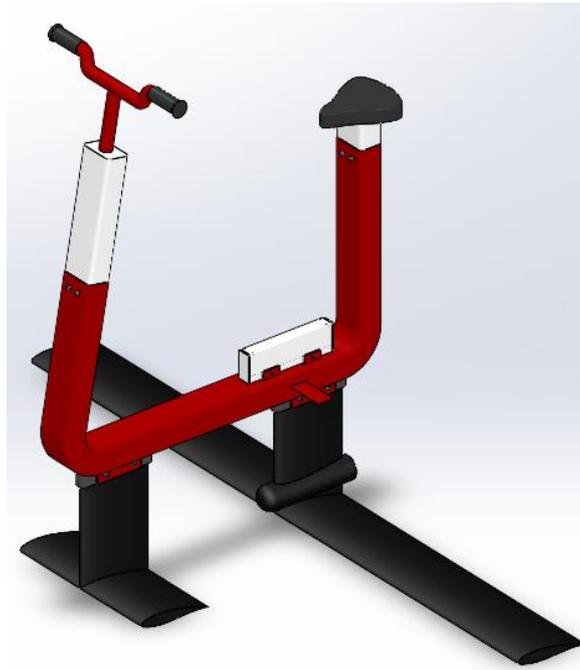


Figura 40. Prototipo final sin carcasa. (Elaboración propia)

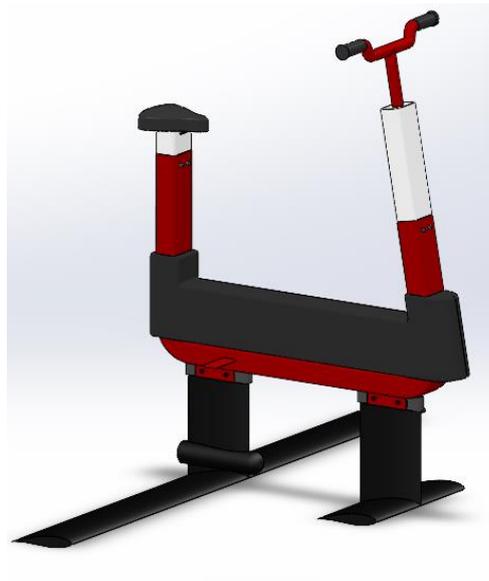


Figura 41. Prototipo final con carcasa. (Elaboración propia)

Se ha decidido colocar una carcasa que proteja la zona de la batería de posibles entradas de agua, además de tener una función embellecedora. En el interior de dicha carcasa la batería irá unida al chasis mediante dos agujeros realizados en la funda de ABS que recubre la batería y aísla eléctricamente el sistema.

Hablando de la parte económica es difícil obtener el valor real del coste de nuestro prototipo, ya que dependería en gran medida de la cantidad de producción que se tuviera.

Es por ello por lo que se va a sumir una fabricación de 100 prototipos. En primer lugar, el perfil de aluminio se comprará el suficiente para la fabricación de los 100 prototipos y un 10% de más para posibles imprevistos. Para el cálculo se supondrá que se comprará la longitud justa para desarrollarlo, por ello se comprará 2300mm de perfil de aluminio por cada prototipo de perfil que se quiera desarrollar por lo que serán necesarios 230000mm totales y además si se añade el 10% extra para imprevistos, queda un total de 253000mm, que presenta un coste total de unos 11.000€ (Alumedida, s.f.). Por otro lado, se necesita planchas de aluminio de 5 milímetros de espesor para realizar las pletinas, por cada prototipo se necesita una superficie de $30.658,12 \text{ mm}^2$. Al querer hacer 100 prototipos se necesita $3.065.812 \text{ mm}^2$, que es igual a unos 3 m^2 . Para ello se busca un proveedor que de dimensiones similares y se encuentra una chapa de aluminio de $3 \times 2 \text{ m}$ (6 m^2) por 432€ (Lumetalplastic, s.f.).

En cuanto a los componentes eléctricos y electrónicos, los costes se han comentado anteriormente:

- Motor corriente continua: 136'06€
- Baterías: 138€
- Controlador, display y potenciómetro: 62€

Al tener que comprar para 100 prototipos los costes quedan así:

- Motores de corriente continua: 13.606€
- Baterías: 13.800€
- Controladores, display y potenciómetros: 6.200€
-

Por otro lado, hay que tener en cuenta la fabricación de las piezas en ABS. Se han de realizar por inyección. Para ello hay que tener en cuenta si se quiere hacer un tirada de piezas largas o si una más pequeña. Si se quisiera una larga tirada se invertiría en un molde de muy alta calidad, que se amortizaría en las piezas fabricadas, en cambio si el número no va a ser tan grande se apostaría por un molde más modesto. Como es un simple prototipo, se apuesta por un tirada de piezas pequeña, con un molde simple, y un coste y calidad más baja.

Se ha encontrado información al respecto, en el que se especifica el coste de fabricación de una pieza en una tirada de unas 100 piezas, la cual es lo que se necesita. El coste del molde son unos 120€ y el coste unitario es de uno 4'8€. Al fabricar tres piezas en ABS el coste de las piezas por modelo será 14'4€ más el del molde 120€. (Formlabs, s.f.). Al fabricar para 100 unidades el coste total de, la fabricación de las 300 piezas es de 1.440€.

Por último, se debe analizar el coste de la fabricación de los foils en fibra de vidrio, los cuales se fabricarán a mano mediante el proceso de laminación. Es difícil encontrar información al respecto, pero observando precios de piezas de tamaños y complejidad similares se puede creer que el precio puede estar entorno a los 800-1000€, para la contabilidad del proyecto se tomará el máximo valor. (Carroceria tuning, s.f.) (Evolucion, s.f.) AL necesitar 100 unidades de ambos foils el coste total será de 100.000€.

En la siguiente tabla se analizarán todos los gastos de una forma más reducida y clara:

Elemento	Precio (€)
Perfil tubular aluminio 120x80mm	11000
Chapa aluminio 5mm 2x3m	432
Motor CC	13606
Batería más cargador	13800
Controlador, display y potenciómetro	6200
Piezas ABS	1440
Moldes ABS	360
Foils fibra vidrio	100000
Tornillería	200
TOTAL	147038

Figura 42. Tabla de costes de la fabricación. (Elaboración propia)

Como se puede observar el coste total de la fabricación ronda los 147.000€. El coste por unidad queda entorno a los 1.470€. Precio mucho más inferior que la competencia directa de Manta5, el cual cuesta unos 8.000€. El precio resultante es orientativo, ya que depende del sistema de fabricación y del tamaño de las tiradas, pero como una posible aproximación funciona.

Para posibles avances en el futuro habría que investigar el coste real de la fabricación real en fibra de vidrio, ya que constituye el 50% del coste del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

Academic. (2018). <https://es-academic.com/dic.nsf/eswiki/922761>.

Alamor. (s.f.). *Alamor-electrico*. Obtenido de https://www.amazon.es/Alamor-el%C3%A9ctrico-Cepillado-2500Rpm-Soporte/dp/B07PNH9N2C/ref=sr_1_3_sspa?__mk_es_ES=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=71198K0VT8EJ&keywords=motor+24v+500w&qid=1657156452&prefix=motor+24v+500w%2Caps%2C85&sr=8-3-spons&psc=1&sp

Alumedida. (s.f.). *Alumedida perfiles*. Obtenido de https://www.alumedida.es/rectangulares/22-3694-perfil-rectangular#/48-tamano_de_rectangular-150x50/126-acabado_texturas-anodizado_plata

Aman Bhargava. (2018). https://manualvuelo.es/lpbav/13_fuerz.html.

Carroceria tuning. (s.f.). *ebay*. Obtenido de https://www.ebay.es/b/Kits-de-carroceria-tuning-de-fibra-de-vidrio-para-coches/72207/bn_75149265

Cordis. (s.f.). *Cordis Europa*. Obtenido de <https://cordis.europa.eu/article/id/238600-carbon-fibre-composites-in-boat-building/es>

Esmeralda. (16 de Noviembre de 2021). *Soloarquitectura*. Obtenido de <https://www.soloarquitectura.com/foros/threads/precio-actual-del-acero.18327/page-2>

Evolucion. (s.f.). *Evoluion-a*. Obtenido de <https://www.evolucion-a.com/es/catalogo/Catalog/listing/carroceria-y-piezas-fibra-11/2>

Fiberdowels. (s.f.). *Fiberdowels*. Obtenido de <https://fiberdowels.com/es/fibra-de-vidrio-vs-acero/>

Formlabs. (s.f.). *Formlabs*. Obtenido de <https://formlabs.com/es/blog/coste-moldeo-inyeccion/>

García, J. F. (2020). *Diseño de un Sistema Hydrofoil para Tablas de Kitesurf con propulsión eléctrica accionada por control remoto*.

Grandado. (s.f.). *Grandado productos*. Obtenido de <https://es.grandado.com/products/paquete-de-bateria-de-iones-de-litio-7s4p-original-24v-30ah-29-4-v-bms-integrado-para-bicicleta-electrica-monociclo-scooter-motor-para-silla-de-ruedas?variant=UHJvZHVjdFZhcmlhbnQ6Mzk4MDkwNjU2>

HelloAuto. (2022). *HelloAuto*. Obtenido de <https://helloauto.com/glosario/cavitacion>

Imbernón, G. G. (2018). *Diseño de una embarcación ligera utilizando foils*.

Lumetalplastic. (s.f.). *Lumetalplastic*. Obtenido de <https://www.lumetalplastic.com/productos-metales/chapas-aluminio-damero/>

Material properties. (s.f.). *Material properties*. Obtenido de <https://material-properties.org/es/fibra-de-carbono-densidad-resistencia-punto-de-fusion/>

Mexican Fibers. (10 de Abril de 2021). *Mexican Fibers*. Obtenido de <https://mexicanfibers.com/la-resistencia-de-la-fibra-de-vidrio/>

MIT. (2013). <https://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/>.

Plaza, D. (13 de Junio de 2022). *Motor.es*. Obtenido de <https://www.motor.es/noticias/solucion-salvar-motores-gasolina-diesel-202287694.html>

Proa. (s.f.). *Pinturas Proa*. Obtenido de <https://www.pinturasproa.com/es/productos/pintura-sintetica-naval>

R.P.M. (13 de Marzo de 2008). *Webmar*. Obtenido de <http://www.webmar.com/foros/viewtopic.php?t=5095>

Teknika4. (s.f.). *Teknika4*. Obtenido de <https://www.teknika4.com/es/aluminio-6082>

Xnomind. (5 de Noviembre de 2019). *Teorema Top*. Obtenido de <https://www.teorema.top/teorema-de-bernoulli/>

A continuación, se adjuntarán todas las gráficas obtenidas mediante Xfoil en la selección de los perfiles.

- Perfil DAE31

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr	CL/CD
0	0.7448	0.00722	0.00162	-0.1559	0.6843	0.0467	103.157895
1	0.8573	0.00664	0.00162	-0.1563	0.6613	0.2818	129.111446
4	1.1786	0.0067	0.00258	-0.1541	0.5436	1	175.910448
5	1.277	0.00757	0.0032	-0.152	0.4907	1	168.692206
6	1.3678	0.00864	0.00403	-0.1486	0.4337	1	158.310185
7	1.4464	0.00993	0.00507	-0.1431	0.3761	1	145.659617
8	1.4956	0.01157	0.00651	-0.1323	0.3218	1	129.265341
9	1.54	0.01393	0.00867	-0.1223	0.2677	1	110.552764
10	1.5836	0.01694	0.01149	-0.1136	0.2165	1	93.4828808
11	1.6244	0.02056	0.01494	-0.1057	0.1707	1	79.0077821
12	1.6609	0.02486	0.01909	-0.0983	0.1313	1	66.8101368
13	1.6934	0.0299	0.02406	-0.0916	0.1006	1	56.6354515
14	1.7245	0.03567	0.02983	-0.0861	0.0773	1	48.345949
15	1.747	0.04284	0.03703	-0.0813	0.0568	1	40.7796452

Figura 43. Datos del perfil DAE31 (Elaboración propia)

- Eppler 211

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr	CL/CD
0	0.4321	0.0055	0.00107	-0.1058	0.689	0.6267	78.5636364
1	0.5386	0.00583	0.00123	-0.1046	0.6268	0.6624	92.3842196
2	0.6455	0.00616	0.00149	-0.1037	0.569	0.7014	104.788961
3	0.7517	0.00655	0.00183	-0.1026	0.5074	0.7433	114.763359
4	0.853	0.00726	0.00235	-0.1007	0.4071	0.8	117.493113
5	0.9399	0.00871	0.00333	-0.0962	0.2337	0.8991	107.910448
6	1.0251	0.01071	0.00466	-0.0917	0.0812	1	95.7142857
7	1.1101	0.01302	0.00654	-0.0874	0.0095	1	85.2611367
8	1.1975	0.01489	0.00859	-0.0833	0.0073	1	80.4231028
9	1.2737	0.01727	0.01119	-0.0775	0.0064	1	73.7521714
10	1.3156	0.02097	0.01522	-0.0661	0.0058	1	62.7372437
11	1.3421	0.02602	0.02066	-0.0543	0.0054	1	51.5795542
12	1.3672	0.03188	0.02694	-0.045	0.0052	1	42.8858218
13	1.3796	0.03964	0.03518	-0.0381	0.005	1	34.8032291
14	1.3661	0.05188	0.04801	-0.0347	0.0049	1	26.3319198
15	1.3258	0.07046	0.06725	-0.038	0.005	1	18.8163497

Figura 44. Datos del perfil Eppler 211. (Elaboración propia)

- Eppler 555

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr	CL/CD
0	0.4411	0.00686	0.00155	-0.1094	0.6026	0.4779	64.3002915
1	0.5524	0.00711	0.00168	-0.1093	0.5623	0.4882	77.6933896
2	0.6624	0.0074	0.00188	-0.109	0.519	0.4999	89.5135135
3	0.7714	0.00776	0.00219	-0.1086	0.4739	0.512	99.4072165
4	0.8784	0.00825	0.00261	-0.1079	0.4267	0.5259	106.4727273
5	0.9832	0.00885	0.00313	-0.1068	0.3768	0.5416	111.0960452
6	1.0831	0.0097	0.00387	-0.1049	0.3153	0.5602	111.6597938
7	1.1777	0.01082	0.00481	-0.1022	0.2472	0.584	108.8447320
8	1.2591	0.01255	0.00623	-0.0973	0.1612	0.6139	100.3266932
9	1.3302	0.0143	0.00785	-0.0907	0.1039	0.6537	93.0209790
10	1.3920	0.01618	0.00976	-0.0827	0.068	0.7108	86.0321384
11	1.4432	0.01845	0.01226	-0.0739	0.0427	0.8181	78.2222222
12	1.4816	0.02117	0.01531	-0.0642	0.0281	1	69.9858290
13	1.5156	0.02548	0.01971	-0.0566	0.0174	1	59.4819466
14	1.5304	0.03218	0.0266	-0.0499	0.0107	1	47.5574891
15	1.5543	0.03928	0.03397	-0.0465	0.01	1	39.5697556

Figura 45. Datos del perfil Eppler 555. (Elaboración propia)

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr	CL/CD
0.0000000	0.5190000	0.00692	0.00162	-0.1279	0.605	0.4678	75
1.0000000	0.6293000	0.00719	0.00177	-0.1276	0.5662	0.4786	87.5243394
2.0000000	0.7385000	0.00751	0.002	-0.1271	0.5248	0.4906	98.3355526
3.0000000	0.8465000	0.0079	0.00232	-0.1264	0.4816	0.5034	107.151899
4.0000000	0.9526000	0.00837	0.00275	-0.1255	0.4383	0.5178	113.811231
5.0000000	1.0564000	0.00898	0.00328	-0.1241	0.3896	0.5343	117.639198
6.0000000	1.1551000	0.00978	0.00401	-0.122	0.3339	0.5533	118.108384
7.0000000	1.2442000	0.01109	0.00504	-0.1182	0.2543	0.577	112.191163
8.0000000	1.3185000	0.01282	0.00648	-0.1119	0.172	0.6055	102.847114
9.0000000	1.3803000	0.01479	0.00824	-0.1036	0.1088	0.6418	93.326572
10.0000000	1.4406000	0.01682	0.01031	-0.0956	0.0729	0.6983	85.648038
11.0000000	1.4915000	0.01928	0.01296	-0.0872	0.0478	0.7911	77.3599585
12.0000000	1.5252000	0.02231	0.01634	-0.0771	0.0312	1	68.3639623
13.0000000	1.5559000	0.02719	0.02127	-0.0697	0.0183	1	57.2232438
14.0000000	1.5793000	0.03342	0.02765	-0.0638	0.0132	1	47.2561341
15.0000000	1.5957000	0.04138	0.03587	-0.06	0.0103	1	38.5621073

Figura 46. Datos del perfil Eppler 556. (Elaboración propia)

- Eppler 557:

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr	CL/CD
0	0.5952	0.00699	0.00172	-0.1459	0.6067	0.4558	346.04651
1	0.705	0.00725	0.00187	-0.1455	0.5699	0.4673	377.00535
2	0.8133	0.00758	0.00212	-0.1448	0.5311	0.4797	383.63208
3	0.9198	0.00798	0.00246	-0.1438	0.4904	0.4941	373.90244
4	1.0243	0.00846	0.00289	-0.1425	0.4494	0.5091	354.42907
6	1.2228	0.00983	0.00415	-0.138	0.3564	0.5486	294.6506
7	1.3106	0.01086	0.00507	-0.1338	0.2975	0.5754	258.50099
8	1.3816	0.01238	0.00638	-0.1265	0.2237	0.6106	216.55172
9	1.4424	0.01433	0.00815	-0.118	0.1578	0.6583	176.9816
10	1.497	0.01653	0.01034	-0.1091	0.1105	0.7309	144.77756
11	1.5343	0.0189	0.01308	-0.0979	0.0775	1	117.30122
12	1.5686	0.02274	0.01685	-0.0887	0.0516	1	93.091988
13	1.5946	0.02781	0.02193	-0.0805	0.0346	1	72.713178
14	1.6161	0.03416	0.0284	-0.0742	0.0244	1	56.90493
15	1.6305	0.04227	0.0367	-0.0699	0.0182	1	44.427793

Figura 47. Datos del perfil Eppler 557. (Elaboración propia)

- Eppler 1210:

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr	CL/CD
0	0.5424	0.00911	0.00229	-0.0919	0.3733	0.154	59.5389682
1	0.6545	0.00918	0.0024	-0.091	0.3514	0.2024	71.2962963
2	0.7648	0.00911	0.00266	-0.0901	0.3313	0.3601	83.9517014
3	0.8699	0.00856	0.00313	-0.0884	0.315	0.779	101.623832
4	0.9849	0.00869	0.00354	-0.0881	0.2997	1	113.337169
5	1.0921	0.00925	0.004	-0.0867	0.2863	1	118.064865
6	1.1973	0.00989	0.00455	-0.0851	0.2738	1	121.061678
7	1.2992	0.01063	0.00523	-0.0831	0.2613	1	122.220132
8	1.3972	0.01147	0.00601	-0.0807	0.2493	1	121.813426
9	1.4932	0.01225	0.00682	-0.078	0.2396	1	121.893878
10	1.5785	0.01326	0.00786	-0.0737	0.2298	1	119.042232
11	1.6445	0.01447	0.0091	-0.0663	0.2198	1	113.648929
12	1.7109	0.0158	0.01055	-0.0598	0.2118	1	108.28481
13	1.7593	0.01806	0.01289	-0.0521	0.2024	1	97.414175
14	1.8044	0.02106	0.01605	-0.046	0.1945	1	85.6790123
15	1.8386	0.02552	0.02069	-0.0409	0.1869	1	72.0454545

Figura 48. Datos del perfil Eppler 1210. (Elaboración propia)

- N-11:

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr	CL/CD
0	0.6271	0.00581	0.00165	-0.0981	0.5337	0.9513	107.934596
1	0.7508	0.00644	0.00188	-0.1011	0.4558	1	116.583851
2	0.851	0.0074	0.00235	-0.0993	0.3608	1	115
4	1.0596	0.00882	0.00346	-0.0977	0.2927	1	120.136054
5	1.162	0.00962	0.00413	-0.0968	0.2565	1	120.790021
6	1.256	0.01099	0.00515	-0.0948	0.1855	1	114.285714
7	1.334	0.01337	0.00696	-0.0903	0.0895	1	99.7756171
8	1.391	0.0167	0.00987	-0.0823	0.015	1	83.2934132
9	1.453	0.01908	0.01243	-0.0755	0.0113	1	76.1530398
10	1.497	0.02273	0.01635	-0.0673	0.0093	1	65.8600968
11	1.5403	0.02683	0.0207	-0.0611	0.0082	1	57.4096161
12	1.5609	0.03354	0.02769	-0.0553	0.0073	1	46.5384615
13	1.5513	0.04444	0.03902	-0.051	0.0068	1	34.9077408
14	1.5405	0.05755	0.05252	-0.0507	0.0064	1	26.7680278
15	1.5096	0.07507	0.07045	-0.0534	0.0061	1	20.1092314

Figura 49. Datos del perfil N-11. (Elaboración propia)

- Naca 2410:

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr	CL/CD
0	0.2368	0.00492	0.00097	-0.0524	0.6953	0.7416	48.1300813
1	0.3378	0.00479	0.00115	-0.0491	0.6178	0.9538	70.5219207
2	0.4812	0.0053	0.00134	-0.056	0.5351	0.9983	90.7924528
3	0.588	0.00586	0.00158	-0.055	0.4569	1	100.341297
4	0.6898	0.00659	0.00197	-0.053	0.3671	1	104.673748
5	0.7889	0.00794	0.00271	-0.0509	0.2252	1	99.3576826
6	0.8857	0.00975	0.00385	-0.0487	0.0911	1	90.8410256
7	0.9847	0.01128	0.00512	-0.0468	0.0413	1	87.2960993
8	1.0832	0.01275	0.00657	-0.0449	0.0264	1	84.9568627
9	1.1786	0.01438	0.00827	-0.0426	0.0197	1	81.961057
10	1.268	0.01637	0.01038	-0.0395	0.0158	1	77.458766
11	1.3466	0.01894	0.01315	-0.035	0.0133	1	71.0982049
12	1.4173	0.02147	0.01587	-0.0297	0.0115	1	66.0130415
13	1.4505	0.02575	0.0205	-0.02	0.0105	1	56.3300971
14	1.4826	0.03088	0.02598	-0.0135	0.0096	1	48.011658
15	1.4981	0.03878	0.03425	-0.01	0.009	1	38.6307375

Figura 50. Datos del perfil Naca 2410. (Elaboración propia)

- Naca 4412:

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr	CL/CD
0	0.4745	0.00684	0.00136	-0.1035	0.6016	0.3695	69.371345
1	0.5779	0.00598	0.00162	-0.102	0.5549	0.8278	96.638796
2	0.6986	0.0061	0.00185	-0.1035	0.5159	1	114.52459
3	0.8067	0.00654	0.00212	-0.1028	0.4843	1	123.348624
4	0.915	0.00702	0.00248	-0.1021	0.4552	1	130.34188
5	1.0225	0.00757	0.00292	-0.1014	0.4188	1	135.072655
6	1.1269	0.0083	0.00348	-0.1003	0.3678	1	135.771084
7	1.2237	0.00953	0.00438	-0.098	0.2893	1	128.405037
8	1.3064	0.01168	0.00592	-0.0936	0.1752	1	111.849315
9	1.3776	0.01424	0.00796	-0.0874	0.085	1	96.741573
10	1.4395	0.01656	0.01009	-0.0796	0.0485	1	86.9263285
11	1.4981	0.0191	0.01265	-0.0722	0.0338	1	78.434555
12	1.5508	0.02223	0.01589	-0.0652	0.0263	1	69.7615834
13	1.5931	0.02649	0.02031	-0.0585	0.0218	1	60.1396753
14	1.6243	0.03224	0.02628	-0.0527	0.0187	1	50.3815136
15	1.6357	0.04067	0.03498	-0.048	0.0165	1	40.2188345

Figura 51. Datos del perfil Naca 4412. (Elaboración propia)

- Naca 4418:

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr	CL/CD
0.0000000	0.4634000	0.00819	0.00222	-0.0985	0.524	0.3517	56.5811966
1.0000000	0.5697000	0.00793	0.00238	-0.0975	0.4969	0.5332	71.8411097
2.0000000	0.6753000	0.00779	0.00268	-0.0962	0.4745	0.7177	86.6880616
3.0000000	0.7763000	0.00776	0.0031	-0.0935	0.4552	0.8922	100.03866
4.0000000	0.8955000	0.0082	0.00358	-0.0948	0.4361	0.9862	109.207317
5.0000000	1.0290000	0.00874	0.00403	-0.0999	0.416	1	117.734554
6.0000000	1.1127000	0.00919	0.00442	-0.0943	0.3955	1	121.077258
7.0000000	1.1981000	0.00985	0.00499	-0.0894	0.3707	1	121.634518
8.0000000	1.2848000	0.01075	0.00581	-0.0852	0.342	1	119.516279
9.0000000	1.3672000	0.01199	0.00694	-0.0807	0.3094	1	114.028357
10.0000000	1.4431000	0.01361	0.00845	-0.0757	0.2741	1	106.032329
11.0000000	1.5085000	0.01588	0.01058	-0.0698	0.2363	1	94.9937028
12.0000000	1.5635000	0.01892	0.0135	-0.0634	0.1988	1	82.6374207
13.0000000	1.6036000	0.0232	0.01766	-0.0566	0.163	1	69.1206897
14.0000000	1.6335000	0.02876	0.02318	-0.0503	0.1332	1	56.7976356
15.0000000	1.6506000	0.03614	0.03056	-0.045	0.109	1	45.6723852

Figura 52. Datos del perfil Naca 4418. (Elaboración propia)

- Naca 63412:

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr	CL/CD
0	0.3437	0.00547	0.00106	-0.0792	0.6597	0.6457	62.833638
1	0.458	0.0056	0.00119	-0.0797	0.6276	0.6833	81.7857143
2	0.5715	0.00581	0.00138	-0.0801	0.5898	0.7161	98.3648881
3	0.683	0.00614	0.00167	-0.0802	0.5353	0.7474	111.237785
4	0.7903	0.00684	0.00214	-0.0796	0.4388	0.7779	115.540936
5	0.8717	0.01012	0.00385	-0.0756	0.0992	0.8114	86.1363636
6	0.9669	0.01167	0.00513	-0.0733	0.0297	0.8509	82.8534704
8	1.1497	0.01402	0.00762	-0.0672	0.0071	1	82.0042796
9	1.2396	0.01557	0.00922	-0.0646	0.0053	1	79.6146435
10	1.3117	0.01774	0.01145	-0.0591	0.0007	1	73.940248
11	1.3648	0.01999	0.01387	-0.0508	0.0005	1	68.2741371
12	1.41	0.02312	0.01723	-0.0432	0.0005	1	60.9861592
13	1.4473	0.02744	0.02181	-0.0368	0.0004	1	52.7441691
14	1.4763	0.03321	0.02789	-0.0318	0.0004	1	44.4534779
15	1.4944	0.0409	0.03595	-0.0286	0.0004	1	36.5378973

Figura 53. Datos del perfil Naca 63412. (Elaboración propia)

- Naca 63415:

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr	CL/CD
1	0.4671	0.00628	0.00146	-0.0802	0.5852	0.6204	74.3789809
2	0.583	0.00645	0.00165	-0.0811	0.5612	0.6452	90.3875969
3	0.6982	0.00668	0.00191	-0.0819	0.5303	0.6714	104.520958
4	0.8115	0.00702	0.00226	-0.0825	0.4884	0.6978	115.598291
5	0.9212	0.00765	0.00278	-0.0825	0.4246	0.7252	120.418301
6	1.0158	0.00946	0.00396	-0.0804	0.2654	0.7532	107.378436
7	1.0968	0.01208	0.00582	-0.0764	0.1069	0.7839	90.794702
8	1.1763	0.01423	0.0077	-0.072	0.0424	0.8208	82.6633872
9	1.2501	0.01592	0.00953	-0.0665	0.0309	0.8667	78.5238693
11	1.3503	0.02059	0.01462	-0.0506	0.0211	1	65.5803788
12	1.3965	0.02459	0.01874	-0.0453	0.0172	1	56.7913786
13	1.4326	0.02997	0.02427	-0.0409	0.0148	1	47.8011345
14	1.4618	0.03664	0.0312	-0.0377	0.0137	1	39.8962882
15	1.4852	0.04466	0.03946	-0.036	0.0128	1	33.2557098

Figura 54. Datos del perfil Naca 63415. (Elaboración propia)

- Naca 64212:

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr	CL/CD
0	0.1753	0.00541	0.001	-0.0407	0.6591	0.6549	32.4029575
2	0.4041	0.00563	0.00122	-0.0421	0.5877	0.7138	71.7761989
3	0.5164	0.00594	0.00146	-0.0424	0.5227	0.7465	86.9360269
4	0.6139	0.00796	0.00239	-0.0409	0.2281	0.7804	77.1231156
5	0.7086	0.01012	0.00372	-0.039	0.0353	0.8163	70.0197628
6	0.8111	0.01106	0.00471	-0.0378	0.0206	0.8552	73.3363472
7	0.9079	0.01202	0.00578	-0.0356	0.0119	0.9027	75.5324459
8	1.0004	0.01306	0.00697	-0.0328	0.0084	1	76.6003063
9	1.0961	0.0145	0.00846	-0.0313	0.0068	1	75.5931034
10	1.1835	0.01616	0.0102	-0.0285	0.0044	1	73.2363861
11	1.248	0.01863	0.01279	-0.0223	0.001	1	66.9887279
12	1.2962	0.02126	0.01563	-0.0142	0.0009	1	60.9689558
13	1.3374	0.02492	0.01957	-0.0074	0.0008	1	53.6677368
14	1.3699	0.0299	0.02488	-0.002	0.0008	1	45.8160535
15	1.3918	0.03657	0.03192	0.0016	0.0008	1	38.0585179

Figura 55. Datos del perfil Naca 64212. (Elaboración propia)

A continuación, se adjuntarán los datos de los perfiles de las alas sustentadoras comparadas en gráficas:

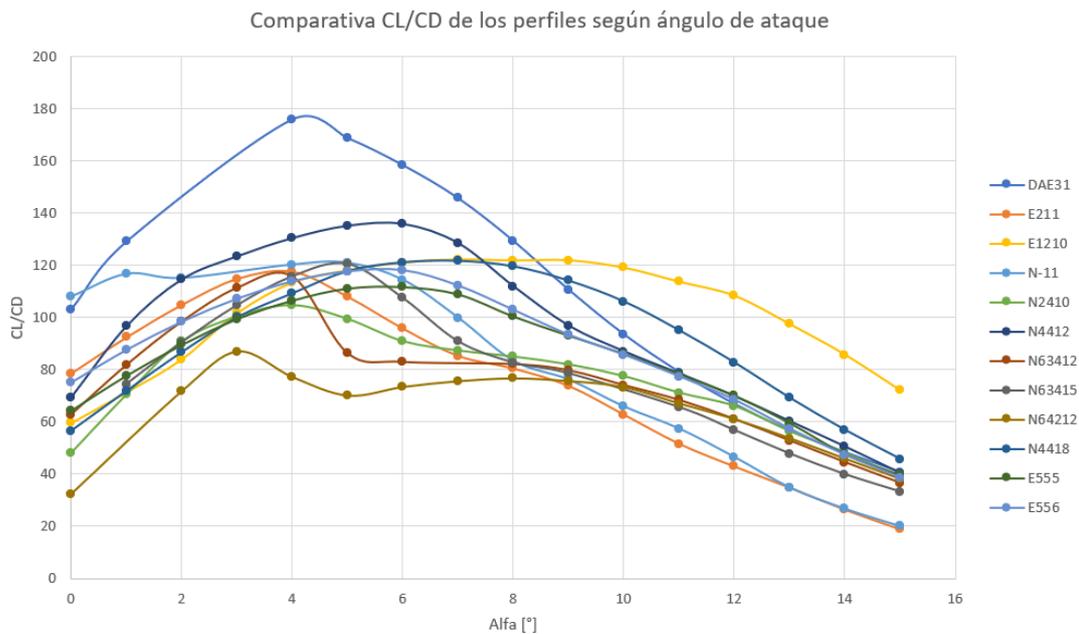


Figura 56. Grafica del rendimiento hidráulico de todos los perfiles sustentadores. (Elaboración propia)

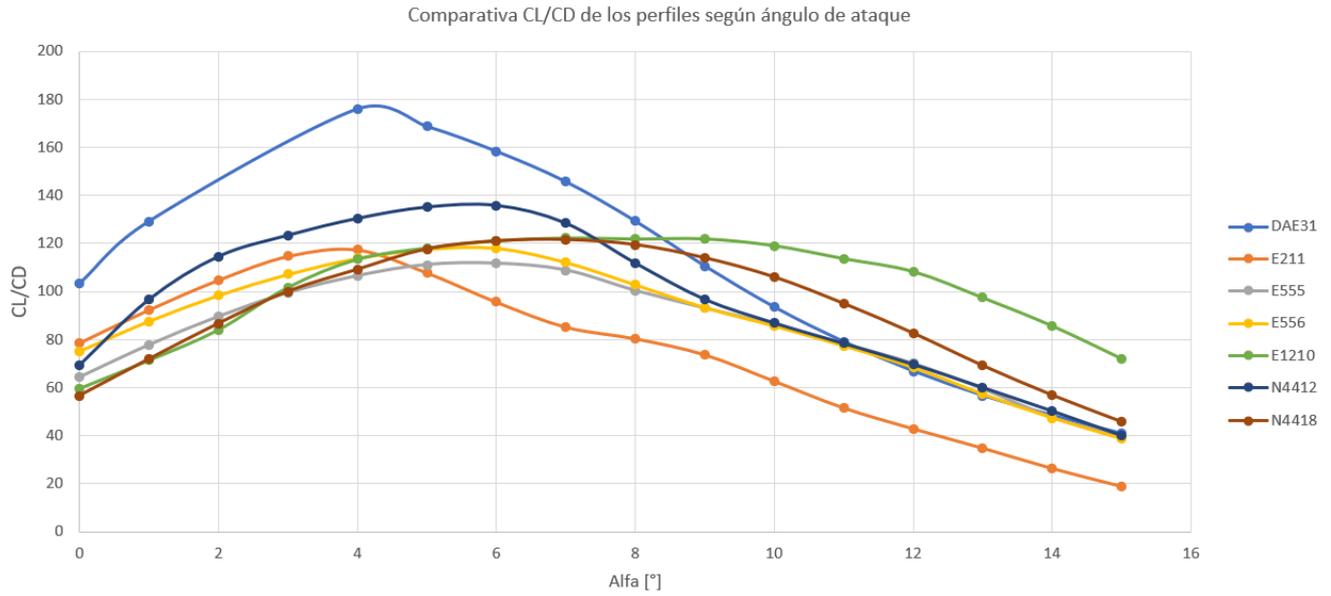


Figura 57. Rendimiento hidráulico de los perfiles tras primera eliminación. (Elaboración propia)

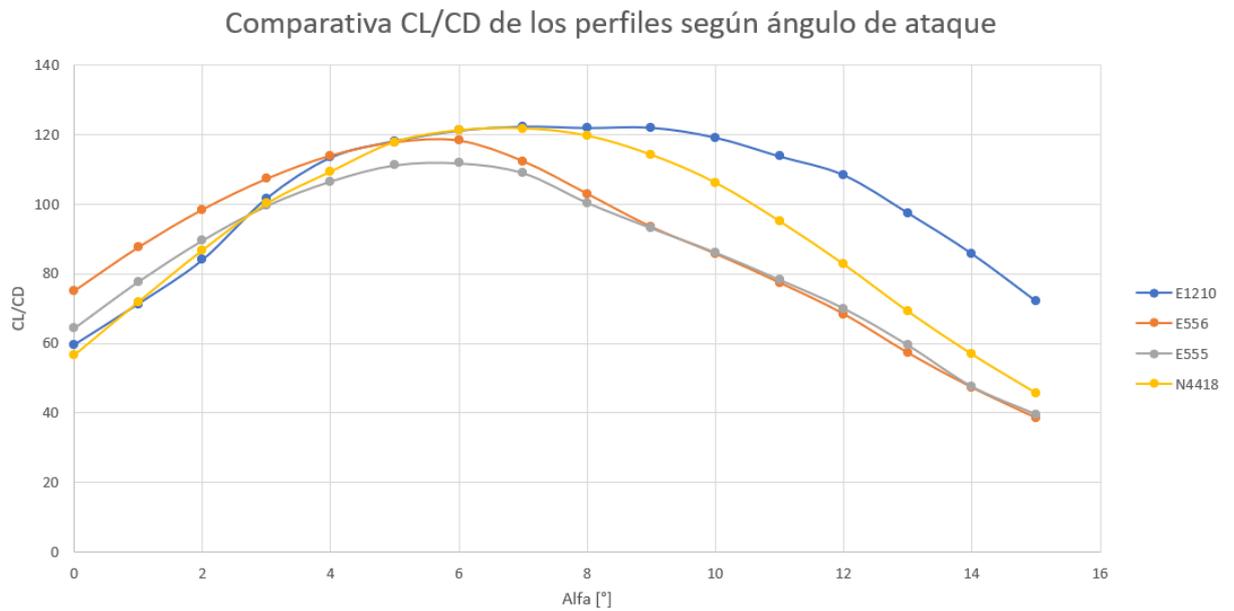


Figura 58. Rendimiento hidráulico de los perfiles tras la última eliminación. (Elaboración propia)

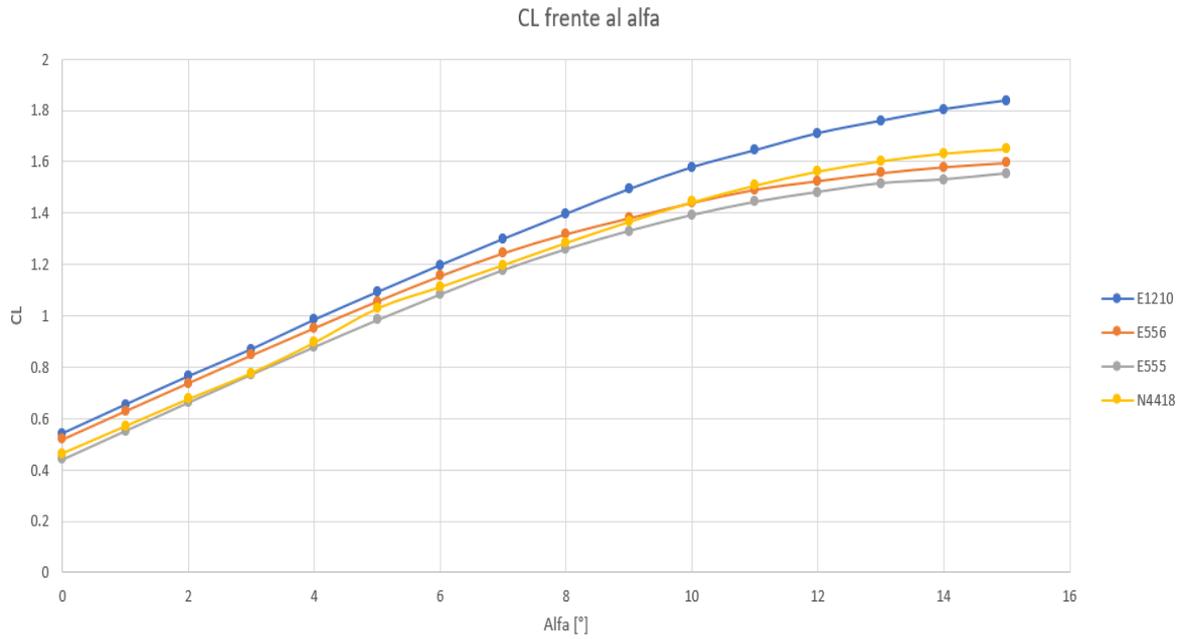


Figura 59. Coeficiente de sustentación de los últimos perfiles. (Elaboración propia)

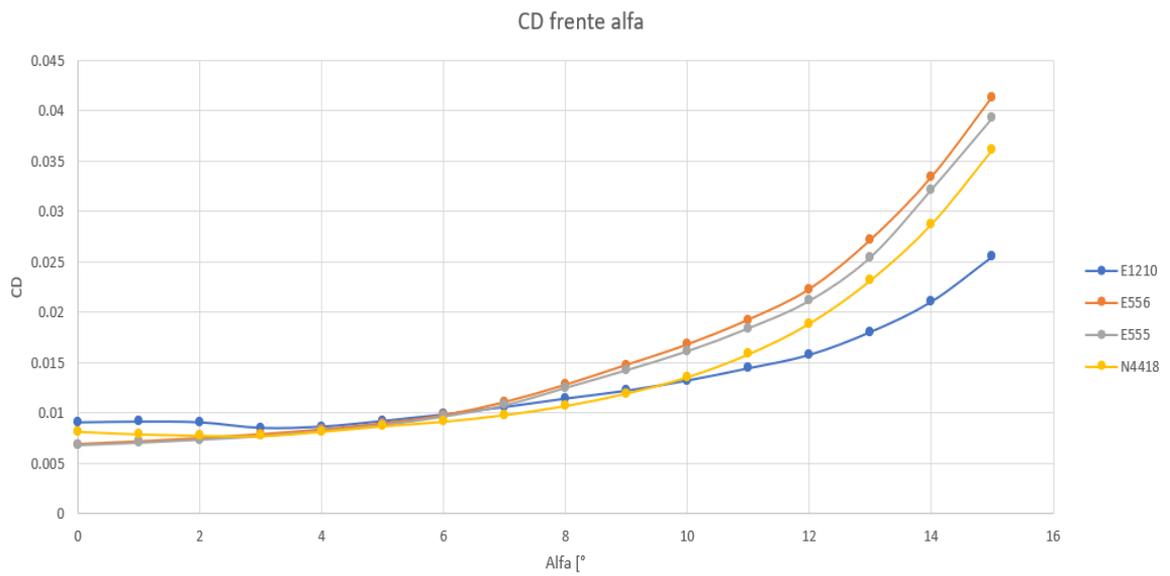


Figura 60. Coeficiente de resistencia de los perfiles restantes. (Elaboración propia)

A continuación, se adjuntarán los datos de los análisis de los perfiles utilizados para los mástiles:

- Naca 0015:

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr
0	0	0.00572	0.00104	0	0.4984	0.4985
1	0.1126	0.00577	0.00109	0.0001	0.4275	0.5703
2	0.2247	0.00592	0.00122	0.0003	0.3577	0.6442
3	0.336	0.00617	0.00145	0.0006	0.2892	0.7185
4	0.446	0.00656	0.00179	0.0012	0.2234	0.7907
5	0.5545	0.00707	0.00225	0.002	0.1668	0.8561
6	0.6614	0.00773	0.00283	0.0032	0.1204	0.9087
7	0.7659	0.00849	0.00352	0.0048	0.0883	0.9488
8	0.8692	0.00934	0.00428	0.0066	0.0671	0.9771
9	0.985	0.01036	0.0052	0.0053	0.0518	0.9916
10	1.1119	0.01152	0.00628	0.0013	0.0412	0.9959
11	1.2347	0.01285	0.00755	-0.0022	0.0335	0.9999
12	1.3014	0.01398	0.0087	0.006	0.0294	1
13	1.3773	0.01538	0.01013	0.0117	0.026	1
14	1.4457	0.01699	0.01181	0.0181	0.0238	1
15	1.5062	0.01929	0.01422	0.0243	0.0217	1

Figura 61. Datos del perfil Naca 0015. (Elaboración propia)

- Naca 0018:

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr
0	0	0.00628	0.00135	0	0.4664	0.4666
2	0.2251	0.00644	0.0015	0.0003	0.3592	0.5805
3	0.3367	0.00664	0.0017	0.0006	0.3086	0.6412
4	0.4474	0.00692	0.00199	0.0011	0.2606	0.7035
5	0.5564	0.00733	0.00238	0.0019	0.2146	0.7654
6	0.6637	0.00785	0.00288	0.0029	0.1741	0.8241
7	0.7698	0.00848	0.00348	0.0041	0.1407	0.8756
8	0.872	0.00925	0.00422	0.006	0.1126	0.9195
9	0.9703	0.01012	0.00505	0.0086	0.0919	0.9544
10	1.0654	0.01112	0.006	0.0116	0.0762	0.9814
11	1.1786	0.01239	0.00718	0.0102	0.0633	0.9936
12	1.298	0.01386	0.00859	0.0069	0.0536	0.9988
13	1.3422	0.01513	0.00988	0.0184	0.0479	1
14	1.4058	0.01707	0.01185	0.0246	0.0426	1
15	1.4675	0.01963	0.01447	0.0294	0.0387	1

Figura 62. Datos del perfil Naca 0018. (Elaboración propia)

- Naca 0024:

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
0	0	0.00737	0.00208	0	0.427	0.4271
1	0.1097	0.00742	0.00212	0.0007	0.3917	0.462
2	0.2183	0.00752	0.00222	0.0016	0.3575	0.5009
3	0.3269	0.00764	0.00238	0.0025	0.3272	0.5424
4	0.4333	0.00788	0.00262	0.0037	0.296	0.5854
5	0.5384	0.00818	0.00294	0.0052	0.2679	0.6302
6	0.6411	0.00854	0.00333	0.007	0.2416	0.6779
8	0.8279	0.00957	0.00447	0.0139	0.1946	0.779
9	0.9187	0.0104	0.00534	0.0173	0.173	0.8302
10	1.0072	0.01135	0.00637	0.0208	0.1556	0.8786
11	1.087	0.01265	0.00773	0.0253	0.1386	0.9254
12	1.1598	0.01418	0.00933	0.0306	0.1256	0.9674
13	1.2409	0.01639	0.01151	0.0326	0.1126	0.9937
14	1.3347	0.01919	0.01428	0.0307	0.1011	1
15	1.3753	0.02241	0.01752	0.0373	0.0931	1

Figura 63. Datos del perfil Naca 0024. (Elaboración propia)

- Naca 63015 A:

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
0	0	0.00488	0.00078	0	0.5895	0.5895
1	0.1146	0.00496	0.00081	-0.0007	0.5518	0.6168
3	0.3418	0.00532	0.00108	-0.0019	0.4528	0.6733
4	0.4473	0.00627	0.00153	-0.0013	0.3011	0.701
5	0.5479	0.00769	0.00232	-0.0001	0.1292	0.7298
6	0.6528	0.00865	0.00306	0.0005	0.063	0.7612
7	0.757	0.00955	0.00391	0.0012	0.0317	0.7988
8	0.8586	0.01046	0.00489	0.0023	0.0183	0.8542
9	0.9543	0.01135	0.00605	0.0047	0.0142	0.9398
10	1.066	0.01269	0.00749	0.0032	0.0125	0.9952
11	1.1551	0.01444	0.00934	0.0056	0.0116	1
12	1.2307	0.01609	0.01109	0.0103	0.0112	1
13	1.294	0.0184	0.01353	0.0158	0.0108	1
14	1.3503	0.02164	0.01693	0.0201	0.0104	1
15	1.3965	0.0262	0.02168	0.0232	0.01	1

Figura 64. Datos del perfil Naca 63015A. (Elaboración propia)

- Naca 64015 A:

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
0	0	0.00484	0.00079	0	0.6008	0.6009
1	0.1146	0.00489	0.00081	-0.0009	0.569	0.6239
2	0.2284	0.00503	0.00089	-0.0016	0.5237	0.6483
3	0.3413	0.00525	0.00106	-0.0022	0.4698	0.675
4	0.4402	0.00672	0.00171	-0.0006	0.2388	0.7012
6	0.6457	0.00893	0.00322	0.001	0.0406	0.7588
7	0.7506	0.00971	0.00401	0.0015	0.0253	0.7924
8	0.8527	0.01058	0.00498	0.0025	0.0178	0.8361
9	0.949	0.01156	0.0062	0.0044	0.0147	0.9046
10	1.0466	0.01264	0.0075	0.006	0.0135	0.9855
11	1.1454	0.01439	0.00932	0.0061	0.0122	1
12	1.2092	0.01645	0.01152	0.0126	0.0116	1
13	1.2751	0.01874	0.01394	0.0172	0.0113	1
14	1.3323	0.02201	0.01738	0.0212	0.0109	1
15	1.3811	0.02635	0.0219	0.0243	0.0105	1

Figura 65. Datos del perfil Naca 64015 A. (Elaboración propia)

- Naca 64008 A:

alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
0	0	0.0036	0.00036	0.0	0.7191	0.7192
1	0.1065	0.00407	0.00042	0.0	0.5275	0.7881
2	0.2097	0.00549	0.00082	0.0	0.1627	0.8387
3	0.3153	0.00635	0.00137	0.0	0.016	0.8997
4	0.4214	0.00686	0.00213	0.0	0.0138	0.9673
5	0.5441	0.00827	0.00376	0.0	0.0097	0.9947
6	0.6674	0.00898	0.00443	-0.0	0.0075	1
7	0.7643	0.01019	0.00572	-0.0	0.0054	1
8	0.8645	0.01147	0.00704	0.0	0.0035	1
11	0.7574	0.1043	0.10334	-0.0	0.0026	1
15	0.5396	0.16046	0.15949	-0.0	0.0032	1

Figura 66. Datos del perfil Naca 64008 A. (Elaboración propia)

A continuación, se adjuntarán las gráficas obtenidas:

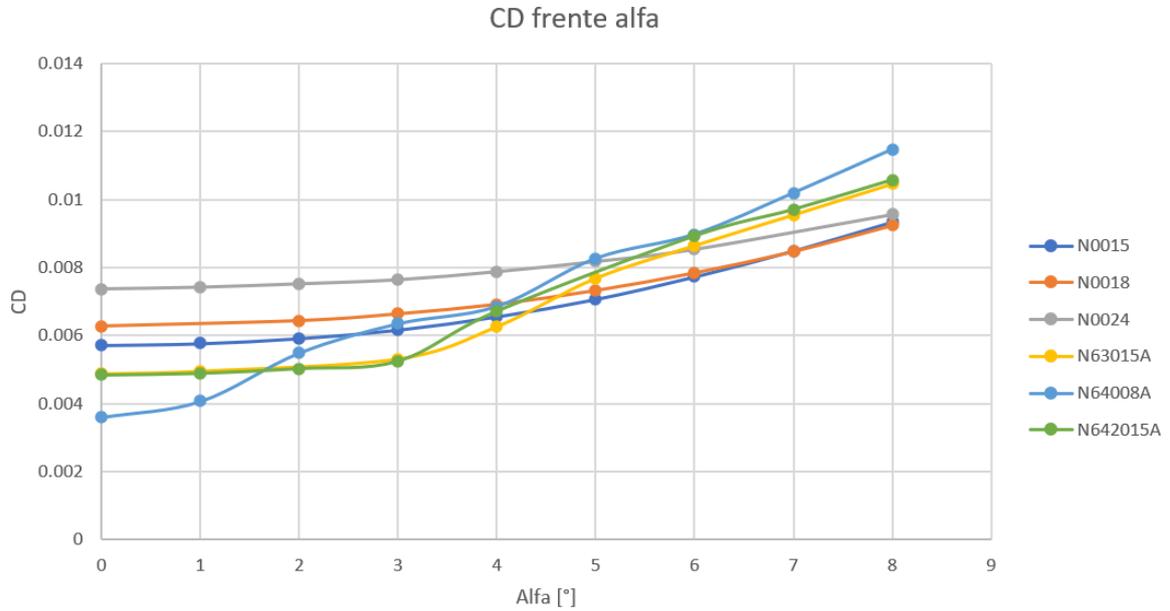


Figura 67. Gráfica del coeficiente de resistencia de los perfiles. (Elaboración propia)

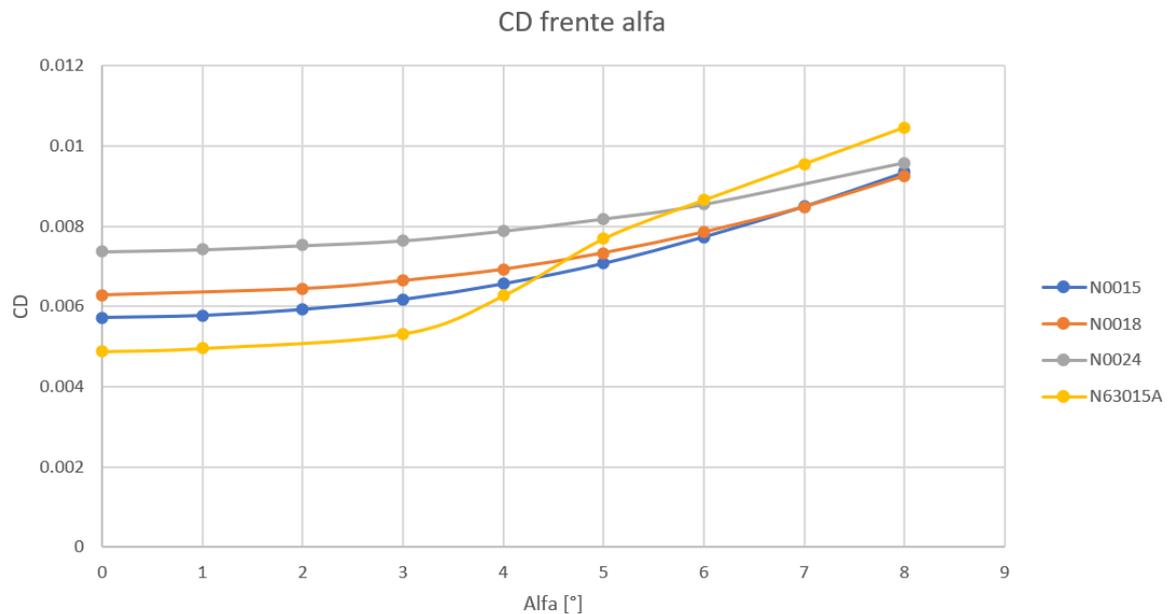


Figura 68. Gráfica del coeficiente de resistencia de los perfiles restantes. (Elaboración propia)

A continuación, se adjuntarán imágenes de todos los componentes del prototipo:

- Chasis:

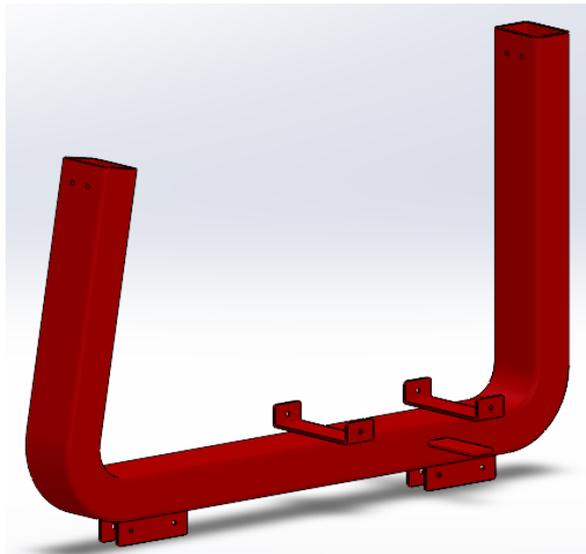


Figura 69. Chasis del prototipo. (Elaboración propia)

- Unión del manillas:

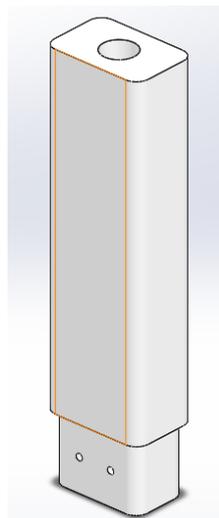


Figura 70. Unión del manillar del prototipo. (Elaboración propia)

- Manillar:

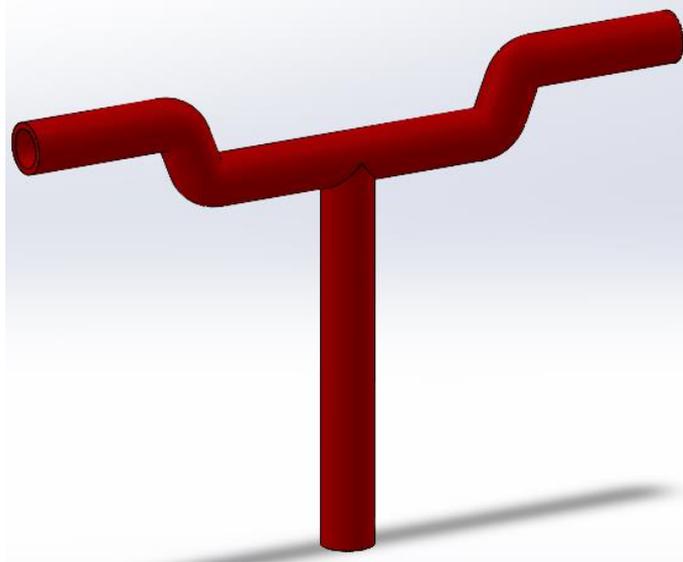


Figura 71. Manillar del prototipo. (Elaboración propia)

- Unión del sillín:

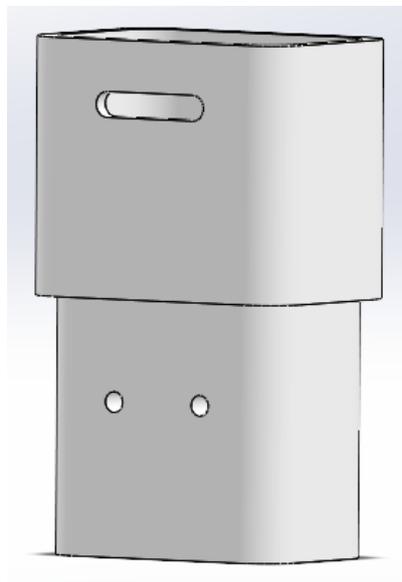


Figura 72. Unión del sillín el prototipo. (Elaboración propia)

- Conjunto mástil-foil delantero:

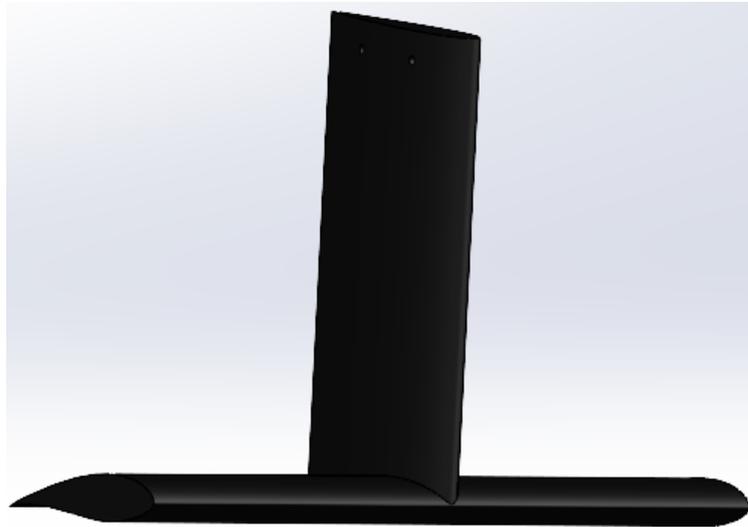


Figura 73. Conjunto mástil-foil delantero. (Elaboración propia)

- Conjunto mástil-foil trasero:

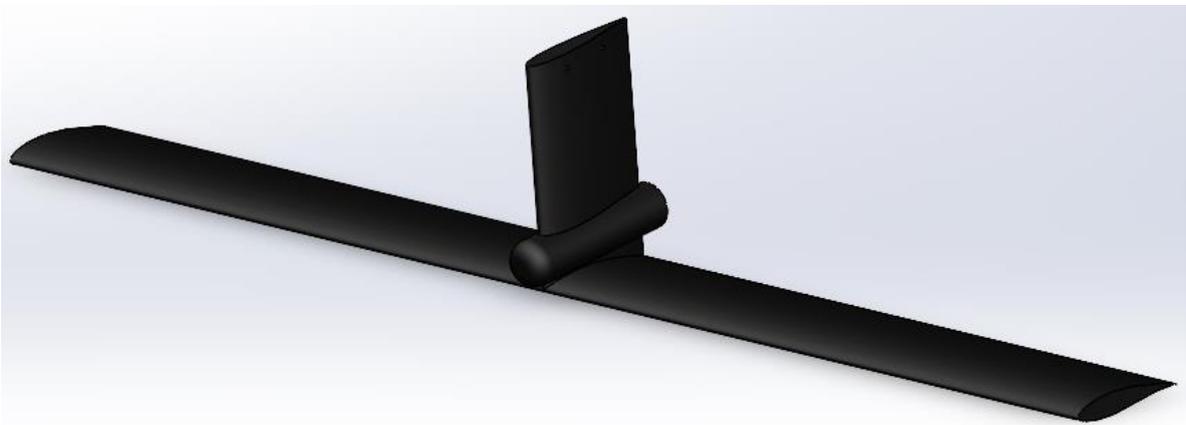


Figura 74. Conjunto mástil-foil trasero. (Elaboración propia)

- Enganche del mástil con el chasis:

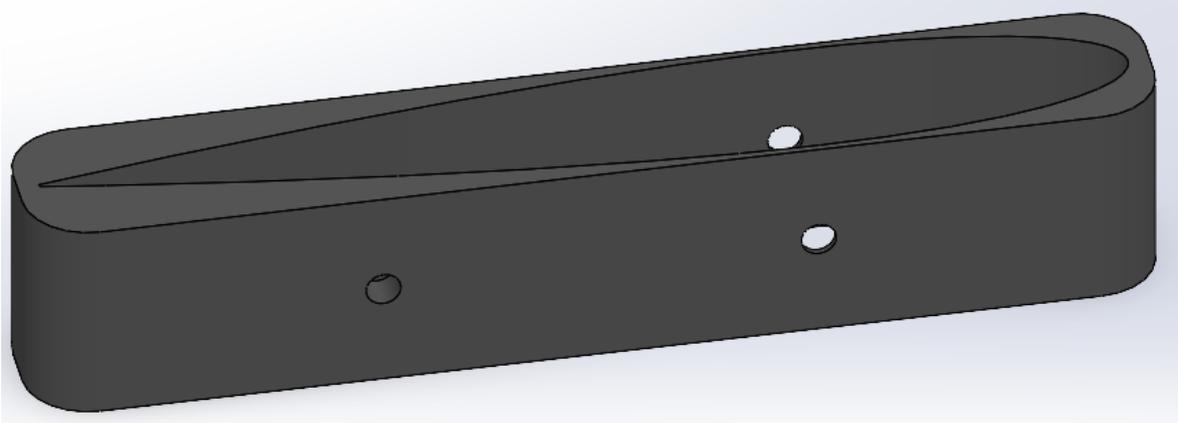


Figura 75. Anclaje chasis y foil. (Elaboración propia)

- Motor de corriente continua de 24V, 28'5A y 500W:



Figura 76. Motor de corriente continua de 24V, 28'5A y 500W. (www.Alamor.com)

- Batería de 24 V y 30Ah:



Figura 77. Batería de 24V y 30Ah. (www.Egosun.com)

En el pack exterior pone que es de 29'4 V, pero ese es el valor máximo al que se podría cargar, su tensión es la 24 voltios, adjunto la ficha técnica:

Especificaciones:

- Aplicación:electrical tools
- Capacidad nominal:30000mAh
- Certificación:CE
- Nombre de la:Dolidada
- Número de modelo:7S4P 30000mAh
- Origen:CN(Origen)
- Peso:1.5kg
- Tamaño:270*40*68mm
- Tipo:Batería de ion de litio
- Voltaje:24V

Figura 78. Especificaciones técnicas del paquete de baterías empleado. (www.Egosun.com)

A continuación, se adjunta el esquema eléctrico del sistema:

- Esquema eléctrico:

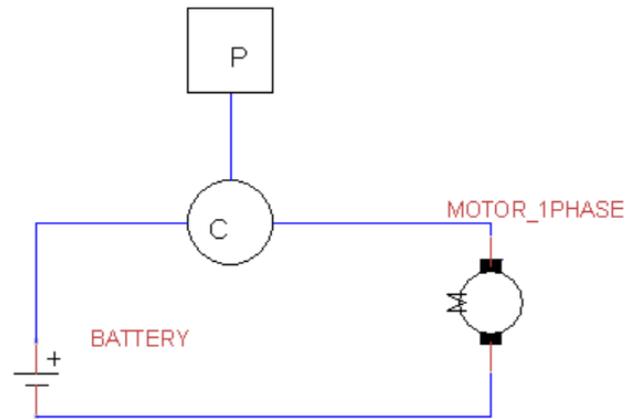


Figura 79. Esquema eléctrico del prototipo. (Elaboración propia)

Por último, se adjuntará una imagen del prototipo final:

- Prototipo:

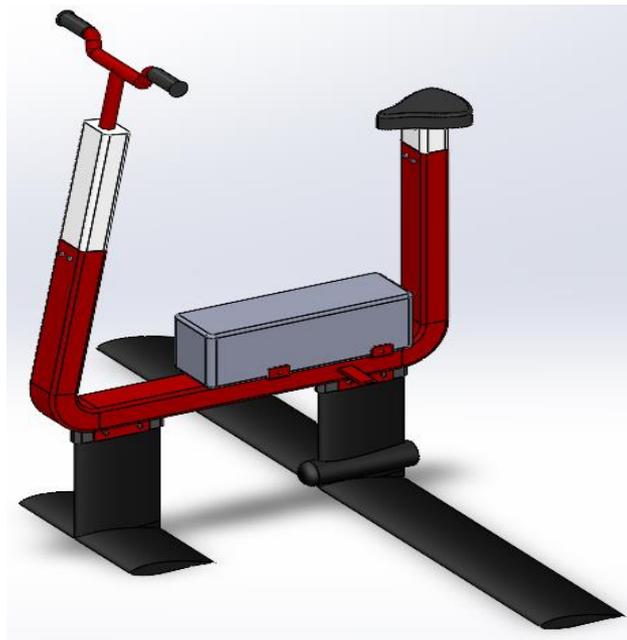


Figura 80. Imagen del prototipo final. (Elaboración propia)

A continuación, se adjuntan las tablas de las masas, el precio de los componentes y la resistencia al avance:

- Masas:

Piezas	Pesos (kg)	Material
Chasis	14.88	Aluminio 6063
Foil trasero	17.25	Fibra de vidrio - E
Foil delantero	16.18	Fibra de vidrio - E
Anclaje foils	0.2	ABS
Anclaje foils	0.2	ABS
Mástil sillín	1.31	ABS
Mástil manillar	4.29	ABS
Manillar	1.62	Aluminio 6063
Puños	0.144	Goma SH-15
Baterías	1.9	
Motor	4	
Sillín	2.44	Neopreno
TOTAL PROTOTIPO	64.414	
Tripulante	80	
TOTAL	144.414	

Tabla 8. Pesos de los componentes. (Elaboración propia)

- Precios:

Elemento	Precio (€)
Perfil tubular aluminio 120x80mm	11000
Chapa aluminio 5mm 2x3m	432
Motor CC	13606
Batería más cargador	13800
Controlador, display y potenciómetro	6200
Piezas ABS	1440
Moldes ABS	360
Foils fibra vidrio	100000
Tornillería	200
TOTAL	147038

Tabla 9. Costes de fabricación. (Elaboración propia)

- Resistencia al avance:

	Eppler 556	Naca 0015
Áreas Delantero (mm ²)	24483.20	4564.26
Áreas Trasero (mm ²)	97946.20	6816.20
Coefficiente resistencia (alfa=6°)	0.00978	0.00572
Velocidad máxima (m/s)	5.56	5.56
Densidad (kg/m ³)	1025	1025
Resistencia avance	18.97	1.03
TOTAL (N)	20.00	

Tabla 10. Cálculo resistencia al avance. (Elaboración propia)