

GRADO EN MARINA
TRABAJO FIN DE GRADO

***DISEÑO ASISTIDO POR ORDENADOR DE UN
HIDROALA Y ESTUDIO HIDRODINÁMICO Y
ESTRUCTURAL MEIANTE SIMULACIONES
COMPUTACIONALES.***

Alumno: Ibarlucea, Parada, Mikel

Director: Lopez, Arraiza, Alberto

Curso: 2018-2019

Fecha: Portugalete, 05, 11, 2018

RESUMEN

CASTELLANO

En el presente Trabajo Fin de Grado (TFG) para la obtención del título de Grado en Marina, se ha diseñado y optimizado hidrodinámicamente un hidroala o hydrofoil para la práctica del surf. El hydrofoil es un sistema de creciente utilización e interés, por lo que se ha realizado un estudio completo del diseño, es decir, tanto conceptual como de resistencia mecánica e hidrodinámica. Mediante el programa SolidWorks se ha realizado el diseño 3D proponiendo una nueva geometría biomimética basada en las ballenas. Igualmente, se ha comprobado mediante Elementos Finitos que la resistencia estructural del diseño con fibra de carbono es adecuada y, por último, mediante Fluidodinámica Computacional se ha conseguido aumentar el rendimiento hidrodinámico en un 30%. En conclusión, el nuevo diseño propuesto es adecuado para la práctica del surf y puede someterse a futuros ensayos con la fabricación de prototipos.

EUSKERA

Gradu amaierako lan hau, Itsasketa gradua lortzeko burutua izan da. Horretarako, hydrofoil bat diseinatu eta hidrodinamikoki hobetua izan da. Hydrofoilak geroz eta ezagutuagoak eta desiratuak dira surf munduan, horregatik diseinuaren azterketa oso bate gin da. Alde batetik, erresistentzia mekanikoa aztertuz eta bestetik hidrodinamika aztertuz. SolidWorks programa erabiliz 3D diseinua burutu da, biomimetika aplikatuz. Era berean, elementu finituen bidez konprobatu egin da, karbono zuntza nahikoa dela egituraren tinkotasuna mantentzeko. Eta azkenik Fluidodinamika konputazionala erabiliz, hydrofoilaren errendimendua %30-ean hobetu egin da. Laburtuz, Hydrofoilaren diseinu berria aproposa da surf-a praktikatzeko eta prototipoak lantzeko eta hauekin entseiuak egiteko prest dago.

INGLÉS

The aim of the following Undergraduate Degree Project, is to hydrodynamically design and optimize a hydrofoil for surfing. The hydrofoil is a system of increasing use and interest; therefore, a complete study of the design has been made, both conceptual and the mechanical and hydrodynamic resistance. Through SolidWorks, a new 3D design has been suggested introducing a new biomimetic geometry. Besides, it has been proven by Finite Elements that the structural strength of the carbon fiber design is adequate. Lastly, it is worth mentioning the improvement of the 30% of the hydrodynamic performance that has been achieved by means of Computational Fluid Dynamics. In short, the suggested new design is suitable for the practice of the surf and may be subjected to future trials with the manufacturing of prototypes.

Palabras clave: surfoil, hydrofoil, simulación

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ÍNDICE	4
LISTA DE TABLAS Y ILUSTRACIONES.....	7
MEMORIA.....	10
1. INTRODUCCIÓN.....	11
2.CONTEXTO	12
3.OBJETIVOS	13
4.ESTADO DEL ARTE	14
4.1 ¿QUÉ ES UN HYDROFOIL?	14
4.2 EVOLUCIÓN DEL SURF	15
4.3 EI SURFOIL	16
4.4 PRINCIPIOS FÍSICOS	17
4.4.1 Principio de Bernouilli	17
4.4.2 Efecto Venturi.....	18
4.4.3 3ª Ley de movimiento de Newton	18
4.4.4 Efecto Coanda.....	19
4.4.5 Capa límite	19
4.5 EL PERFIL AERODINÁMICO	20
4.5.1 La sustentación, lift o empuje	21
4.6 PROGRAMA CAD.....	22
4.7 ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS	23
4.8 ANÁLISIS POR CFD.....	24
5.DESARROLLO DEL TRABAJO.....	26
5.1 DISEÑO E HIPÓTESIS INICIALES.....	26
5.1.1 Hipótesis.....	26
5.1.2 Componentes del hidroala.....	26
5.2 DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL MÁSTIL	26
5.2.1 Primer boceto	26
5.2.2 CAD 3D	27
5.2.3. Propuestas de mejora del mástil.....	29
5.2.3.1 Propuesta 1 contrarreloj.....	29
5.2.3.1 Propuesta 2: Tecnología de tubérculos	32
5.2.4 Análisis Cfd	35
5.2.5 Análisis FEM	36

5.3 DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL ALA DE SUSTENTACIÓN.....	38
5.3.1 Elección del perfil	38
5.3.1.1 Perfil N-11	39
5.3.1.3 Perfil RAF 19.....	40
5.3.1.4 Perfil DAE-31	41
5.3.2 CAD 3D del ala de sustentación	42
5.3.3 Mejoras propuestas para el ala de sustentación	43
5.4 DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL ALA DE ESTABILIZACIÓN.....	45
5.4.1 CAD 3D del ala de estabilización.....	45
5.4.2 Simulaciones ala de estabilización	45
5.5 DISEÑO DEL CONJUNTO DEL HIDROALA.....	46
CONCLUSIONES	48
REFERENCIAS	50
ANEXO I: PLANOS.....	53

LISTA DE TABLAS Y ILUSTRACIONES

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1(Forlanini surcando un lago en su hidroala [1])	14
Ilustración 2(Barco de la armada Italiana [3])	15
Ilustración 3(Surfista con una colección de tablas años 30 [4])	16
Ilustración 4: Surfoil corriente [6] y Ilustración 5: Deportista surfeando con un Surfoil[6]	16
Ilustración 6: Conservación de la energía en fluidos [8]	17
Ilustración 7(efecto Coanda en una pelota[9]) y Ilustración 8(efecto Coanda en un perfil[9])	19
Ilustración 9(formación de la capa límite en un perfil [9]).....	20
Ilustración 10: partes de un perfil [10]	20
Ilustración 11(Efecto de la diferencia de presiones en un perfil [10]).....	22
Ilustración 12(Efecto de deflexión en un ala).....	22
Ilustración 13(Interfaz de Solidworks CAD [13]) y Ilustración 14(Logo Solidworks [13])	23
Ilustración 15: Simulación de viga sometida a esfuerzos de flexión [14]	24
Ilustración 16(logo Solidworks FEM[14])	24
Ilustración 17: resultado de una simulación aerodinámica de un F1 [15]).....	25
Ilustración 18(logo Solidworks CFD [15]).....	25
Ilustración 19(surfoil convencional [6])	26
Ilustración 20(primer boceto de la geometría) y Ilustración 21(primer boceto del análisis de fuerzas).....	27
Ilustración 22(perfil Parasec) y Ilustración 23(perfil NACA0012)	27
Ilustración 24(gráfico coeficiente de drag Parasec) y Ilustración 25(gráfico coeficiente de drag NACA0012).....	28
Ilustración 26(geometría del perfil utilizado)	28
Ilustración 27(proceso de diseño del mástil)	28
Ilustración 28(mástil)	29
Ilustración 29(bici de escaladores) y Ilustración 30(bici de contrarreloj)	29
Ilustración 31(mástil sin mejora) y Ilustración 32(mástil con mejora)	30
Ilustración 33(campo de velocidades sin mejora) y Ilustración 34(campo de velocidades con mejora).....	31
Ilustración 35(campo de vórtices sin mejora) y Ilustración 36(campo de vórtices con mejora)	31
Ilustración 37(FEM mástil sin mejora) y Ilustración 38(FEM mástil con mejora)	32
Ilustración 39(posible problema de concentración de tensiones)	32
Ilustración 40(aleta delantera de ballena jorobada).....	33
Ilustración 41(mástil con tecnología de jorobas) y Ilustración 42(mástil corriente).....	33
Ilustración 43(campo de velocidades) y Ilustración 44(campo de velocidades)	34
Ilustración 45(superficie de presiones) y Ilustración 46(superficie de presiones).....	34
Ilustración 47(campo y superficie de vórtices) y Ilustración 48(campo y superficie de vórtices)	35
Ilustración 49(campo de longitud de turbulencia y superficie de vorticidad)	36
Ilustración 50(relación entre el campo de velocidad y superficie de vorticidad)).....	36
Ilustración 51(superficie de deformaciones) y Ilustración 52(superficie de tensiones)	37
Ilustración 53(mástil antiguo) y Ilustración 54(mástil diseño TFG).....	38
Ilustración 55(perfil geométrico de la N-11).....	39
Ilustración 56(análisis de la capa límite y campo de velocidades del perfil N-11)	39
Ilustración 57(geometría del perfil EPPLER 1210)	40
Ilustración 58(análisis de la capa límite y campo de velocidades del perfil EPPLER 1210 ..	40

Ilustración 59(geometría del perfil RAF-19).....	40
Ilustración 60(análisis de la capa límite y campo de velocidades del perfil RAF-19)	41
Ilustración 61(geometría del perfil DAE-31).....	41
Ilustración 62(análisis de la capa límite y campo de velocidades del perfil DAE-31)	42
Ilustración 63(proceso de modelado CAD del ala de sustentación).....	42
Ilustración 64(cola de ballena) y Ilustración 65(la biomiméisis aplicada al ala)	43
Ilustración 66(aspecto final del hidroala)	44
Ilustración 67(geometría perfil de estabilización).....	45
Ilustración 68(ala de estabilización) y Ilustración 69(ala interactuando con líneas de agua) 45	
Ilustración 70(conjunto TFG).....	46
Ilustración 71(conjunto diseño referencia).....	47

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: resultados de fuerzas hidrodinámicas con y sin modificación.....	30
Tabla 2: resultados de las simulaciones CFD a distintas velocidades.....	34
Tabla 3: resultados CFD de la geometría propuesta.....	35
Tabla 4: propiedades mecánicas de la fibra de carbono para la fabricación del Mástil.....	37
Tabla 5: resultados de la resistencia al avance del mástil con las nuevas propuestas.....	38
Tabla 6: resultados CFD de las distintas geometrías del ala de sustentación.....	44
Tabla 7: valores hidrodinámicos de la nueva ala de sustentación.....	44
Tabla 8: Suma de los resultados diseño TFG.....	46
Tabla 9: Suma de los resultados diseño referencia.....	47

MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN

En el presente Trabajo Fin de Grado se realiza el diseño y la simulación de un hydrofoil para la práctica del surf. Basado en el teorema de Bernouilli y en la 3º ley de Newton, el hydrofoil logra reducir drásticamente la resistencia al avance y hace que el surf evolucione de una manera jamás imaginada.

El proyecto se va llevar a cabo mediante el modelado computacional o 3D, que es una herramienta de un gran potencial para el diseño y prototipado de objetos y conjuntos. Hoy en día es el sistema más utilizado para el diseño dada su versatilidad y capacidad de creación. Además, todos los componentes serán sometidos a simulaciones computacionales, imitando lo máximo posible las condiciones de trabajo.

Dentro del modelado computacional, la simulación por elementos finitos (FEM) permite ver el comportamiento estructural del objeto cuando se le somete a unas fuerzas externas, comprobando si el material resiste de manera adecuada o, por el contrario, el diseño debe ser retocado.

Por otro lado, la simulación por CFD (Computational Fluids Dynamics) permite estudiar la interacción del objeto con un fluido, en este caso el agua. De esta manera, se estudia cómo de hidrodinámico es el cuerpo sometido al estudio y las fuerzas que se generan. El proyecto no cuenta con la parte experimental, que puede ser una línea futura de trabajo.

2.CONTEXTO

El surf es un deporte que depende de las olas y de su calidad. La calidad y la consistencia de éstas no son siempre las adecuadas para la práctica de dicho deporte. Muchas veces la energía y la velocidad de estas ondulaciones no es suficiente para desplazar al deportista por la superficie. Cuando la resistencia al avance vence a la fuerza generada por la pendiente la tabla se frena.

Aquí es donde el surfoil cobra sentido. Su principal función es elevar al surfista del agua evitando así que la tabla genere cualquier tipo de fricción con la ola, reduciendo así la resistencia al avance drásticamente, y hace que olas que antes eran insuficientes, se vuelvan divertidas. Los surfoil son recientes en el mercado y tienen una gran proyección.

El objetivo de este TFG será mejorar el diseño y las actuales tecnologías utilizadas en los surfoils actuales. Al final del proyecto se comparará con un diseño que se hizo con anterioridad para la asignatura Oficina Técnica (3º Grado en Marina).

Las simulaciones computacionales serán la base de este proyecto ya que dan la posibilidad de poder ver y analizar cómo un diseño se va a comportar en condiciones de trabajo, sin tener que construirlo. Esto ahorra tiempo y dinero en procesos que tienden a ser costosos y largos.

3.OBJETIVOS

Los principales objetivos de este trabajo fin de grado (TFG) son los siguientes:

- ❖ Entender el funcionamiento de un hidroala o hydrofoil.
- ❖ Diseñar un hidroala para la práctica del surf mejorando los diseños actuales
- ❖ Realizar el diseño 3D mediante el programa SolidWorks
- ❖ Comprobar la resistencia mecánica del diseño mediante SolidWorks Simulation
- ❖ Llevar a cabo simulaciones del comportamiento en la mar mediante SolidWorks Flow Simulation.
- ❖ Optimizar y proponer un diseño final de hydrofoil para su futura fabricación.

4. ESTADO DEL ARTE

4.1 ¿QUÉ ES UN HYDROFOIL?

La palabra “hydrofoil” es una palabra compuesta inglesa que la forman las palabras “Foil”(perfil) y “Hydro”(agua). Su uso y aplicación ha sido mayoritariamente en embarcaciones a motor y no ha sido introducido en los deportes acuáticos hasta estos últimos años.

Un hidroplano, hidroala o hydrofoil, palabras que se utilizan para referirse al mismo concepto en este proyecto, es una superficie de elevación, o lámina, que opera en el agua. Son similares en apariencia y propósito a los perfiles utilizados por los aviones. Los barcos que usan tecnología de hidroplanos también se denominan simplemente hidroalas o hydrofoils.

Esta tecnología fue patentada por primera vez en 1898 por el inventor italiano Enrico Forlanini [1]. Poco después patentaba su segundo prototipo. El hidroala que Forlanini construyó, logró alcanzar la velocidad de 68 kilómetros por hora con un motor de 45kW, un hito más que considerable teniendo en cuenta que los barcos más rápidos de la época sólo alcanzaban entre 40 y 50 kilómetros por hora.



Ilustración 1(Forlanini surcando un lago en su hidroala [1])

Otro de los inventores que aportó su tiempo y conocimiento a la evolución del hidroala fue Alexander Graham Bell en 1919, fue el inventor de la hidroala HD4 y alcanzaba una velocidad de 114 kilómetros por hora. [2].

A pesar de ser tan prometedores, los hidroalas nunca han llegado a despegar del todo. Fueron más populares en los años 60 y 70 debido a la fascinación por los espectaculares hidroplanos de pasajeros rusos, pero su tecnología, más delicada y cara de mantener que otras soluciones, los ha relegado a un papel menor en la ingeniería naval. En su lugar han aparecido otros tipos de embarcaciones tecnológicamente superiores como los catamaranes, trimaranes, pentamaranes o los navíos SWATH de doble casco sumergido.

Dada su alta velocidad muy superior a todos los demás barcos, pensaron que sería un rival esquivo y difícil de alcanzar por torpedos y misiles. La Marina Militar Italiana dispuso de hidroalas de la clase Sparviero en 1973 (Ilustración 2). Posteriormente, entre 1977 y 1984 ha utilizado seis hidroalas de la clase Nibbio, dotados de un cañón de 76 mm y dos lanzamisiles, capaces de alcanzar una velocidad superior a los 50 nudos.[3]



Ilustración 2(Barco de la armada Italiana [3])

Hoy en día el hidroala tiene aplicación limitada a embarcaciones de pasaje de personas y coches que cruzan zonas de ríos o zonas de poca ola.

No es hasta el siglo XXI cuando el hidroala es aplicado al mundo del deporte y la navegación. El hydrofoil logra su máximo potencial en deportes que requieran velocidad, como son las regatas, el windsurf, el kitesurf y el surf.

4.2 EVOLUCIÓN DEL SURF

El surf es uno de los deportes más antiguos del mundo. Aunque surfear sobre las olas tuvo su origen en una tradición religiosa y cultural, lo cierto es que el surf se convirtió rápidamente en uno de los deportes acuáticos mundiales. Estas son las fechas más importantes en la historia del surf [4]:

- 3000-1000 aC: los pescadores peruanos construyen y arman ‘caballitos de totora’ para el transporte de redes y la captura de peces.
- 900 aC: Los polinesios montan tablas ‘olo’ como parte de su cultura ceremonial.
- 1769: El botánico Joseph Banks escribe una primera descripción de la manera de tomar las olas de los polinesios en la bahía de Matavai, en Tahití.
- 1778: El capitán James Cook toca las islas de Hawai.

Hoy en día, el surf se ha convertido en un deporte extremo con apoyo de alta tecnología, en el que la hidrodinámica y los materiales juegan un papel muy importante. Los fabricantes de tablas de surf han mejorado sus técnicas; los deportistas de las olas han mejorado sus habilidades. Si se compara una tabla de 1930 (Ilustración 3) con una de la actualidad; se aprecia que la forma ha cambiado algo y los materiales han cambiado, pero no de una manera radical. La aplicación de nuevos materiales ha permitido crear tablas más pequeñas y con diferentes formas. Aun así, la evolución ha sido menos visible que en otros deportes. [4]



Ilustración 3(Surfista con una colección de tablas años 30 [4])

Intentando crear un concepto nuevo del surf, D.Morgan patentó la primera tabla de surf con hydrofoil en 1970 [5], pero no ha tenido repercusión mediática hasta el 2016 cuando Kay Lenny hizo viral un video surfeando con una de éstas [6]. Aunque hoy en día no tenga un sitio sólido en el mercado, se está haciendo un hueco y puede que sea el futuro del surf.

4.3 EI SURFOIL

Pese a que Forlanini patentó el primer hidroala no ha sido hasta en los últimos años cuando ha tenido un impacto real en el surf. “Go foil” marca registrada [6], es una de las marcas punteras en el sector y lleva produciendo e investigando estos artefactos desde 1989 (Ilustraciones 4 y 5). Poseen la patente U.S. No. 9.789.935. La mayor parte de surfoils que se encuentran en el mercado son imitaciones simples de los mismos.



Ilustración 4(Surfoil corriente [6])



Ilustración 5(Deportista surfeando con un Surfoil[6])

El surfoil estándar que existe en el Mercado (Ilustración 4) se compone fundamentalmente de tres partes:

- Mástil: Pieza que une las alas a la tabla de surf
- Ala de sustentación: Ala que se encuentra en la parte delantera, es la encargada de crear la mayor parte de “lift” o fuerza de sustentación.

- Ala de estabilización: Ala que se encuentra en la parte trasera, se encarga de estabilizar el surfoil.

Como ya se ha mencionado, el objetivo del surfoil es reducir la resistencia al avance y esto permite surfear olas más pequeñas sin problemas de velocidad, a veces incluso es posible avanzar sobre el agua sin ola ninguna.

4.4 PRINCIPIOS FÍSICOS

En el siguiente apartado se presentarán y explicarán las diferentes leyes físicas por las que el conjunto genera una sustentación y es capaz de navegar.

4.4.1 Principio de Bernouilli

El teorema de Bernoulli es una aplicación directa del principio de conservación de energía y dice: "En todo fluido ideal (sin viscosidad ni rozamiento), incompresible, en régimen laminar de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de todo su recorrido" [7,8]. Con otras palabras, se dice que si el fluido no intercambia energía con el exterior (por medio de motores, rozamiento, térmica...) esta ha de permanecer constante.

El teorema considera los tres únicos tipos de energía que posee el fluido que pueden cambiar de un punto a otro de la conducción. Estos tipos son; energía cinética, energía potencial gravitatoria y la energía debida a la presión de flujo (hidrostática). Veamos cada una de ellas por separado (Ilustración 6):

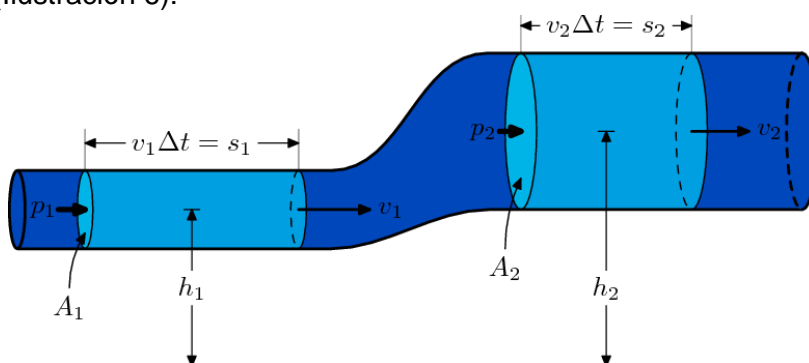


Ilustración 6: Conservación de la energía en fluidos [8]

Energía (hidrodinámica)	cinética Debida a la velocidad de flujo	$\frac{1}{2} \cdot m v^2$
Energía potencial gravitatoria	Debida a la altitud del fluido	mgh
Energía de flujo (hidrostática)	Debida a la presión a la que está sometido el fluido	pV

Por lo tanto, el teorema de Bernoulli se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{1}{2} \cdot m v^2 + mgh + pV = cte \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

- v es la velocidad de flujo del fluido en la sección considerada.
- g es la constante de gravedad.
- h es la altura desde una cota de referencia.
- p es la presión a lo largo de la línea de corriente del fluido (p minúscula).

Si consideramos dos puntos de la misma conducción (1 y 2) la ecuación queda:

$$\frac{1}{2} \cdot m v_1^2 + m g h_1 + p_1 V = \frac{1}{2} \cdot m v_2^2 + m g h_2 + p_2 V \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde m es constante por ser un sistema cerrado y V también lo es por ser un fluido incompresible. Dividiendo todos los términos por V , se obtiene la forma más común de la ecuación de Bernoulli, en función de la densidad del fluido:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho v_1^2 + \rho g h_1 + p_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho v_2^2 + \rho g h_2 + p_2 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Una simplificación que en muchos casos es aceptable es considerar el caso en que la altura es constante, entonces la expresión de la ecuación de Bernoulli, se convierte en:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho v_2^2 + p_2 \quad (\text{Ecuación 4})$$

4.4.2 Efecto Venturi

El efecto Venturi consiste en un fenómeno en el que un fluido en movimiento dentro de un conducto cerrado disminuye su presión cuando aumenta la velocidad al pasar por una zona de sección menor. En ciertas condiciones, cuando el aumento de velocidad es muy grande, se llegan a producir grandes diferencias de presión y entonces, si en este punto del conducto se introduce el extremo de otro conducto, se produce una aspiración del fluido de este conducto, que se mezclará con el que circula por el primer conducto. Este efecto, demostrado en 1797, recibe su nombre del físico italiano Giovanni Battista Venturi [7]. El efecto Venturi se explica por el Principio de Bernoulli y el principio de continuidad de masa. Si el caudal de un fluido es constante pero la sección disminuye, necesariamente la velocidad aumenta tras atravesar esta sección. Por el teorema de la conservación de la energía mecánica, si la energía cinética aumenta, la energía determinada por el valor de la presión disminuye forzosamente.

4.4.3 3ª Ley de movimiento de Newton

La tercera ley de Newton establece que siempre que un objeto ejerce una fuerza sobre un segundo objeto, este ejerce una fuerza de igual magnitud y dirección pero en sentido opuesto sobre el primero. Con frecuencia se enuncia así: A cada acción siempre se opone una reacción igual, pero de sentido contrario. En cualquier interacción hay un par de fuerzas de acción y reacción situadas en la misma dirección con igual magnitud y sentidos opuestos. Algunos ejemplos donde actúan las fuerzas acción-reacción son los siguientes:

- Si una persona empuja a otra de peso similar, las dos se mueven con la misma velocidad, pero en sentido contrario.
- Cuando saltamos, empujamos a la tierra hacia abajo, que no se mueve debido a su gran masa, y esta nos empuja con la misma intensidad hacia arriba.
- Una persona que rema en un bote empuja el agua con el remo en un sentido y el agua responde empujando el bote en sentido opuesto.
- Cuando caminamos empujamos a la tierra hacia atrás con nuestros pies, a lo que la tierra responde empujándonos a nosotros hacia delante, haciendo que avancemos.

4.4.4 Efecto Coanda

En mecánica de fluidos, el efecto Coandă es el fenómeno físico en el cual una corriente de fluido gaseosa o líquida tiende a ser atraída por una superficie vecina a su trayectoria. El término fue acuñado por Albert Metral en honor al ingeniero aeronáutico rumano Henri Coandă, quien descubrió el efecto en su prototipo de un avión de reacción.

El efecto Coandă fue descubierto en 1910 por Coandă (1885-1972), que se interesó en el fenómeno después de haber destruido un prototipo de aeroplano desarrollado por él (Coandă-1910).

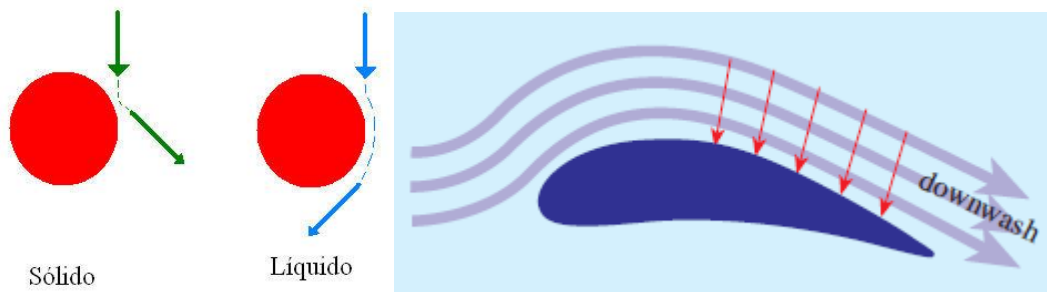


Ilustración 7(efecto Coanda en una pelota[9])

Ilustración 8(efecto Coanda en un perfil[9])

Como se observa en la ilustración 8 las láminas de fluido que interactúan con las caras del perfil tienden a seguir su trayectoria. A diferencia de los sólidos los fluidos tienden a seguir la superficie con la que entran en contacto como se muestra en la ilustración 7. En un caso idílico este fluido seguiría la cara a lo largo de todo el perfil, pero en la realidad el fluido se desprende debido al concepto de capa límite. [9]

4.4.5 Capa límite

En mecánica de fluidos, la capa límite o capa fronteriza de un fluido es la zona donde el movimiento de éste es perturbado por la presencia de un sólido con el que está en contacto. La capa límite se entiende como aquella en la que la velocidad del fluido respecto al sólido en movimiento varía desde cero hasta el 99% de la velocidad de la corriente no perturbada [10].

La capa límite puede ser laminar o turbulenta; aunque también pueden coexistir en ella zonas de flujo laminar y de flujo turbulento. En ocasiones es de utilidad que la capa límite sea turbulenta.

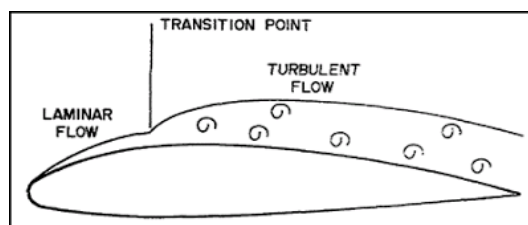


Ilustración 9(formación de la capa límite en un perfil [9])

Este fenómeno es de vital importancia en el estudio de la hidrodinámica de las alas, como se verá en el desarrollo de este proyecto. El objetivo es retrasar el punto de desprendimiento lo más atrás posible para crear las mínimas turbulencias posibles y así menos resistencia al avance. En la ilustración (9) la capa límite se forma en el “transition point” señalado, es la capa que separa el régimen laminar del turbulento.

4.5 EL PERFIL AERODINÁMICO

Para el diseño aerodinámico e hidrodinámico, existe una inmensa variedad de perfiles, no obstante, la forma básica es siempre la misma. El perfil tiene un borde redondeado (borde de ataque) que se enfrenta a la corriente incidente y un borde afinado (borde de salida o de fuga) en la parte posterior (Ilustración 10). El diseño de ambos bordes, como se verá más adelante, es responsable del correcto comportamiento del perfil desde el punto de vista aerodinámico o hidrodinámico [10].

Normalmente, los perfiles se dibujan horizontales denominándose extradós o cara de succión a la parte superior del perfil de aspecto convexo e intradós o cara de presión a la inferior de aspecto cóncavo. Como se verá en las siguientes páginas, ninguna de estas características geométricas comentadas es gratuita, cumpliendo cada una de ellas funciones específicas que juntas caracterizan el eficaz comportamiento aerodinámico de los perfiles [10].

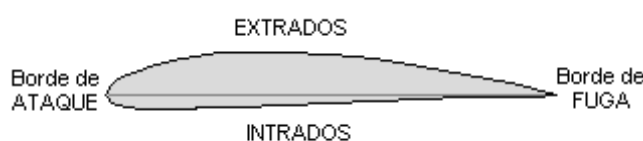


Ilustración 10: partes de un perfil [10]

Esta peculiar forma provoca un estrechamiento en la parte superior, lo que a la vez genera que la velocidad del fluido aumente en esa zona y por consiguiente la presión disminuya. Mientras que en la parte inferior fluye de una manera normal y la presión se mantiene constante, al igual que la velocidad del fluido.

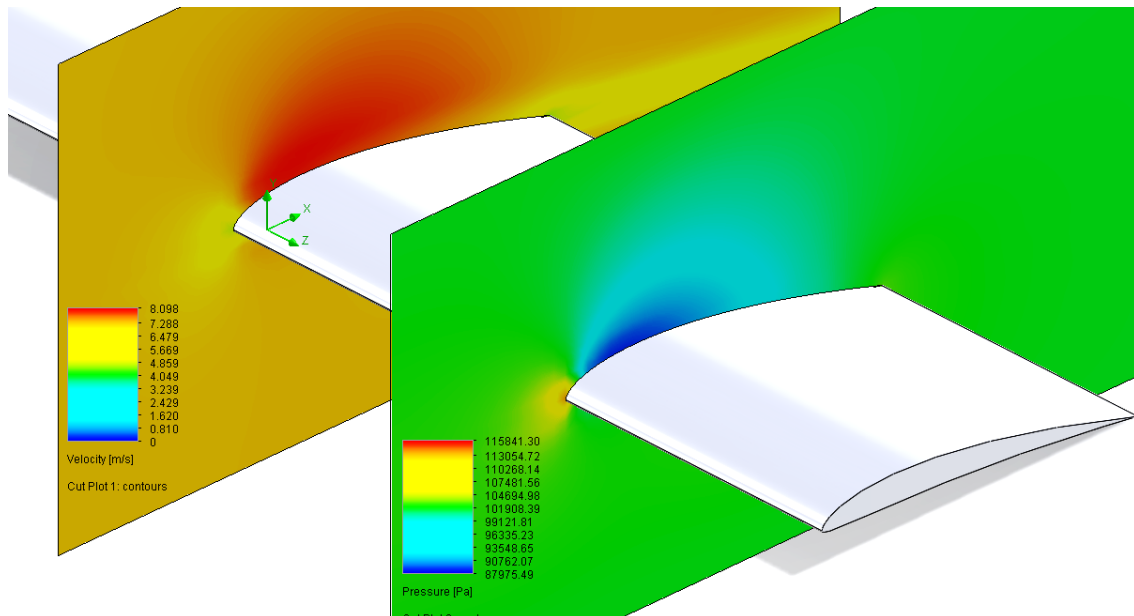


Ilustración 11 (A la sometida a un campo de velocidades en la izquierda y campo de presiones derecha)

La simulación de la Ilustración 11, muestra visualmente con campo de colores. Mientras vemos que las velocidades aumentan en el parte superior, expresado con color rojo; las presiones disminuyen por la ley de conservación de la energía, zona de color azul.

4.5.1 La sustentación, lift o empuje

La sustentación se genera por la combinación de tres diferentes fenómenos, que son el resultado de las leyes anteriormente presentadas [11]:

- Diferencia de presiones: La mayor parte de la sustentación proviene de este fenómeno. El objetivo es crear una zona de depresiones en el extradós (zona superior) y una zona de presiones en el intradós (zona inferior). El efecto Venturi dice que si se hace pasar un fluido por un estrechamiento aumenta la velocidad, y viceversa. Por eso, si conseguimos que el agua recorra una mayor distancia por alguna de las dos caras, la velocidad aumentará. Por la ley de conservación de energía y como Bernoulli investigó; la presión disminuye, de manera proporcional en el que la velocidad aumenta y al contrario si la velocidad disminuye la presión aumenta. Esta diferencia de presión tiende a igualarse por lo que se genera una fuerza de sentido vertical. Esta fuerza es dependiente de la superficie alar del perfil y del salto de presiones. Cuando el agua fluye por la cara superior tiene que recorrer un mayor espacio por lo que acelera y su velocidad aumenta.

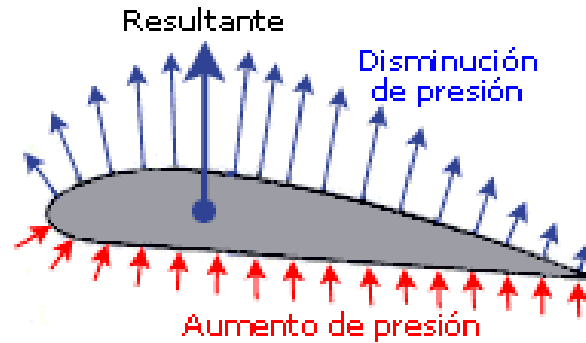


Ilustración 12(Efecto de la diferencia de presiones en un perfil [10])

- **Acción/reacción:** El perfil tiene un ángulo de ataque, por lo que cuando las partículas de agua chocan contra la cara del intradós, transmiten su energía a la hidroala produciendo una fuerza perpendicular.
- **Deflexión:** El término deflexión hace referencia a la "desviación de la dirección de una corriente". Al desviar una corriente de agua por el borde de salida, se desvía con un ángulo que genera una fuerza de sustentación (Ilustración 13).

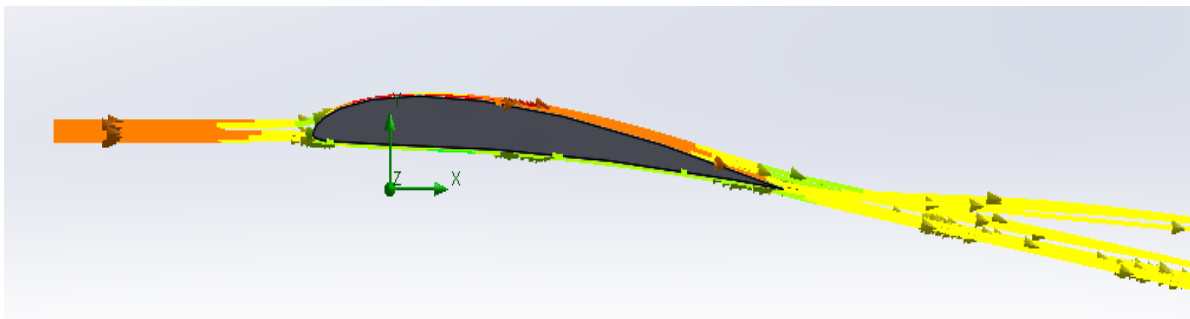


Ilustración 13(Efecto de deflexión en un ala)

4.6 PROGRAMA CAD

El diseño asistido por computadoras (diseño asistido por ordenador en España), más conocido por sus siglas inglesas CAD (computer-aided design), es el uso de un amplio rango de herramientas computacionales que asisten a ingenieros, arquitectos y diseñadores. El CAD es también utilizado en el marco de procesos de administración del ciclo de vida de productos.

Estas herramientas se pueden dividir básicamente en programas de dibujo 2D y de modelado 3D. Las herramientas de dibujo en 2D se basan en entidades geométricas vectoriales como puntos, líneas, arcos y polígonos, con las que se puede operar a través de una interfaz gráfica. Los modeladores en 3D añaden superficies y sólidos.

El CAD fue principalmente inventado por un francés, Pierre Bézier, ingeniero de los Arts et Métiers ParisTech. El ingeniero desarrolló los principios fundamentales del CAD con su programa UNISURF en 1966. [12]

En las herramientas CAD, el usuario puede asociar a cada entidad una serie de propiedades como color, capa, estilo de línea, nombre, definición geométrica, material, etc., que permiten manejar la información de forma lógica. Además se pueden renderizar a través de diferentes motores o softwares como V-Ray, Maxwell Render, Lumion, Flamingo, entre los que son pagados, hay algunos de licencia free and open source como por ejemplo el Kerkythea y Acis, entre los más usados, son modeladores 3D para obtener una previsualización realista del producto, aunque a menudo se prefiere exportar los modelos a programas especializados en visualización y animación, como Autodesk Maya, Bentley MicroStation, Softimage XSI o Cinema 4D y la alternativa libre y gratuita Blender, capaz de modelar, animar y realizar videojuegos.

El programa utilizado para el proyecto es el SOLIDWORKS PREMIUM 2017 SP6, que es uno de los programas CAD más importantes del mundo industrial. [13]

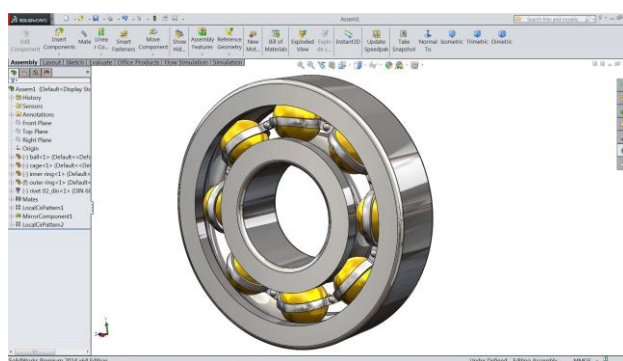


Ilustración 14(Interfaz de Solidworks CAD [13])



Ilustración 15(Logo Solidworks [13])

4.7 ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

El análisis por elementos finitos (FEA, siglas en inglés de Finite Element Analysis) es una técnica de simulación por computador usada en ingeniería. Usa una técnica numérica llamada método de los elementos finitos (FEM). Se utiliza para analizar estructuras sometidas a fuerzas permitiendo que complejos problemas sean resueltos de manera eficaz. Con el debido conocimiento es una herramienta muy potente y de uso generalizado en diseño industrial y mecánico.

Hoy en día hay una infinidad de programas en el mercado. En el mundo laboral los más utilizados son ANSYS, NASTRAN, PATRAN, SOLID EDGE, SOLIDWORKS etc. Para este proyecto se ha utilizado el SOLIDWORKS SIMULATION 2017 SP6 Premium edition, ya que ofrece una gran variedad de posibilidades y es adecuado para el estudio.

SOLIDWORKS Simulation utiliza el método de formulación de desplazamientos de elementos finitos para calcular desplazamientos, deformaciones y tensiones de los componentes con cargas internas y externas. La geometría que se analiza se individualiza con elementos tetraédricos (3D), triangulares (2D) y de vigas, y se resuelve con un solver Direct Sparse o iterativo. SOLIDWORKS Simulation también ofrece el supuesto de simplificación en 2D para las opciones de tensión o deformación de plano, extruidas o axisimétricas. SOLIDWORKS

Simulation puede utilizar un tipo de elemento h adaptativo o p adaptativo, que proporciona una gran ventaja a los diseñadores e ingenieros, ya que el método adaptativo garantiza el hallazgo de la solución. [14]

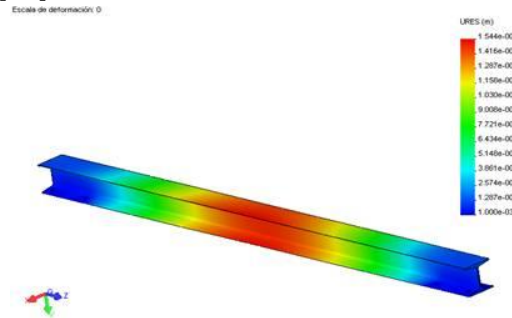


Ilustración 16: Simulación de viga sometida a esfuerzos de flexión [14])

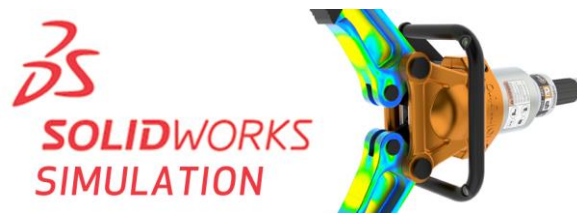


Ilustración 17(logo Solidworks FEM[14])

4.8 ANÁLISIS POR CFD

La Fluidodinámica Computacional (CFD) simula el paso de fluidos (líquidos o gases) a través de un objeto o a su alrededor. El análisis puede ser muy complejo; por ejemplo, puede contener en un cálculo: transferencia de calor, mezclas, y flujos inestables y compresibles. La capacidad de predecir el impacto de dichos flujos en el rendimiento de un producto puede resultar lenta y costosa si no se utiliza ningún tipo de herramienta de simulación. En el presente proyecto se utiliza para calcular las resistencias al avance y la sustentación que generan las diferentes piezas de las que se compone.

Hoy en día hay una infinidad de programas en el mercado. En el mundo laboral los más utilizados son ANSYS, NASTRAN, PATRAN, SOLID EDGE, SOLIDWORKS etc. Para este proyecto se ha utilizado el SOLIDWORKS FLOW SIMULATION 2017 SP6 Premium edition, ya que ofrece una gran variedad de posibilidades y es adecuado para el estudio.

SOLIDWORKS Flow Simulation utiliza el análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD) para permitir una simulación rápida y eficaz del flujo de fluidos y de la transferencia de calor. Puede calcular fácilmente las fuerzas de fluidos y comprender el impacto de un líquido o gas en el rendimiento de un producto.

Estrechamente integrado con el CAD de SOLIDWORKS, el análisis de CFD con SOLIDWORKS Simulation elimina la complejidad del análisis de flujo y puede convertirse en un elemento habitual del proceso de diseño, lo que reduce la necesidad de crear prototipos, acaba con las repeticiones y demoras, y ahorra tiempo y costes de desarrollo.[15]

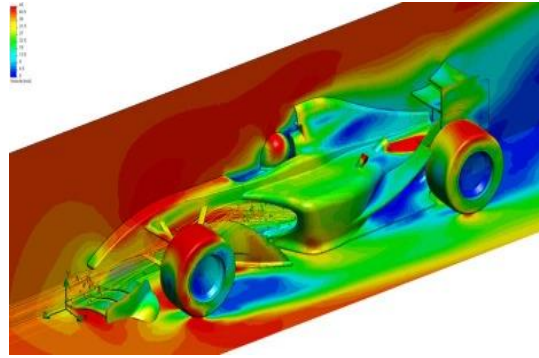


Ilustración 18: resultado de una simulación aerodinámica de un F1 [15]



Ilustración 19(logo Solidworks CFD [15])

5.DESARROLLO DEL TRABAJO

5.1 DISEÑO E HIPÓTESIS INICIALES

En el presente apartado se definen las hipótesis y los criterios seguidos para el diseño y optimización del hidroala.

5.1.1 Hipótesis

Los cálculos llevados a cabo en este proyecto, tales como la resistencia al avance y la sustentación, son dependientes de la velocidad de diseño y del peso del surfista. La velocidad de diseño es la velocidad en la que el hydrofoil va a trabajar. Esta velocidad depende de la ola y de la destreza del surfista, y fluctúa mucho durante la práctica del surf. Y el peso por el contrario es dependiente de la persona que vaya a practicar el deporte.

Por todo ello, se definen como hipótesis de trabajo las siguientes:

- una velocidad de diseño del hydrofoil $v_d = 6,5$ m/s., Pudiendo realizar simulaciones con otras velocidades para su caracterización.
- Peso del surfista $m = 75$ kg

5.1.2 Componentes del hidroala

. Para empezar, es necesario definir las partes de un hydrofoil de manera adecuada y específica.



Ilustración 20(surfoil convencional [6])

- **Mástil:** Parte rígida que une las alas de sustentación con la tabla de surf. Debe resistir todas las fuerzas que se generen y ser lo más hidrodinámica posible.
- **Ala de sustentación:** Es el ala con mayor envergadura donde se produce la mayor parte de la sustentación, se coloca en la parte delantera.
- **Ala de estabilización:** Es el ala que se coloca en la parte más atrasada del conjunto y sirve para aportar estabilidad al conjunto.

5.2 DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL MÁSTIL

5.2.1 Primer boceto

El primer diseño que se hace es a mano alzada (Ilustraciones 21 y 22), pero será la base para su creación. En este primer boceto se dimensiona el mástil de una manera lógica y haciendo un análisis de las opciones que se encuentran en el mercado.

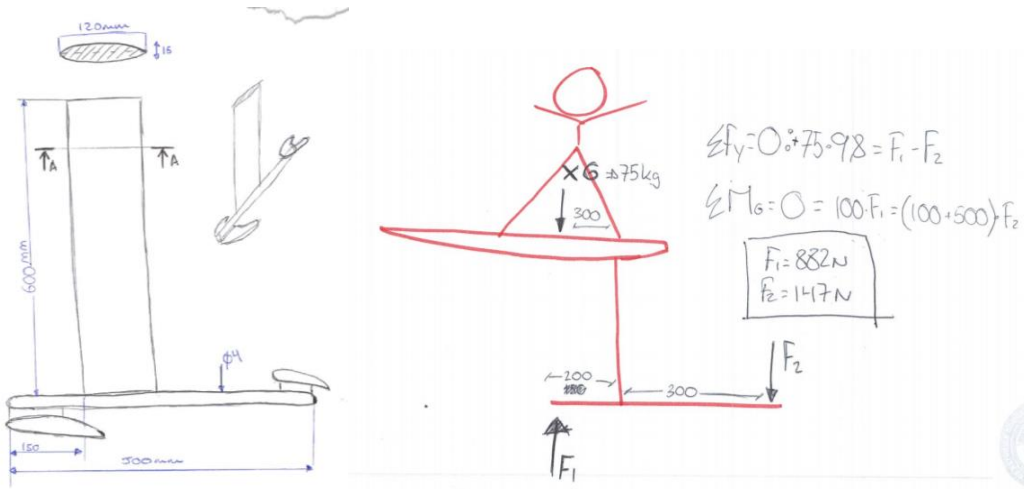


Ilustración 21 (primer boceto de la geometría)

Ilustración 22 (primer boceto del análisis de fuerzas)

Como resultado del boceto (ilustración 22) se obtiene que el ala de sustentación debe generar una fuerza cercana a los 882N en dirección ascendente (F_1). El ala de estabilización deberá generar una fuerza de 147N en dirección contraria (F_2). Esta fuerza, aunque sea negativa, produce un momento positivo.

Dado que es el primer boceto, las medidas que se muestran en las imágenes puede variar durante el diseño. Y las fuerzas a obtener son meramente orientativas ya que el surfista no siempre irá a 6.5 m/s, es fácil que vaya más rápido; y puede variar la fuerza generada por el surfboard con solo variar el ángulo de la tabla.

5.2.2 CAD 3D

Se empieza a crear el ala desde el mástil ya que es la estructura central y en la que se transmiten todas las fuerzas. Para ello se utiliza el programa Java foil [16], este programa cuenta con una base de datos muy amplia y con mucha información. El objetivo es encontrar un perfil para el mástil adecuado a nuestras necesidades.

El coeficiente de "drag" o coeficiente de resistencia al avance, se denomina C_d y varía dependiendo del perfil y del ángulo de ataque. El mástil actuará con un ángulo de 0° respecto a la velocidad del agua, con lo que hay que hallar el C_d del perfil a 0° de ángulo de ataque. Se escoge un perfil con una geometría relajada y suave (Ilustración 24, el otro por lo contrario es más agresivo y ambicioso (Ilustración 23).

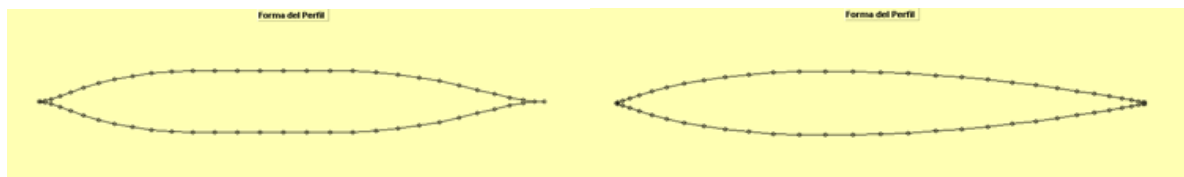


Ilustración 23 (perfil Parasec)

Ilustración 24 (perfil NACA0012)

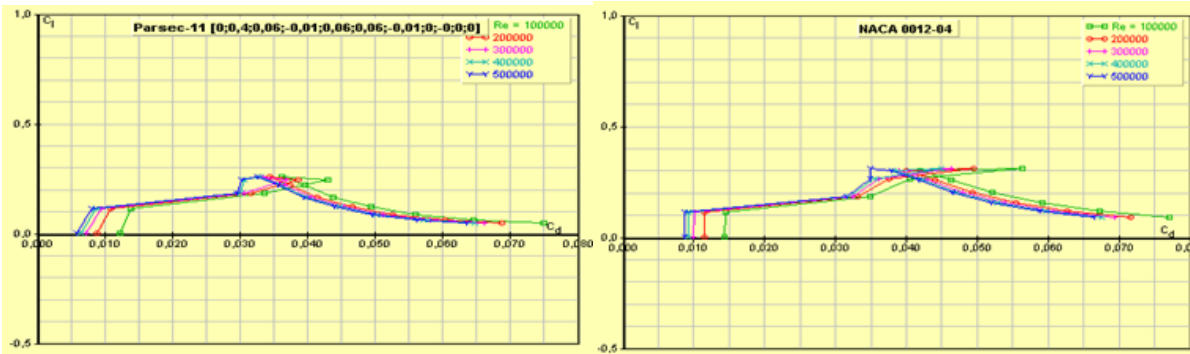


Ilustración 25(gráfico coeficiente de drag Parsec)

Ilustración 26(gráfico coeficiente de drag NACA0012)

Aunque ambos sean perfiles muy similares, el Parsec tiene un menor C_d o coeficiente de drag, a 0° de ángulo de ataque, como se puede observar en la Ilustración 25, pero su agresiva forma podría no ser útil en la práctica. Por eso se escoge el NACA 0012, Ilustración 26, con la arista de ataque suavizada para la seguridad del surfista y del entorno que lo rodea.

En este apartado se describe el proceso realizado en el programa SOLIDWORKS para obtener el resultado deseado.

1. El primer paso es plasmar el perfil del mástil.

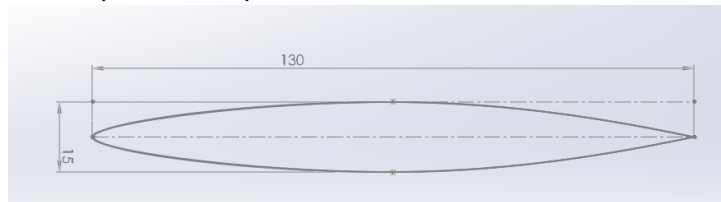


Ilustración 27(geometría del perfil utilizado)

2. Se define la longitud del mástil que será de 500mm.



Ilustración 28(proceso de diseño del mástil)

3. Se le coloca un pie o fuselaje donde se unirán las alas posteriormente.

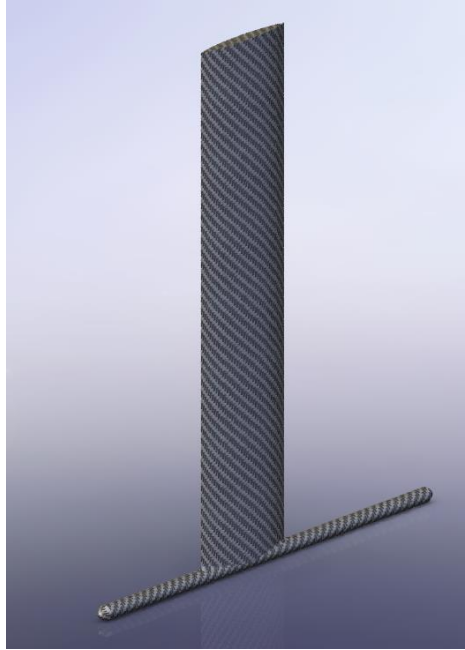


Ilustración 29(mástil)

5.2.3. Propuestas de mejora del mástil

5.2.3.1 Propuesta 1 contrarreloj

Para optimizar la geometría del mástil, como primera propuesta, se comparan los distintos perfiles del cuadro de una bici de contrarreloj y una de montaña. En la de montaña al no importar tanto la aerodinámica, tiene unos perfiles más redondos y las uniones pierden importancia. En la de contrarreloj, en cambio tiene unos perfiles más alargados y las uniones tienen curvas suaves (Ilustraciones 30 y 31).



Ilustración 30(bici de escaladores)

Ilustración 31(bici de contrarreloj)

Aplicándolo al mástil, lo que se pretende es optimizar al máximo el rendimiento hidrodinámico. En la Ilustración 33 se puede observar el nuevo diseño propuesto con las uniones redondeadas en la parte inferior del mástil. Una vez los diseños han sido creados en 3D, se procede a simular ambos y comparar los resultados obtenidos.

Esta primera propuesta de mejora se estudia desde los puntos de vista hidrodinámico y estructural. Utilizando SolidWorks Flow Simulation se estudia la hidrodinámica de las geometrías. Primero se simula el diseño inicial sin mejoras y se obtienen una serie de datos que se pueden observar en la tabla 1.

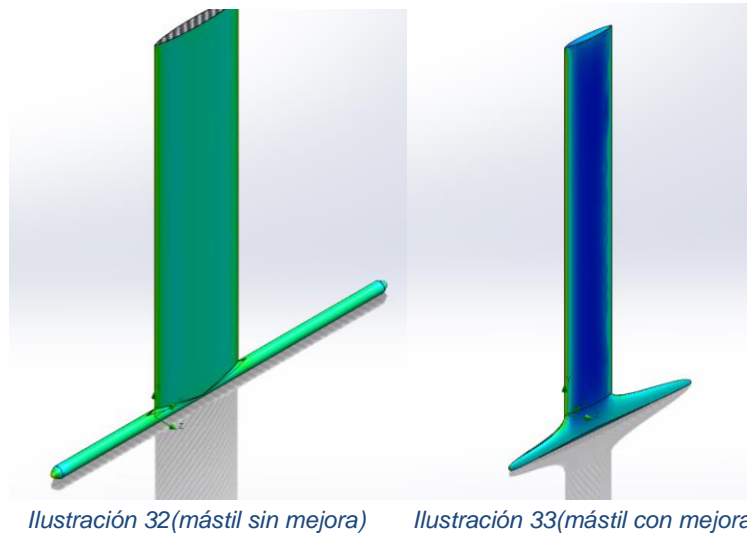


Tabla 1: resultados de fuerzas hidrodinámicas con y sin modificación

Name	Averaged Value	Name	Averaged Value
Drag Force	9.66327 N	Drag Force	11.0162 N
Friction Force	5.68686 N	Friction Force	8.87387 N

Se han calculado el “Drag force” (resistencia al avance) y el “Friction force” (resistencia por rozamiento). Analizando los resultados obtenidos, la resistencia al avance aumenta un 10% mientras que la fuerza por fricción aumenta en un 60%. A primera vista parecen unos resultados decepcionantes, pero si se analizan de forma minuciosa se obtiene una valoración positiva.

Se deduce que el aumento de la resistencia por fricción se debe a que la superficie del mástil ha aumentado y por consiguiente ha aumentado la resistencia total.

La diferencia del drag force y el friction force nos da la resistencia inducida por turbulencias. En el mástil original la relación Drag force/Friction force es de 1,7 mientras que en el mástil con la mejora es de 1,2, lo que significa que es más hidrodinámico.

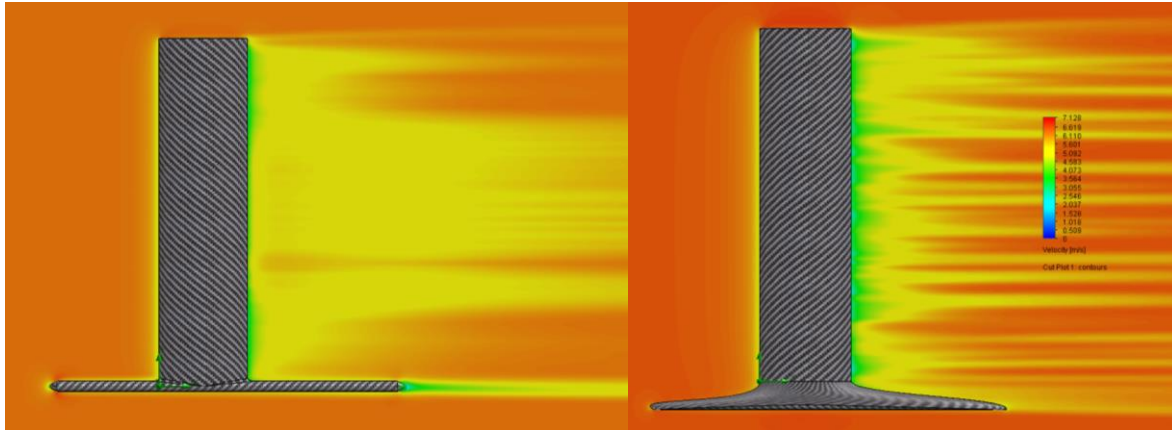


Ilustración 34(campo de velocidades sin mejora)

Ilustración 35(campo de velocidades con mejora)

Observando el campo de velocidades (Ilustraciones 34 y 35), se ve como el primer mástil forma una zona de bajas velocidades a la salida del agua por el pie, mientras que el mástil mejorado no produce zonas de bajas velocidades, confirmando que es más hidrodinámico.

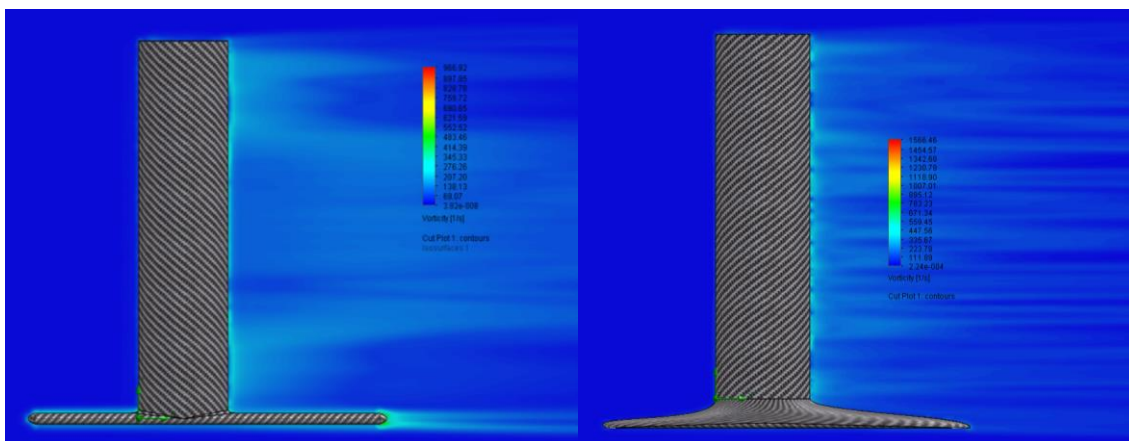
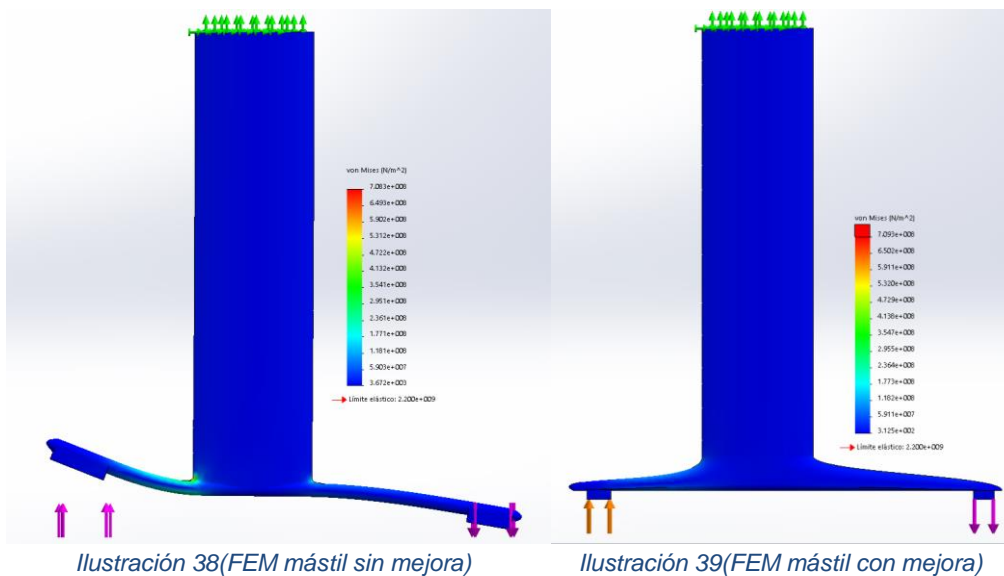


Ilustración 36(campo de vórtices sin mejora)

Ilustración 37(campo de vórtices con mejora)

La vorticidad es una magnitud física empleada en mecánica de fluidos y en el mundo meteorológico para cuantificar la rotación de un fluido. Los vórtices son láminas de agua que dejan de fluir de forma laminar y comienzan a girar en un eje lo cual frena las partículas de agua y se producen zonas de bajas velocidades y altas presiones [18]. Este efecto es el que produce la resistencia por turbulencias y como se observa en las imágenes anteriores el mástil mejorado evita que se produzcan de una manera muy satisfactoria, lo que confirma que es más hidrodinámico.

A continuación, se estudia la resistencia mecánica mediante la simulación por elementos finitos con SolidWorks FEM. El análisis por elementos finitos comprueba la resistencia del material ante las fuerzas que se generan en el mástil. En esta simulación solo se quiere hacer una comparación entre ambos mástiles y ver como reparten las tensiones en su geometría. Por ese motivo se escoge el mismo material que se explicara más tarde en detalle [19]. Las fuerzas que se simulan son de valor y dirección iguales a la ilustración 23(primer boceto del análisis de fuerzas).



Analizando los resultados se observa como el primer mástil en la unión del pie del mástil al vertical se forma un área donde la tensión se dispara (Ilustración 38). Esto es debido a que la unión se hace a 90°; en cambio en el mástil mejorado se observa cómo esta tensión se reparte a lo largo de la curva y no se genera un punto de concentración de tensiones (Ilustración 39).

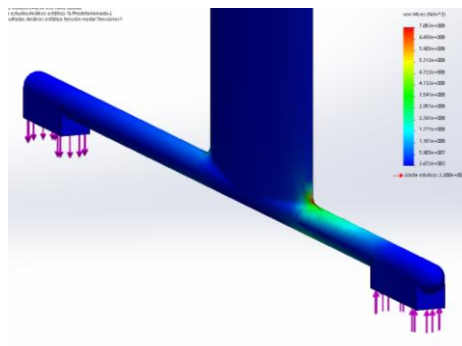


Ilustración 40 (posible problema de concentración de tensiones)

Puntos como estos donde la tensión se dispara en zonas muy concentradas es conveniente evitar dado que con el tiempo se podrían producir roturas o fallos por fatiga (Ilustración 40).

En conclusión, después de analizar todos los aspectos se deduce que la mejora aplicada al mástil es útil, y a pesar de que su resistencia al avance aumente ligeramente, es más hidrodinámico y soporta mejor los esfuerzos.

5.2.3.1 Propuesta 2: Tecnología de tubérculos

La Biomimética consiste en hacer diseños basados en animales y la naturaleza. Los peces han evolucionado de forma que han optimizado al máximo sus cuerpos para ser lo más hidrodinámicos posibles.

Las ballenas más grandes del planeta, la ballena jorobada, posee unos tubérculos en sus aletas delanteras. Estos tubérculos han sido estudiados para conocer el fin por lo que la evolución los ha mantenido. El resultado es que las ballenas jorobadas logran reducir

considerablemente la resistencia al avance gracias a estas perturbaciones. Logran que la presión generada en la arista de ataque se reparta de manera no uniforme y beneficiosa para la aleta delantera como se observa en la Ilustración 41. [17]



Ilustración 41(aleta delantera de ballena jorobada)

Esta mejora se aplica en la arista de ataque del mástil y para cuantificar el porcentaje de mejora se someten a simulación dos mástiles, uno con la tecnología de jorobas (Ilustración 42) y la otra sin ella (Ilustración 43). Los dos mástiles tienen la misma envergadura.

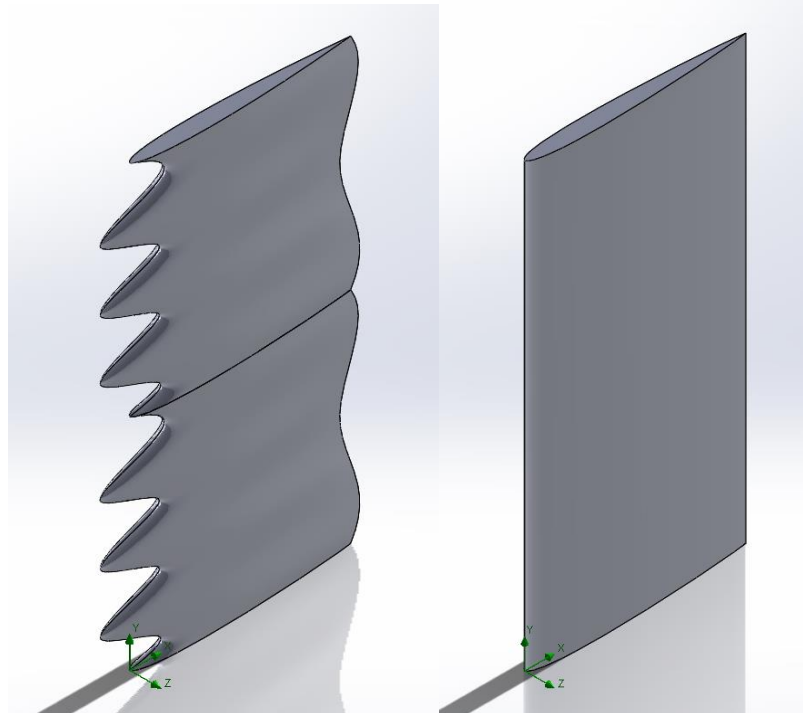


Ilustración 42(mástil con tecnología de jorobas) Ilustración 43(mástil corriente)

Se han hecho varias simulaciones con el CFD de SolidWorks a diferentes velocidades de agua para determinar su comportamiento en diferentes condiciones, que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2: resultados de las simulaciones CFD a distintas velocidades

VELOCIDAD(m/s)	RESISTENCIA AL AVANCE MÁSTIL DE TUBÉRCULOS	RESISTENCIA AL AVANCE DEL MÁSTIL LISO	MEJORA
20	86.3713 N	137.437 N	37%
10	21.6 N	31.44 N	31%
5	5.45 N	7.9 N	30%

Los resultados son muy satisfactorios, aunque para asegurarse de dicha mejora y estudiarla a fondo se deberían hacer prototipos y probarlos en campo. A continuación, se analizan diferentes resultados de la simulación.

- Campo de velocidades.

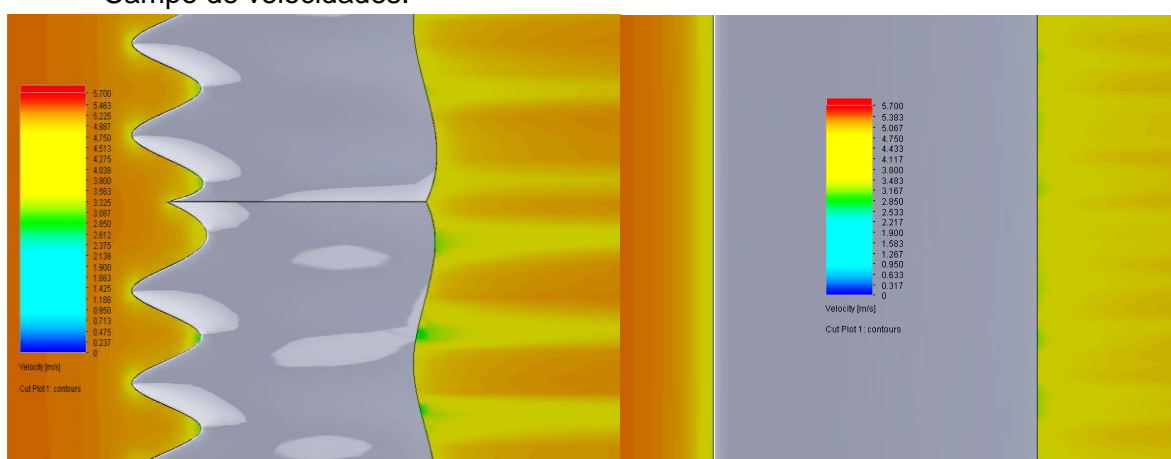


Ilustración 44(campo de velocidades)

Ilustración 45(campo de velocidades)

Se observa como el mástil con jorbas (Ilustración 44) genera una estela menos irregular que el mástil liso (Ilustración 45), y aunque genere campos de menor velocidad en conjunto los tubérculos lo hacen más hidrodinámico.

- Superficie de presiones.

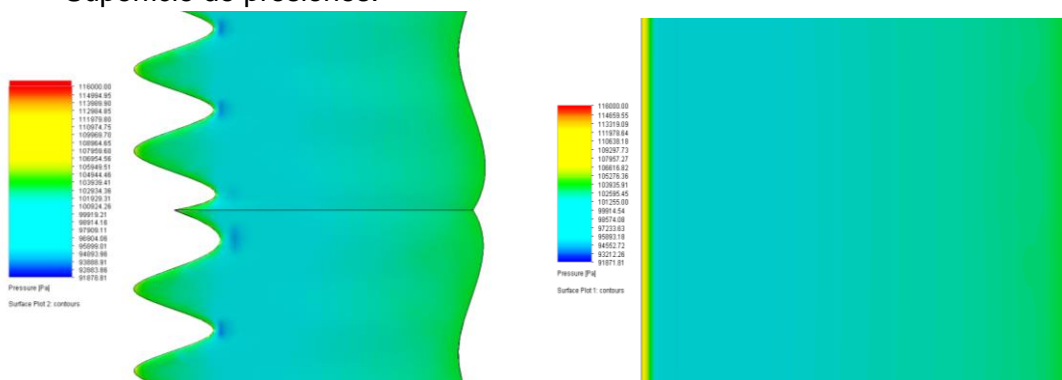


Ilustración 46(superficie de presiones)

Ilustración 47(superficie de presiones)

El campo de presiones muestra como en el mástil con jorbas (Ilustración 46) en el valle de las mismas, la presión disminuye de manera notable haciendo que acelere en ese sector.

Esto hace que el agua fluya de una manera más rápida. Además de esto las presiones máximas que se alcanzan en el mástil mejorado son menores, lo que significa que el agua fluirá de una manera más rápida y sin formar turbulencias.

- Campo y superficie de vórtices.

Los vórtices son láminas de agua que dejan de fluir de manera laminar para hacerlo de una manera caótica. Lo ideal sería que no se formara ningún vórtice durante el paso del agua, pero es algo inevitable.

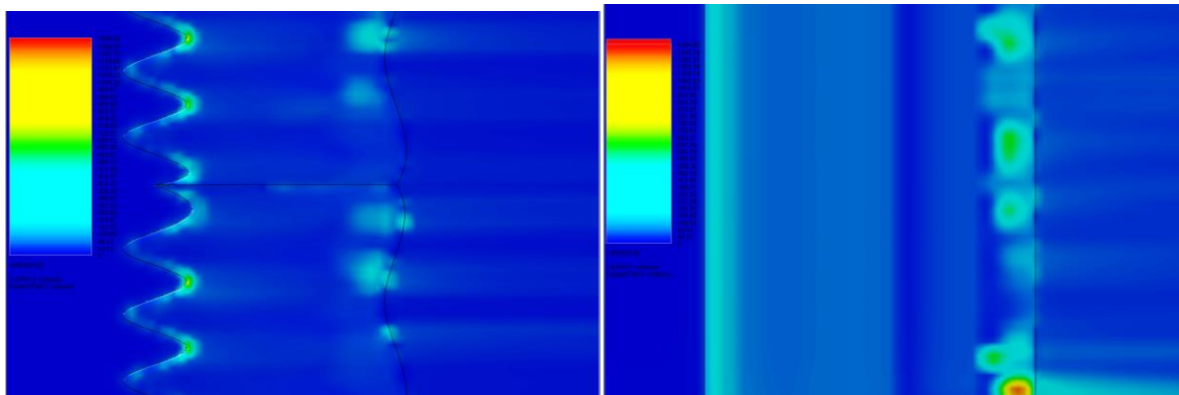


Ilustración 48(campo y superficie de vórtices)

Ilustración 49(campo y superficie de vórtices)

Como se puede comprobar en las imágenes y como los resultados demuestran el mástil con jorobas (Ilustración 48) genera menos cantidad de vórtices y de menor tamaño que el original (Ilustración 49), lo que significa que es más hidrodinámico y esto ratifica los resultados.

Como se ha comentado anteriormente, la baja resistencia al avance debe ser una de las características más importantes del mástil. Esta resistencia es generada por la fricción de las partículas del agua contra la superficie en cuestión y por las turbulencias o vórtices generados. Un vórtice es un flujo turbulento en rotación espiral con trayectorias de corriente cerradas. Como vórtice puede considerarse cualquier tipo de flujo circular o rotatorio que posee vorticidad. La vorticidad es un concepto matemático usado en dinámica de fluidos que se puede relacionar con la cantidad de circulación o rotación de un fluido. La vorticidad se define como la circulación por unidad de área en un punto del flujo. La situación óptima es la de vorticidad 0; pero es una situación teórica, por lo que el objetivo debe ser que la vorticidad sea la más pequeña posible. Esto se logra creando curvas suaves por donde el agua fluya de forma laminar.

5.2.4 Análisis Cfd

Se ha llevado a cabo la simulación CFD de la geometría completa del mástil, simulación que ha durado 2 horas desde su inicio debido a que el ordenador ha procesado más de un millón de partículas de agua interaccionando con el mástil.

Tabla 3: resultados CFD de la geometría propuesta

Nombre	Averaged Value
Drag Force	10,8739 N
Friction Force	8,1729 N

Tras analizar los datos finales (Tabla 3) la resistencia total obtenida es de $R= 10,8739\text{N}$ lo que equivale a $m= 1,109\text{ kg}$ aplicando la 2ª Ley de Newton. Es un resultado muy satisfactorio ya que un nadador medio es capaz de generar $F= 15\text{ kg } 9,8\text{ m/s}^2= 147\text{ N}$ de fuerza, sin tener en cuenta la fuerza que generaría la pendiente de una ola.

Las siguientes ilustraciones 50 y 51 muestran la estrecha relación entre la vorticidad y la velocidad, ya que donde más vórtices es donde la velocidad es más lenta. Estas turbulencias que se muestran en la imagen 50 se muestran de color verde. Hacen que el fluido pierda velocidad como se muestran las zonas de baja velocidad en la imagen 51 de color amarillo.

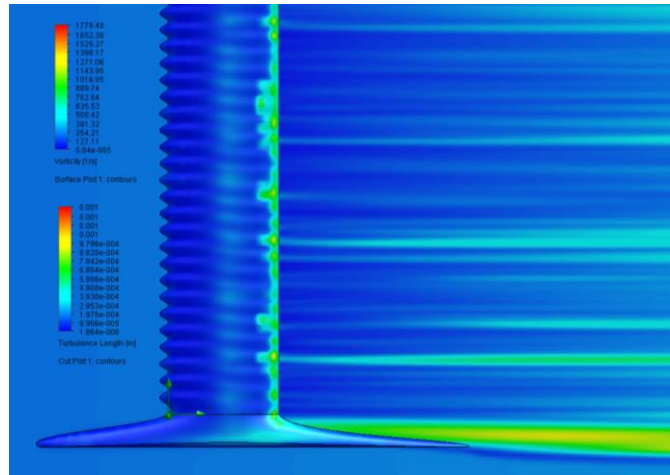


Ilustración 50(campo de longitud de turbulencia y superficie de vorticidad)

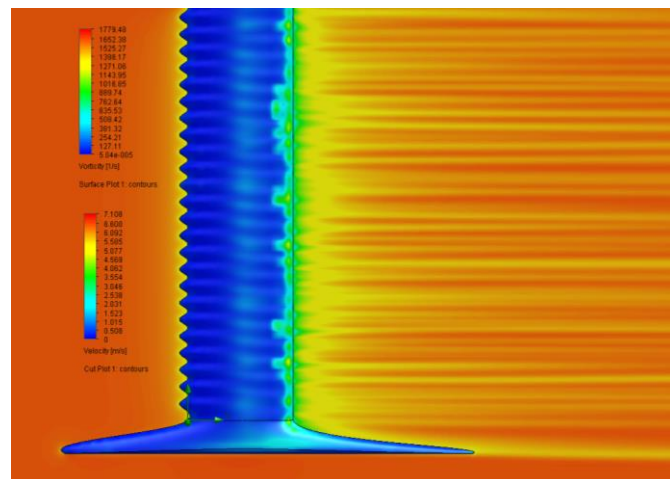


Ilustración 51(relación entre el campo de velocidad y superficie de vorticidad)

5.2.5 Análisis FEM

Para el análisis de elementos finitos la geometría del perfil ha tenido que ser simplificada y las jorobas han sido omitidas ya la geometría que se creaba era demasiado complicada para el análisis.

El objetivo de este estudio es ver los esfuerzos que se generan debidas a las fuerzas exteriores, analizando los puntos donde se concentren los esfuerzos para su posterior rediseño si fuera necesario.

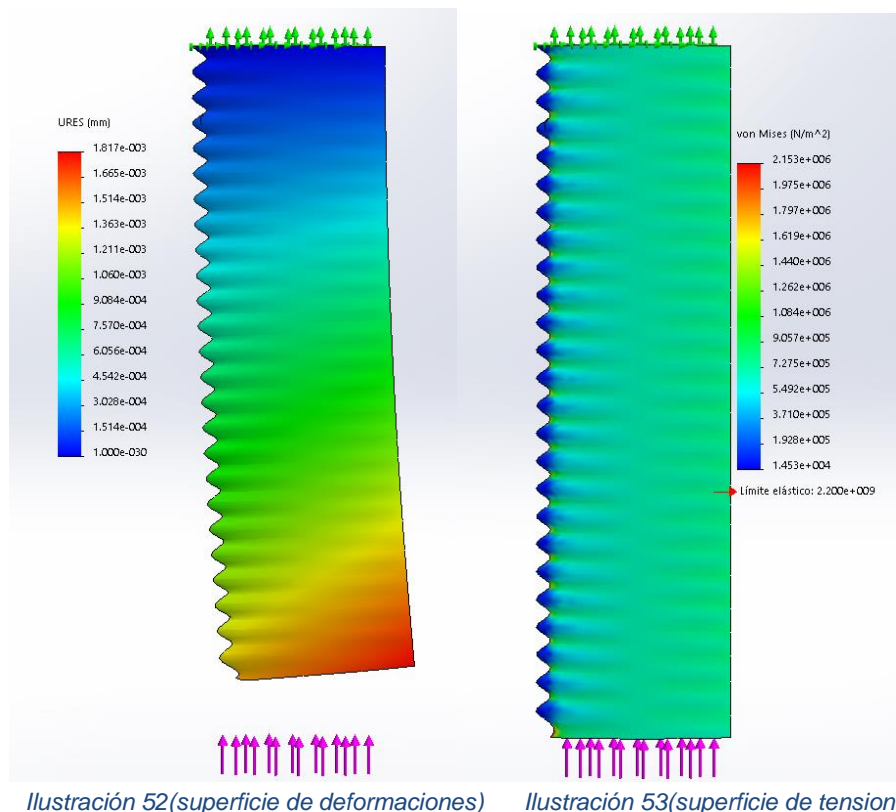
Las fuerzas reflejadas en el primer boceto (Ilustración 22), son de una situación idílica por lo que a estas fuerzas se les aplicará un coeficiente de seguridad. No se prevé que se generen el doble de las fuerzas de diseño, pero es con lo que se analizará para estar seguros de que el mástil es robusto y resistente.

El material que se utiliza será la fibra de carbono y es importante definir las propiedades del mismo para una correcta simulación (Tabla 4). Hay que tener en cuenta que la fibra de carbono a pesar de ser un material muy resistente sus propiedades varían mucho dependiendo del proceso de curado y la resina con la que se cure, por lo que para el análisis se ha escogido una fibra de carbono curada con epoxi a 120°C de bajo módulo con las siguientes propiedades.

Tabla 4: propiedades mecánicas de la fibra de carbono para la fabricación del Mástil

	FIBRA DE CARBONO DE BAJO MÓDULO
Contenido en Carbono (%)	>55
Densidad (g/m ³)	1.6
Módulo de Young (MPa)	85
Límite elástico (MPa)	350
Alargamiento a la rotura (%)	0.4

[19]



El mástil aguanta sin ningún problema las tensiones generadas. Las tensiones generadas no se acercan al límite elástico como se muestra en la imagen (Ilustración 53). La ilustración (52) muestra la deformación que sufriría y sufre una deformación máxima de 0.001 mm, y no es preocupante. Visto los siguientes resultados, se piensa que se podría afinar más el diseño y

hacer el mástil más estrecho, buscando el límite del material; o por el contrario buscar un material más barato y con peores propiedades.



Ilustración 54(mástil diseño inicial)

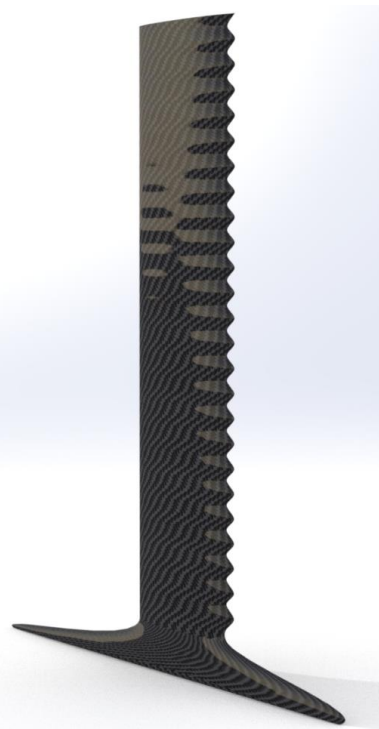


Ilustración 55(mástil diseño TFG)

Tabla 5: resultados de la resistencia al avance del mástil con las nuevas propuestas

	DISEÑO INICIAL	DISEÑO MEJORADO
DRAG (N)	16.4	10.8

Como conclusión, el diseño del mástil propuesto con la tecnología de tubérculos, logra que la resistencia al avance disminuya en un 34,14%, del mismo modo que estéticamente ha mejorado también, pensando en un futuro mercado.

5.3 DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL ALA DE SUSTENTACIÓN

El ala de sustentación es el componente más importante en lo que se refiere a la fuerza necesaria para levantar al surfista. Como ha sido previamente explicado en el Estado del arte, el ala genera una sustentación debido al cambio de presiones, a la desviación del flujo del agua.

5.3.1 Elección del perfil

El perfil del ala de sustentación debe generar la máxima diferencia de presiones entre las caras, pero sin generar turbulencias. Existen muchos tipos de perfiles para generar sustentación. Para escoger el más adecuado, se harán una serie de simulaciones hasta

encontrar el que mejor se adapte a la velocidad y ángulo de ataque que se define en 5° . Todos los objetos de simulación se dimensionan igualmente para que los resultados sean comparables.

Los diferentes perfiles y las respectivas ilustraciones y tablas son propiedad de Airfoil tools.[20]

5.3.1.1 Perfil N-11

En la Ilustración 56 se puede observar el perfil geométrico denominado N-11. Este perfil se ha simulado hidrodinámicamente mediante SolidWorks Flow Simulation para la obtención de la capa límite y el campo de velocidades considerando que el perfil incide contra el agua a una velocidad de 6.5m/s.

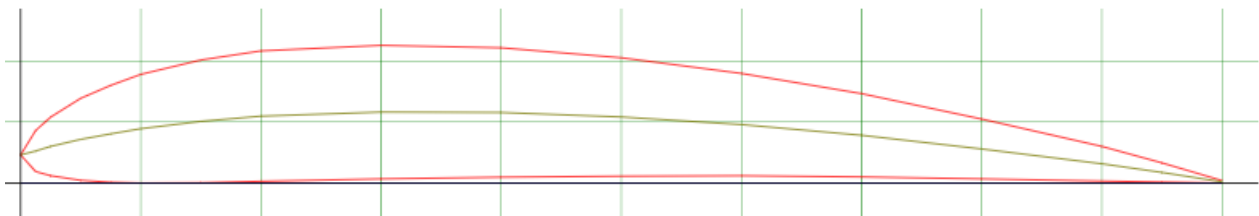


Ilustración 56(perfil geométrico de la N-11)

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN:

- LIFT: 723N Relación Lift/Drag: 7,01
- DRAG: 103N

La relación Lift/Drag es un valor sin unidades que relaciona ambas magnitudes. Cuanto más grande sea este número, más hidrodinámica será el ala.

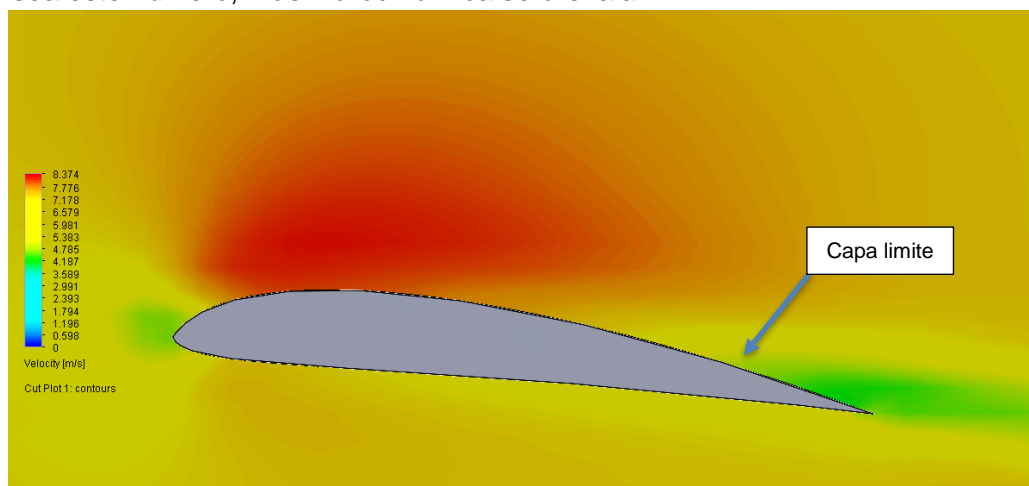


Ilustración 57(análisis de la capa límite y campo de velocidades del perfil N-11)

La primera simulación es realmente buena y los resultados obtenidos son suficientes; pero el objetivo es buscar el mejor modelo. Uno de los aspectos más importantes en la hidrodinámica del perfil, es la formación de la capa límite. Esta se debe formar lo más retrasada posible. En la imagen (Ilustración 57) se ve claramente donde se sitúa, es la zona donde el campo pasa a color verde. Esto significa que el agua disminuye la velocidad drásticamente en esa zona, provocando un efecto de succión y esto provoca la resistencia al avance. En este caso la capa se forma muy atrás y casi no tiene efecto.

5.3.1.2 Perfil EPPLER 1210 AIRFOIL

Este perfil tiene una gran diferencia de volúmenes entre el intradós y el extradós. Debería generar una gran diferencia de presiones entre las caras.

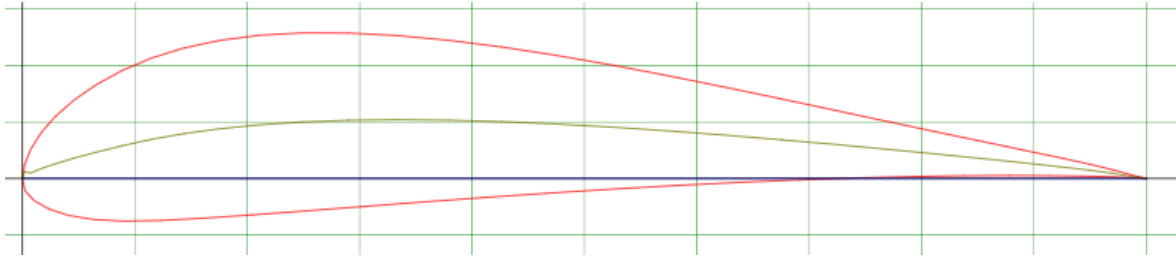


Ilustración 58(geometría del perfil EPPLER 1210)

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN:

- LIFT: 536 N Relación Lift/Drag: 5,25
- DRAG: 102 N

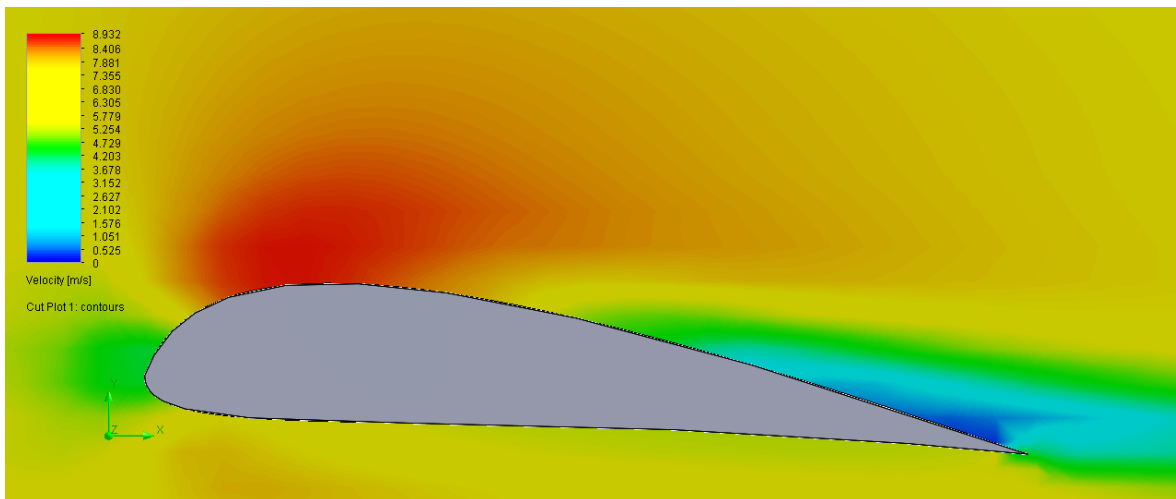


Ilustración 59(análisis de la capa límite y campo de velocidades del perfil EPPLER 1210)

La resistencia al avance o drag no ha variado, pero el lift o la sustentación ha disminuido un 25%. Como se observa en la imagen (Ilustración 59) la capa límite se forma muy pronto y esto genera que el agua se quede casi parada a la salida del perfil. Puede que este perfil funcione bien con fluidos menos densos como el aire, pero debido a la densidad del agua no es una elección adecuada.

5.3.1.3 Perfil RAF 19

El perfil RAF 19 cuya geometría se observa en la Ilustración 60, es un perfil con una forma muy agresiva y diferente a los demás, por lo que se decide someter a estudio.,

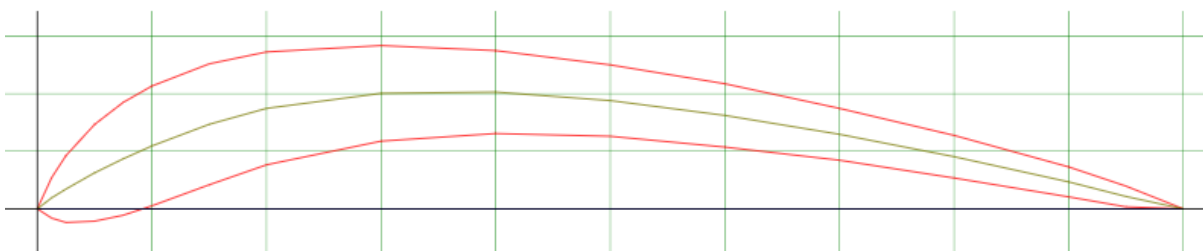


Ilustración 60(geometría del perfil RAF-19)

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN:

- LIFT: 803 N Relación lift/drag: 4,66
- DRAG: 172 N

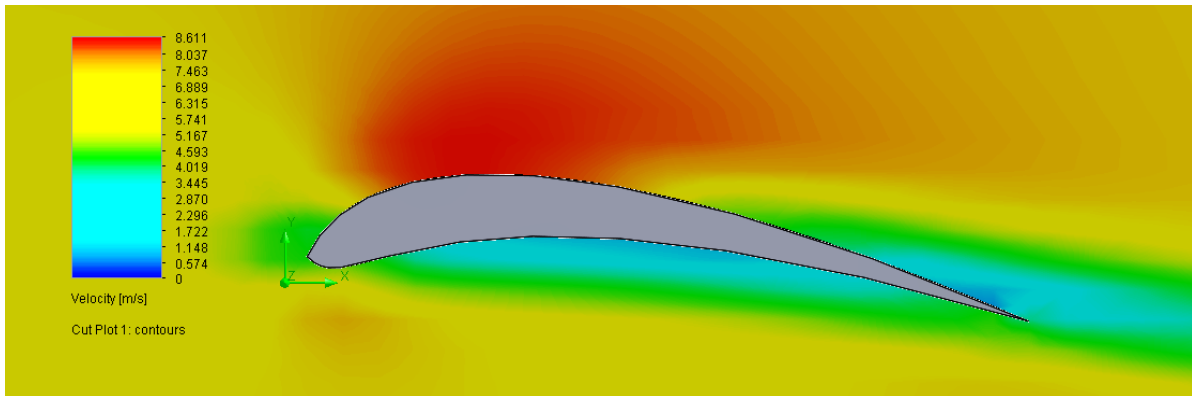


Ilustración 61(análisis de la capa límite y campo de velocidades del perfil RAF-19)

Los resultados obtenidos son sorprendentes dado que se comporta de una manera muy similar a la N-11. Si se analiza el campo de velocidades (Ilustración 61), se ve que trabaja de una manera muy diferente. La RAF 19 gracias a su muy pronunciada curvatura logra crear unas velocidades muy bajas en su parte inferior y por el consiguiente una mayor presión. Esto genera una mayor diferencia de presión y mayor “lift” o fuerza de sustentación. Este perfil tan agresivo y las velocidades tan bajas pueden ser una elección arriesgada ya que su comportamiento a mayores velocidades es muy posible que sea irregular.

5.3.1.4 Perfil DAE-31

Buscando en la base de datos de Airfoil tolos [20] llama la atención un perfil con una forma mezcla del N-11 que produce poca resistencia al avance y del RAF-19 que produce mucho empuje. Dicha geometría se observa en la Ilustración 62.

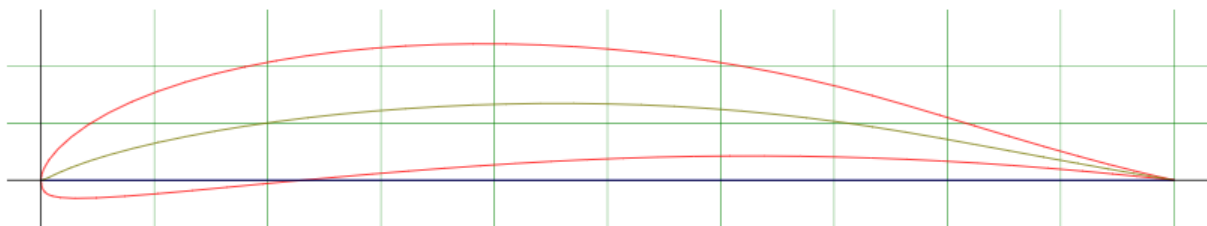


Ilustración 62(geometría del perfil DAE-31)

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN:

- LIFT: 856 N Relación lift/drag: 5,48
- DRAG: 156 N

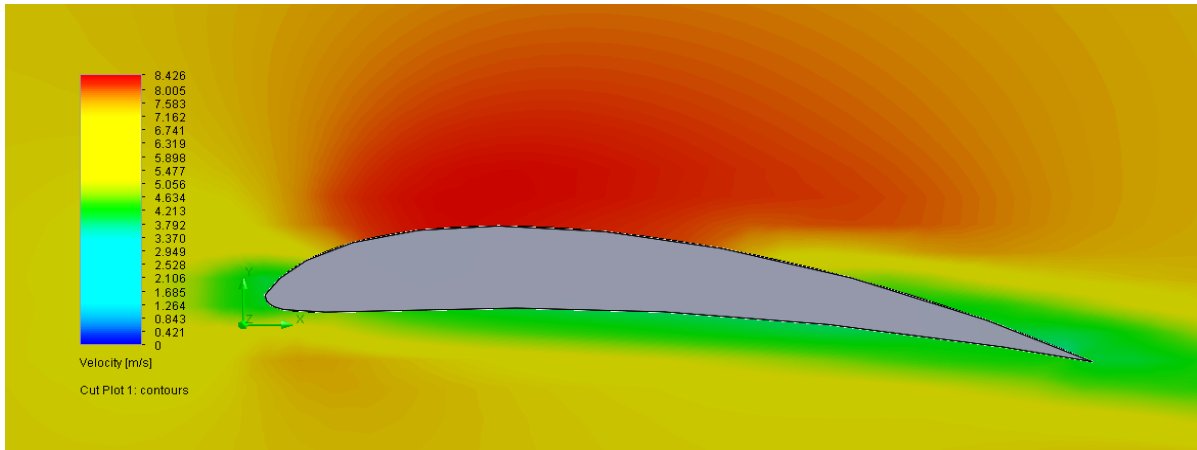


Ilustración 63(análisis de la capa límite y campo de velocidades del perfil DAE-31)

El campo de velocidades (Ilustración 63) confirma el resultado tan bueno obtenido. Se ve como el agua fluye a la mitad de velocidad en el inferior, pero sin llegar a producir velocidades excesivamente lentas. La capa límite se forma en tres cuartos del perfil. Aun generando más empuje que todas las demás, no es tan hidrodinámica como la N-11, la escogida para el diseño ya que tiene un menor valor de resistencia hidrodinámica Drag_{N-11}= 103N frente Drag_{DAE-31}= 156N.

5.3.2 CAD 3D del ala de sustentación

Una vez escogido el perfil del ala de sustentación con menor resistencia hidrodinámica, perfil N-11, se dimensiona para generar un valor cerca de los R= 800N que se han calculado inicialmente (Apartado 5.2.1). Con una envergadura de l= 600 mm, se realiza la simulación CFD con las condiciones de diseño, un campo de agua que incide en el ala a una velocidad de 6.5 m/s y se logra un valor cercano (999.1N) el cual se toma por válido para seguir con el diseño.

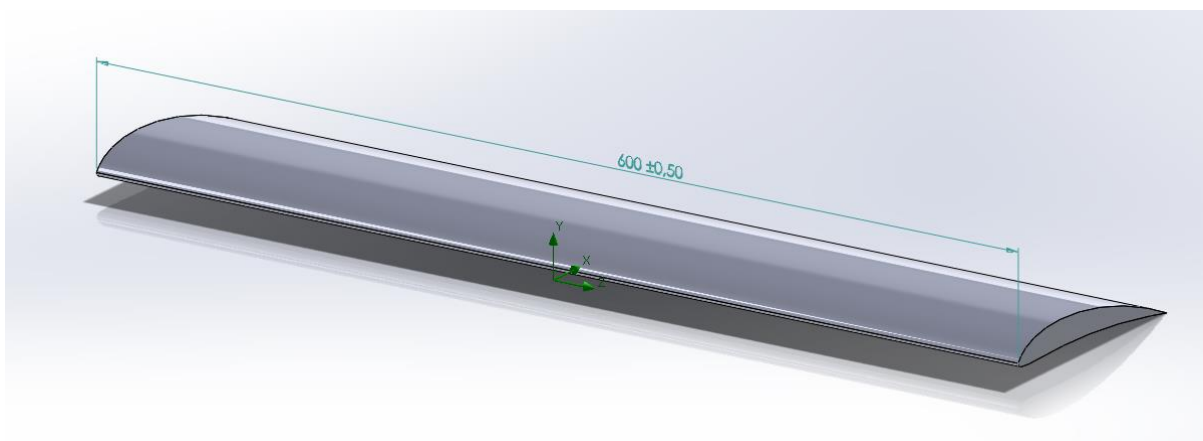


Ilustración 64(proceso de modelado CAD del ala de sustentación)

Los resultados iniciales de la simulación CFD del ala de sustentación con un perfil N-11 y una longitud l= 600 mm, son:

- LIFT: 999.1 N
- DRAG: 150.8 N

5.3.3 Mejoras propuestas para el ala de sustentación

Analizando las diferentes colas de animales marinos grandes como las ballenas (Ilustración 65), se observa que todos tienen una forma muy parecida, que podría ser utilizada para el diseño. La mejora debería reducir la resistencia al avance en mayor medida que el empuje.



Ilustración 65(cola de ballena)

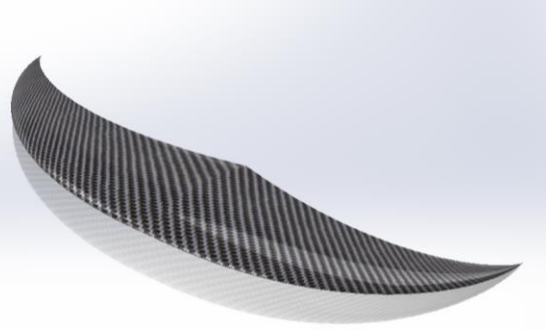


Ilustración 66(la biomiméisis aplicada al ala)

Antes de realizar la simulación se ve que la superficie útil del ala ha disminuido, por lo que se deduce que el lift disminuirá al igual que el drag. Para saber si la mejora es realmente útil, el drag debería descender en mayor medida que lift y la relación lift/drag debe aumentar.

Los resultados de las simulaciones CFD, después de aplicar la mejora del diseño son:

Tabla 6: resultados CFD de las distintas geometrías del ala de sustentación

ALA DE SUSTENTACIÓN	SIN MEJORA (N)	CON MEJORA (N)	PORCENTAJE DE VARIACIÓN (%)
LIFT	999.1	740.5	25%
DRAG	150.8	88.3	41.4%

Como se puede observar en la Tabla 6, el drag ha disminuido un 41,4% más que el lift, y la relación lift/drag ha pasado de 6,6 a 8,4. Mientras que el lift ha subido un 9% el drag o la resistencia al avance ha disminuido un 37%. Esto confirma que el ala con forma de cola de ballena es más hidrodinámica y la mejora está justificada. Por lo tanto, se propone como diseño novedoso para el ala de sustentación la geometría que se observa en la Ilustración 67.

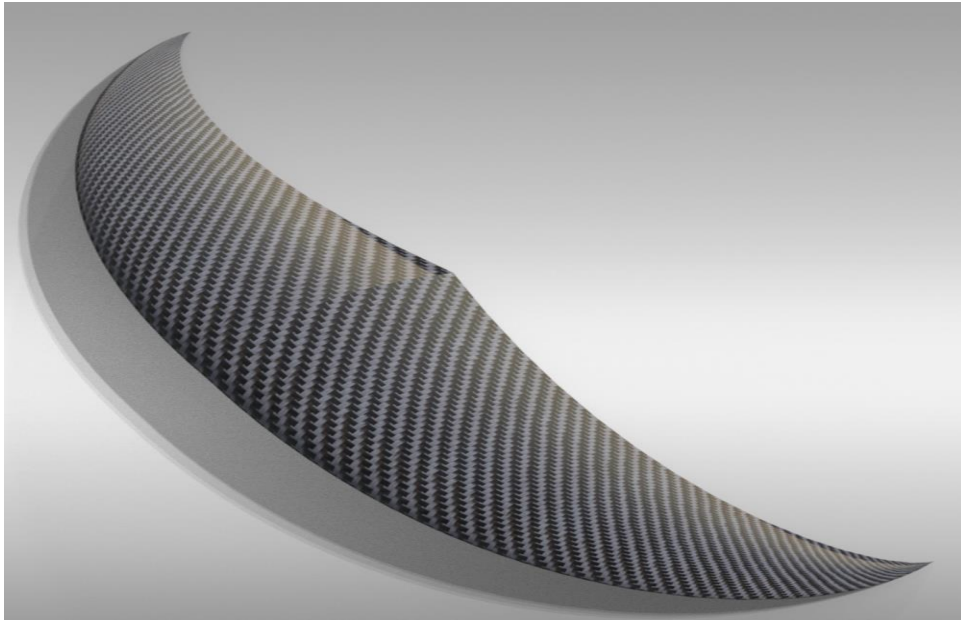


Ilustración 67(aspecto final del hidroala)

Tabla 7: valores hidrodinámicos de la nueva ala de sustentación

	DISEÑO TFG
LIFT (N)	740.5
DRAG (N)	88.3

5.4 DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL ALA DE ESTABILIZACIÓN

El ala de estabilización se encuentra en la parte más atrasada de todo el conjunto, se diseña utilizando el mismo proceso que el ala de sustentación. Tiene el mismo propósito que las aletas traseras de los aviones, es decir, crea una fuerza de sentido contrario al del ala de sustentación para generar un par que ayuda a mantener un mejor equilibrio en el conjunto.

5.4.1 CAD 3D del ala de estabilización

El perfil utilizado como referencia es igual que el del ala de sustentación, el N-11. La única diferencia es que el perfil se invierte para producir una fuerza contraria a la de la sustentación y geoméricamente es más pequeña ($l = 240$ mm), ya que la fuerza a generar es menor (Ilustración 68). Esta fuerza hacia abajo genera un par positivo que ayuda a mantener al surfista a flote.

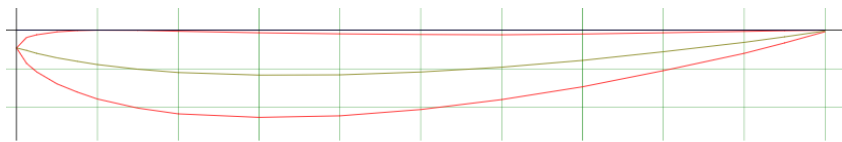


Ilustración 68(geometría del ala de estabilización con el perfil N-11)

5.4.2 Simulaciones ala de estabilización

La envergadura del ala es de 240 mm lo que resulta suficiente para satisfacer las necesidades de diseño. Los resultados CFD dan como resultados:

- LIFT: -115 N
- DRAG: 29,3 N

Al igual que para el ala de sustentación, en el ala de estabilización se realiza una mejora geométrica observando las colas de ballena (Ilustración 69). El resultado CFD se puede observar en la Ilustración 70 y los valores obtenidos son:

- LIFT: -168 N
- DRAG: 30 N

Se observa que el drag se mantiene, pero la capacidad de generar empuje ha aumentado en un 31%.

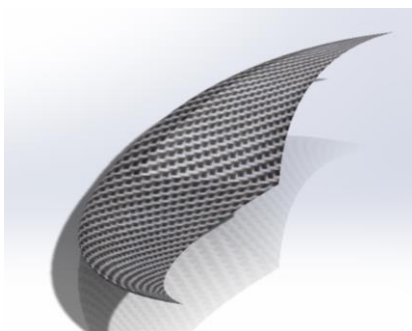


Ilustración 69(ala de estabilización)

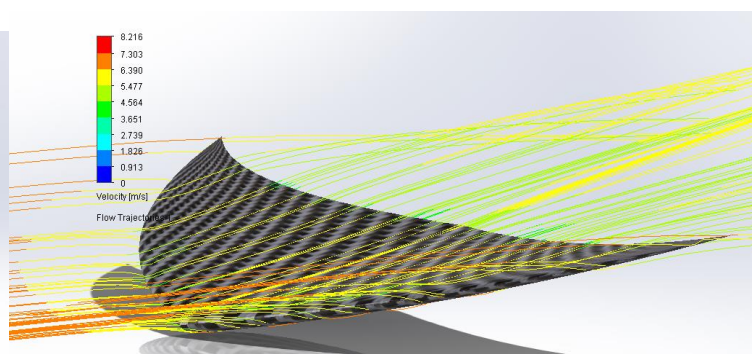


Ilustración 70(ala interactuando con líneas de agua)

5.5 DISEÑO DEL CONJUNTO DEL HIDROALA

Una vez estudiadas todas las partes que componen el hidroala, se ensamblan para obtener el conjunto (Ilustración 71) y se someten a simulaciones tanto mediante FEM como por CFD, comparándolas con el diseño inicial de referencia (Ilustración 72). Dada la complejidad del conjunto las simulaciones no son capaces de analizar el funcionamiento del mismo de una manera adecuada. Para ello se deberían utilizar programas profesionales como ANSYS para el estudio de la estructura y fluent para el estudio del CFD. De todas maneras, se hace la suma de los diferentes valores obtenidos individualmente para formar el resultado final. En el caso del diseño de referencia, son valores obtenidos del trabajo realizado el año previo. Los hydrofoils están sometidos al mismo campo de simulación, lo que quiere decir que geoméricamente tienen la misma envergadura y la velocidad del agua en la simulación es de 6.5m/s para ambos diseños.

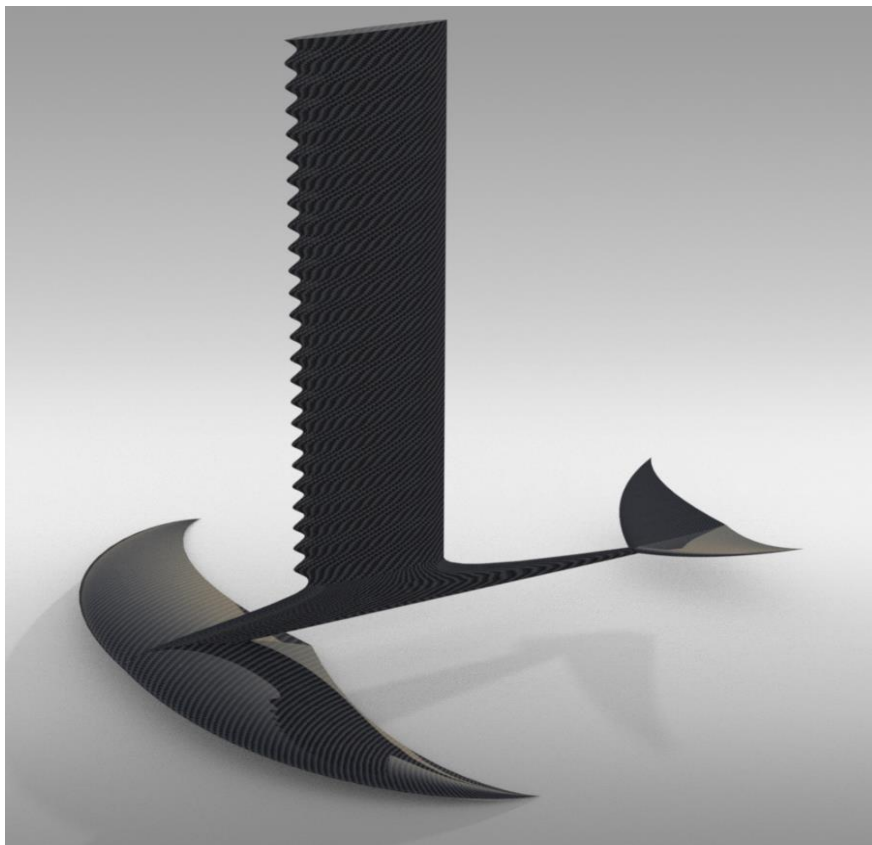


Ilustración 71(conjunto TFG)

Tabla 8: Suma de los resultados diseño TFG

	DISEÑO TFG
LIFT	908 N
DRAG	129 N

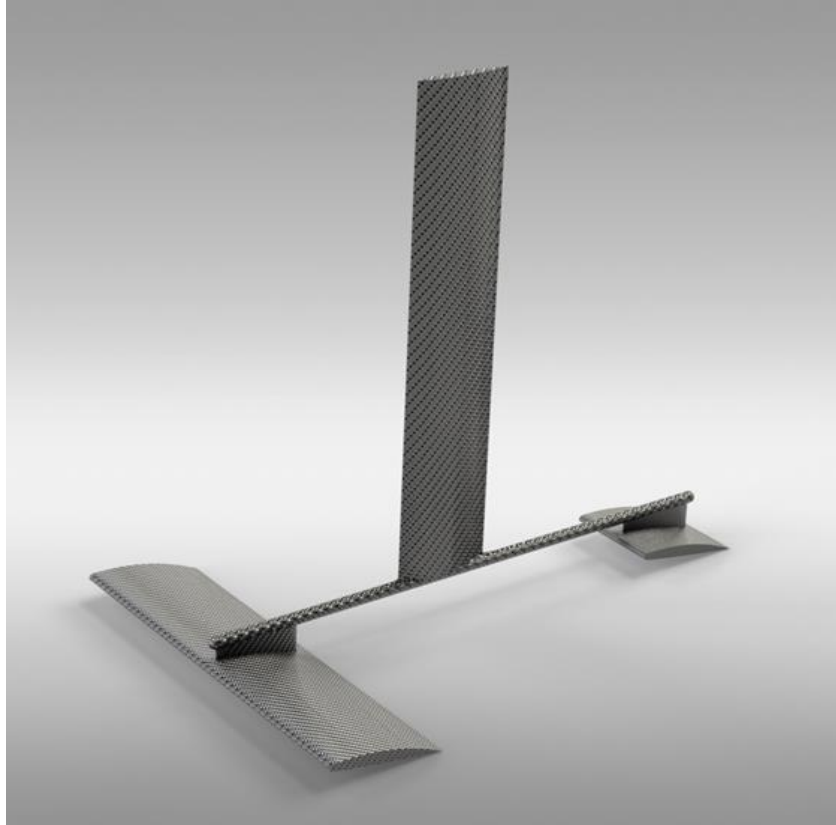


Ilustración 72(conjunto diseño referencia)

Tabla 9: Suma de los resultados diseño referencia

	DISEÑO 2017
LIFT	795
DRAG	185.7 N

El conjunto entero sumando todas las fuerzas generadas por cada uno de los componentes ha aumentado em empuje en un 12% mientras que ha disminuido la resistencia al avance o drag en un 30.5%. Una esfera de 150mm de diámetro sufre una resistencia al avance de 77 N, comprobado con una simulación. El hidroala que tiene una envergadura de casi cuatro veces la esfera produce, 129 N, esto habla de la buena hidrodinámica que posee el diseño.

CONCLUSIONES

Las conclusiones del presente Trabajo Fin de Grado son las siguientes:

- Las mejoras basadas en la biomímesis, en concreto, en la tecnología de tubérculos que se fija en las aletas y colas de las ballenas han resultado efectivas.
- El nuevo diseño del hidroala para la práctica del surf, mejora la capacidad de sustentación un 10% y reduce la resistencia al avance un 33% frente a un diseño convencional.
- La utilización del programa SolidWorks tanto para diseño como para las simulaciones mecánicas y fluidodinámicas ha facilitado la realización del presente TFG.
- Para simulaciones complejas se deberían utilizar programas profesionales y especializados para ello.
- Los resultados obtenidos pueden dar lugar a futuros trabajos de investigación fabricando y probando prototipos a escala real.

REFERENCIAS

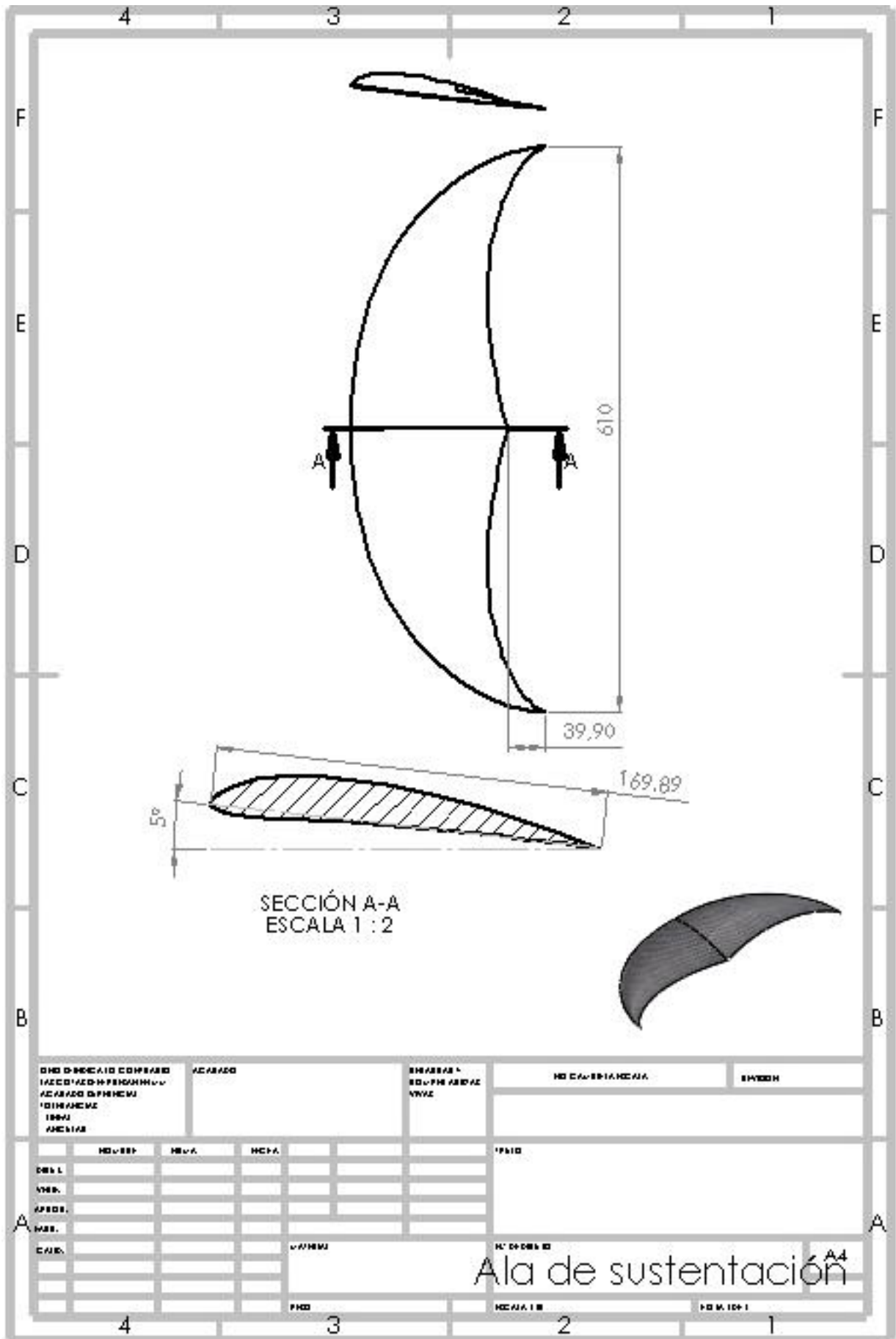
- [1]- Forlanini, E. (1898) *Patente US1024067A*.
- [2]- Bruce, R. (1973). *Bell: Alexander Graham Bell and the Conquest of Solitude*. Cornell: Little, Brown & Company.
- [3]- Oliveira, J. (2014). *Hidroalas El HMCS Bras d'Or*. Accedido 07 septiembre, 2018, de <https://vadebarcos.net/2014/09/21/hidroalas-hmcs-bras-dor-hydrofoil.com>
- [4]- Esparza, D.E. (2011). *El surf del Capitán Cook a los "Beach boys"*. Clío: Revista de historia, Nº 121(ISSN 1579-3532), 80-87.
- [5]- Morgan, D. (1970). *Patente US3747138A Hydrofoil surfboards*
- [6]- Go foil, G.F. (2018). *Go Foil*. Acedido 7 November, 2018, de <https://gofoil.com/about-us>.
- [7]- Levenspiel, O. (2009). *Fluido en fluxua eta bero-trukea ingeniarietan*. Bilbao: Euskal Herriko Unibertsitate Publikoa.
- [8]- Gonzales, J. y Castellano, G. (2014). *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. Barcelona: ECU.
- [9]- Zerner, F.Z & Metral, A.M. (1959). *The Coanda effect*. Tennessee: US Atomic Energy Commission.
- [10]- Abbott, I.R.A. & Doenhoff, A.E.Von. (1959). *Theory of Wing Sections*. NY: Dover.
- [11]- Carmona, A. (1987). *Aerodinámica y actuaciones del avión*. Parainfo: Madrid.
- [12]- Lapiere, S. (2017). *Pierre Bézier*. Visitado 1 julio, 2018, de https://es.wikipedia.org/wiki/Pierre_B%C3%A9zier
- [13]- Solidworks. (2018). *3D CAD Design Software*. Visitado 05 mayo,2018, de <https://www.solidworks.com>
- [14]- Solidworks. (2018). *Solidworks Fem Software*. Visitado 05 mayo,2018, de: <http://www.solidworks.es/sw/products/simulation/finite-element-analysis.htm>
- [15]- Solidworks. (2018). *Solidworks Flow simulation*. Visitado 05 mayo,2018, de: <https://www.solidworks.com>.
- [16]- Mh-aerotoools (2014). *JavaFoil*. Visitado 24 junio,2018 de: <https://www.mh-aerotoools.de/airfoils/javafoil.htm>.
- [17]- JW.G. (2018). *La aleta de la ballena jorobada | ¿Casualidad o diseño?* Visitado 14 agosto,2018, de: <https://www.jw.org/es/publicaciones/revistas/g201306/aleta-de-la-ballena-jorobada.com>

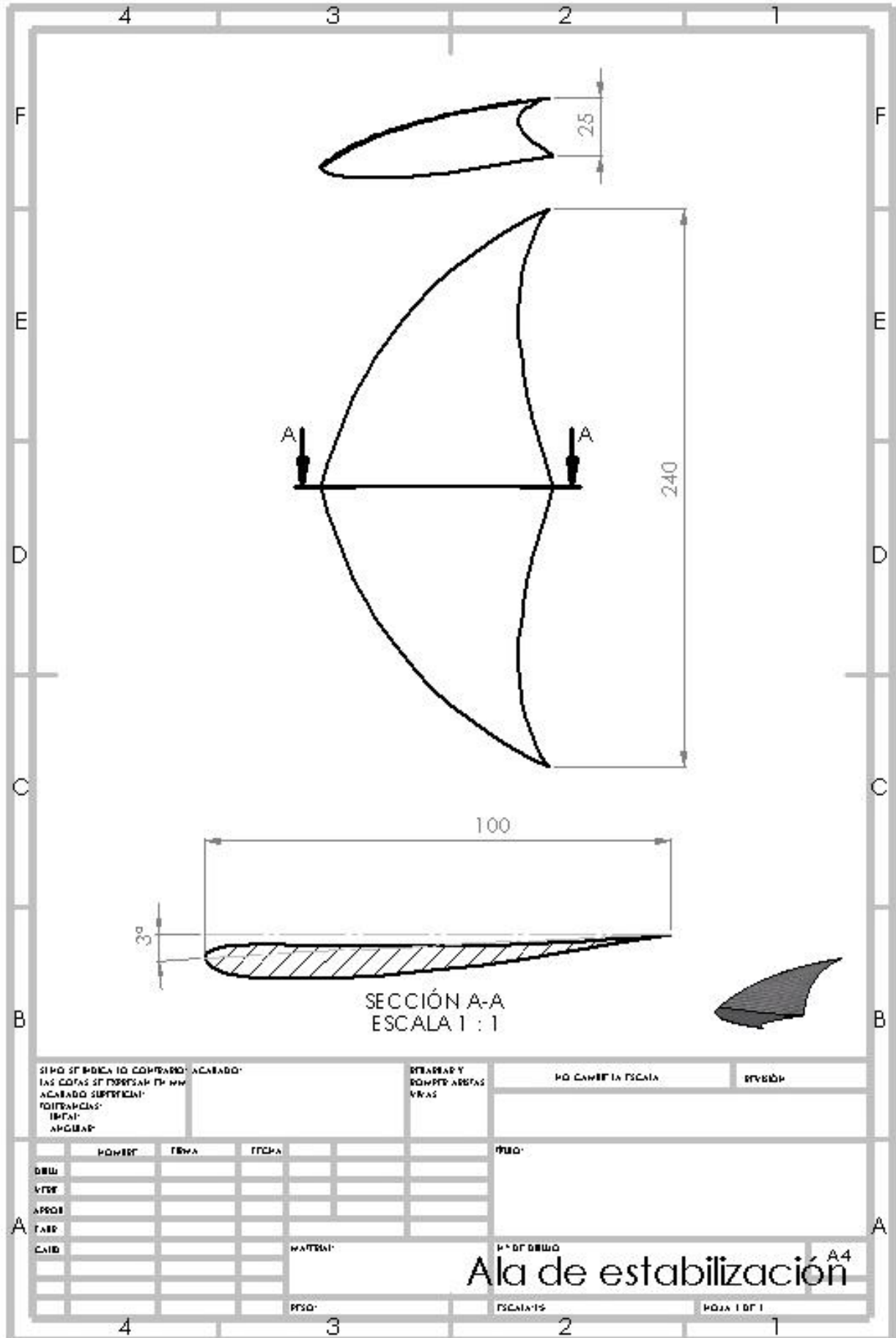
[18]- Perez, J. (2015). *Definición de Vórtice*. Visitado 25 septiembre 2018, de <https://definicion.de/vortice.com>

[19]- Rodriguez, H. (2017). *Tablas de Propiedades de los Materiales*. Visitado 17 julio,2018, de: <https://ingemecanica.com/tutoriales/materiales.html>

[20]- Airfoiltools. (2008). *Airfoil database search*. Visitado, 10 abril,2018, de: <http://airfoiltools.com>.

ANEXO I: PLANOS





SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: ACABADO: LAS CORTAS SE EJECUTAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TORNEADOS: 125µm APUNTES	BORDOS Y BOMBEO ABBAS VIVAS	NO CAMBIA ESCALA	REVISIÓN
DISEÑO VERIFICACIÓN APROBACIÓN TALLER CALIBRACIÓN	FECHA FECHA FECHA FECHA	FECHA	FECHA
MATERIAL:		Nº DE DIBUJO	
ESCALA:		PÁGINA 1 DE 1	

A4 Ala de estabilización