



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



TRABAJO FIN DE GRADO

Estudio hidrodinámico de los planeadores submarinos Spray y Seaglider

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL
ESPECIALIDAD AERONAVES

Autora

Paola Carbonell Pérez

Tutora

Dra. Xandra Marcelle Margot

Universitat Politècnica de València

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Departamento de Máquinas y Motores Térmicos

Curso académico 2021/2022

Resumen

Los planeadores submarinos son vehículos autónomos que se desplazan por el océano utilizando como método de propulsión la variación de su flotabilidad. Su principal función es la adquisición de información medioambiental submarina para su posterior transmisión inalámbrica. Adaptándose a las características de las distintas misiones que se llevan a cabo, existen diversos modelos de planeadores.

El objetivo de este trabajo es comparar el comportamiento hidrodinámico de dos planeadores submarinos de dimensiones y formas similares: el Spray y el Seaglider. Para ello, se realiza un análisis mediante técnicas de *mecánica de fluidos computacional* utilizando el programa STAR CCM+. A lo largo del proyecto se modelan ambos planeadores, y se siguen los pasos que componen un estudio CFD. Una vez validados los modelos, se discuten los resultados obtenidos y se comparan las características hidrodinámicas del Spray y el Seaglider. Por último, se determinan las condiciones de navegación óptimas para cada modelo, y se decide qué planeador es más adecuado en función de los requerimientos de la misión.

Resum

Els planadors submarins són vehicles autònoms que es desplacen per l'oceà utilitzant com a mètode de propulsió la variació de la seua flotabilitat. La seua principal funció és l'adquisició d'informació mediambiental submarina per a la seua posterior transmissió sense fil. Adaptant-se a les característiques de les diferents missions que es duen a terme, existeixen diversos models de planadors.

L'objectiu d'aquest treball és comparar el comportament hidrodinàmic de dos planadors submarins de dimensions i formes similars: el Spray i el Seaglider. Per a això, es realitza un anàlisi mitjançant tècniques de *mecànica de fluids computacional* utilitzant el programa STAR CCM+. Al llarg del projecte es modelen ambdós planadors, i se segueixen els passos que componen un estudi CFD. Una vegada validats els models, es discuteixen els resultats obtinguts i es comparen les característiques hidrodinàmiques del Spray i el Seaglider. Finalment, es determinen les condicions de navegació òptimes per a cada model, i es decideix quin planador és més adequat en funció dels requeriments de la missió.

Abstract

Underwater gliders are autonomous vehicles that move through the ocean using the variation in their buoyancy as a propulsion method. Their main function is to collect submarine environmental information for its later wireless transmission. There are diverse glider models according to the different characteristics of the missions that are carried out.

This project has the objective of comparing the hydrodynamic behaviour of two underwater gliders with similar dimensions and shape: the Spray and the Seaglider. For this, an analysis is carried out using *computational fluid dynamics* techniques with the programme STAR CCM+. Throughout the work both gliders are modelled, and the steps of a CFD analysis are followed. Once the models used have been validated, the results obtained are analyzed and the hydrodynamic characteristics of Spray and Seaglider are compared. Finally, the optimal navigational conditions are determined for each model, and so the most suitable glider can be selected depending on the requirements of the mission.

Índice general

Resumen	I
Índice general	VII
Índice de figuras	XI
Índice de tablas	XIII
Nomenclatura	14
1. Introducción	1
1.1. Los planeadores submarinos	1
1.2. Objetivos del estudio	2
2. Sobre los planeadores submarinos	3
2.1. Historia y desarrollo	3
2.2. Funciones y aplicaciones	5
2.3. Ventajas respecto a otros exploradores submarinos	6
2.4. Principales componentes	7
2.4.1. Componentes externos	7
2.4.2. Componentes internos	7
2.5. Funcionamiento	9
2.5.1. Desplazamiento	9
2.5.2. Modo de operación	10
2.6. Modelo matemático para el desplazamiento estacionario en el plano vertical	11
3. Fundamentos de CFD	15

4. Desarrollo del estudio	17
4.1. Modelado conceptual	17
4.1.1. Planeadores de estudio	17
4.1.2. Simplificaciones del problema	19
4.2. Generación y discretización del dominio computacional	20
4.2.1. Geometría	20
4.2.2. Dominio computacional	21
4.2.3. Malla	22
4.3. Configuración de la simulación	30
4.3.1. Condiciones de contorno	30
4.3.2. Propiedades del fluido y condiciones de navegación	30
4.3.3. Modelos seleccionados para el flujo	30
4.3.4. Criterios de convergencia	31
4.4. Validación de los modelos	32
4.4.1. Validaciones para el Spray	32
4.4.2. Validaciones para el Seaglider	33
4.4.3. Validación conjunta para el Spray y el Seaglider	37
4.5. Análisis adicional: independencia del modelo de turbulencia	39
5. Resultados	43
5.1. Distribución de fuerzas en el planeador	43
5.2. Comparación del Spray y el Seaglider en condiciones de crucero	45
5.2.1. Coeficiente de sustentación (C_L)	45
5.2.2. Entrada en pérdida	47
5.2.3. Coeficiente de resistencia (C_D)	51
5.3. Variación de velocidad	57
5.4. Condiciones óptimas para cada planeador	60
5.5. Planeador apropiado para unas determinadas condiciones	62
6. Conclusiones	65
Apéndices	66

A. Pliego de condiciones	67
A.1. Real Decreto 486/1997	67
A.2. Real Decreto 488/1997	69
B. Presupuesto	71
B.1. Coste de personal	71
B.2. Coste del equipo informático	71
B.3. Coste de consumo	72
B.4. Coste de <i>software</i>	72
B.5. Coste total	73
Bibliografía	75

Índice de figuras

2.1. Planeadores submarinos más conocidos.	4
2.2. Distintos modelos de planeadores submarinos.	5
2.3. Aplicaciones de planeadores submarinos.	6
2.4. Esquema aproximado de la estructura interna de un planeador submarino.	9
2.5. Esquema simplificado del sistema de flotación del Spray y el Seaglider.	10
2.6. Fases del modo de operación.	11
2.7. Esquemas del desplazamiento del planeador.	12
3.1. Etapas de la metodología CFD [41].	16
4.1. Plano del Spray Glider [25].	19
4.2. Plano del Seaglider [26].	19
4.3. Planos de los modelos 3D de los planeadores de estudio.	21
4.4. Esquema del dominio computacional.	22
4.5. Escena del dominio computacional.	22
4.6. Valores de y^+ obtenidos en las superficies del planeador para distintas mallas.	24
4.7. Cilindros con menor <i>Base Size</i> rodeando al planeador.	24
4.8. Estudio de sensibilidad de malla del Spray.	25
4.9. Estudio de sensibilidad de malla del Seaglider.	26
4.10. Escena de la malla en el plano de simetría del planeador.	29
4.11. Escena de la malla en una sección transversal del planeador.	29
4.12. Variación del C_D del casco con el Re para los casos experimental y CFD.	33
4.13. USM Underwater Glider [34].	33
4.14. Comparación del C_L entre el Spray y el USM Underwater Glider.	34

4.15. Comparación del C_D entre el Spray y el USM Underwater Glider.	35
4.16. Comparación de coeficientes entre el estudio experimental y CFD del Seaglider.	36
4.17. Laboratory Glider [21].	37
4.18. Comparación de los coeficientes hidrodinámicos para los tres planeadores. . .	38
4.19. Variación del coeficiente de resistencia en función del modelo de turbulencia utilizado.	40
4.20. Variación del coeficiente de sustentación en función del modelo de turbulencia utilizado.	41
5.1. Variación de los porcentajes de fuerzas de las partes de los planeadores con el ángulo de ataque.	44
5.2. Porcentaje de la fuerza total que representa cada parte del planeador. . . .	45
5.3. Comparación del coeficiente de sustentación para los dos planeadores. . . .	47
5.4. Coeficientes de sustentación teóricos y calculados mediante CFD en la zona de flujo potencial.	47
5.5. Comparación entre Spray y Seaglider: coeficiente de sustentación debido al ala y al casco.	48
5.6. Representación del coeficiente de presión en una sección de la mitad del ala para $\alpha = 30^\circ$	48
5.7. Representación del coeficiente de presión en el plano de simetría del casco para $\alpha = 30^\circ$	48
5.8. Evolución del desprendimiento de la capa límite. Ángulos de ataque 8° , 12° , 16°	48
5.9. Curva C_L ampliada en la zona de entrada en pérdida.	49
5.10. Representación del coeficiente de presión en una sección de mitad del ala para $\alpha = 45^\circ$	49
5.11. Desprendimiento de la capa límite del Spray para $\alpha = 12^\circ$ en tres secciones del ala: encastre, mitad del ala y punta de ala.	49
5.12. Desprendimiento de la capa límite del Seaglider para $\alpha = 18^\circ$ en tres secciones del ala: encastre, mitad del ala y punta de ala.	50
5.13. Evolución del barrido de la capa límite.	50
5.14. Evolución del barrido de la capa límite sobre el ala del Spray.	50
5.15. Evolución del barrido de la capa límite sobre el ala del Seaglider.	51
5.16. Esquema del balance de fuerzas.	52
5.17. Comparación del coeficiente de resistencia.	52

5.18. Comparación del coeficiente de resistencia de fricción. Las líneas de puntos representan el valor medio de la resistencia.	53
5.19. Vectores de velocidad en la cola del Seaglider.	53
5.20. Comparación del coeficiente de resistencia inducida.	54
5.21. Escenas de velocidad de diferentes secciones frontales del ala para un AOA de 30°: borde de ataque (<i>LE</i>), mitad del ala, borde de fuga (<i>TE</i>) y parte posterior al ala a una distancia aproximada de una cuerda.	55
5.22. Comparación del coeficiente de resistencia de presión.	56
5.23. Líneas de corriente en la parte posterior de los planeadores para $\alpha = 30^\circ$	57
5.24. Desprendimiento para una sección de mitad del ala para $\alpha = 30^\circ$	57
5.25. Coeficiente de resistencia de cada planeador a distintas velocidades.	58
5.26. Coeficiente de sustentación de cada planeador a distintas velocidades.	59
5.27. Coeficientes de sustentación y resistencia para una velocidad de $U = 0,25m/s$	59
5.28. Coeficientes de sustentación y resistencia para una velocidad de $U = 0,35m/s$	60
5.29. Coeficientes de sustentación y resistencia para una velocidad de $U = 0,45m/s$	60
5.30. Eficiencia hidrodinámica y ángulo de planeo en función de α para el Spray.	61
5.31. Eficiencia hidrodinámica y ángulo de planeo en función de α para el Seaglider.	62
5.32. Eficiencia hidrodinámica y ángulo de planeo en función de α para una velocidad $U = 0,25m/s$	63
5.33. Eficiencia hidrodinámica y ángulo de planeo en función de α para una velocidad $U = 0,35m/s$	63
5.34. Eficiencia hidrodinámica y ángulo de planeo en función de α para una velocidad $U = 0,45m/s$	64

Índice de tablas

4.1. Comparación de las principales características de los planeadores de estudio.	18
4.2. Dimensiones de los planeadores modelados.	20
4.3. Valores de entrada y salida en la calculadora de y^+	27
4.4. Propiedades del agua del Mediterráneo a 500m de profundidad.	30
4.5. Diferencia de condiciones experimentales y CFD.	34
5.1. Comparación de las principales dimensiones de los planeadores.	44
5.2. Valores de los parámetros.	46
5.3. Valores calculados de los parámetros.	54
B.1. Costes asociados al personal.	71
B.2. Coste asociado al equipo informático.	72
B.3. Costes asociados al consumo eléctrico.	72
B.4. Costes asociados a la conexión a internet.	72
B.5. Coste asociado a los <i>software</i>	73
B.6. Coste total del proyecto.	73

Nomenclatura

Símbolos

α	Ángulo de ataque
ΔB	Flotabilidad neta
Δs	Espesor de la primera capa de celdas prismáticas
δ	Espesor de la capa límite
ϵ	Tasa de disipación turbulenta
γ	Ángulo de planeo
κ	Energía cinética turbulenta
Λ	Ángulo de flecha alar
μ	Viscosidad cinemática
ω	tasa de disipación específica
ϕ	Ángulo de alabeo (<i>roll</i>)
Ψ	Ángulo de guiñada (<i>yaw</i>)
ρ	Densidad
τ_ω	Esfuerzos tangenciales
Θ	Ángulo de cabeceo (<i>pitch</i>)
$\tilde{\nu}$	Difusividad modificada
D_0	Coefficiente de resistencia parásita
a	pendiente de la curva de C_L para un ala calculada con la <i>teoría del ala de gran alargamiento de Prandtl</i>
a_0	Pendiente de la curva del C_L para un perfil aerodinámico
B	Flotabilidad
C_D	Coefficiente de resistencia
C_f	Coefficiente de fricción

C_L	Coeficiente de sustentación
C_p	Coeficiente de presión
C_{D0}	Coeficiente de resistencia parásita
C_{Df}	Coeficiente de resistencia de fricción
C_{Di}	Coeficiente de resistencia inducida
C_{Dp}	Coeficiente de resistencia de presión
C_{L0}	Coeficiente de sustentación para ángulo de ataque nulo
$C_{L\alpha}$	Pendiente de la curva del coeficiente de sustentación
D	Fuerza de resistencia
E	Eficiencia hidrodinámica
e	Factor de eficiencia de Oswald
K	Estrechamiento de las capas de malla prismática
k	Coeficiente de resistencia inducida
L	Fuerza de sustentación
L_P	Longitud del planeador
N	Número de capas de malla prismática
Re	Número de Reynolds
Re_x	Número de Reynolds tomando la longitud del planeador como longitud de referencia
S	Salinidad
T	Temperatura
U	Velocidad de desplazamiento
u_τ	Velocidad tangencial o de fricción
V_{casco}	Volumen del casco del planeador
$V_{planeador}$	Volumen del planeador
y	Distancia absoluta a la pared
y^+	Distancia adimensional: distancia entre la pared y el centroide de la primera celda

Siglas

ADCP	Acoustic Doppler current profiler
AHRS	Attitude and Heading Reference System
AOA	Angle of Attack (ángulo de ataque)

ASW	Anti-submarine warfare
AUG	Autonomus Underwater Glider
AUV	Autonomus Underwater Vehicle
CAD	Computer-aided design
CFD	Computational Fluid Dynamics
CTD	Conductivity, Temperature and Depth
GPS	Global Positioning System
ISR	Intelligence, Surveillance and Reconnaissance
LE	Leading Edge (borde de ataque)
OBS	Optical burst switching
RANS	Reynolds-averaged Navier-Sokes
TE	Trailing Edge (borde de fuga)
USBL	Ultra-short baseline

Capítulo 1

Introducción

1.1. Los planeadores submarinos

Durante muchos años las misiones de exploración del océano se han llevado a cabo utilizando embarcaciones e instrumentos que suponían un elevado coste, limitando por tanto el número de investigaciones realizadas. La llegada de los AUG (*Autonomous Underwater Gliders*, es decir, planeadores submarinos autónomos) en el año 1990 trajo un aumento en la densidad de exploraciones hidrográficas gracias a las ventajas que estos presentan, como son su bajo coste, la facilidad de despliegue, y la posibilidad de distintos modos de operación.

Los planeadores submarinos son vehículos autónomos que se desplazan por el océano con diversos fines, entre los que destaca la aplicación científica para la toma de parámetros oceánicos y la recogida de información medioambiental submarina. En función de su misión principal, los *gliders* pueden presentar distintas geometrías y tamaños, sin embargo, los elementos que los componen y su funcionamiento son muy similares generalmente.

Se trata de vehículos que se desplazan siguiendo trayectorias en forma de diente de sierra y a una baja velocidad, consiguiendo de esta forma una elevada eficiencia. Además, se controlan de forma remota y transmiten la información recogida en su trayecto inalámbricamente. Esto permite realizar operaciones de largas distancias y de duraciones de varios meses, y disponer de la información submarina poco tiempo después de haber sido recogida.

La principal peculiaridad de los AUG es que utilizan como método de propulsión la variación de su flotabilidad, generando un movimiento vertical que se convierte en movimiento de avance gracias a las fuerzas generadas por el ala. Por otro lado, algunos modelos son capaces de variar su rumbo sin necesidad de superficies externas móviles.

A lo largo de este trabajo se explica la evolución de estos vehículos, su funcionamiento y principales componentes, así como las ventajas que presentan respecto a otros exploradores submarinos. Posteriormente se analizan mediante CFD dos de los planeadores más utilizados, el Spray y el Seaglider, con el fin de conocer su comportamiento hidrodinámico. Por último, teniendo en cuenta las eficiencias hidrodinámicas y sendas de planeo que ofrecen, se determinan las condiciones de navegación óptimas para cada planeador, así como qué planeador es más adecuado en función de la misión.

1.2. Objetivos del estudio

Los objetivos de este trabajo son:

- Obtener un modelo 3D que represente adecuadamente la geometría del Spray y el Seaglider.
- El desarrollo de un modelo CFD que permita analizar el comportamiento hidrodinámico de los planeadores submarinos.
- La aplicación de dicho modelo a los planeadores Spray y Seaglider.
- La comparación del comportamiento hidrodinámico de ambos planeadores.
- Determinar las condiciones de navegación óptimas de cada uno de los planeadores.
- Concluir cuál es el planeador más adecuado para unas condiciones de navegación determinadas.

Capítulo 2

Sobre los planeadores submarinos

2.1. Historia y desarrollo

Hasta hace aproximadamente treinta años el interior del océano se observaba utilizando instrumentos descargados desde embarcaciones de investigación, o suspendidos en amarres situados en un punto determinado.

Las embarcaciones eran la herramienta central para cartografiar el interior del océano, desarrollando misiones de uno o dos meses de duración. Sin embargo, su capacidad limitada para mantenerse en un punto fijo suponía un problema, y la baja frecuencia con la que se producían las expediciones no permitía resolver la variabilidad espacio-temporal del océano [21].

En cuanto a los amarres, solían estar recogiendo información alrededor de dos años, y demostraron ser efectivos recogiendo datos en distintos instantes de tiempo, resolviendo de esta forma la variable temporal en un punto fijo, pero seguía sin poder resolverse la variabilidad espacial. Además, la presencia de estos instrumentos seguía siendo escasa para poder estudiar la variabilidad de los flujos oceánicos, y dependían de las embarcaciones desde las que se desplegaban y recuperaban.

La densidad de observaciones oceanográficas e información recogida se vio limitada por el coste que suponían estas plataformas y embarcaciones. Sin embargo, la llegada de la navegación y comunicación por satélite hizo posible utilizar plataformas de reducidas dimensiones y económicas que cambiarían la forma en la que se observaba el océano.

El concepto de planeador submarino apareció en 1960 cuando Ewan Fallon presentó la patente de su Hydroglider [1], en la que presentaba un vehículo propulsado por su propia flotabilidad y que utilizaba hidroalas (*hidrofoils*) para transformar el movimiento ascendente y descendente en movimiento de avance.

Posteriormente, en 1989, Henry Stommel publicó en la revista *Oceanography* [2] un artículo narrado en primera persona y escrito como si se encontrase en el año 2021, en el que hablaba de un mundo en el que existía un sistema de observación formado por “una flota de pequeños flotadores de flotabilidad neutra llamados Slocum que extraen su energía de la estratificación térmica del océano”. Estos flotadores “migran verticalmente a través del océano variando su lastre, y pueden ser dirigidos horizontalmente planeando con sus

alas a un ángulo de 35° (...). Durante los cortos periodos de tiempo en los que se encuentran en la superficie, transmiten los datos acumulados y reciben instrucciones diciéndoles cómo dirigirse por el océano mientras están sumergidos. Su velocidad es generalmente de medio nudo (...). Tenemos una flota bastante grande, sobre 1000” narraba Henry. La flota se llamaba Slocum en honor a Joshua Slocum, el primero en dar la vuelta al mundo en solitario en un pequeño velero.

Un año más tarde se puso en servicio el primer flotador autónomo, y una década más tarde la mayor parte de lo que Stommel había visualizado se había vuelto realidad. El programa Argo¹ había implementado una flota de más de 1200 vehículos, cuyas posiciones no se podían controlar. Para solucionar este problema y cumplir por completo la visión de Stommel, el AOSN (Autonomous Ocean Sensing Network) empezó a desarrollar el concepto de propulsión por motores y añadir alas a estos vehículos.

El resultado de estos estudios se observa hoy en día en forma de vehículos pequeños, inteligentes y económicos con la capacidad de describir el interior del océano con gran resolución en tiempo y espacio. Las flotas autónomas han demostrado el poder de una red distribuida, y actualmente existen varios proyectos de observación oceánica que utilizan redes de planeadores submarinos, como es el caso de JERICO-S3² en Europa o IOOS³.

Desde los inicios de estos vehículos se han diseñado distintos modelos de AUG optimizados para determinadas misiones y que utilizan distintas fuentes de energía [22]. En la Figura 2.2 se pueden observar distintos modelos de planeadores.

Sin embargo, los tres planeadores más conocidos son el Seaglider, el Slocum y el Spray, que fueron los primeros planeadores operativos y se pueden observar en la Figura 2.1. Como ya se ha comentado anteriormente, el Slocum debe su nombre a Joshua Slocum, y Spray era el nombre del velero que utilizó para su hazaña.

Existen numerosos estudios tanto experimentales como CFD realizados con el fin de mejorar las características de los planeadores. Las fuerzas y momentos hidrodinámicos se analizan para conseguir diseños más eficientes [3] [24] y se comparan cascos con distintas geometrías, determinando sus ventajas y desventajas para determinadas condiciones [4]. La influencia de la geometría del ala en la estabilidad y características hidrodinámicas también ha sido objeto de estudio [5], así como se han modelado los distintos parámetros dinámicos e hidrodinámicos para conocer de forma aproximada las ecuaciones de movimiento de los *gliders* [6].

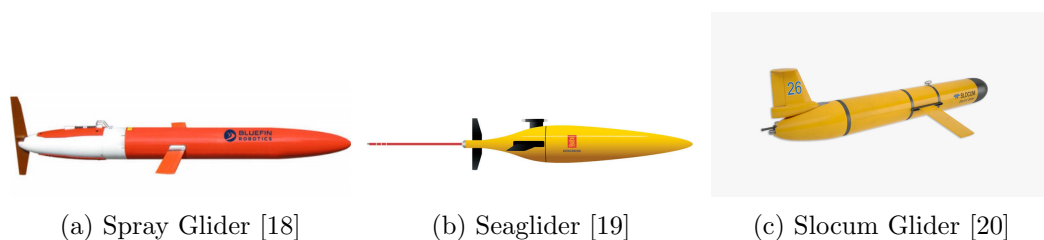


Figura 2.1: Planeadores submarinos más conocidos.

¹Argo: Programa internacional que recoge información oceánica usando una flota de instrumentos robóticos. Enlace a la web: <https://argo.ucsd.edu/>

²JERICO-S3: <https://www.jerico-ri.eu/>

³IOOS (*Integrated Ocean Observing System*): <https://ioos.noaa.gov/about/about-us/>

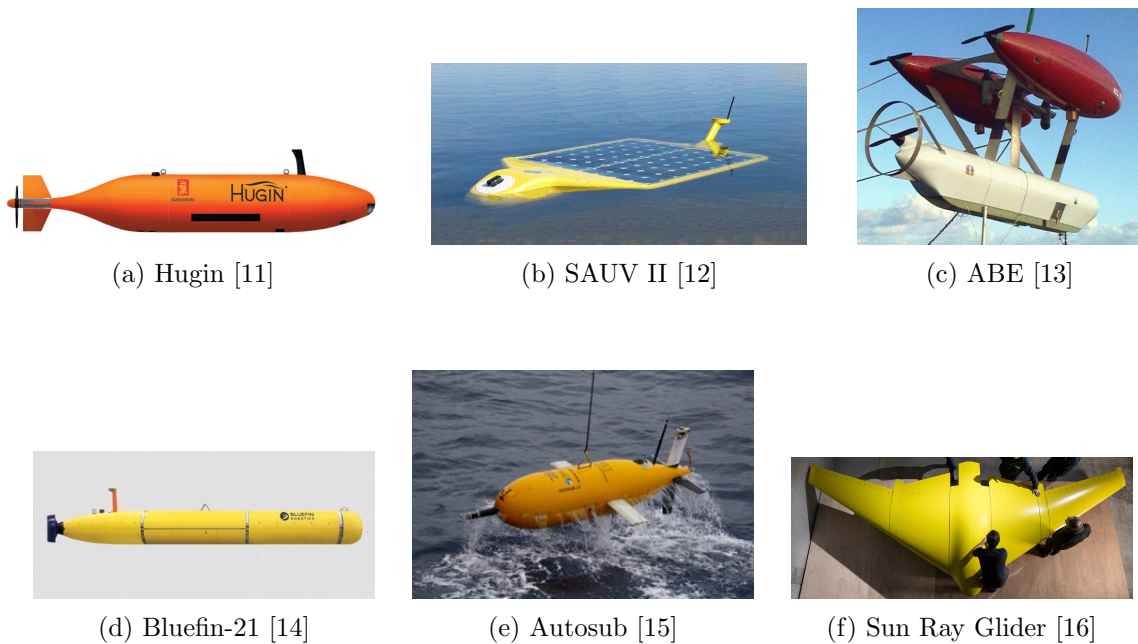


Figura 2.2: Distintos modelos de planeadores submarinos.

2.2. Funciones y aplicaciones

Los AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*) o AUG (*Autonomous Underwater Glider*) están diseñados para planear desde la superficie del océano hasta una profundidad programada y regresar, siguiendo una trayectoria en forma de diente de sierra a través del agua. Una vez regresan a la superficie transmiten la información recogida y reciben órdenes mediante comunicación por satélite. Las principales aplicaciones de los planeadores son científicas, navales y de defensa [21].

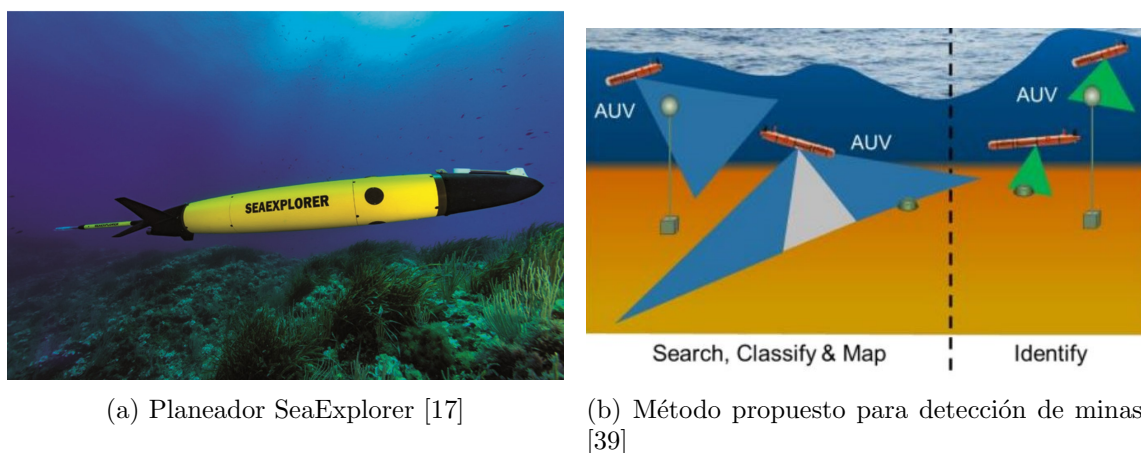
Cunado se utilizan con fines científicos, los *gliders* están dotados de un amplio rango de sensores que les permiten tomar medidas de distintos parámetros oceánicos como la temperatura, conductividad (utilizada para calcular la salinidad), profundidad, fluorescencia de clorofila, etc. Debido al amplio rango de posibilidades y la resolución espacio-temporal que ofrecen, las redes de planeadores submarinos se han convertido en las principales plataformas utilizadas para la adquisición de información medioambiental submarina en el ámbito de la investigación oceánica.

Un ejemplo de este tipo de *gliders* es el SeaExplorer, mostrado en la Figura 2.3a. Sus principales aplicaciones son determinar la calidad del agua y detectar en ella la presencia de aceites, gases y contaminación.

Cuando se trata de fines navales y de defensa, los *gliders* se utilizan para tareas asociadas con inteligencia marítima, vigilancia y reconocimiento (ISR), detección de minas, guerra antisubmarina (ASW), o patrullaje portuario.

En la Figura 2.3b se muestra una propuesta de detección de minas utilizando única-

mente AUVs. En estos casos los vehículos están dotados con un sonar⁴ de alta resolución.



(a) Planeador SeaExplorer [17]

(b) Método propuesto para detección de minas [39]

Figura 2.3: Aplicaciones de planeadores submarinos.

2.3. Ventajas respecto a otros exploradores submarinos

Como ya se ha comentado anteriormente, los planeadores submarinos son una alternativa a otros exploradores como los barcos de investigación o los flotadores oceánicos⁵.

Además de su bajo coste, los *gliders* son plataformas pequeñas y fácilmente transportables, lo que permite tomar muestras de fenómenos que ocurran intermitentemente y en zonas localizadas. Se trata de infraestructuras escalables, es decir, la cantidad de planeadores que se despliegan en una misión puede adaptarse al problema que se quiera abordar. Una distribución global es más apropiada para problemas climáticos, mientras que para estudiar las interacciones de remolinos de mesoescala⁶ se requerirán despliegues más focalizados [23].

Los AUG se controlan de forma remota y se pueden desplazar tanto en el plano horizontal como el vertical, es decir, además de hundirse y salir a flote pueden variar su rumbo. Esto significa que en una misma misión los planeadores pueden adoptar dos comportamientos diferentes:

- Función de barco de investigación: recoger información siguiendo un camino programado, realizando trayectorias en forma de diente de sierra a través del agua.
- Función de flotador oceánico: mantener su posición geográfica perfilando y muestreando como lo haría un amarre o flotador oceánico. Sin embargo, a diferencia de

⁴Sonar: del inglés SONAR (*Sound Navigation and Ranging*), es una técnica que utiliza la propagación del sonido para detectar objetos sumergidos.

⁵Flotadores oceánicos: dispositivos cilíndricos de flotación libre que se hunden hasta los 2000 metros de profundidad durante varios días, y que son desplazados por las corrientes oceánicas. Durante este proceso recopilan datos de temperatura y salinidad y los transmiten.

⁶Remolinos de mesoescala: estructuras cuasi-circulares y rotatorias que se originan por las inestabilidades en las corrientes oceánicas y el esfuerzo de los vientos. Tienen diámetros de 100 – 200km y pueden permanecer hasta 5 años sin destruirse y mezclarse con el resto del agua. Un ejemplo son los *Meddies*, remolinos formados por agua mediterránea que fluyen hacia el Atlántico a través del Estrecho de Gibraltar.

estos, los planeadores pueden mantener su posición sin ser arrastrados por la corriente. Para ello, deberán “desplazarse” a una velocidad igual a la de las corrientes, pero en sentido contrario.

Por último, debido a la baja velocidad a la que se desplazan, los planeadores submarinos presentan muy poca resistencia hidrodinámica. Esto significa que presentan una elevada eficiencia y son capaces de llevar a cabo operaciones de amplio rango y duración [23].

2.4. Principales componentes

2.4.1. Componentes externos

Desde el exterior de un planeador submarino se suelen distinguir las siguientes partes: el casco, el ala, los estabilizadores, las antenas y el timón.

- **Casco:** en su interior se encuentran los componentes internos del planeador. Normalmente es la parte que más resistencia al avance supone, por lo que es de gran importancia conseguir un diseño hidrodinámico adecuado y de baja resistencia para que el planeador tenga una buena eficiencia.

El material utilizado para los cascos suele ser el aluminio, que permite resistir la presión externa y mantener la forma hidrodinámica.

- **Ala:** es la superficie responsable de la generación de sustentación, y que por tanto permite el desplazamiento horizontal del planeador. Normalmente se utilizan perfiles hidrodinámicos simétricos, de manera que la fuerza generada es igual tanto al ascender como al descender. Pueden presentar diferentes dimensiones y formas en planta, y su colocación no debe perjudicar la hidrodinámica del casco.
- **Estabilizadores:** del mismo modo que en el ala, se utilizan perfiles simétricos y se deben colocar teniendo en cuenta el diseño del casco.
- **Antenas:** puede haber una o dos antenas que sirven para transmitir la información y los datos recogidos por los sensores, y para recibir indicaciones con la trayectoria que deben seguir. En función del modelo de planeador pueden estar montadas en distintas partes, como en la parte posterior o en un ala.
- **Timón:** al mover este elemento a un lado u otro se consigue generar un momento de guiñada y variar el rumbo del planeador. No está presente en todos los *gliders*, ya que existen otros métodos de variación de rumbo.

2.4.2. Componentes internos

En la parte interna de un planeador submarino se encuentran distintos sistemas y elementos que varían según el modelo de planeador y de la función que se le va a asignar. En la Figura 2.4 se observa un esquema aproximado de la distribución interna de un *glider*. Como se puede ver, los principales componentes son:

- a) **Carga de pago:** se trata de los sensores que se utilizan para recoger información. El principal requerimiento para los sensores es que sean pequeños, ligeros y consuman poca energía. Además, lo ideal es que no sobresalgan de la superficie externa del planeador, pero si no se puede evitar, se deben diseñar y situar en la superficie de forma que se minimice la resistencia hidrodinámica que generan [23].

Los sensores más comunes son los de temperatura, presión, y sensores CTD de conductividad que se utilizan para calcular la salinidad del agua. Además de estos, dependiendo de su misión, cada planeador incluirá distintos sensores biológicos, químicos y físicos. Algunos ejemplos son: sensor de oxígeno, altímetro acústico para evitar colisionar con el fondo, ADCP (*Acoustic Doppler current profiler*) para medir velocidades de corrientes, pHmetro, fluorímetro de clorofila, sensor OBS para medir turbiedad y concentración de sólidos suspendidos, o sistemas de posicionamiento USBL.

- b) **Navegación y comunicación:** conjunto de sistemas y sensores que permiten la comunicación y la navegación, como es el caso de los sensores AHRS, que son Sistemas de Referencia de Actitud y Rumbo.
- c) **Sistema para cambio de rumbo:** cada planeador puede presentar un sistema diferente para variar su rumbo, y por tanto se puede encontrar situado en distintas partes del planeador. Existen sistemas que se basan en generar un momento de alabeo, como es el caso del Spray y el Seaglider, y otros generan momento de guiñada, como es el caso del Slocum. Para generar un momento de alabeo se utiliza una masa excéntrica (baterías) que gira alrededor del eje longitudinal del planeador, y para generar un momento de guiñada hará falta un sistema que deflecte el timón que se encuentra en el exterior del planeador.
- d) **Sistema de cabeceo:** se trata de un paquete de baterías que se desplazan por un eje longitudinal al planeador. Estas baterías también proporcionan energía a los distintos componentes.

Cuando un planeador cambia su rumbo utilizando el sistema de rotación de una masa excéntrica, esta masa puede ser la misma que la usada para el cabeceo, es decir, una masa excéntrica que se desplaza longitudinalmente por el eje, y que además gira alrededor de este.

- e) **Baterías extra:** grupos de baterías que se incluyen en caso de no ser suficientes las utilizadas en el sistema de cabeceo y alabeo. La energía proporcionada por estas se utiliza en mayor parte para la propulsión, es decir, el control de flotabilidad y el desplazamiento. El resto de la energía la consumen el microprocesador, controlador, sensores y la comunicación.
- f) **Procesador y controlador:** para conseguir un bajo consumo de energía uno de los requerimientos es que sean capaces de desconectar ciertos subsistemas cuando no son necesarios. Deben ser pequeños e incluir suficientes canales tanto digitales como analógicos para integrar los sensores.
- g) **Sistema hidráulico de flotación:** su función es mover el fluido hidráulico de un depósito interno a una vejiga externa y viceversa, con el fin de variar la flotabilidad. Los principales componentes de este sistema son: un depósito interno flexible de aceite, filtros, una bomba de alta presión y las válvulas que controlan el flujo del aceite.

- h) **Módulo de propulsión auxiliar:** en algunos casos un planeador podría incluir este sistema para complementar la propulsión por flotabilidad [7]. Se trata de una hélice de baja potencia que permite que el planeador adopte nuevos comportamientos, como la navegación totalmente horizontal, o hacer frente a las corrientes marinas adversas que superan la velocidad máxima de avance del planeador.

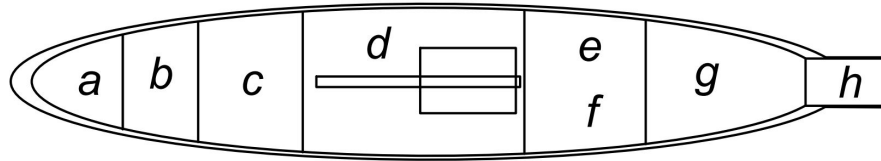


Figura 2.4: Esquema aproximado de la estructura interna de un planeador submarino.

2.5. Funcionamiento

2.5.1. Desplazamiento

Los *gliders* se desplazan a velocidad muy baja, de aproximadamente 30cm/s , y como consecuencia tienen una baja resistencia que permite realizar operaciones de larga duración.

Como ya se ha comentado anteriormente, utilizan como método de propulsión la variación de su flotabilidad. Con esta variación se consigue un desplazamiento vertical del planeador, que permite que el vehículo se hunda y salga a la superficie. El desplazamiento horizontal se consigue variando el ángulo de ataque con un momento de cabeceo. De esta forma, la componente horizontal de la sustentación generada por el ala hace que el planeador se desplace hacia delante tanto en la inmersión como en la ascensión. La variación del rumbo se consigue mediante un momento de alabeo.

Por tanto, el movimiento del planeador está gobernado por el control de la flotabilidad, del cabeceo y del rumbo.

- **Control de flotabilidad:** existen distintos sistemas para variar la flotabilidad de los planeadores. Por ejemplo, el Slocum Battery utiliza un pistón que inunda un compartimento de agua marina o lo vacía.

Los planeadores de estudio de este trabajo, el Spray y el Seaglider, presentan el sistema que se observa en la Figura 2.5. Consiste en una bomba que desplaza el fluido hidráulico desde un depósito interno hasta una vejiga externa, y viceversa. La vejiga externa es inflable y se encuentra en un compartimento abierto al exterior, y por tanto inundado por agua, de forma que cuando está llena de aceite ocupa el espacio del compartimento sin dejar que entre agua [8].

Para descender, el fluido hidráulico se mueve desde la vejiga externa hasta el depósito interno que se encuentra a una elevada presión. La disminución de volumen de la vejiga hace que el compartimento externo se inunde de agua, aumentando la densidad del planeador y generando la flotabilidad negativa necesaria para hundirse. Para ascender el proceso es el opuesto: el aceite se desplaza del depósito interno con elevada presión a la vejiga externa, expulsando el agua del compartimento debido

al incremento de volumen de la vejiga. De esta forma se disminuye la densidad y se genera flotabilidad positiva para ascender.

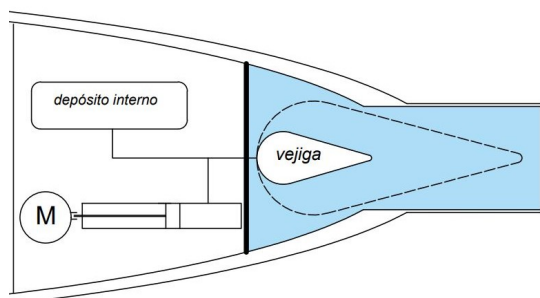


Figura 2.5: Esquema simplificado del sistema de flotación del Spray y el Seaglider.

- **Control de cabeceo:** normalmente se consigue moviendo axialmente una masa interna hacia delante y hacia detrás dentro del planeador, desplazando de esta forma su centro de gravedad. La masa que se desplaza suele ser un conjunto de baterías internas utilizadas por el planeador [23].

- **Control de rumbo:** para controlar el rumbo se utilizan dos métodos [21]. El más intuitivo consiste en deflectar un timón (*rudder*) generando un momento de guiñada (*yaw*). Este es el método utilizado por el Slocum Battery, el cual permite un radio de giro de entre $7m$ y $10m$, valor adecuado para operaciones de poca profundidad y zonas costeras. De esta manera se puede cambiar el rumbo de una forma más rápida.

El otro método consiste en rotar una masa excéntrica alrededor del eje longitudinal del planeador. De esta manera se genera un momento de alabeo (*roll*), ya que el centro de masa está por debajo del centro de flotación, lo que hace que una componente de la sustentación generada por el ala actúe lateralmente, generando el movimiento en espiral necesario para cambiar de rumbo.

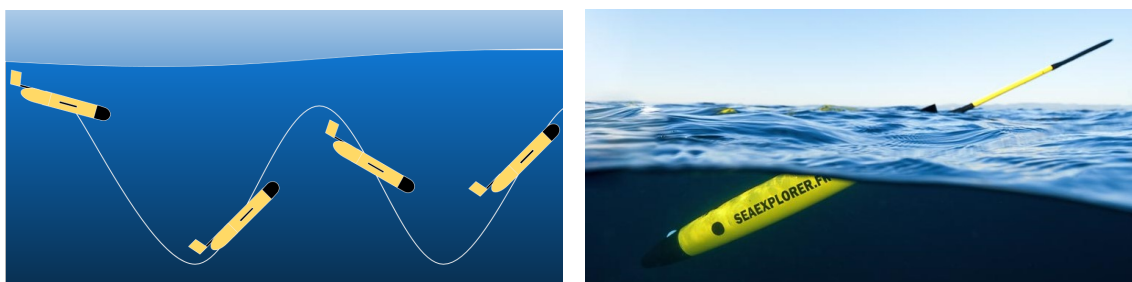
Cuando la sustentación actúa lateralmente, la componente horizontal de la sustentación genera una fuerza centrípeta que permite el giro, mientras que el deslizamiento lateral que actúa en el estabilizador vertical genera el momento de guiñada necesario para cambiar el rumbo. Por ejemplo, girando a la derecha en un descenso, el ala derecha desciende generando fuerza (sustentación) hacia la derecha, lo que hace que el planeador se desplace hacia este lado. El deslizamiento lateral y hacia abajo que actúa en el estabilizador vertical hace que este genere un momento de guiñada hacia la derecha, que hace que se cambie el rumbo. Este método es el utilizado por el Seaglider y por el Spray, y permite radios de giro de $20 - 30m$, siendo más adecuados para operaciones a mayor profundidad.

2.5.2. Modo de operación

La misión comienza cuando el planeador se despliega desde la embarcación correspondiente y se le transmite mediante comunicación por satélite cuál es el camino que debe seguir. Una vez conocido el objetivo, el planeador adapta su velocidad y pendiente de planeo para desplazarse de la forma más eficiente posible.

Mientras están sumergidos, los planeadores navegan por estimación y siguen trayectorias verticales en forma de diente de sierra, tal y como se muestra en la Figura 2.6a. Al volver a la superficie el planeador se inclina alabeando o cabeceando con el fin de sacar sus antenas y encararlas, como se observa en la Figura 2.6b. De esta forma transmite la información y datos recogidos durante su navegación y recibe las órdenes para una nueva ruta o correcciones de la trayectoria que está siguiendo.

Una de las ventajas de los AUV es que, seleccionando una velocidad igual a la de la corriente marina en módulo y dirección pero en sentido contrario, el planeador puede perfilar verticalmente en un punto geográfico fijo, es decir, equivale a un amarre⁷ virtual que puede volver al modo de operación del *glider* en cualquier momento. En cuanto a la navegación por estima, los tres modelos de *glider* comentados anteriormente conocen su actitud y rumbo cuando están sumergidos usando una combinación de magnetómetros y niveles de burbuja en los tres ejes. Si están bien equilibrados (*trimados*) pueden navegar un par de horas sin desviarse y sin necesidad de correcciones [23]. En algunos casos utilizan la diferencia entre sus desplazamientos estimados y desplazamientos reales para calcular la corriente marina que hay.



(a) Trayectoria de diente de sierra seguida por el planeador [9].

(b) Planeador Seaexplorer cabeceando para orientar la antena durante la transmisión de datos [10].

Figura 2.6: Fases del modo de operación.

2.6. Modelo matemático para el desplazamiento estacionario en el plano vertical

Cuando un planeador recibe la información del objetivo al que se debe dirigir, debe determinar la trayectoria que va a seguir y el ángulo de planeo (γ) con el que se va a desplazar.

Como ya se ha comentado, los planeadores se desplazan siguiendo trayectorias en forma de diente de sierra. Sin embargo, para llegar a un mismo objetivo se pueden seguir trayectorias con pendientes más o menos pronunciadas, como se muestra en la Figura 2.7a. Una vez seleccionada la senda de planeo, se deberá determinar el ángulo de ataque (α) para conseguirla, y la velocidad de planeo a la que se desplazará el vehículo. El valor de estos parámetros también se puede escoger en función de la eficiencia hidrodinámica deseada.

⁷Amarre: dispositivo o conjunto de dispositivos conectados a una cable y anclados al fondo del mar, con el objetivo de desplazarse verticalmente y medir corrientes oceánicas

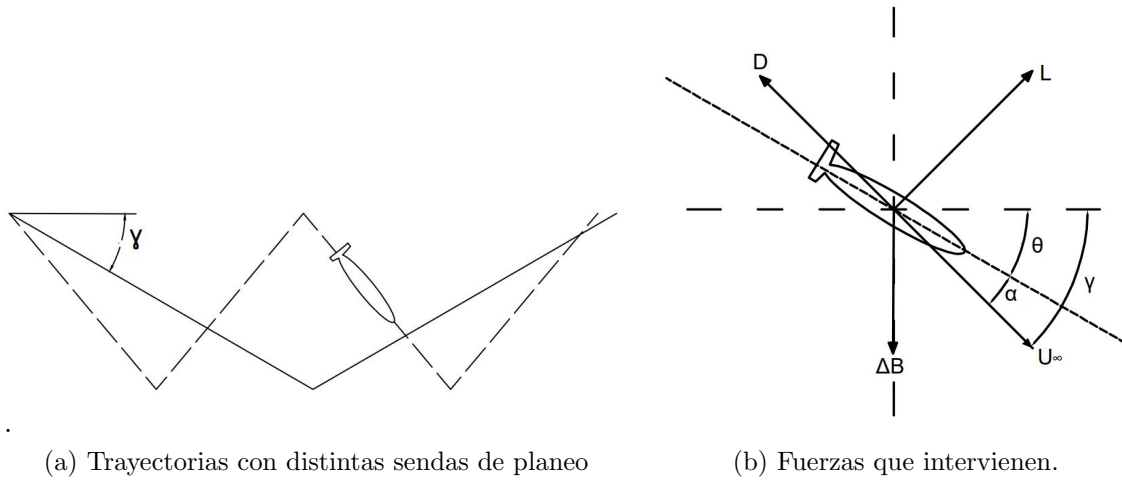


Figura 2.7: Esquemas del desplazamiento del planeador.

En primer lugar, se va a buscar una expresión que relacione el ángulo de planeo (γ) con el ángulo de ataque (α). Para ello se va a considerar el esquema de fuerzas mostrado en la Figura 2.7b, donde:

U_∞ : velocidad de desplazamiento

L : fuerza de sustentación

D : fuerza de resistencia

$\Delta B = mg - \rho gV$: flotabilidad neta

α : ángulo de ataque

θ : ángulo de cabeceo

γ : ángulo de planeo

Observando este esquema se pueden definir las Ecuaciones 2.1 y 2.2.

$$\gamma = \theta + \alpha \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \Delta B \cos \gamma &= -L \\ \Delta B \sin \gamma &= -D \end{aligned} \implies \tan \gamma = \frac{D}{L} \quad (2.2)$$

Las fuerzas de sustentación y resistencia se pueden expresar como muestran las Ecuaciones 2.3 y 2.4, y sus respectivos coeficientes como se muestra en las Ecuaciones 2.5 y 2.5.

$$L = \frac{1}{2} \rho U^2 S C_L \quad (2.3)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho U^2 S C_D \quad (2.4)$$

$$C_L = C_{L0} + C_{L\alpha} \alpha \quad (2.5)$$

$$C_D = C_{D0} + k C_L^2 \quad (2.6)$$

Sustituyendo estas expresiones en la Ecuación 2.2, la expresión de la senda de planeo quedaría como en la Ecuación 2.7.

$$\tan \gamma = \frac{D}{L} = \frac{C_{D0} + k(C_{L0} + C_{L\alpha}\alpha)^2}{C_{L0} + C_{L\alpha}\alpha} \quad (2.7)$$

La Ecuación 2.8 muestra la expresión de la senda de planeo simplificada para perfiles simétricos, como suele ser el caso de los planeadores submarinos. Por tanto, se ha depreciado el término C_{L0} que corresponde al coeficiente de sustentación para un ángulo de ataque nulo.

$$\tan \gamma = \frac{D}{L} = \frac{C_{D0} + kC_{L\alpha}^2\alpha^2}{C_{L\alpha}\alpha} \quad (2.8)$$

Observando la Ecuación 2.8 se puede concluir que, para un mismo ángulo de ataque (α), la senda de planeo (γ) dependerá de los parámetros:

- C_{D0} : resistencia parásita, compuesta por la resistencia de presión y de fricción, y depende de la forma hidrodinámica del planeador.
- k : coeficiente de resistencia inducida, que depende de la geometría del ala. pendiente de la curva del C_L , que depende del perfil hidrodinámico utilizado y la geometría del ala.

Como se puede ver, las diferencias en el ángulo de planeo se deben principalmente a la geometría de los distintos componentes del planeador.

En segundo lugar, de una forma similar se puede obtener una expresión para la eficiencia hidrodinámica, tal y como se muestra en la Ecuación 2.9, en la que se ha considerado un perfil hidrodinámico simétrico. Como se puede ver, la eficiencia también dependerá de los parámetros del planeador y del ángulo de ataque.

$$E = \frac{L}{D} = \frac{C_{L\alpha}\alpha}{C_{D0} + kC_{L\alpha}^2\alpha^2} \quad (2.9)$$

Por último, se va a buscar una relación entre la velocidad de planeo del vehículo y su flotabilidad. De esta forma se podrá determinar cómo debe actuar el sistema de flotación para conseguir una determinada velocidad.

De nuevo, a partir de la Figura 2.7b se puede definir:

$$\Delta B \cos \gamma = L \implies \Delta B \cos \gamma = \frac{1}{2}\rho U^2 S C_L \quad (2.10)$$

A partir de la Ecuación 2.10 y considerando que se trabaja con un perfil simétrico, se puede deducir qué flotabilidad será necesaria para mantener una determinada velocidad y senda de planeo (Ecuación 2.11), y qué velocidad llevará el planeador para una determinada flotabilidad y senda de planeo (Ecuación 2.12).

$$\Delta B = \frac{-1\rho SC_L U^2}{2 \cos \gamma} = \frac{\rho SC_{L\alpha} \alpha U^2}{2 \cos \gamma} \quad (2.11)$$

$$U = \sqrt{\frac{2\Delta B \cos \gamma}{\rho SC_L}} = \sqrt{\frac{2\Delta B \cos \gamma}{\rho SC_{L\alpha} \alpha}} \quad (2.12)$$

Capítulo 3

Fundamentos de CFD

Como ya se ha comentado anteriormente, el análisis hidrodinámico del Spray y el Seaglider se va a llevar a cabo mediante Mecánica de Fluidos Computacional o CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

Se trata de una técnica empleada para resolver problemas de mecánica de fluidos mediante simulaciones numéricas. Se desarrolló con la intención de reducir los elevados costes de las técnicas experimentales y realizar estudios cuyas mediciones son complicadas, como es el caso de la combustión, la distribución de temperatura, o el flujo supersónico. Aunque en la mayoría de los estudios se consigue una gran fiabilidad en los resultados, en algunos casos esta técnica se debe complementar con estudios experimentales. Es por ello que en este trabajo se contrastarán los resultados obtenidos con los de análisis experimentales, con el fin de corroborar que son correctos.

Las ecuaciones que describen el movimiento de un fluido son las conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes. De forma general estas ecuaciones carecen de solución analítica, por lo que se recurre a métodos numéricos para hallar una solución aproximada del problema. Dicho problema debe ser previamente discretizado, siendo el método más común en CFD el de volúmenes finitos. De esta forma se pasa de tener un dominio continuo a uno discreto formado por un conjunto de volúmenes de control. Las ecuaciones de conservación se plantean para cada uno de estos volúmenes de control, generando un sistema de ecuaciones que debe resolverse numéricamente.

Como se puede ver en la Figura 3.1, la metodología CFD está compuesta por una serie de etapas que se deben seguir al realizar un estudio para obtener resultados con una calidad adecuada. Estas etapas son:

- **Pre-proceso:** consiste en la preparación de la simulación para obtener el campo fluido. Se deben plantear los objetivos del estudio, determinar la geometría del problema y el dominio computacional, generar el mallado (discretización del problema), caracterizar las condiciones del fluido y la simulación, y establecer aspectos numéricos para la resolución de las ecuaciones.
- **Cálculo:** se plantean las ecuaciones de transporte discretizadas, y se resuelve el sistema de ecuaciones algebraico que estas componen. Los cálculos se llevan a cabo de forma iterativa, y se deben establecer unos criterios para determinar cuándo la solución está convergida.

- Post-proceso:** en primer lugar se debe comprobar la independencia de malla y se deben validar los resultados. Una vez hecho esto, se puede interpretar la solución proporcionada para obtener los resultados buscados y llegar a unas determinadas conclusiones. Para ello se pueden representar las soluciones de distintas formas, como graficando variables o representando magnitudes escalares y líneas de corriente.

En el siguiente capítulo se detallan estos procesos aplicados al estudio hidrodinámico del Spray y el Seaglider, y se presentan los resultados y conclusiones obtenidas.

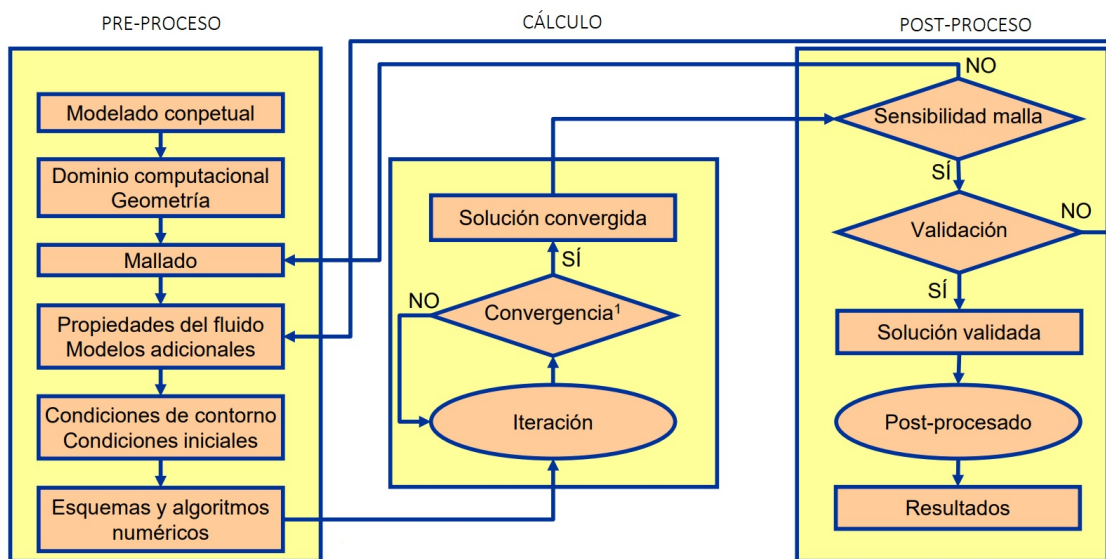


Figura 3.1: Etapas de la metodología CFD [41].

Capítulo 4

Desarrollo del estudio

4.1. Modelado conceptual

4.1.1. Planeadores de estudio

Los dos modelos de planeador que se van a estudiar y comparar son el Spray y el Seaglider. Se trata de dos planeadores que están operativos desde 2004 y se han utilizado para distintas misiones científicas. En la Figura 4.1 y Figura 4.2 se pueden observar dos imágenes de sus planos.

Se ha decidido comparar estos planeadores porque son similares en su modo de funcionamiento y características. Por ejemplo, ambos planeadores tienen unas dimensiones similares. Su tamaño y peso hacen que se puedan manejar sin necesidad de equipamiento especial y que algunos factores operacionales como el cambio de baterías sean más fáciles.

Ninguno de los dos posee superficies externas móviles, por tanto, para controlar el rumbo utilizan el método consistente en la rotación de una masa excéntrica alrededor de su eje longitudinal para generar un momento de alabeo.

La velocidad máxima de operación es de aproximadamente 45cm/s , y su velocidad de crucero para alargar las misiones al máximo debe ser de alrededor de 25cm/s , velocidad a la que ya son capaces de contrarrestar corrientes oceánicas modestas.

Pueden operar en un amplio rango de pendientes de planeo para cubrir todos los perfiles que se necesita explorar. Las trayectorias con pendientes más suaves se utilizan para misiones de reconocimiento, mientras que las trayectorias de mayor inclinación son útiles para misiones de tipo amarre virtual. Sin embargo, el Spray y el Seaglider no están optimizados para operar en zonas costeras.

En la Tabla 4.1 se recogen las principales características de cada uno de ellos y a continuación se detallan algunas diferencias estructurales:

- **Casco:** el Spray utiliza un casco en forma de esferoide, es decir, su sección transversal es una circunferencia mientras que la longitudinal es una elipse. Se trata del único casco que posee el planeador, y se encarga tanto de soportar la presión como de aportar la forma hidrodinámica descrita. El casco está constituido por tres segmentos

de aluminio 6061 T6 sellados por anillos circulares, y su espesor general es de $6,4mm$.

A diferencia del Spray, el Seaglider posee un doble casco: uno interno para soportar la presión y otro externo para aportar una forma hidrodinámica adecuada.

El casco externo está hecho de fibra de vidrio de espesor $3,8mm$. Se trata de un carenado al que se unen el ala y estabilizador, que presenta una forma ahusada suave. Por tanto, su sección transversal es una circunferencia mientras que la longitudinal tiene una forma ojival compuesta por varios arcos de circunferencia.

El casco de presión está hecho de aluminio AA6061 T6, y se encuentra inundado en el interior del carenado.

- **Ala y estabilizador:** ambos utilizan perfiles hidrodinámicos simétricos de distintos espesores, tanto para el ala como para el estabilizador. De esta forma se consigue que el comportamiento del planeador sea el mismo para ángulos de ataque positivos y negativos, es decir, cuando se está sumergiéndose y cuando está emergiendo.

El Spray presenta un ala rectangular con gran alargamiento situada en la parte central del planeador y con una flecha de $\Lambda = 5^\circ$; y un estabilizador trapezoidal. En cuanto al Seaglider, presenta un ala trapezoidal de menor alargamiento situada hacia la parte posterior del planeador, y con flecha en el borde de ataque de $\Lambda = 13^\circ$. El estabilizador también tiene forma trapezoidal.

- **Navegación y comunicación:** ambos planeadores utilizan la localización GPS cuando están en la superficie, y navegan por estima cuando están sumergidos.

En el caso del Spray, las antenas están situadas en un ala, por tanto, para la transmisión de datos debe realizar un movimiento de alabeo (*roll*) de aproximadamente $\phi = 90^\circ$ para encararlas. En cambio, el Seaglider tiene las antenas montadas de forma axial en la parte trasera, por lo que para sacarlas y encararlas debe realizar un movimiento de cabeceo (*pitch*).

Parámetro	Spray	Seaglider
Longitud	$2m$	$1,8m$
Envergadura	$1,2m$	$1m$
Peso	$50kg$	$52kg$
Rango	$7000km$	$4600km$
Profundidad máxima	$1500m$	$1000m$
Carga de pago	$3,5kg$	$4kg$

Tabla 4.1: Comparación de las principales características de los planeadores de estudio.

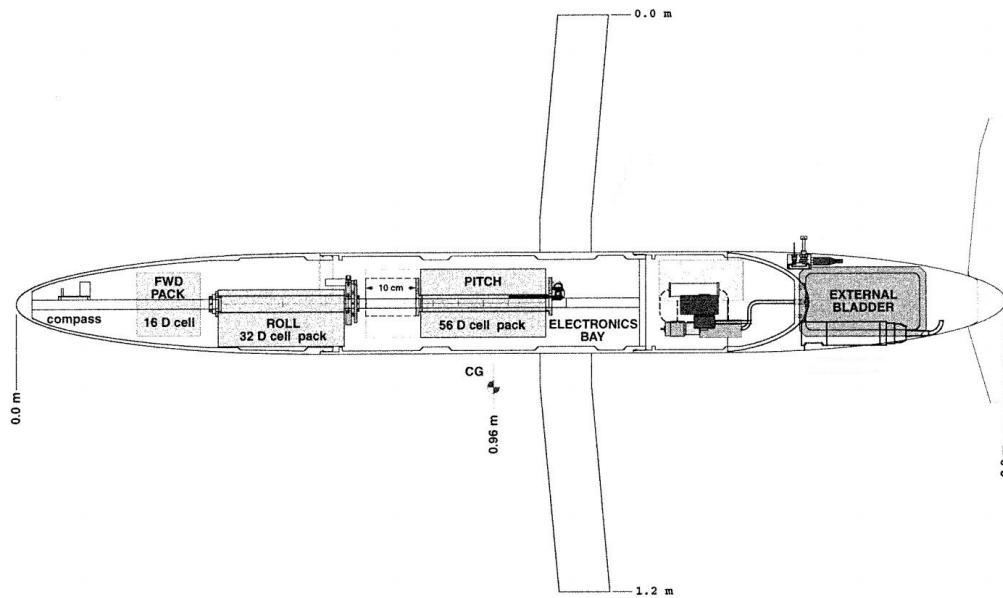


Figura 4.1: Plano del Spray Glider [25].

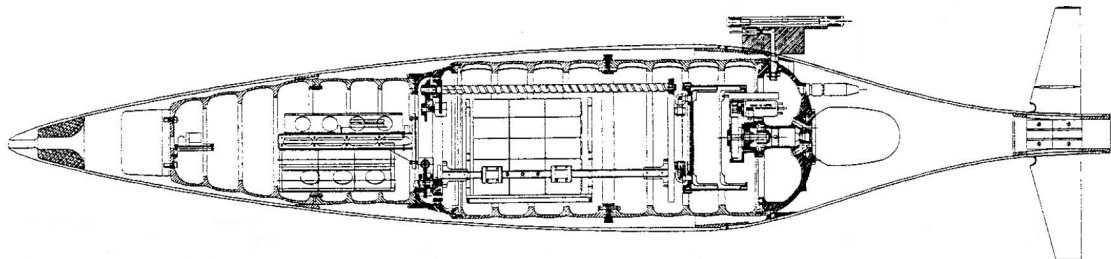


Figura 4.2: Plano del Seaglider [26].

4.1.2. Simplificaciones del problema

Para realizar el análisis de estos planeadores mediante CFD se han llevado a cabo algunas simplificaciones.

Puesto que tanto el Spray como el Seaglider tienen simetría axial, solo se ha utilizado una mitad del planeador para los cálculos. De esta forma se consigue tener un menor coste computacional ya que el dominio de cálculo se reduce a la mitad.

Ya se ha explicado anteriormente que estos planeadores siguen una trayectoria de diente de sierra, por tanto, se trata de un movimiento estacionario excepto cuando se cambia la dirección y se pasa de descender a ascender, o viceversa. En este caso no se han estudiado las partes transitorias, por lo que el problema estudiado es completamente estacionario.

4.2. Generación y discretización del dominio computacional

4.2.1. Geometría

Para obtener la geometría de los planeadores se ha utilizado un programa CAD y se han seguido las dimensiones recogidas por revisión bibliográfica. Puesto que algunas medidas eran desconocidas, se ha realizado el diseño de tal forma que la geometría quede suave y su aspecto sea similar en proporciones al original.

A pesar de que el Spray y el Seaglider utilizan perfiles aerodinámicos distintos, a la hora de modelarlos se ha utilizado el perfil NACA 0012 para ambos casos, tanto para el ala como para el estabilizador. Se trata de un perfil simétrico que no presenta curvatura. Tiene un espesor máximo del 12% de la cuerda, y está situado al 30% de la cuerda.

En las Figuras 4.3a y 4.3b se muestran los planos de las geometrías generadas, y en la Tabla 4.2 se muestran sus principales dimensiones.

	Spray	Seaglider
Longitud	2m	1,674m
Envergadura	1,2m	1m
Diámetro máximo	0,2m	0,269m
Longitud estabilizador	0,561m	0,375m
Cuerda alar	0,1m	0,195m (encastre) 0,11m (punta)
Cuerda estabilizador	0,07m (raíz) 0,045m (punta)	0,08m (raíz) 0,06m(punta superior) 0,07m(punta inferior)
Flecha alar	5°	13° (LE), 0° (TE)
Flecha estabilizador	3,8° superior 7,12° inferior	6,3° superior 4,63° inferior

Tabla 4.2: Dimensiones de los planeadores modelados.

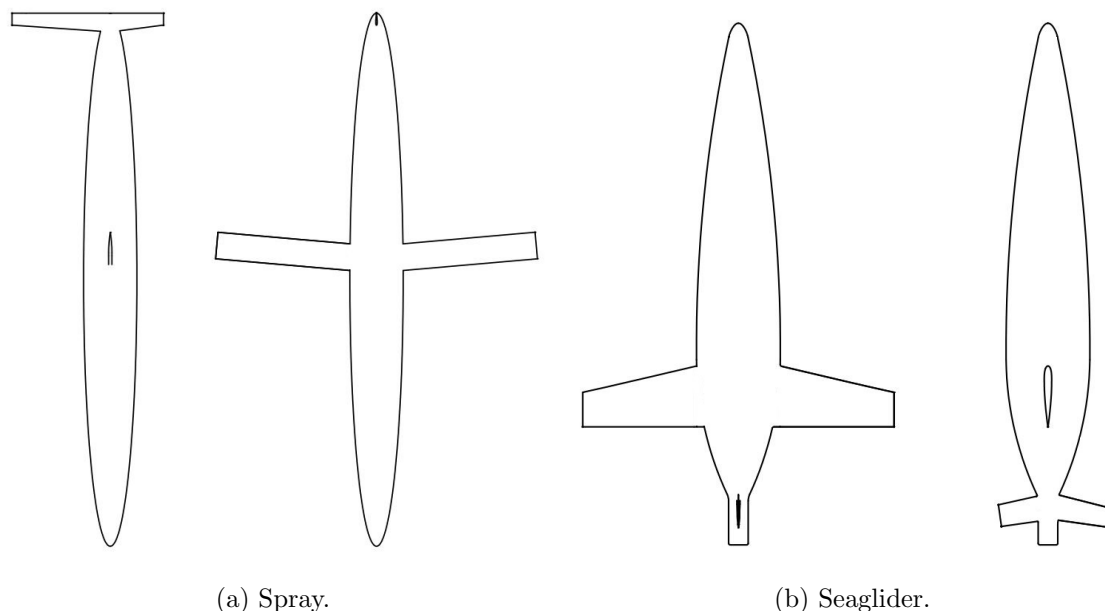


Figura 4.3: Planos de los modelos 3D de los planeadores de estudio.

4.2.2. Dominio computacional

El dominio computacional es el volumen de control dentro del cual se resolverán las ecuaciones de conservación. Este dominio debe ser lo suficientemente grande para que las perturbaciones no lleguen a las fronteras y se reflejen hacia el planeador, alterando así los resultados. Sin embargo, también se debe tener en cuenta el coste computacional que supone el tamaño de dicho dominio, tratando de evitar un exceso de celdas.

En este caso, el volumen de control está formado por un cilindro y una semiesfera situada en su extremo anterior. El hecho de que las fronteras del dominio sean redondeadas permite reducir el coste computacional y reducir recursos en zonas que no son de interés. Puesto que solo se utiliza la mitad de los planeadores para realizar los cálculos, el volumen de control también será la mitad del cilindro y la esfera. En la Figura 4.4 se muestran un esquema de la geometría descrita, y en la Figura 4.5 se puede ver una escena del dominio en STAR CCM+, en la que se puede apreciar la posición del planeador en el centro.

Las dimensiones del volumen de control son de $20L_P$ de longitud y $10L_P$ de diámetro, siendo L_P la longitud del planeador. Por tanto, el tamaño del dominio no es el mismo para el Spray y para el Seaglider, ya que es proporcional a las dimensiones de cada planeador. Cada vehículo está situado en el centro del dominio, en la frontera que corresponde al plano de simetría.

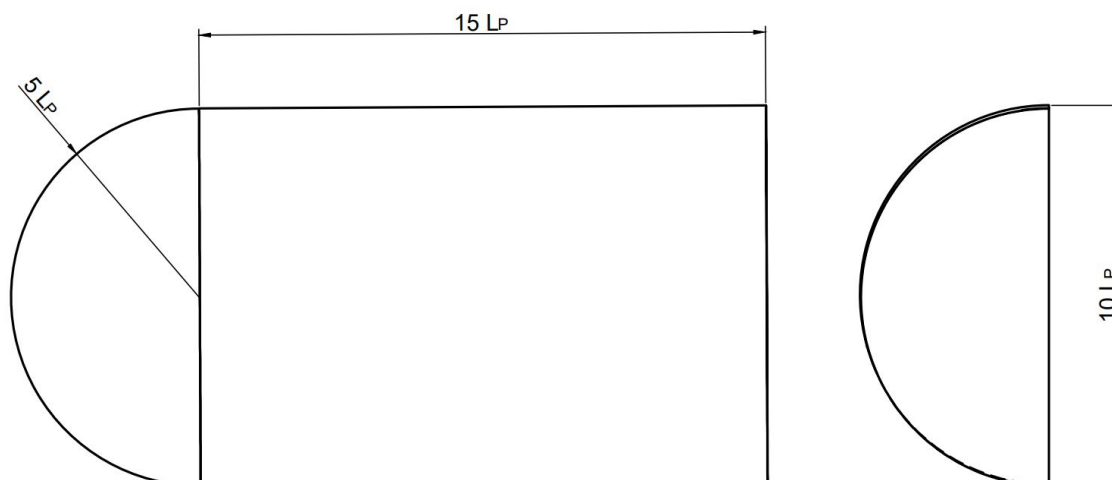


Figura 4.4: Esquema del dominio computacional.

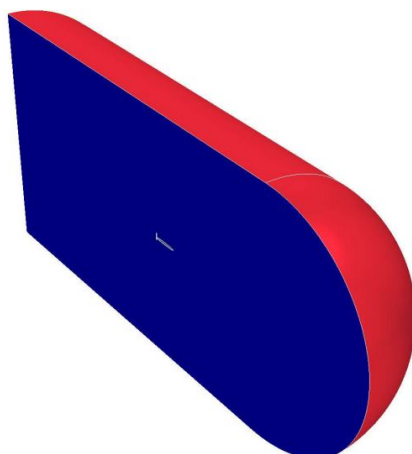


Figura 4.5: Escena del dominio computacional.

4.2.3. Malla

Estudio de independencia de malla

La estrategia seguida para construir la malla consiste en utilizar una capa de celdas prismáticas que cubra la capa límite cercana a las superficies del planeador, y el resto de los elementos de malla poliédricos. Con el fin de evitar interferencias entre la capa prismática de distintas superficies, se decide no aplicar dicha capa a las superficies planas correspondientes a la punta del ala y la punta del estabilizador.

Con el fin de obtener unos resultados suficientemente fiables se ha buscado obtener en todas las superficies un valor de y^+ inferior a 30. El parámetro y^+ se define como una distancia adimensional a la pared, es decir, una distancia adimensional desde el punto donde se evalúan los parámetros que rigen la dinámica del flujo hasta la superficie de

estudio. Se utiliza para describir cuantitativamente la densidad de la malla en las paredes del objeto. El tener un tamaño de celda apropiado cerca de las paredes de estudio es un aspecto importante en el que se debe tener en cuenta el modelo de turbulencia seleccionado, ya que los resultados son sensibles al modelo escogido. Por tanto, reduciendo el valor de y^+ se consigue que la magnitud de la turbulencia y de la malla sean más cercanos, y por tanto, que el resultado obtenido capte más detalladamente los vórtices de turbulencia en la capa límite.

Teniendo en cuenta estos aspectos, se empieza realizando una malla a la que se van introduciendo mejoras y estudiando la variación de dos variables de interés (la resistencia y la sustentación), con el fin de determinar cuál es la más apropiada de acuerdo a la exactitud de los resultados y el coste computacional.

- **Malla 1:** siguiendo la estrategia explicada anteriormente, se utiliza una *Prism Layer* con la misma configuración sobre todas las superficies del planeador, buscando un valor de y^+ inferior a 30. La *Prism Layer* se elimina de las superficies plana de la punta de ala y del estabilizador, y el resto de las celdas son poliédricas con *Base Size* de $0,3m$.
- **Malla 2:** partiendo de los resultados de la Malla 1, se observan las dimensiones aproximadas de la capa límite en cada superficie y se ajusta la configuración de la *Prism Layer* a cada una de ellas. De esta manera se consigue disminuir el y^+ en las zonas en las que es mayor, que como se puede ver en la Figura 4.6a son el ala, el estabilizador y la nariz del casco. Por tanto, se crea una *Prism Layer* de menores dimensiones en las superficies correspondientes al ala y el estabilizador. La disminución de los valores de y^+ se puede ver en la Figura 4.6b.
- **Malla 3:** además del refinamiento de la capa límite de la Malla 2, se crea un cilindro que rodea al planeador con el objetivo de disminuir el *Base Size* de las celdas poliédricas que se encuentran en su interior. El radio del cilindro es de $1m$, con el objetivo de cubrir las zonas de mayor interés. En la Figura 4.7a se observan tres valores para la Malla 3, y cada uno de ellos representa un tamaño de celda en el interior del cilindro. Se prueba con diferentes valores de *Base Size* ($0,2m, 0,13m, 0,038m$) de manera que el número de celdas se multiplique cada vez por 1,5 aproximadamente dentro de los cilindros. En la Figura 4.7a se muestra la parte de malla correspondiente al cilindro.
- **Malla 4:** de forma similar al caso anterior, se crea una geometría formada por dos cilindros que rodea al planeador, como se observa en la Figura 4.7b. El radio del mayor es de $1,5m$ y el del menor de $1m$. De esta forma se consigue cubrir totalmente las zonas de mayor interés de una forma más ajustada para los casos de mayor desprendimiento. De nuevo se prueba con distintos valores de *Base Size* representados por las distintas marcas correspondientes a la Malla 4.

En las Figuras 4.8 y 4.9 se pueden observar los distintos valores de las variables de interés (sustentación y resistencia) obtenidos para cada una de las mallas y para ambos planeadores. La malla más fina, y por tanto la que proporciona resultados más precisos, es la Malla 4. Puesto que esta malla supone un elevado coste computacional, se han establecido unos límites para las variables de interés dentro de los cuales se considera que los resultados son aceptables. Estos límites corresponden a un 1% de error respecto a la malla más precisa (Malla 4), y en los gráficos de las Figuras 4.8 y 4.9 se representan por las líneas rojas.

Teniendo en cuenta el coste computacional, la precisión de las variables de interés y el estudio de los resultados obtenidos mediante la representación de escenas de velocidad, se considera que la malla más adecuada en el caso del Spray es la Malla 4 con un *Base Size* de 0,2m. En cuanto al Seaglider, se considera que la más adecuada es la Malla 4 con un *Base Size* de 0,13m. La configuración para estas mallas se detalla en el siguiente apartado.

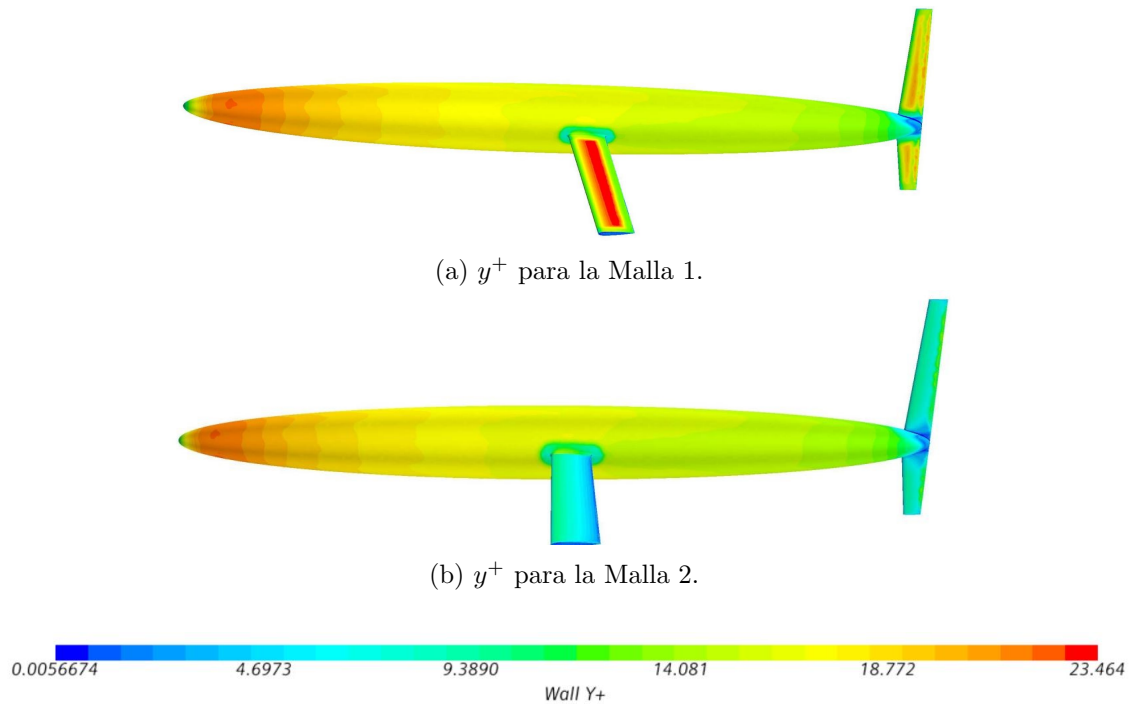


Figura 4.6: Valores de y^+ obtenidos en las superficies del planeador para distintas mallas.

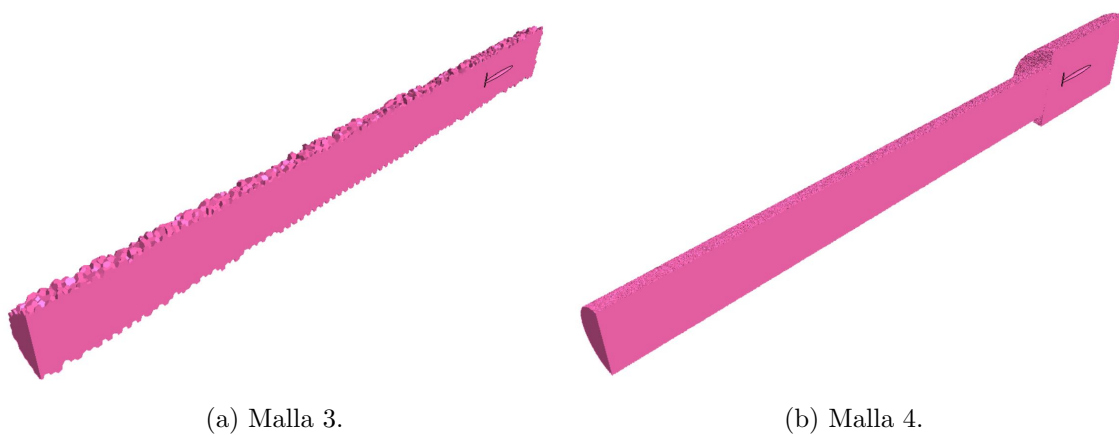
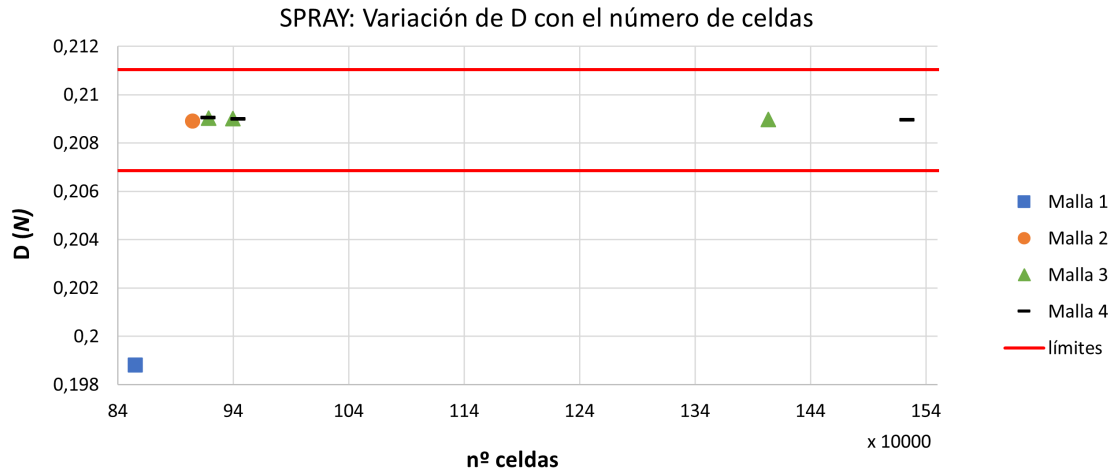
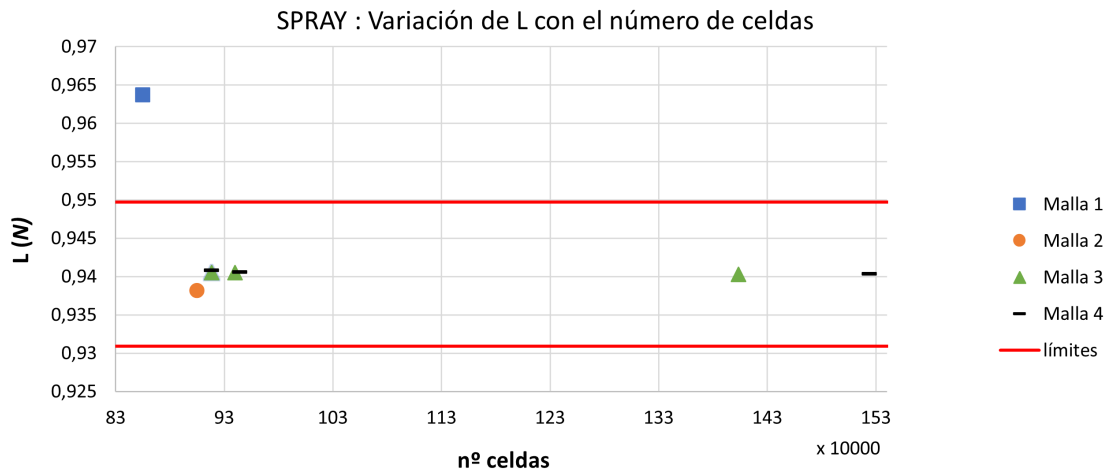


Figura 4.7: Cilindros con menor *Base Size* rodeando al planeador.

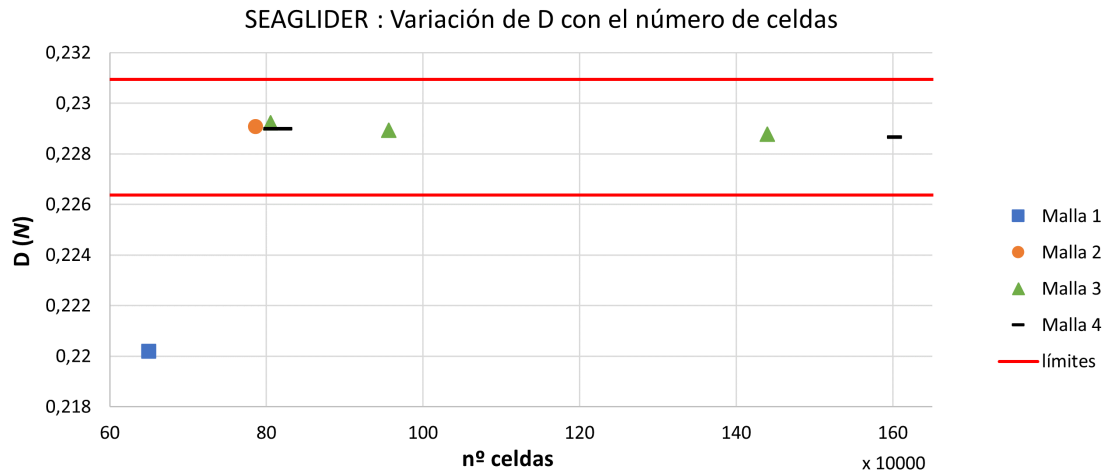


(a) Variación de la resistencia del Spray con el número de celdas.

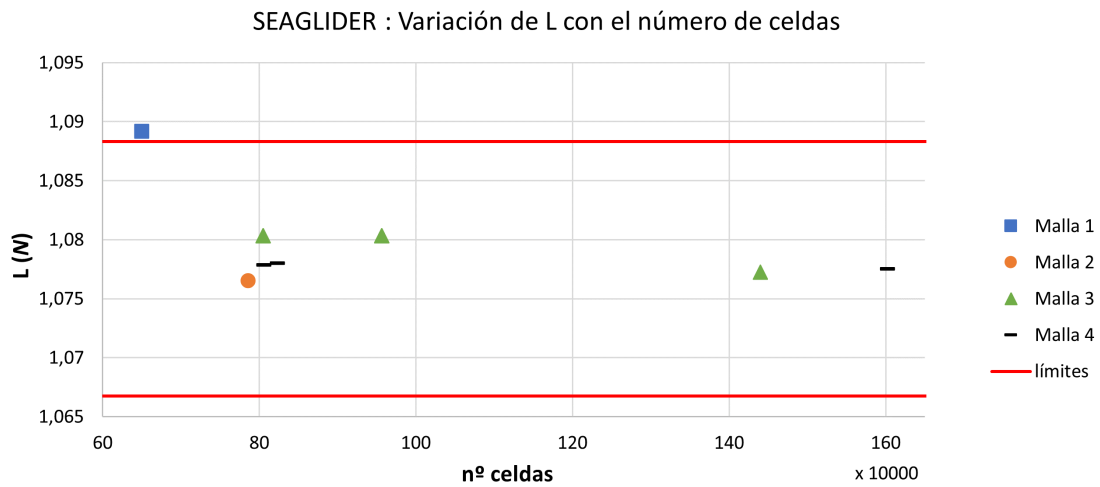


(b) Variación de la sustentación del Spray con el número de celdas.

Figura 4.8: Estudio de sensibilidad de malla del Spray.



(a) Variación de la resistencia del Seaglider con el número de celdas.



(b) Variación de la sustentación del Seaglider con el número de celdas.

Figura 4.9: Estudio de sensibilidad de malla del Seaglider.

Configuración de las mallas escogidas

Se trata de mallas automáticas no estructuradas en las que se seleccionan las siguientes opciones:

- *Polyhedral mesher*: para que las celdas del núcleo de la malla sean poliédricas, como ya se ha comentado anteriormente.

- *Prism Layer mesher*: para que se genere una capa prismática sobre las superficies de forma que la capa límite quede cubierta por ella.
- *Surface Remesher*: mejora las superficies de la geometría. Es conveniente ya que a partir de ella se genera la malla volumétrica.
- *Automatic Surface repair*: corrige problemas geométricos que pueden surgir debido al uso de *Surface Remesher*.

Para las celdas poliédricas se han establecido de forma general los siguientes ajustes:

- *Base Size*: 0,3m. Es la dimensión característica de la celda.
- *Target Surface Size*: 100 %. Longitud de los bordes respecto al *Base Size* que buscará el mallador.
- *Minimum Surface Size*: 0,1 %. Especifica el tamaño medio de los bordes de la celda en la superficie de la malla.
- *Maximum Cell Size*: 1000 %. Tamaño máximo de los bordes de la celda en la superficie de la malla
- *Volume Growth rate*: 1,2. Define el crecimiento del tamaño de las celdas a medida que se alejan de la región de interés.

Para las celdas prismáticas que se encuentran en el interior de los cilindros, se establece una dimensión característica de 0,2m en el caso del Spray y de 0,13m en el caso del Seaglider.

En cuanto a la configuración de la capa prismática, distinguimos tres regiones: la que corresponde al fuselaje, la del ala y la del estabilizador. A cada una se le deben asignar unos parámetros con el fin de conseguir un valor de y^+ apropiado en todas las superficies. Para calcular estos parámetros se siguen los siguientes pasos:

- **Espesor de la primera capa de la *Prism Layer***: se estima su valor usando una calculadora de una página web [27] [28]. Para el cálculo se consideran las dimensiones del planeador, las condiciones en las que se encuentra, y el valor de y^+ deseado. El resultado es el espesor aproximado que debe tener la primera capa prismática (Δs) para obtener dicho valor de y^+ . En la Tabla 4.3 se muestran los datos y resultados para cada planeador. El cálculo de algunos de los parámetros utilizados se detalla en el apartado 4.3.

Prámetro	SPRAY	SEAGLIDER
U_∞	0,25m/s	
y^+	30	
ρ	1031,6kg/m ³	
μ	1,2910 ⁻³ kg/ms	
L_P	2m	1,67m
Δs	0,0033m	0,0032m

Tabla 4.3: Valores de entrada y salida en la calculadora de y^+ .

- **Espesor total de la *Prism Layer*:** ya que la capa prismática debe cubrir la capa límite, se estima el espesor de la capa límite utilizando la correlación correspondiente a la Ecuación 4.1 que depende del Re_x , es decir, considerando la longitud del planeador como dimensión característica. Dicha correlación ha sido obtenida para el caso de flujo paralelo turbulento sobre una placa plana, que se asemeja al flujo externo turbulento que presenta el planeador.

$$\delta = 0,37xRe_x^{-1/5}[29] \quad (4.1)$$

- **Número de capas y factor de estrechamiento:** se utiliza la correlación correspondiente a la Ecuación 4.2 para calcular el coeficiente de fricción. La correlación se ha obtenido bajo las mismas condiciones que en el caso anterior.

A partir del coeficiente de fricción se calculan los esfuerzos tangenciales (Ecuación 4.3), y posteriormente la velocidad tangencial o de fricción (Ecuación 4.4). Mediante la Ecuación 4.5 se puede calcular la distancia absoluta a la pared utilizando los valores de N (número de capas) y K (factor de estrechamiento). Por último, el valor estimado de y^+ se obtiene utilizando la Ecuación 4.6. De esta forma, probando distintos valores de N y K se determina cuáles son los adecuados para obtener el y^+ estimado que se desee.

$$C_f = 0,00592Re_x^{-1/5}[29] \quad (4.2)$$

$$\tau_w = C_f \frac{1}{2} \rho u_\infty^2 \quad (4.3)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (4.4)$$

$$y = \frac{1}{2} \frac{\delta}{(1 - k^N)(1 - k)} \quad (4.5)$$

$$y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu} \quad (4.6)$$

Malla resultante

En la Figura 4.10 se muestra la malla generada. Esta imagen corresponde al plano de simetría del planeador. Se puede ver la capa de celdas prismáticas que rodea al vehículo, y que las celdas que están más alejadas son poliédricas.

En la Figura 4.11 se muestra la malla desde un plano transversal al planeador. En esta imagen se puede observar que la capa prismática del ala es menor que la que rodea el casco, y en la imagen ampliada se ve la transición entre ellas. Además, también se puede ver que en la punta del ala no hay capa prismática para evitar interferencias, como ya se ha comentado anteriormente.

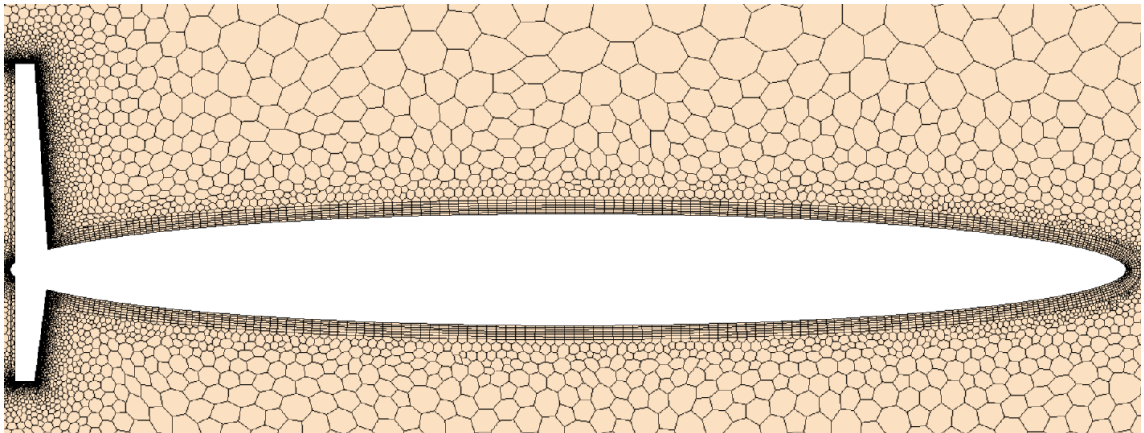


Figura 4.10: Escena de la malla en el plano de simetría del planeador.

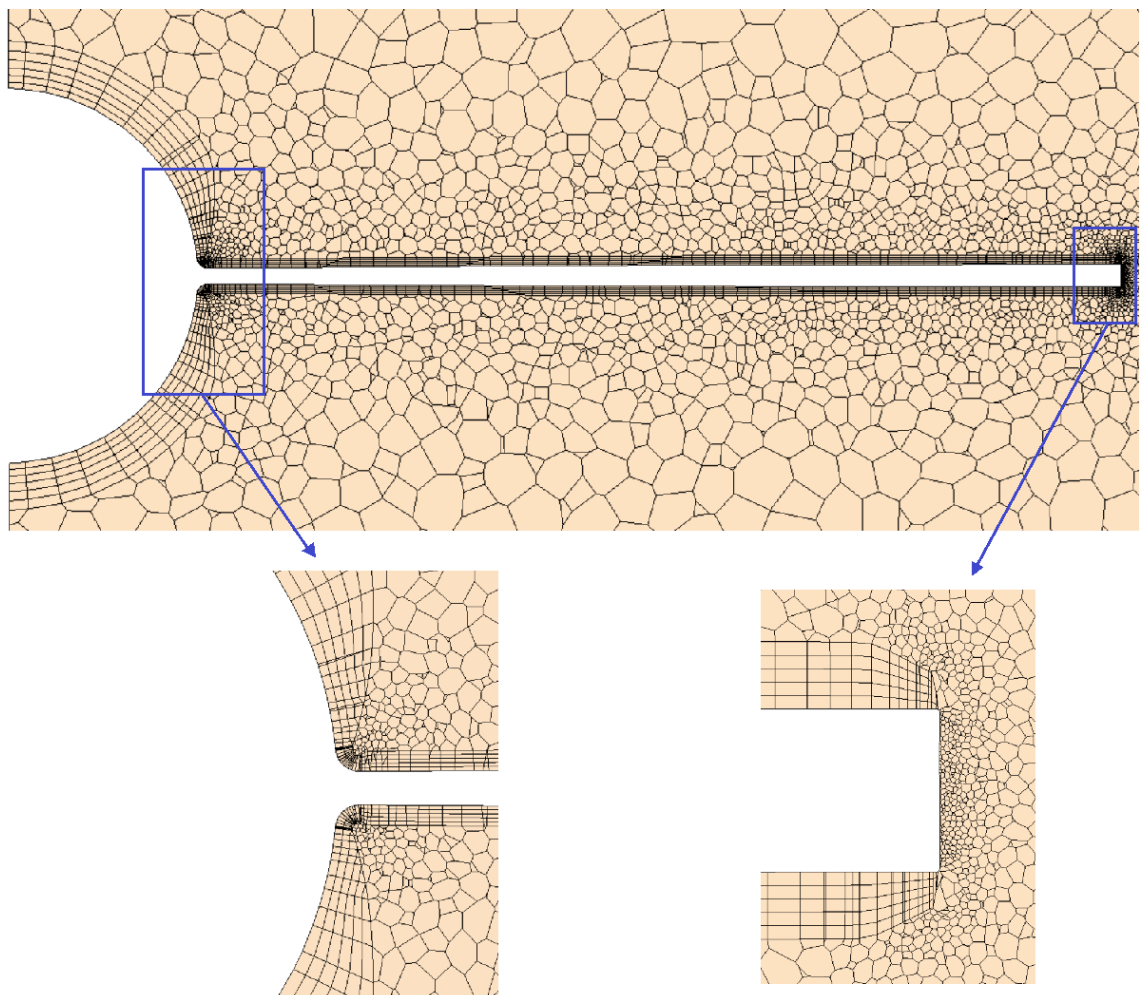


Figura 4.11: Escena de la malla en una sección transversal del planeador.

4.3. Configuración de la simulación

4.3.1. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno que se han empleado en la simulación son las siguientes:

- **Superficies del planeador:** condición de contorno de pared (*Wall*). De esta forma el planeador es una superficie impermeable sobre la que se consigue la condición de no deslizamiento, puesto que se trata de flujo viscoso.
- **Plano de simetría:** condición de contorno de simetría (*Symmetry plane*), para representar un plano de simetría imaginario en la simulación.
- **Entrada (semiesfera):** condición de contorno de velocidad de entrada (*Velocity Inlet*), especificando la dirección del flujo y la magnitud de la velocidad.
- **Salida (base del cilindro):** condición de contorno de salida (*Outlet*), para que el flujo se dirija exclusivamente hacia fuera.
- **Superficies exteriores (lado del cilindro):** condición de contorno de velocidad de entrada (*Velocity Inlet*), especificando la misma dirección del flujo y magnitud de la velocidad que en la semiesfera.

4.3.2. Propiedades del fluido y condiciones de navegación

Para el desarrollo de este trabajo se ha supuesto que los planeadores navegan por el mar Mediterráneo y a una profundidad de 500m.

Para determinar los parámetros de dichas condiciones de navegación se considera una presión aproximada para una profundidad de 500m [30], y partir de la temperatura y salinidad del Mediterráneo y la presión se puede calcular la densidad del agua [31]. Las propiedades y características del agua de mar en estas condiciones se recogen en la Tabla 4.4.

Parámetro	Valor
Temperatura (T)	12°C[32]
Salinidad (S)	38g/L
Presión (p)	51,53bar[30]
Densidad (ρ)	1031,6kg/m ³ [31]
Viscosidad dinámica (μ)	1,2910 ⁻³ kg/ms [33]

Tabla 4.4: Propiedades del agua del Mediterráneo a 500m de profundidad.

4.3.3. Modelos seleccionados para el flujo

Teniendo en cuenta los aspectos comentados anteriormente, las especificaciones seleccionadas para el cálculo son las siguientes:

- **Space: Three Dimensional.** Para indicar que el volumen de control es tridimensional.
- **Time: Steady.** Para considerar el problema estacionario y simplificar el término transitorio de las ecuaciones de transporte.
- **Material: Liquid.** Indica el estado del fluido, que es el agua en este caso.
- **Flow: Segregated Flow.** Utilizando generalmente un esquema de discretización de segundo orden, excepto en los casos en los que no se alcanza la convergencia y se cambia a primer orden.
- **Equation of State: Constant Density.** Se establece que la densidad es constante ya que para los cálculos se está considerando que el planeador se encuentra a una profundidad determinada.
- **Viscous Regime: Turbulent.** Al tratarse de agua, el régimen turbulento se considera a partir de $Re = 2000$, y por tanto se trata de un problema en régimen turbulento.
- **Reynolds-Averaged Turbulence: K-Omega Turbulence.** Se trata de un modelo de turbulencia RANS ¹ que modela la viscosidad turbulenta utilizando dos ecuaciones.

4.3.4. Criterios de convergencia

El proceso iterativo que se lleva a cabo para la resolución del problema se puede detener cuando los sistemas de ecuaciones satisfacen una cierta tolerancia. Dicha tolerancia se establece mediante los criterios de convergencia seleccionados, que, para este caso, son los explicados a continuación:

- **Los residuales deben ser de un orden inferior a 10^{-3} .** Los residuales cuantifican el error en la solución del sistema de ecuaciones, es decir, el grado en que las ecuaciones discretizadas se satisfacen. Para ello se mide el desequilibrio de las variables conservadas en cada volumen de control. Por tanto, cada celda tendrá su propio valor residual, que nunca será cero.
- **La solución no debe presentar fenómenos espurios.** Esto quiere decir que no se deben observar fenómenos antinaturales en los resultados obtenidos. Para realizar la comprobación se observa el campo de velocidades alrededor del planeador.
- **La tasa de variación de las variables de interés debe ser inferior al 0,1 %.** En este caso se han seleccionado como variables de interés las fuerzas de sustentación y resistencia. Estas variables deben presentar una tendencia asintótica hacia su valor final.

Para aquellos casos en los que usando la configuración explicada anteriormente la solución no convergía, se ha optado por utilizar un esquema de discretización de 1^{er} orden, a partir de las iteraciones ya realizadas y la solución no convergida.

¹RANS: (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*). Se trata de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas, en las que se debe modelar el tensor de esfuerzos de Reynolds. Existen varios modelos: lineales, no lineales, algebraicos, de una ecuación, de dos ecuaciones, etc.

4.4. Validación de los modelos

Para llevar a cabo el análisis de los resultados obtenidos mediante CFD es necesario ratificar que estos son correctos. Para ello se deben comparar dichos resultados con los de otros estudios similares, ya sean experimentales o numéricos.

Si se observa que las soluciones obtenidas son similares, se puede considerar que se trata de resultados correctos y, por tanto, que el modelo que se ha utilizado es adecuado para resolver el problema que se está tratando.

A continuación se muestran comparaciones entre los resultados obtenidos para el Spray y el Seaglider y otros estudios realizados para planeadores iguales o similares.

4.4.1. Validaciones para el Spray

En primer lugar se analiza la resistencia generada por el casco del Spray, contrastando los resultados obtenidos mediante CFD con los de un estudio experimental en el que se estudia únicamente el casco del planeador [25].

En la Figura 4.12 se muestra la evolución del coeficiente de resistencia generada por el casco con el número de Reynolds para el caso experimental y el CFD. Las dimensiones de referencia empleadas son la longitud del planeador (L_P) para el Re , y el volumen del casco elevado a $2/3$ ($V_{casco}^{2/3}$) en el caso del coeficiente de resistencia, puesto que son las dimensiones empleadas en el estudio experimental.

Como se puede observar, en los cálculos CFD se subestima la resistencia respecto a los resultados experimentales, siendo el valor medio del C_D un 70 % superior en el caso experimental. Esto puede deberse, en primer lugar, a las simplificaciones realizadas en el modelo CFD y a que la superficie real del Spray puede tener cierta rugosidad. En segundo lugar, a pesar de que en el caso CFD se considera el valor de resistencia generado por el casco que proporciona STAR CCM+, en el modelo también se incluyen el ala y estabilizador que pueden variar este resultado.

Teniendo en cuenta que los valores se encuentran dentro del mismo orden de magnitud, la subestimación del C_D no se considera de gran importancia puesto que es habitual en los cálculos CFD, ya que nunca se llega a resolver estrictamente la capa límite. Para obtener una mayor exactitud sería necesaria una malla más fina.

En segundo lugar, se comparan los resultados obtenidos en un estudio CFD del planeador USM Underwater Glider [34] con los obtenidos para el Spray. Como se puede ver en la Figura 4.13, el USM Underwater Glider es un planeador similar al Spray, aunque de menor longitud y diámetro.

En la Figura 4.14 y Figura 4.15 se muestra la comparación de los resultados. Aunque las velocidades representadas no son las mismas para el Spray que para el USM, son muy similares y se consideran adecuadas para realizar una comparación aproximada. La superficie de referencia utilizada para calcular los coeficientes es la mitad de la superficie alar.

Como se puede observar en las gráficas, los valores de C_L son muy similares en todos los casos. La mayor diferencia es de un 6 % respecto al valor del USM, y se produce para un

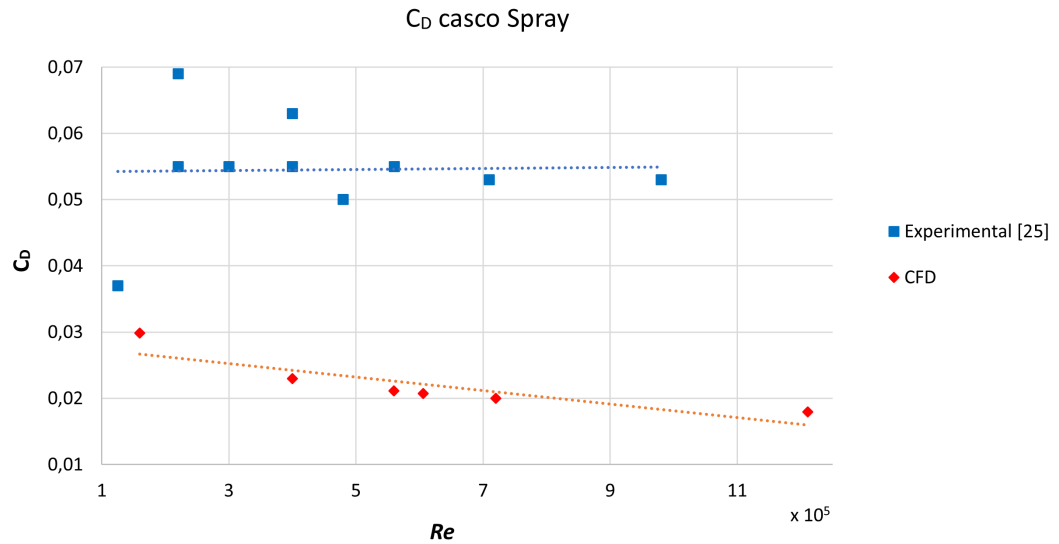


Figura 4.12: Variación del C_D del casco con el Re para los casos experimental y CFD.

ángulo de ataque de 8° y a velocidades altas. En cuanto al C_D , se puede ver una pequeña diferencia en la que se deben considerar las desigualdades entre velocidades representadas y las diferencias geométricas entre planeadores.

Puesto que los valores son similares y del mismo orden de magnitud, se considera que los resultados del Spray son válidos.

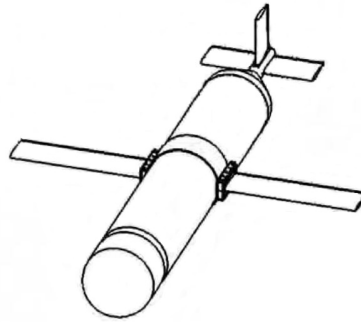


Figura 4.13: USM Underwater Glider [34].

4.4.2. Validaciones para el Seaglider

En la Universidad de Washington se desarrolló un estudio experimental del Seaglider en un túnel de viento [35]. Del mismo modo que en este estudio CFD, el planeador del experimento no incluía la antena, por lo que se puede llevar a cabo una sencilla comparación.

En este caso la superficie de referencia utilizada en el estudio es el volumen del planeador elevado a $2/3$ ($V_{planeador}^{2/3}$). Además, el número de Reynolds del experimento es ligeramente superior al del CFD, aunque del mismo orden de magnitud, tal y como se

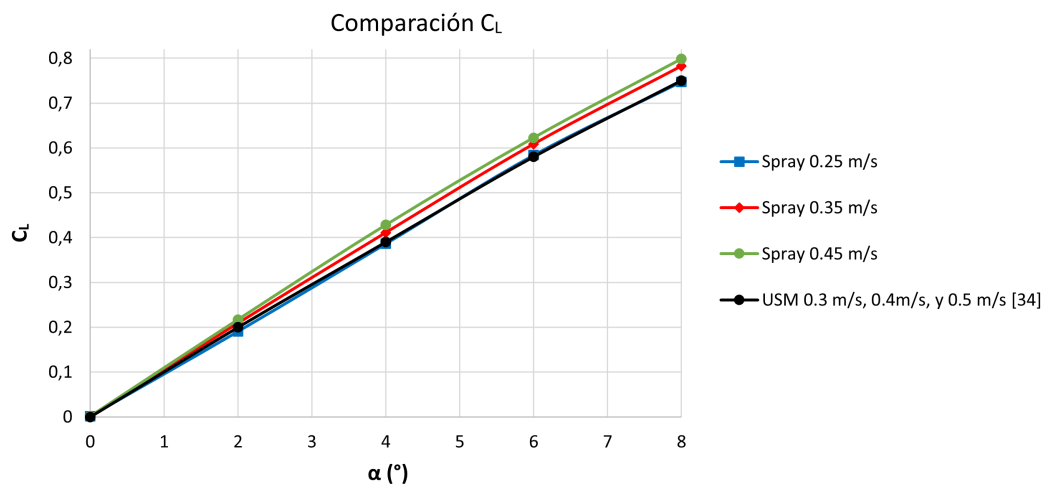


Figura 4.14: Comparación del C_L entre el Spray y el USM Underwater Glider.

puede observar en la Tabla 4.5.

En el informe del estudio experimental se explica cómo se ha tenido en cuenta el hecho de que el estudio se lleva a cabo en un túnel de viento, adaptando las velocidades del aire para conseguir los valores de Re deseados en el agua.

Estudio	U agua	Reynolds
Experimental	0,267m/s	91000
CFD	0,25m/s	75500

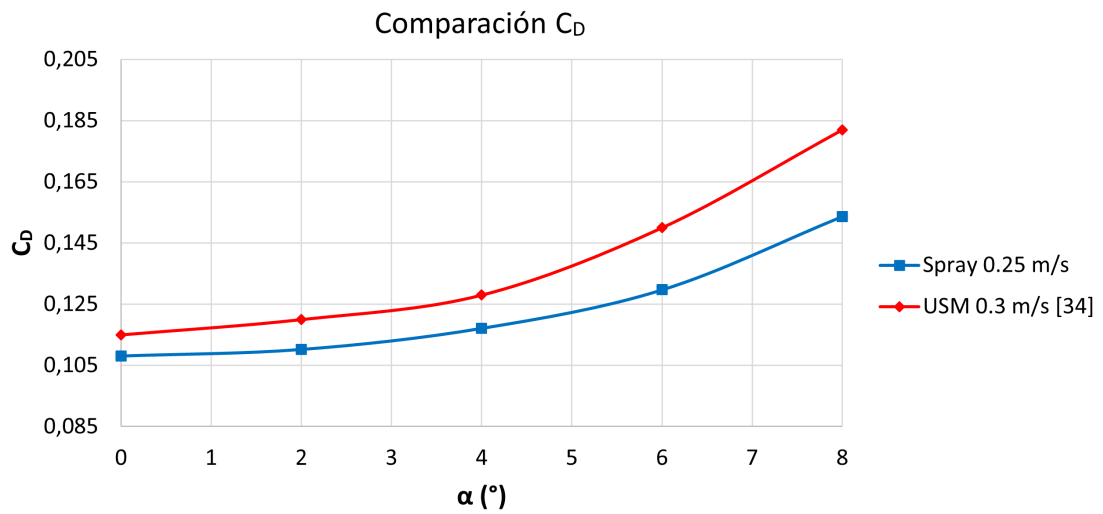
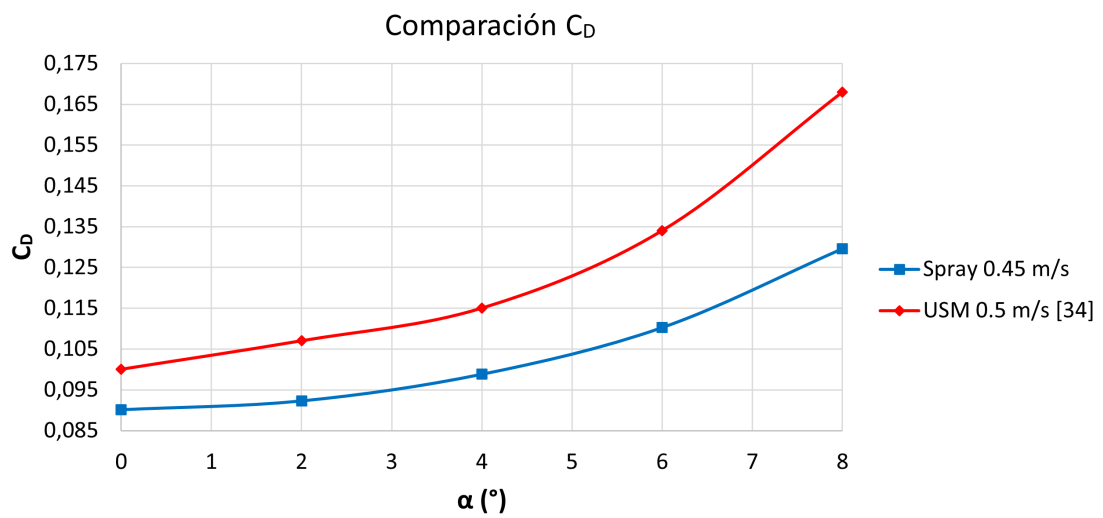
Tabla 4.5: Diferencia de condiciones experimentales y CFD.

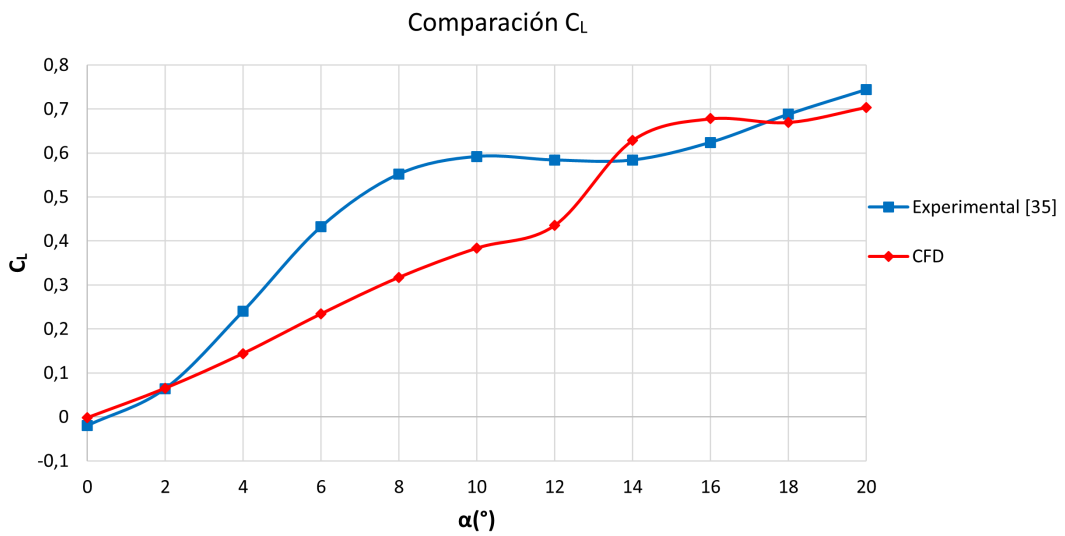
En la Figura 4.16a se observa en el C_L una diferencia máxima del 45 % respecto al valor experimental para AOA bajos, que se va reduciendo a medida que aumenta el ángulo.

En la Figura 4.16b también se observa una diferencia máxima del 63 % en los valores de C_D , que va aumentando con el ángulo de ataque.

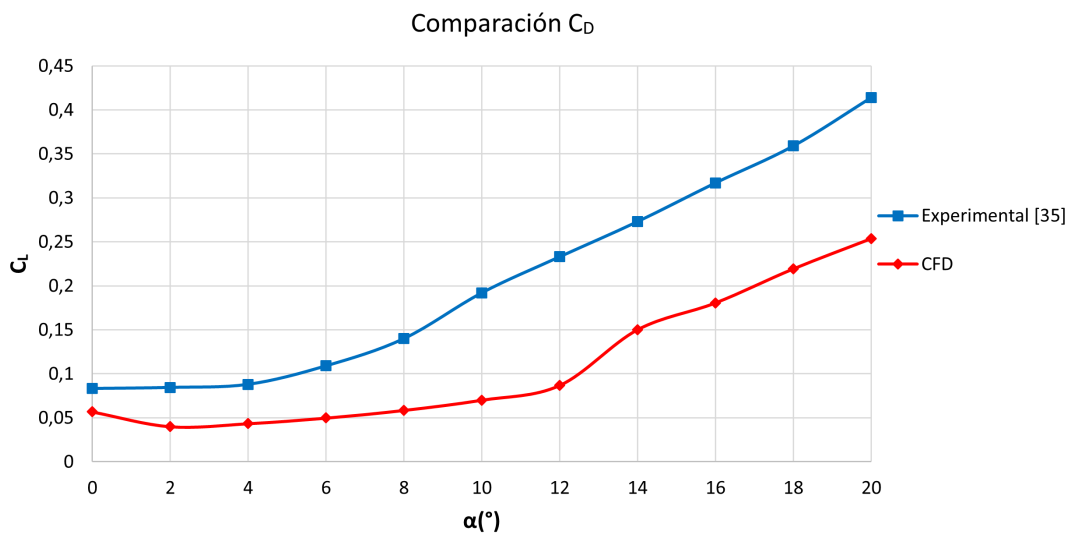
De nuevo se considera que la subestimación del C_D , en la que se debe tener en cuenta la ligera diferencia de velocidades, no es de gran importancia, ya que ambas curvas muestran una tendencia similar. En ambos casos el crecimiento del C_D es mayor a medida que aumenta el AOA, y el hecho de que el incremento sea menor en el caso CFD puede deberse a que la capa límite no está bien resuelta.

En cuanto a las diferencias en el C_L , se debe considerar que, aunque se sabe que el perfil utilizado en el experimento es simétrico, no se conoce su espesor, por lo que la sustentación generada por el ala no será idéntica a la del CFD, y la curva del C_L será distinta.

(a) Comparación del C_D a $0,25m/s$.(b) Comparación del C_D a $0,45m/s$.Figura 4.15: Comparación del C_D entre el Spray y el USM Underwater Glider.



(a) Comparación del C_L .



(b) Comparación del C_D .

Figura 4.16: Comparación de coeficientes entre el estudio experimental y CFD del Seaglider.

4.4.3. Validación conjunta para el Spray y el Seaglider

El Laboratory Glider es un vehículo no comercializado diseñado para estudiar su comportamiento experimentalmente y mediante CFD [21]. Como se puede observar en la Figura 4.17, tiene un casco cilíndrico con nariz y cola elipsoidales, y su geometría es más similar a la del Spray.

En la Figura 4.18 se muestran las curvas de C_D y C_L para el Spray, el Seaglider y el Laboratory Glider, para una velocidad de $0,1m/s$. En este caso todos los valores comparados se han obtenido mediante CFD.

Como se puede ver en la Figura 4.18b, los valores de C_L son prácticamente iguales a los del Laboratory Glider en el caso del Spray, y hay una pequeña diferencia en el caso del Seaglider. En el caso el C_D , en la Figura 4.18a se observa una diferencia mayor, pero que sigue estando dentro de unos límites aceptables teniendo en cuenta que se trata de planeadores que no son exactamente iguales. De nuevo, se deben considerar las diferencias geométricas entre los distintos planeadores, así como los modelos utilizados en el cálculo CFD del Laboratory Glider.

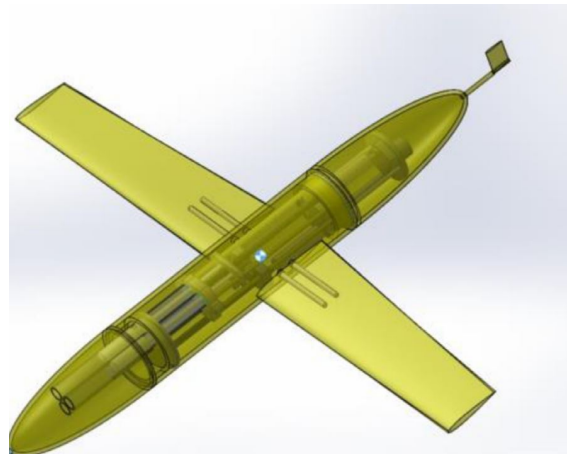
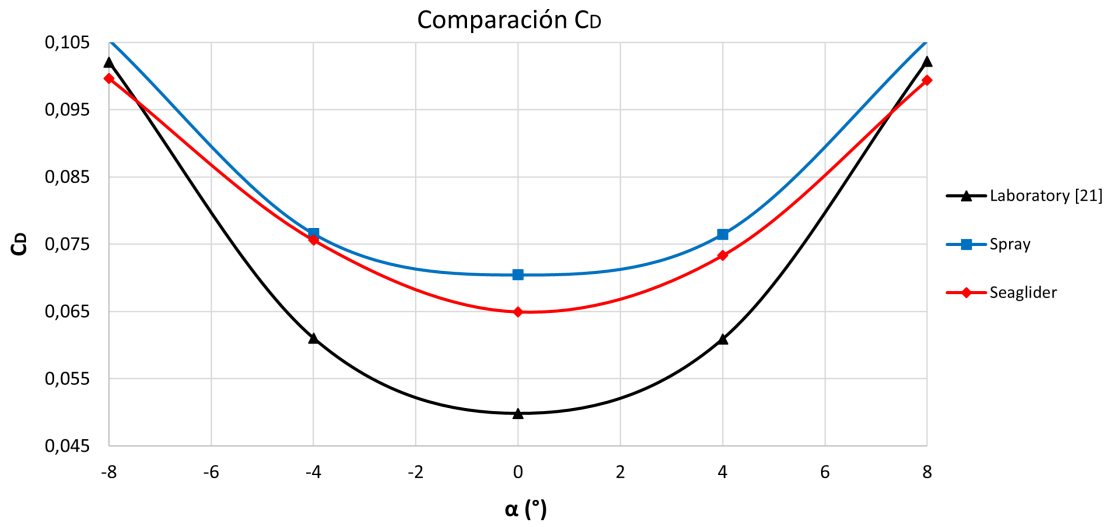
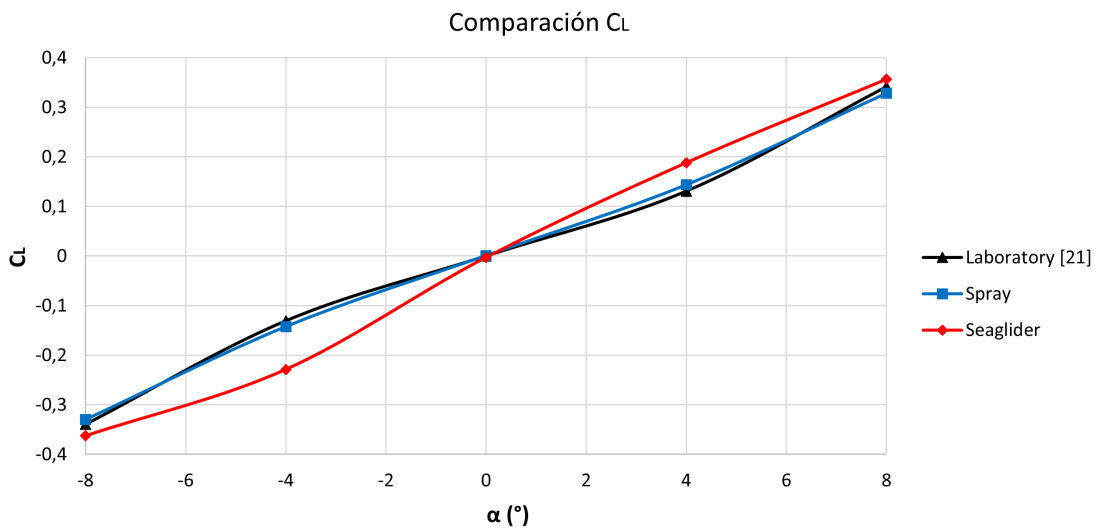


Figura 4.17: Laboratory Glider [21].



(a) Comparación del C_D .



(b) Comparación del C_L .

Figura 4.18: Comparación de los coeficientes hidrodinámicos para los tres planeadores.

4.5. Análisis adicional: independencia del modelo de turbulencia

Como ya se ha comentado anteriormente, para las simulaciones de este trabajo se ha utilizado como modelo de turbulencia el $k - \omega$ puesto que era el que parecía dar resultados más razonables en los cálculos iniciales. Con el fin de comprobar si los resultados obtenidos para cálculos posteriores son independientes del modelo de turbulencia utilizado, se estudia la variación de los parámetros de interés (coeficientes de sustentación y resistencia) para distintos modelos de turbulencia. Estos modelos son:

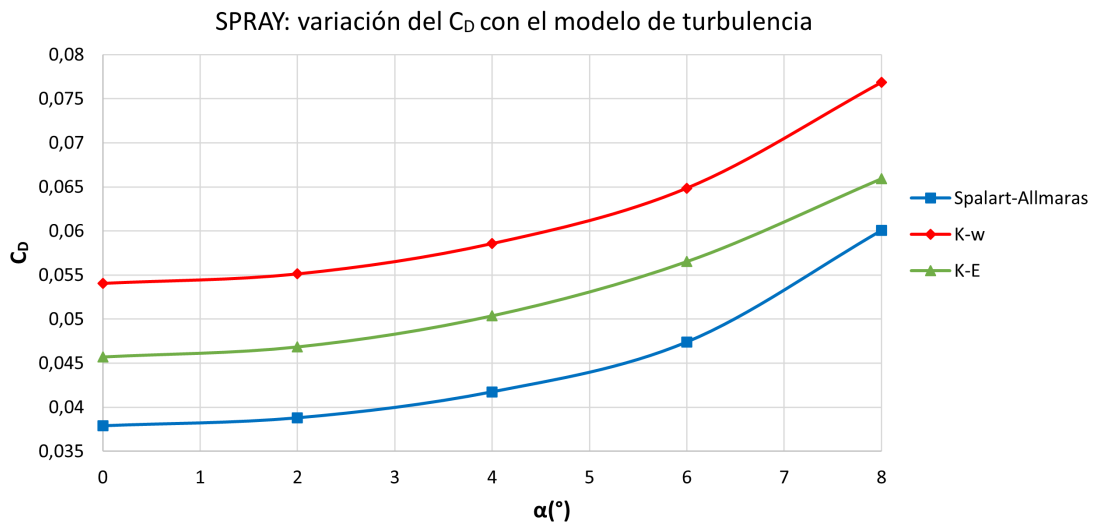
- $k - \omega$: es el modelo que se ha utilizado a lo largo del trabajo. Se trata de un modelo RANS² lineal en el que se resuelven dos ecuaciones de transporte: una para la energía cinética turbulenta (κ) y otra para la tasa de disipación específica (ω). Se considera un modelo adecuado para aplicaciones aeronáuticas.
- $k - \epsilon$: es un modelo RANS lineal muy similar al $k - \omega$ utilizado, ya que también se resuelven dos ecuaciones de transporte, pero en este caso una corresponde a la energía cinética turbulenta (κ) y la otra a la tasa de disipación turbulenta (ϵ). Es un modelo apropiado para aplicaciones industriales aunque no resuelve bien las zonas de recirculación.
- *Spalart - Allmaras*: se trata de un modelo RANS lineal que resuelve una única ecuación de transporte para la difusividad modificada ($\tilde{\nu}$). Se suele emplear en casos con desprendimientos suaves de la capa límite.

El estudio se realiza únicamente para una velocidad de $0,25m/s$ y ángulos de ataque de hasta 8° . En la Figura 4.19 se observa la comparación de la curva del coeficiente de resistencia. En el caso del Spray (Figura 4.19a) se puede ver cómo hay una diferencia de aproximadamente el 15% entre los tres modelos. En cambio, en el caso del Seaglider los modelos $k - \omega$ y $k - \epsilon$ presentan resultados prácticamente iguales, con una diferencia de aproximadamente el 12% con el modelo Spalart-Allmaras.

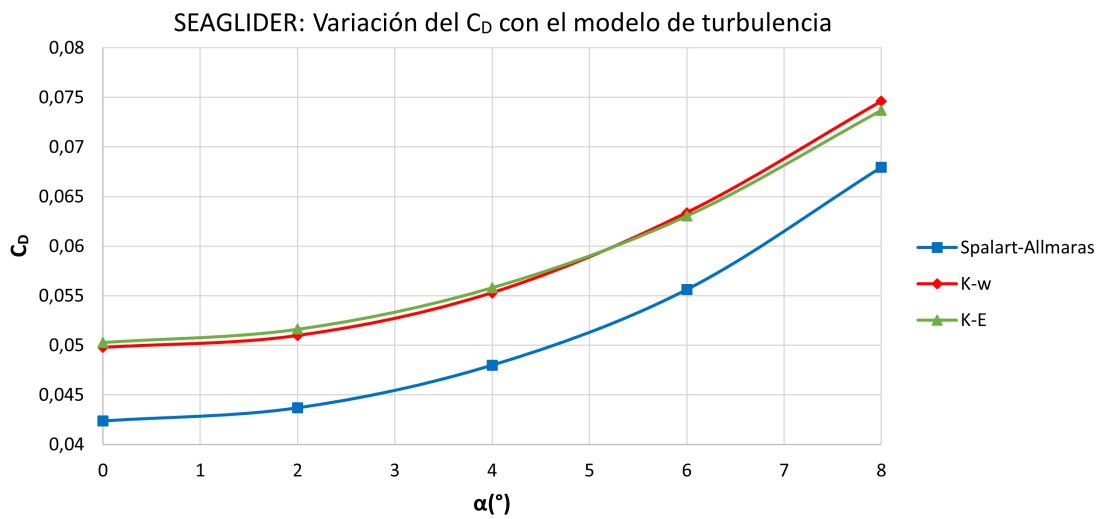
En cuanto a la curva del coeficiente de sustentación (Figura 4.20), en ambos casos se puede observar que los resultados se asemejan más para ángulos de ataque pequeños, y la diferencia crece al aumentarlos. En el caso del Spray, el modelo $k - \epsilon$ es el que presenta una mayor diferencia respecto a los otros dos (del 10% aproximadamente), mientras que en el caso del Seaglider es el $k - \omega$, con una diferencia similar.

Pese a las pequeñas diferencias entre los distintos modelos de turbulencia, los resultados obtenidos son del mismo orden de magnitud y no difieren de los esperados para planeadores de este tipo.

²RANS: (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*). Se trata de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas, en las que se debe modelar el tensor de esfuerzos de Reynolds. Existen varios modelos: lineales, no lineales, algebraicos, de una ecuación, de dos ecuaciones, etc.

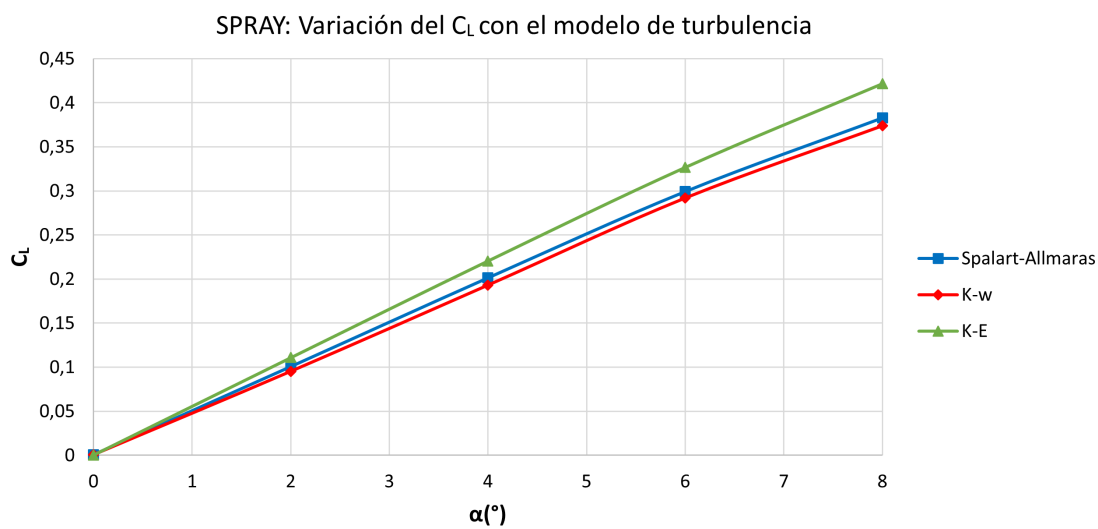


(a) Spray.

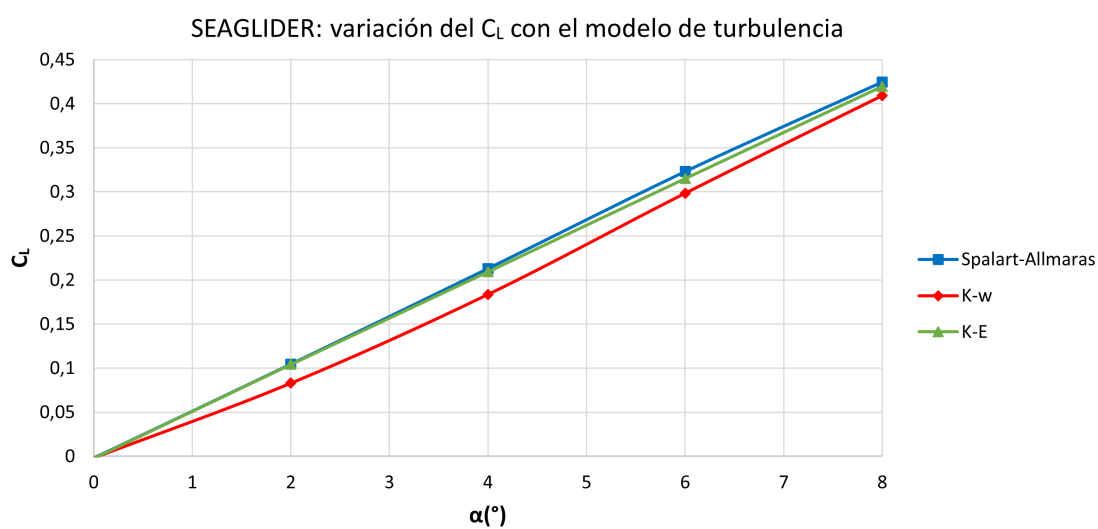


(b) Seaglider.

Figura 4.19: Variación del coeficiente de resistencia en función del modelo de turbulencia utilizado.



(a) Spray.



(b) Seaglider.

Figura 4.20: Variación del coeficiente de sustentación en función del modelo de turbulencia utilizado.

Capítulo 5

Resultados

La parte principal del estudio se ha realizado considerando una velocidad de desplazamiento de los planeadores de $0,25m/s$, ya que corresponde a la velocidad de crucero para ambos vehículos. Más adelante, en el apartado 5.3 se analizarán los resultados para distintas velocidades.

5.1. Distribución de fuerzas en el planeador

En este apartado se va a calcular la resistencia y sustentación generada por cada una de las partes del planeador, y en qué medida contribuyen a la fuerza total. Las distintas partes que se distinguen son el casco, el ala y el estabilizador.

En la Figura 5.1 se ha representado la variación del porcentaje de fuerza con el ángulo de ataque que representan el ala y el casco respecto a la fuerza total. Tomando como referencia un ángulo de 8° y una velocidad de $0,25m/s$ se puede ver que, como era de esperar, en ambos casos la superficie sustentadora es el ala y la parte que más resistencia genera es el casco. Estos resultados se muestran en la Figura 5.2.

En el caso de la resistencia, se puede ver que el ala también supone una parte considerable, mientras que la aportación del estabilizador resulta insignificante. En cuanto a la sustentación, cuando el planeador se encuentra en un ángulo de ataque distinto de cero, el fuselaje también genera fuerza sustentadora.

En la Figura 5.2 también se puede observar que las proporciones no son iguales para los dos planeadores. En la Tabla 5.1 se recogen los valores de algunas dimensiones de los planeadores y las relaciones entre ellas, con el fin de comprender las diferencias en las fuerzas generadas.

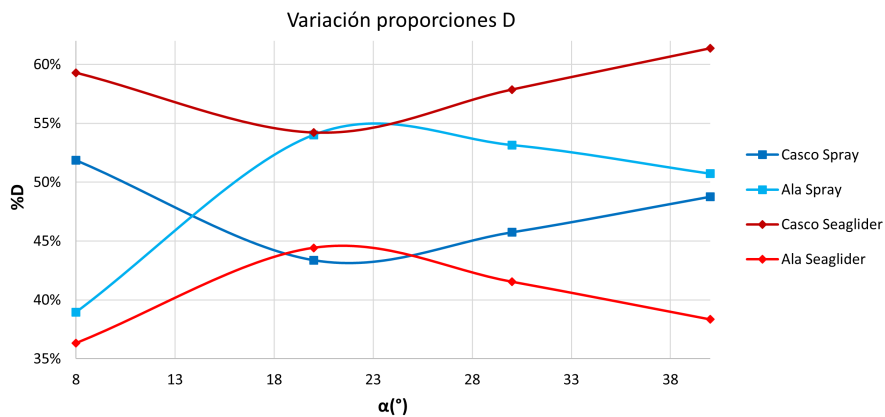
Por ejemplo, se puede observar que en el caso del Spray el casco genera una menor resistencia respecto a la total. Esto se debe a que, como se puede ver en la Tabla 5.1, su casco es más esbelto. En cuanto a la sustentación, el ala del Spray representa una mayor superficie respecto a la total, por lo que es lógico que su aportación a la sustentación sea mayor.

Teniendo en cuenta estos aspectos se puede considerar qué superficie es más adecua-

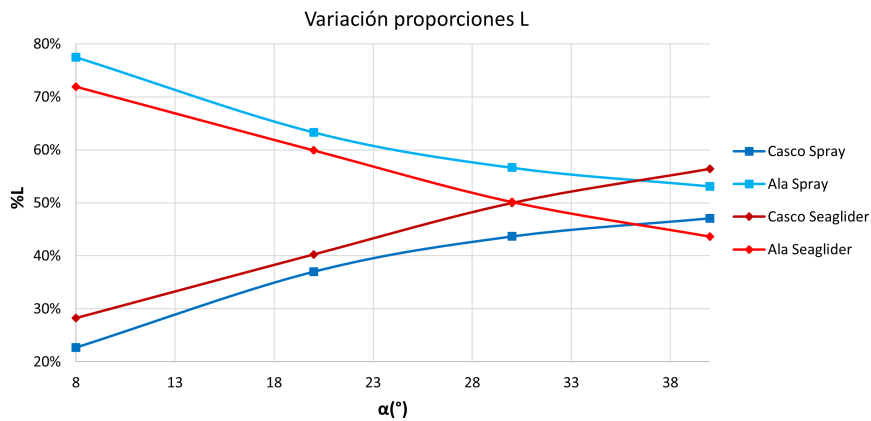
da para la obtención de los coeficientes hidrodinámicos posteriormente. En el caso de la sustentación se utilizará la superficie alar como superficie de referencia, y en el caso de la resistencia se utilizará el área frontal máxima del fuselaje, es decir, el círculo de mayor área de cada planeador.

	SPRAY	SEAGLIDER
Longitud (m)	2	1.6746
Diámetro máximo (m)	0.2	0.269
Tamaño estabilizador (m)	0.57	0.368
S.alar (m^2)	0.1	0.112
S.mojada (m^2)	1.301	1.263
Esbeltez: Longitud/Diámetro	10	6.22
Estabilizador/Diámetro	2.82	1.36
S.alar/S.mojada	0.076	0.088

Tabla 5.1: Comparación de las principales dimensiones de los planeadores.



(a) Variación del D



(b) Variación del L.

Figura 5.1: Variación de los porcentajes de fuerzas de las partes de los planeadores con el ángulo de ataque.

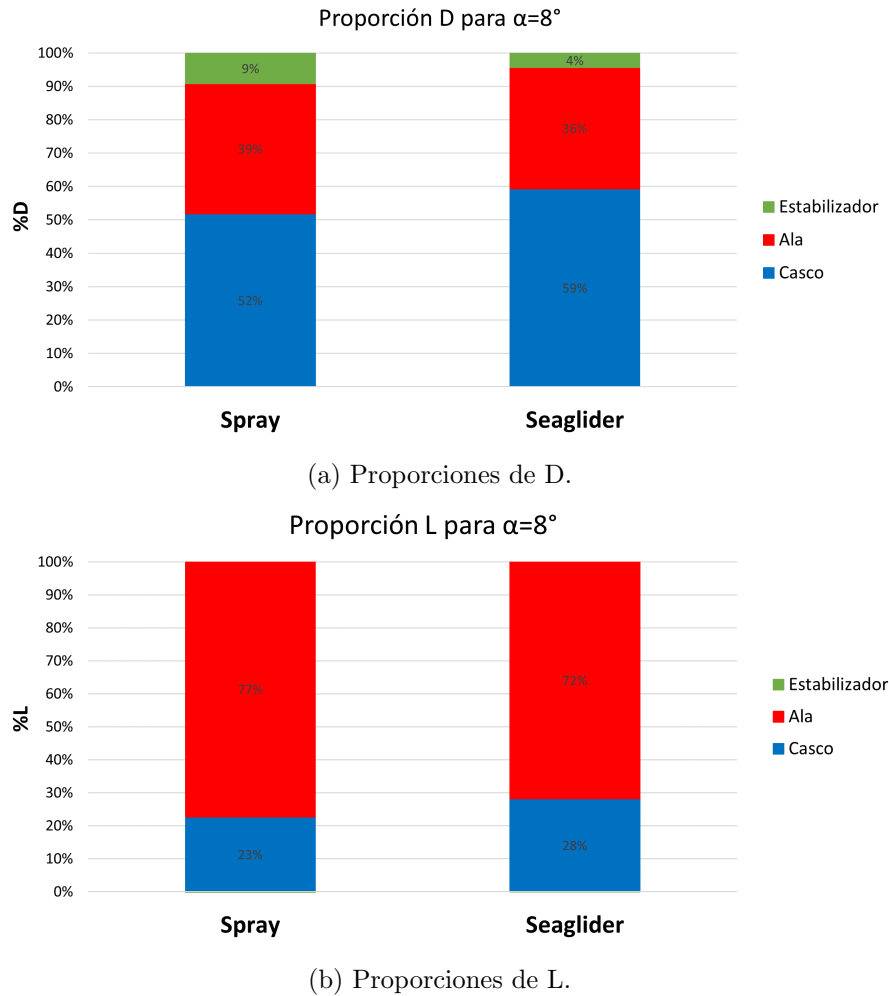


Figura 5.2: Porcentaje de la fuerza total que representa cada parte del planeador.

5.2. Comparación del Spray y el Seaglider en condiciones de crucero

5.2.1. Coeficiente de sustentación (C_L)

Como ya se ha comentado, la superficie de referencia utilizada en este caso es la superficie alar, puesto que se trata de la sustentadora principal.

En la Figura 5.3 se han representado las curvas del C_L para ambos planeadores, y como se puede observar, se pueden distinguir tres regiones con distinta pendiente en función del AOA:

- De 0° a 6° aproximadamente: se trata de la región lineal de la curva en la que se puede considerar que el flujo es potencial. Como se puede observar en la Figura 5.4, el C_L del Spray es ligeramente superior al del Seaglider. Esto se debe a que en la parte inicial la pendiente de la curva ($C_{L\alpha}$) es superior en el caso del Spray ($0,048rad$

y $0,046rad$ respectivamente), como es de esperar ya que tiene un alargamiento (AR) mayor.

- De 6° a 30° aproximadamente: en este tramo la capa límite empieza a ser gruesa y se desprende, con lo que la teoría potencial no es aplicable. En la Figura 5.3 se puede ver cómo la pendiente del Seaglider aumenta mientras que la del Spray disminuye, generando una diferencia considerable entre sus valores de C_L .
- De 30° a 45° aproximadamente: en esta región ambas curvas tienen una pendiente similar, y se aplanan hasta la entrada en pérdida, después de la cual el C_L empieza a disminuir.

A pesar de presentar un comportamiento razonable en la zona lineal, en la Figura 5.4 se puede observar cómo ambas curvas presentan una pendiente inferior a la teórica derivada de la *teoría del ala de gran alargamiento de Prandtl*. Estas pendientes teóricas se han obtenido mediante la Ecuación 5.1, utilizando los valores de los coeficientes mostrados en la Tabla 5.2.

Por tanto, teniendo en cuenta esta diferencia de resultados, se puede concluir que se trata de una teoría que no es aplicable a un fluido de estas características. Esto se debe a que el fluido de estudio es agua, mientras que la teoría está desarrollada para aire.

$$a = \frac{a_0}{1 + \frac{a_0}{\pi AR e}} \quad (5.1)$$

Parámetro	SPRAY	SEAGLIDER
AR	14,4	6,54
e	0,85 [36]	0,89 [37]
a_0	6,26rad [38]	

Tabla 5.2: Valores de los parámetros.

Como ya se ha podido observar, de forma general el Seaglider presenta un mayor C_L , y para analizar el motivo, en la Figura 5.5 se compara el C_L del casco y ala de cada planeador. Se debe tener en cuenta que en el caso del casco se ha tomado como referencia la superficie mojada del casco para adimensionalizar los coeficientes en función del tamaño del planeador.

Se puede observar que excepto en la región de flujo potencial, tanto el casco como el ala del Seaglider generan un mayor C_L . Esto se puede comprobar mediante las Figuras 5.6 y 5.7, donde se representa el coeficiente de presión para el casco y el ala a un ángulo de ataque de 30° , y en ambos casos la diferencia de presión entre intradós y extradós es superior en el Seaglider.

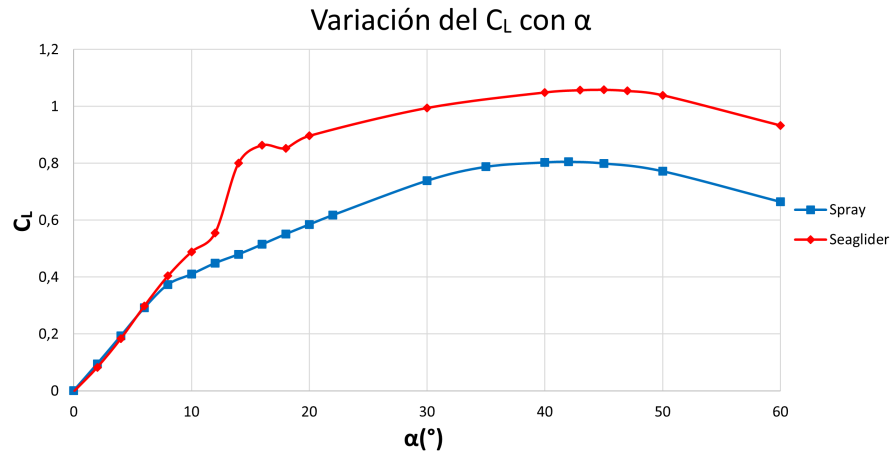


Figura 5.3: Comparación del coeficiente de sustentación para los dos planeadores.

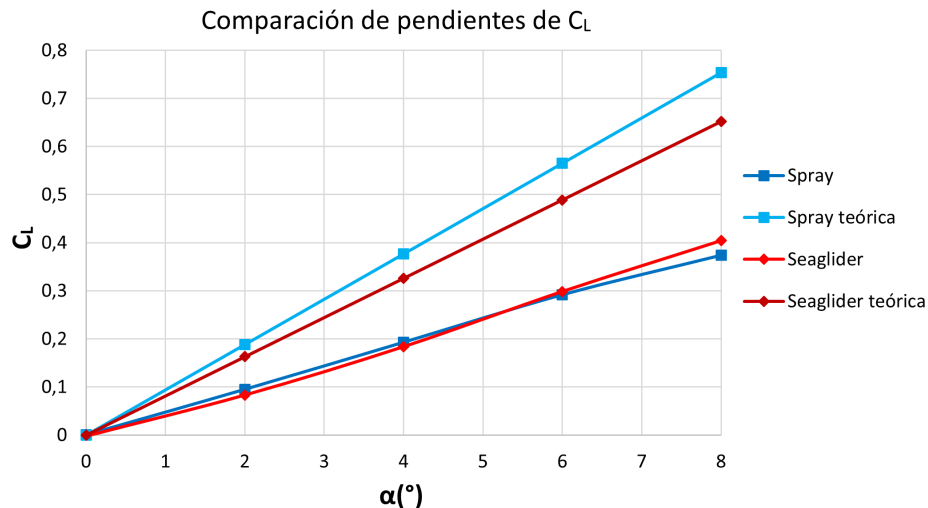


Figura 5.4: Coeficientes de sustentación teóricos y calculados mediante CFD en la zona de flujo potencial.

5.2.2. Entrada en pérdida

El perfil hidrodinámico utilizado en el modelo de estos planeadores es el NACA 0012. Se trata de un perfil de espesor medio, para el que el desprendimiento de la capa límite empieza por el borde de fuga y se extiende hacia el borde de ataque a medida que aumenta el ángulo de incidencia. En la Figura 5.8 se puede observar esta evolución para el caso del Spray.

En la Figura 5.9 se muestra ampliada la zona de la curva C_L correspondiente a la entrada en pérdida. En ella se aprecia que la entrada en pérdida del Spray se produce aproximadamente para un ángulo de ataque de 42° , mientras que en el caso del Seaglider ocurre para un ángulo de 45° . En la Figura 5.10 se puede ver cómo para un ángulo de 45° , la diferencia de presiones entre intradós y extradós es ligeramente superior en el caso del Seaglider. En el caso del Spray, el C_L ya está disminuyendo debido a que el desprendimiento

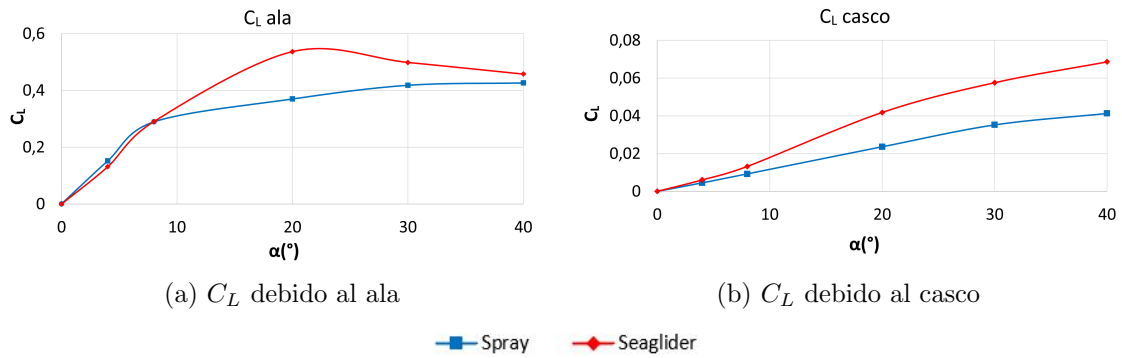


Figura 5.5: Comparación entre Spray y Seaglider: coeficiente de sustentación debido al ala y al casco.

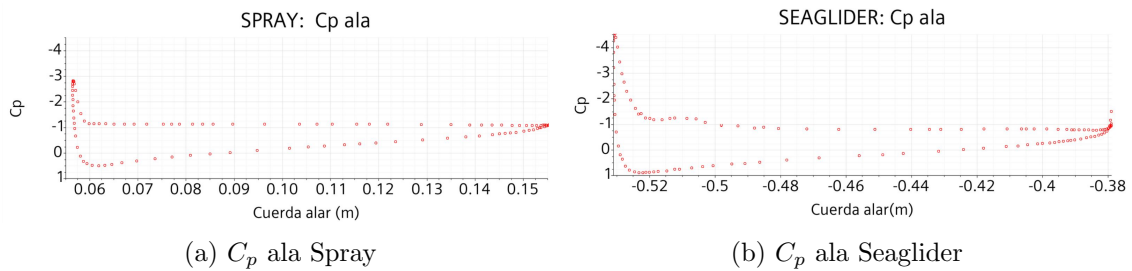


Figura 5.6: Representación del coeficiente de presión en una sección de la mitad del ala para $\alpha = 30^\circ$.

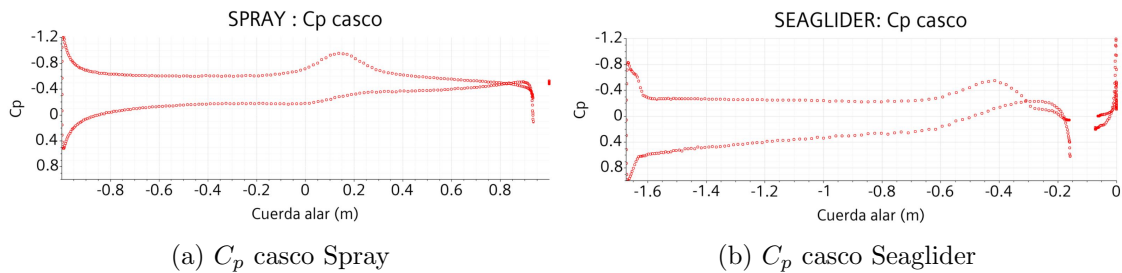


Figura 5.7: Representación del coeficiente de presión en el plano de simetría del casco para $\alpha = 30^\circ$.

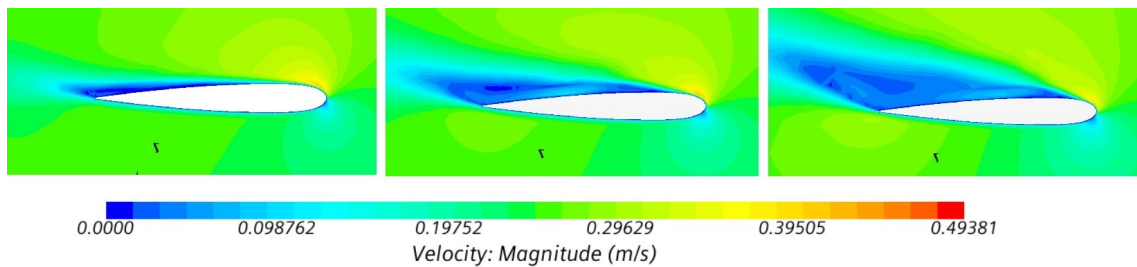


Figura 5.8: Evolución del desprendimiento de la capa límite. Ángulos de ataque $8^\circ, 12^\circ, 16^\circ$.

hace que la presión en el extradós sea mayor, y por tanto la diferencia de presiones sea menor.

La entrada en pérdida se produce antes para el Spray porque la capa límite se desprende para un ángulo de ataque menor. Este hecho se puede observar en la Figura 5.11 y Figura 5.12, en las que se representa el desprendimiento de la capa límite y se puede ver que se produce para un ángulo de ataque de 12° en el caso del Spray, y 18° en el caso del Seaglider.

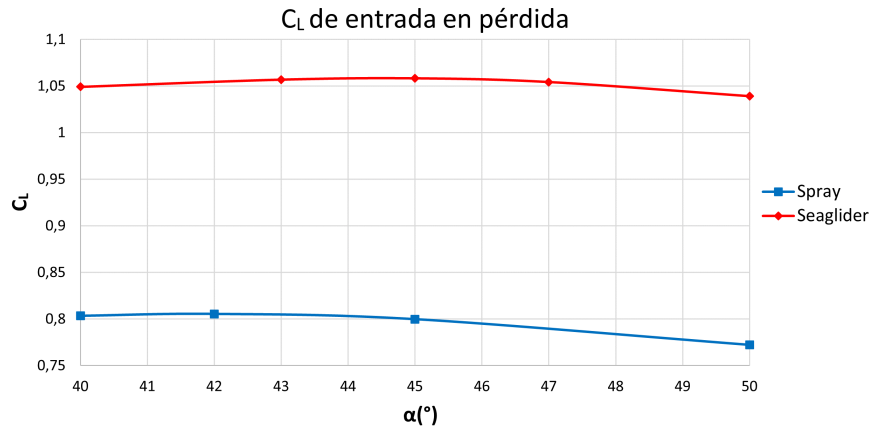


Figura 5.9: Curva C_L ampliada en la zona de entrada en pérdida.

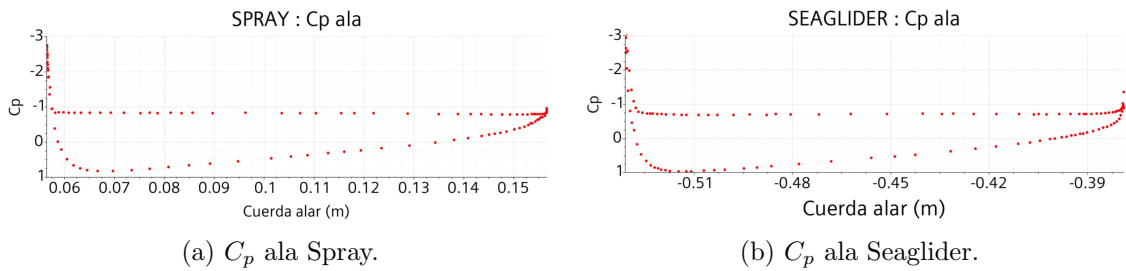


Figura 5.10: Representación del coeficiente de presión en una sección de mitad del ala para $\alpha = 45^\circ$.

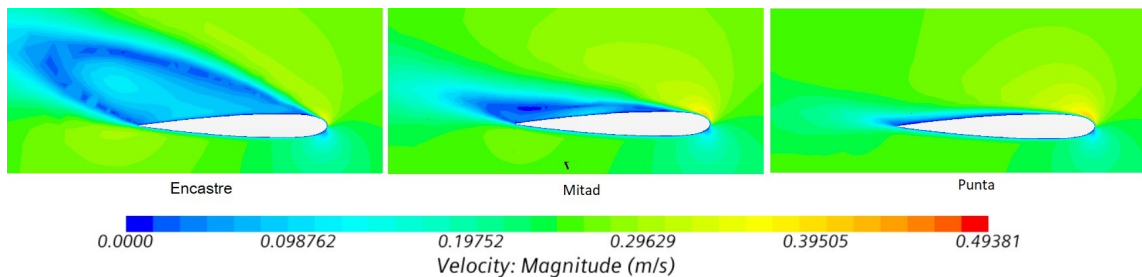


Figura 5.11: Desprendimiento de la capa límite del Spray para $\alpha = 12^\circ$ en tres secciones del ala: encastre, mitad del ala y punta de ala.

En ambos casos el desprendimiento comienza por la parte del encastre en el borde de fuga, y el barrido de la capa límite se extiende hacia la punta del ala, siguiendo el esquema

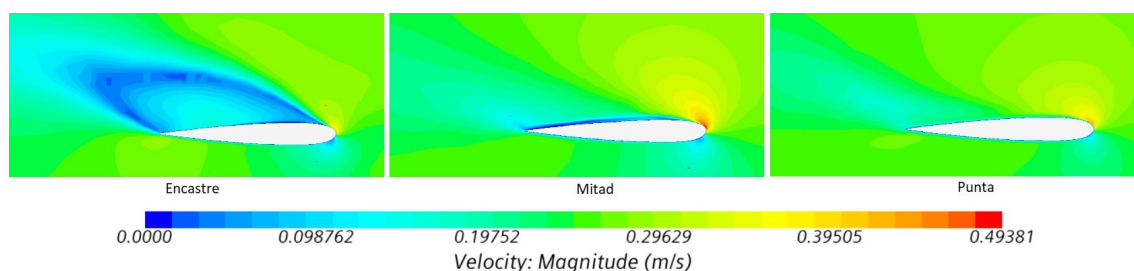


Figura 5.12: Desprendimiento de la capa límite del Seaglider para $\alpha = 18^\circ$ en tres secciones del ala: encastre, mitad del ala y punta de ala.

mostrado en la Figura 5.13. La evolución del barrido en el caso de estos planeadores se muestra en la Figura 5.14 y Figura 5.15, donde se observa que para un mismo ángulo de ataque está más avanzado en el caso del Spray. En las Figuras 5.11 y 5.12 también se puede observar el barrido, ya que se ve cómo evoluciona el desprendimiento desde el encastre hasta la punta del ala.

Teniendo en cuenta la evolución que sigue el barrido de la capa límite se puede intuir que la presencia de flecha alar retrasará la entrada en pérdida, ya que con esta geometría se evitan las zonas del ala hacia las que avanza el desprendimiento. Esto se demuestra teniendo en cuenta el AOA de entrada en pérdida de cada planeador, ya que como se muestra en la Tabla 4.2, el Seaglider presenta un ángulo de flecha mayor y por tanto un AOA de entrada en pérdida superior al del Spray.

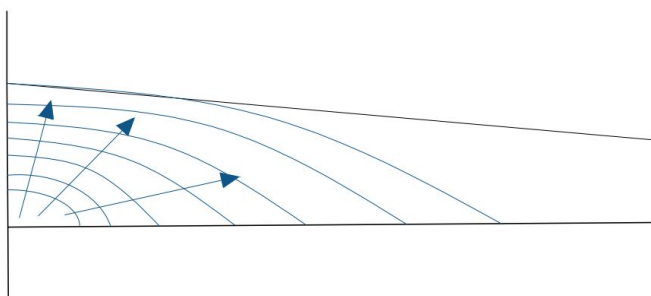


Figura 5.13: Evolución del barrido de la capa límite.

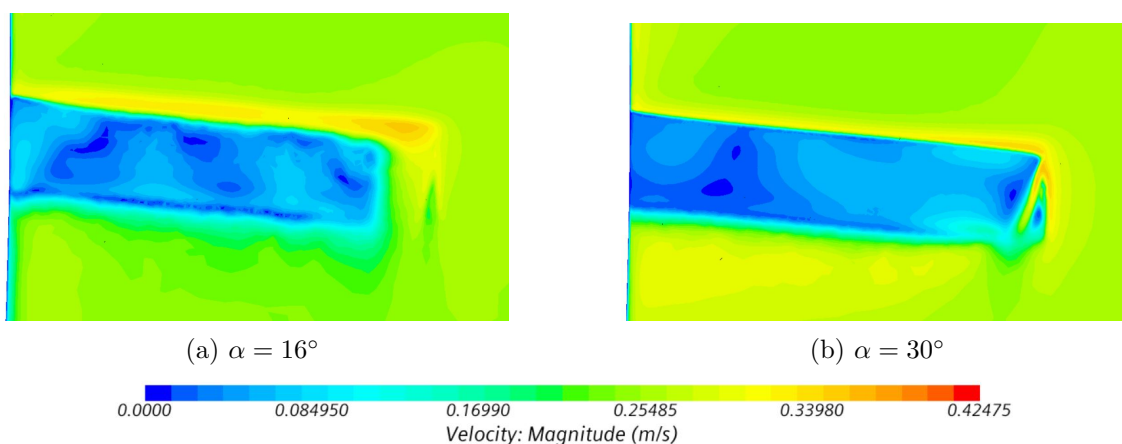


Figura 5.14: Evolución del barrido de la capa límite sobre el ala del Spray.

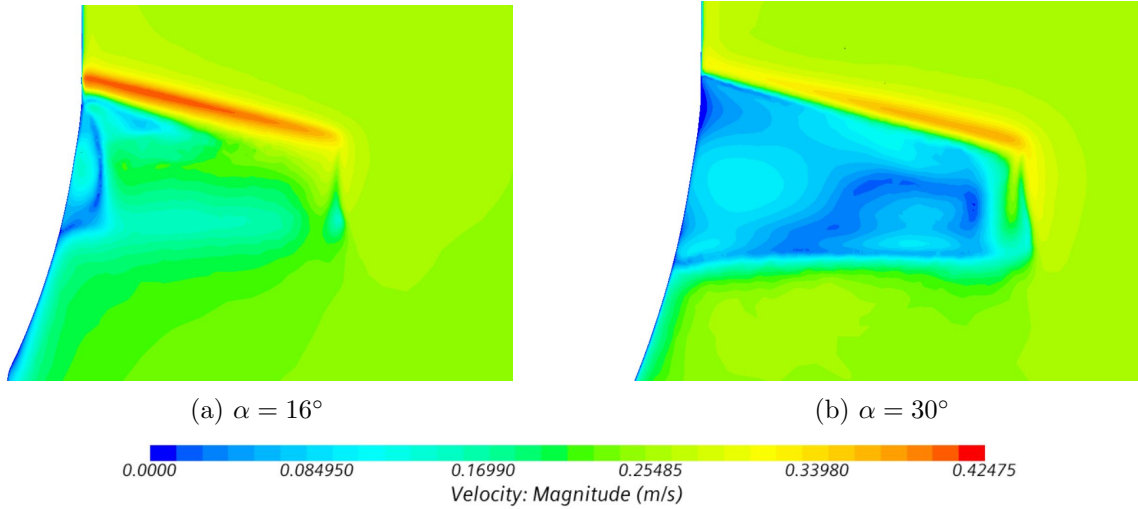


Figura 5.15: Evolución del barrido de la capa límite sobre el ala del Seaglider.

Como se ha visto, a pesar de que la capa límite se desprende a los 12° o 18° , la entrada en pérdida no se produce hasta los 42° o 45° . Esto significa que aunque haya desprendimiento se mantiene una diferencia de presiones suficiente para generar sustentación.

Para explicar este hecho se va a hacer uso del esquema mostrado en la Figura 5.16. Observando este esquema y teniendo en cuenta que el movimiento del planeador es estacionario, es decir que su aceleración es nula, se puede establecer el balance de fuerzas como:

$$\Delta B + F_x + F_y = ma = 0 \quad (5.2)$$

donde F_x y F_y son la fuerza horizontal y vertical en ejes horizonte local debidas a las fuerzas hidrodinámicas. A partir de la Ecuación 5.2 se puede deducir que para que el planeador tenga un avance controlado se deben cumplir las siguientes ecuaciones:

$$L = \Delta B U_y \quad (5.3)$$

$$\Delta B U_x > D \quad (5.4)$$

La Ecuación 5.3 implica que no haya desplazamiento en el eje y en el sistema de referencia de las fuerzas hidrodinámicas, mientras que la Ecuación 5.4 implica que las fuerzas en el sentido positivo del eje x sean mayores que las negativas, y que por tanto haya un avance del planeador.

Considerando estos aspectos, se deduce que para que el planeador entre en pérdida se debe cumplir la Ecuación 5.5, que supondría un descenso descontrolado del vehículo.

$$L < \Delta B U_y \quad (5.5)$$

5.2.3. Coeficiente de resistencia (C_D)

En la Figura 5.17 se muestra una gráfica de la curva del C_D , en la que se puede ver que es mayor para el Spray. Con el fin de determinar a qué se debe esta diferencia, se analizan

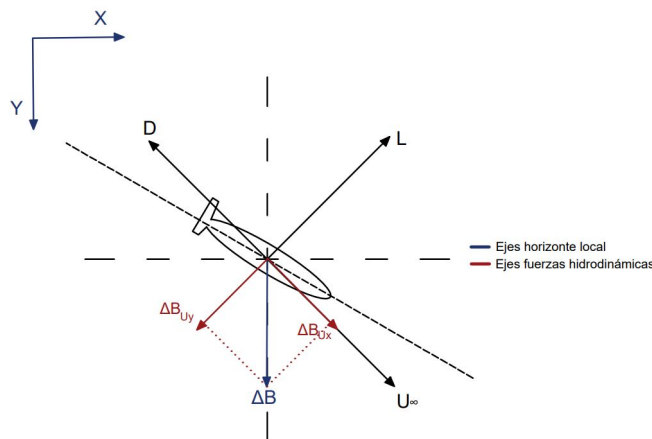


Figura 5.16: Esquema del balance de fuerzas.

los coeficientes de los distintos tipos de resistencia: de fricción, inducida y de presión.

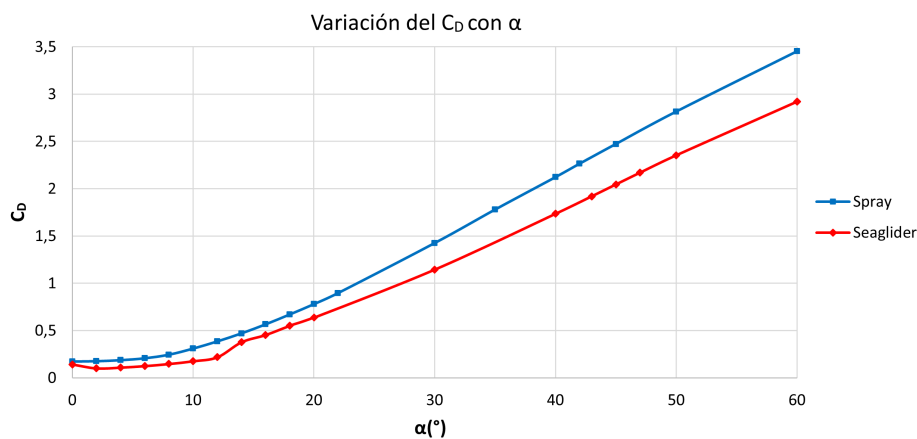


Figura 5.17: Comparación del coeficiente de resistencia.

- C_D de fricción:** es la debida a la fricción del fluido viscoso con una pared, ya que depende del gradiente de velocidades generado entre la superficie del planeador y el fluido, y aumenta si la pared es rugosa. Se ha obtenido mediante el valor de fuerza de fricción proporcionado por los cálculos, y utilizando como referencia la superficie mojada del planeador.

Su valor debe ser aproximadamente constante y, como se puede ver en la Figura 5.18, se observan variaciones mínimas en función del ángulo de ataque. En el caso del Seaglider se observan diferencias mayores debidas al cambio de esquema de discretización utilizado para el cálculo.

En la gráfica también están representados los valores medios para cada planeador, y como se puede ver son muy similares. Uno de los factores que puede influir en el hecho de que C_{Df} sea menor en el caso del Seaglider es que presenta una región en la parte posterior por la que no se desliza el agua y por tanto no genera resistencia de fricción, pero sí que se contabiliza como superficie mojada. Esta superficie se muestra en la

Figura 5.19. También se debe tener en cuenta que a diferencia del Spray, el Seaglider tiene una parte del fuselaje detrás del estabilizador, y este reducirá la fricción en dicha superficie.

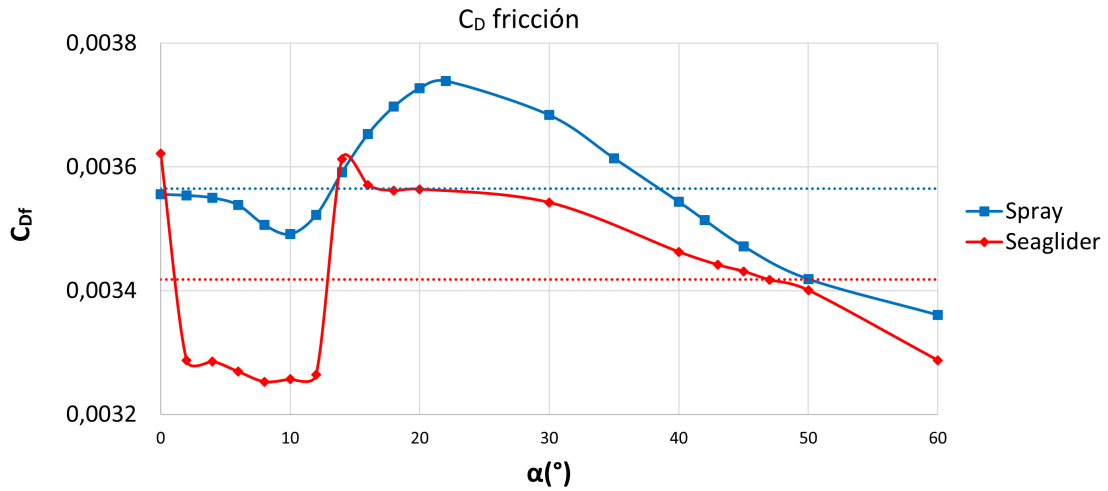


Figura 5.18: Comparación del coeficiente de resistencia de fricción. Las líneas de puntos representan el valor medio de la resistencia.

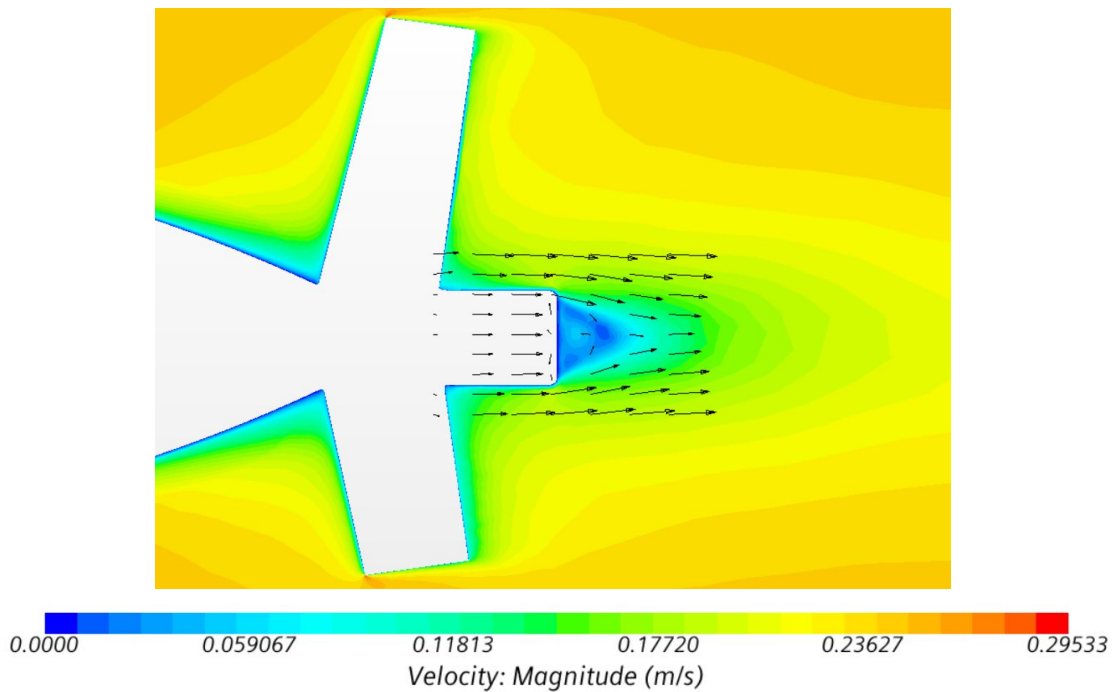


Figura 5.19: Vectores de velocidad en la cola del Seaglider.

- C_D inducida:** se debe a los torbellinos formados en punta de ala por la diferencia de presión entre intradós y extradós. Su valor se ha estimado mediante la Ecuación 5.6, utilizando los valores de AR y e mostrados en la Tabla 5.3, y la superficie alar como referencia ya que la ecuación depende del C_L .

$$C_{Di} = \frac{C_L^2}{\pi AR e} \quad (5.6)$$

	SPRAY	SEAGLIDER
AR	14.4	6.35
e	0.85 [36]	0.89 [37]

Tabla 5.3: Valores calculados de los parámetros.

En la Figura 5.20 se puede ver que el Seaglider presenta un mayor coeficiente de resistencia inducida, debido a que su C_L es mayor y su AR menor al del Spray. Este hecho se puede explicar observando la Figura 5.21, en la que se pueden ver los torbellinos de punta de ala causantes de la resistencia inducida para distintas secciones del ala y un ángulo de ataque de 30° . Teniendo en cuenta las velocidades en el intradós y extradós en cada caso, se puede concluir que la diferencia de presiones será mayor en el caso del Seaglider, y por tanto el C_{Di} será mayor. En la imagen correspondiente a la mitad del ala (Figuras 5.21c y 5.21d) también se puede ver que la velocidad en punta de ala del Seaglider es mayor, y por tanto también la intensidad del torbellino. Por último, en la imagen correspondiente al borde de fuga (Figuras 5.21e y 5.21f) se puede ver que el diámetro y velocidad del torbellino del Spray son menores, lo que supone un C_{Di} inferior.

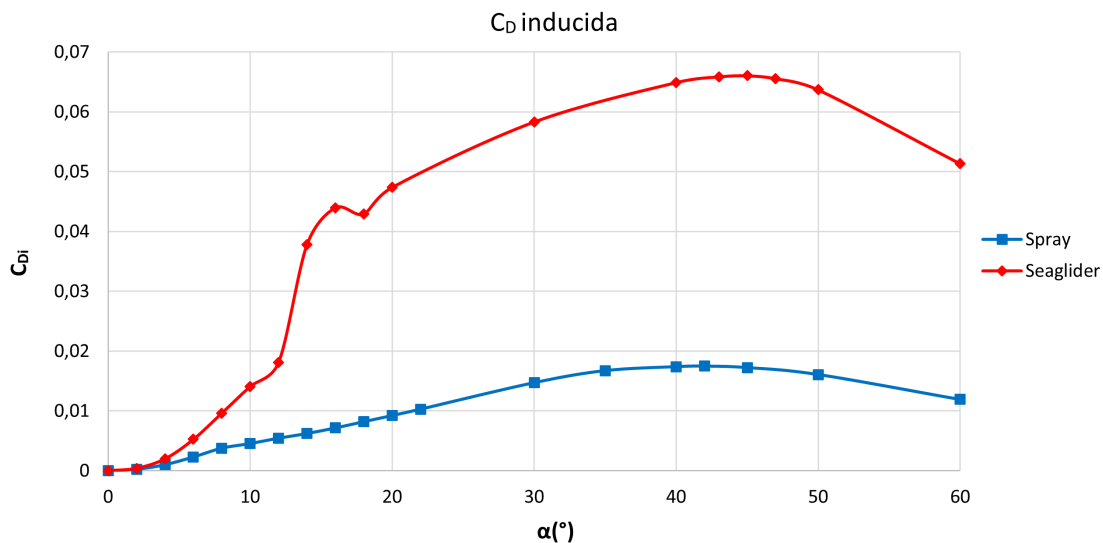


Figura 5.20: Comparación del coeficiente de resistencia inducida.

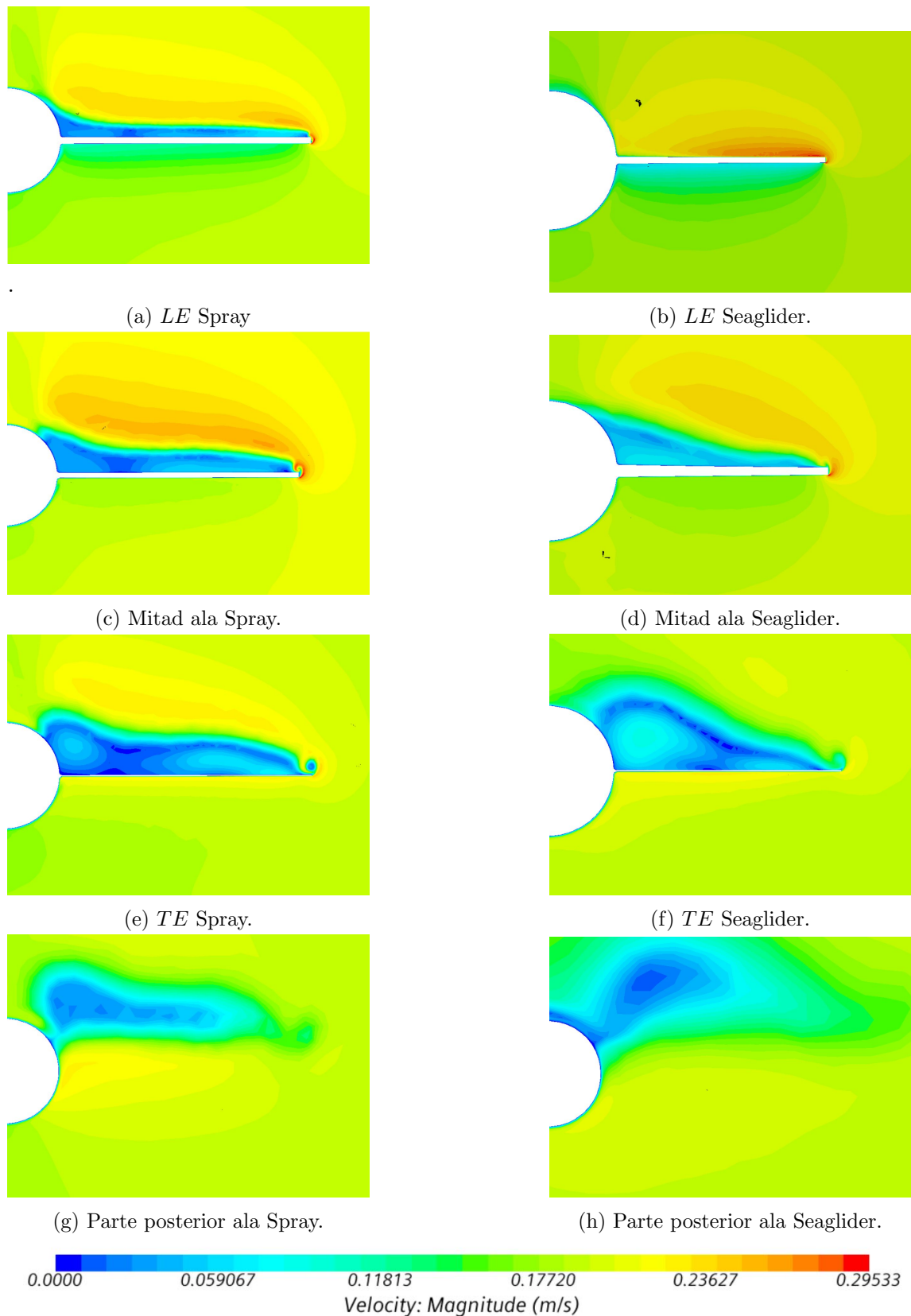


Figura 5.21: Escenas de velocidad de diferentes secciones frontales del ala para un AOA de 30°: borde de ataque (*LE*), mitad del ala, borde de fuga (*TE*) y parte posterior al ala a una distancia aproximada de una cuerda.

- **C_D de presión:** es la debida a la estela formada, en la que se reduce la velocidad del fluido y aumenta la presión. Se ha obtenido restando el C_{Df} y C_{Di} al C_D total, y se ha adimensionalizado utilizando la superficie frontal del planeador.

Como se puede ver en la Figura 5.22, el C_{Dp} es mayor en el caso del Spray, sin embargo, en la Figura 5.23 se puede ver que el Seaglider presenta una mayor recirculación en la parte posterior. Por tanto, el hecho de que el Spray presente un mayor C_{Dp} se debe a que, como ya se ha comentado anteriormente, para un mismo ángulo de ataque el Spray tiene un mayor desprendimiento. Esto se puede ver en la Figura 5.24, en la que se muestra el desprendimiento a mitad del ala para un ángulo de ataque de 30° , y en las Figuras 5.14 y 5.15 donde se ve que para un mismo ángulo de ataque la zona desprendida es mayor en el caso del Spray.

En la Figura 5.21 se puede observar que para una elevada incidencia se forman, además del torbellino de punta de ala, dos torbellinos sobre el ala: uno situado cerca del casco y el otro cerca de la punta de ala (en la Figura 5.21e y 5.21f son en las que mejor se aprecian). El primero se debe a que el desprendimiento del ala interactúa con la capa límite del casco, haciendo que se desprenda y formando un torbellino alejado de la pared del ala. El segundo se debe a la influencia del torbellino de punta de ala con el desprendimiento del ala, ya que el torbellino de punta de ala le aporta energía haciendo que el torbellino se pegue a la pared del ala.

Estos torbellinos se aprecian mejor en determinadas secciones del ala debido al barrido de la capa límite, ya que el desprendimiento empieza por el borde de fuga y por tanto habrá más intensidad de recirculación en esta región.

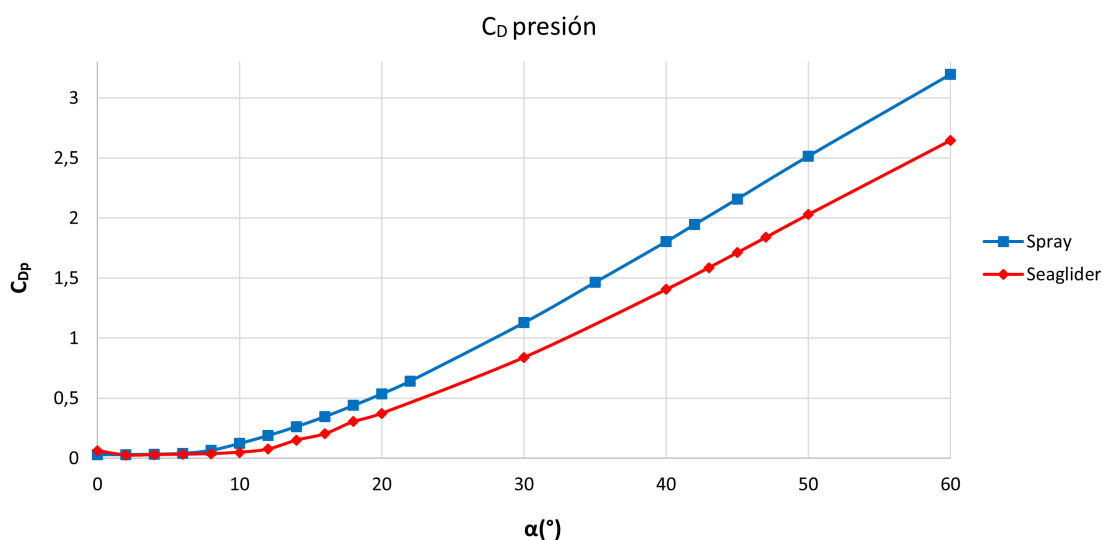


Figura 5.22: Comparación del coeficiente de resistencia de presión.

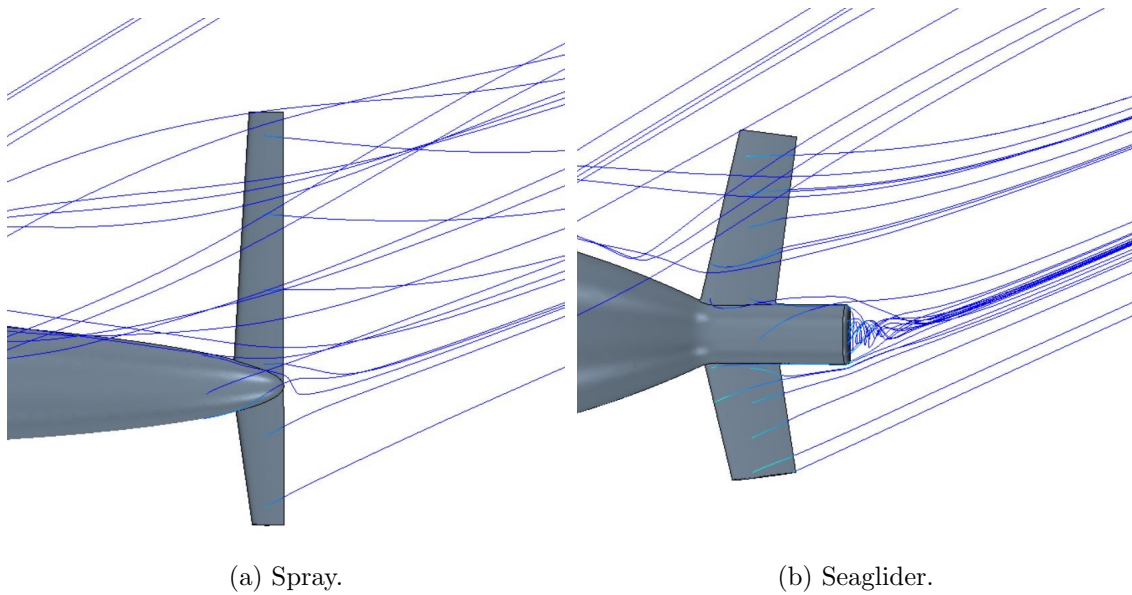


Figura 5.23: Líneas de corriente en la parte posterior de los planeadores para $\alpha = 30^\circ$.

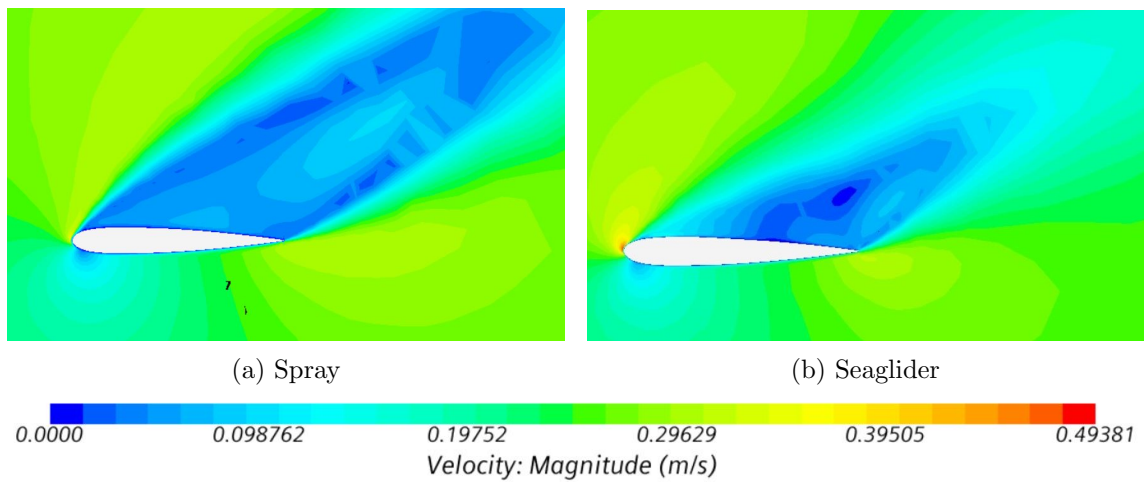


Figura 5.24: Desprendimiento para una sección de mitad del ala para $\alpha = 30^\circ$.

5.3. Variación de velocidad

Como ya se ha descrito anteriormente, la velocidad típica de crucero del Spray y el Seaglider es de $0,25\text{m/s}$, sin embargo, ambos pueden alcanzar los $0,45\text{m/s}$. A continuación se analizan los cambios que presentan las curvas de C_D y C_L para distintas velocidades comprendidas entre estos valores.

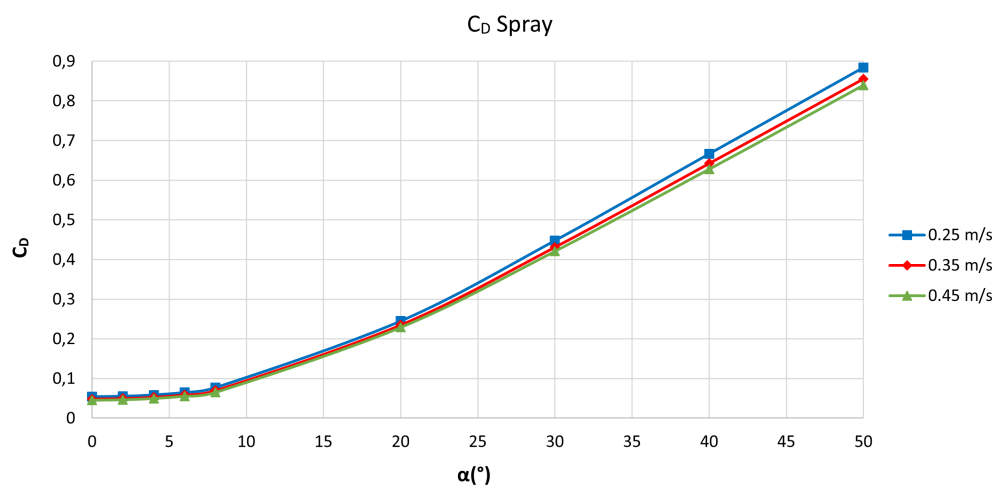
En la Figura 5.25 se puede ver que para ambos planeadores, al aumentar la velocidad el C_D disminuye, probablemente porque el desprendimiento del flujo es menor para valores de Re mayores, es decir, velocidades mayores. La diferencia entre los valores de C_D entre $0,25\text{m/s}$ y $0,45\text{m/s}$ es del 16 % para el Spray ($\alpha = 4^\circ$) y del 13 % para el Seaglider ($\alpha = 6^\circ$).

En cuanto al C_L , en la Figura 5.26b se puede ver que en el caso del Seaglider la mayor

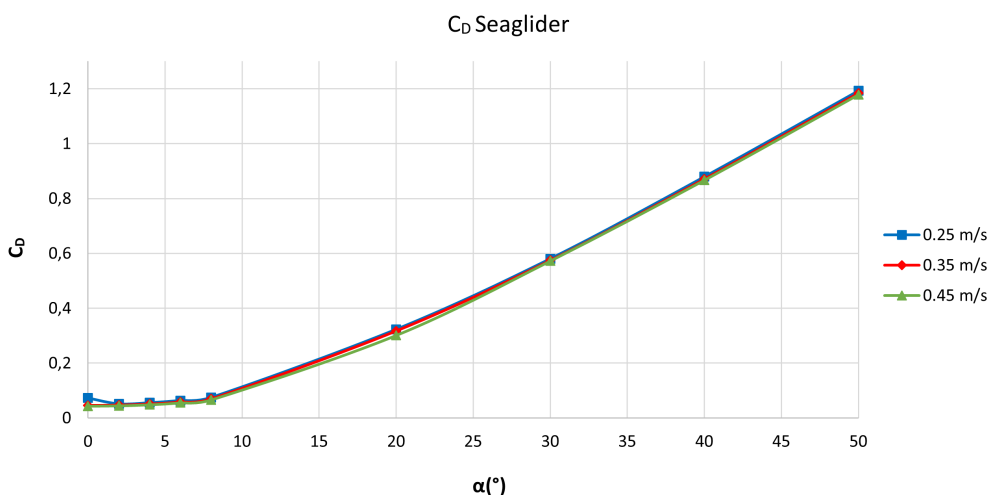
diferencia se observa para una velocidad de $0,45\text{m/s}$, ya que presenta un máximo superior a las demás. Además, la tendencia general es que el C_L aumenta con la velocidad. Sin embargo, en el caso del Spray esto depende del ángulo de ataque, tal y como se muestra en la Figura 5.26a. Hasta los 25° aproximadamente el C_L es mayor para velocidades mayores, pero se observa la tendencia inversa a partir de los 25° cuando empieza a predominar el desprendimiento del flujo, que es más importante en el Spray.

Si se comparan ambos planeadores para distintas velocidades solo se observan diferencias notables para ángulos de ataque bajos. En las Figuras 5.27a, 5.28a y 5.29a se observa que el C_D del Spray y el Seaglider es más parecido para ángulos de ataque entre 8° y 10° , e incluso llega a ser mayor el del Seaglider. A medida que aumenta la velocidad el punto en el que se cortan las curvas se adelanta, pero para ángulos de ataque mayores sigue siendo superior el C_D del Spray.

En cuanto al C_L , en las Figuras 5.27b, 5.28b y 5.29b se puede ver que no se observan diferencias notables al variar la velocidad.

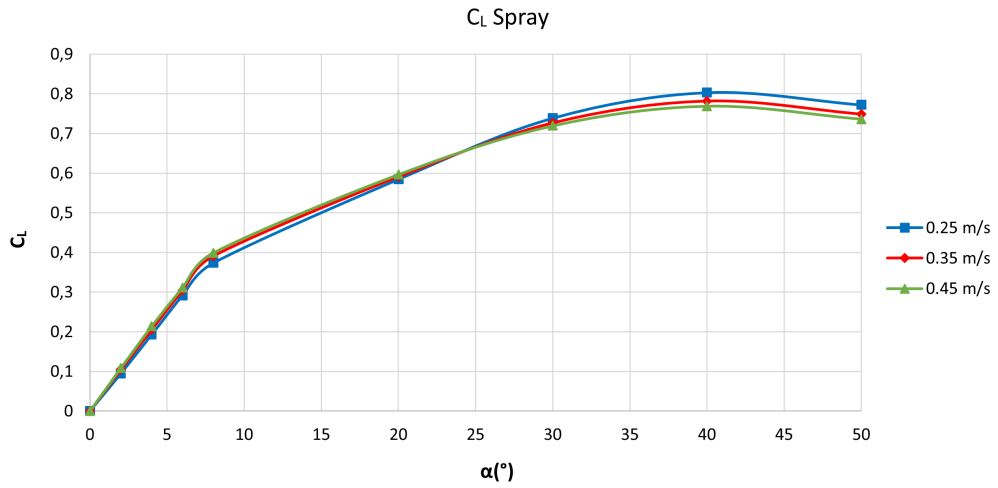


(a) Spray.

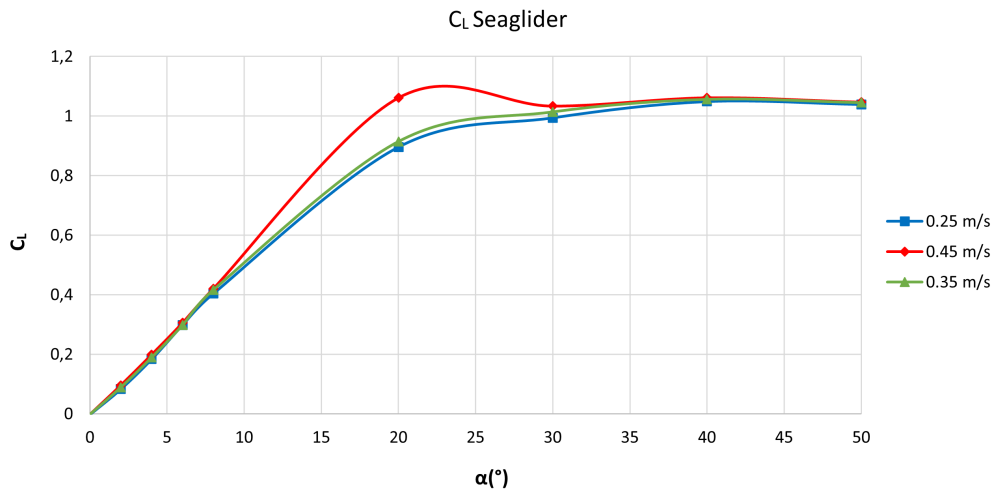


(b) Seaglider.

Figura 5.25: Coeficiente de resistencia de cada planeador a distintas velocidades.



(a) Spray.



(b) Seaglider.

Figura 5.26: Coeficiente de sustentación de cada planeador a distintas velocidades.

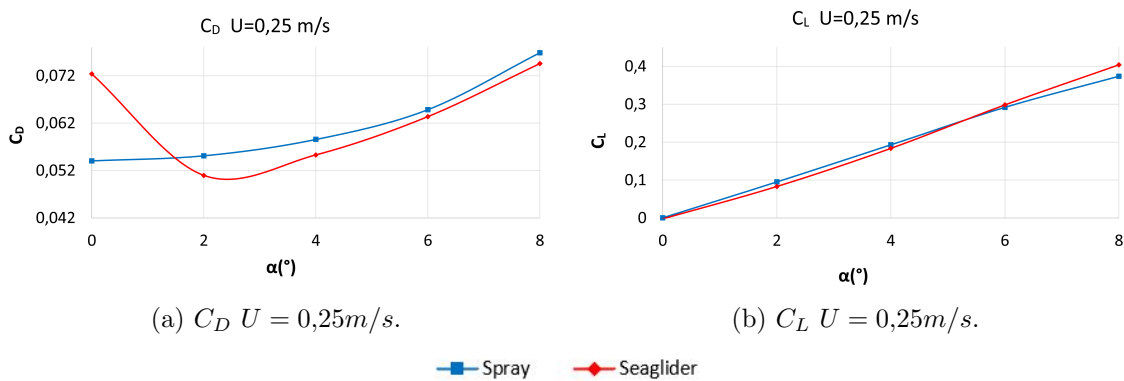


Figura 5.27: Coeficientes de sustentación y resistencia para una velocidad de $U = 0,25m/s$.

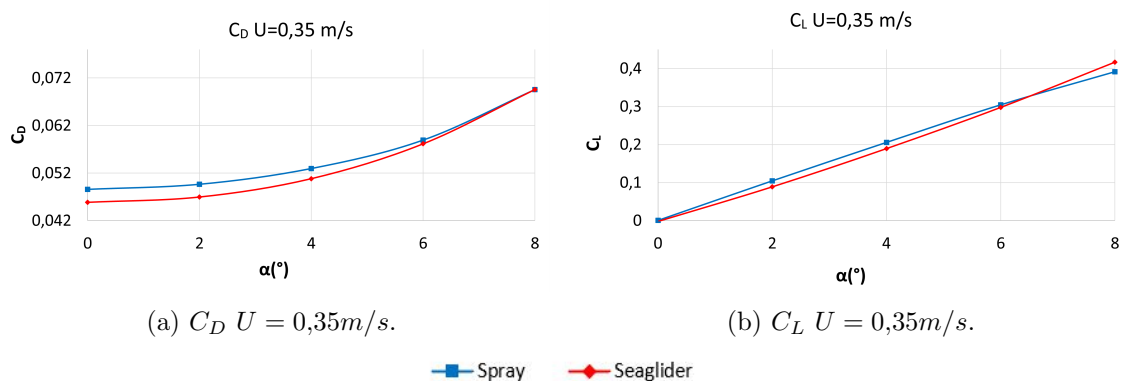


Figura 5.28: Coeficientes de sustentación y resistencia para una velocidad de $U = 0,35 \text{ m/s}$.

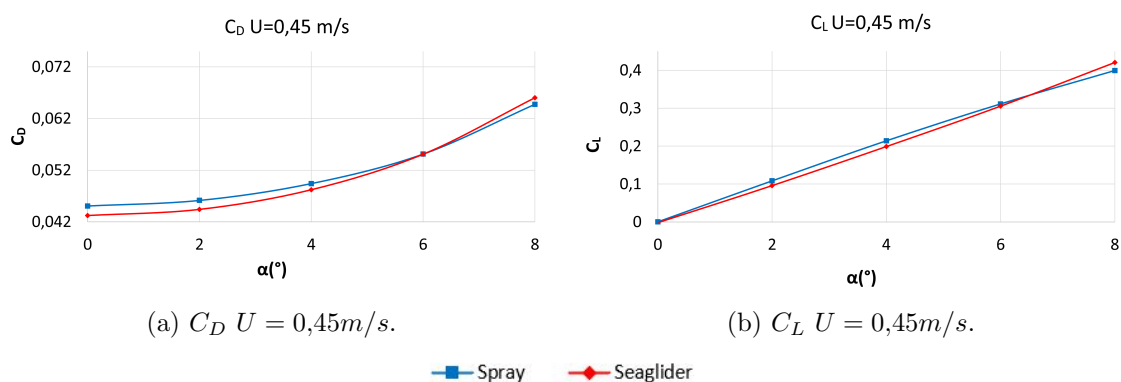


Figura 5.29: Coeficientes de sustentación y resistencia para una velocidad de $U = 0,45 \text{ m/s}$.

5.4. Condiciones óptimas para cada planeador

Para determinar las condiciones óptimas de navegación para cada planeador se van a tener en cuenta la eficiencia hidrodinámica y el ángulo de planeo para cada ángulo de ataque.

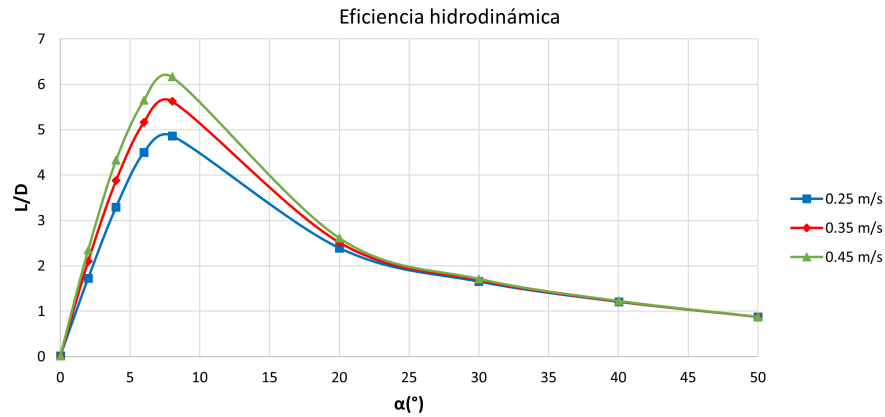
En primer lugar, la eficiencia hidrodinámica se calcula como L/D (Ecuación 2.9), es decir, la relación entre la sustentación y resistencia generados. En cuanto a ángulo de planeo, se define como el ángulo formado entre la pendiente de planeo y la horizontal, y se ha calculado como $\arctan D/L$ (Ecuación 2.8). Como ya se ha comentado, depende de los parámetros k , $C_{L\alpha}$ y C_{D0} de cada planeador.

- Spray:** la evolución de la eficiencia hidrodinámica y senda de planeo con el ángulo de ataque se pueden ver en la Figura 5.30a y Figura 5.30b respectivamente. Como se puede observar, la máxima eficiencia se da para una velocidad de $0,45 \text{ m/s}$ y la senda de planeo mínima, que corresponde a 10° . El intervalo de mayor eficiencia se da para ángulos de ataque entre 4° y 10° , es decir, cuando la capa límite todavía no está totalmente desprendida, y corresponde a sendas de planeo entre 10° y 15° .

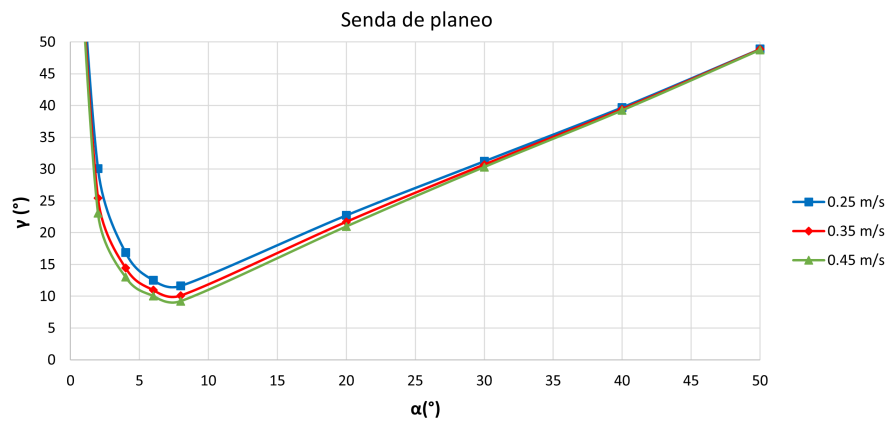
Teniendo en cuenta estos aspectos, si se pretende maximizar la eficiencia del Spray se deben escoger sendas de planeo bajas (10° - 15°) y una velocidad alta.

Por otro lado, si el objetivo es navegar con sendas de planeo bajas será más eficiente

escoger una velocidad más alta, mientras que para sendas de planeo superiores no hay una influencia significativa de la velocidad.



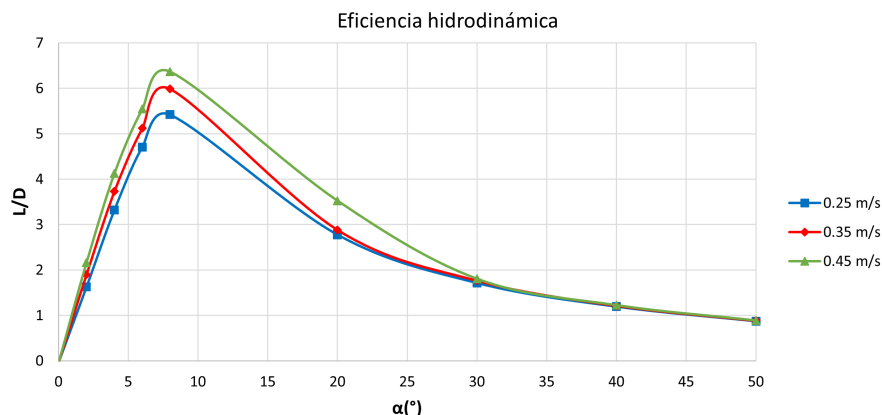
(a) Eficiencia hidrodinámica.



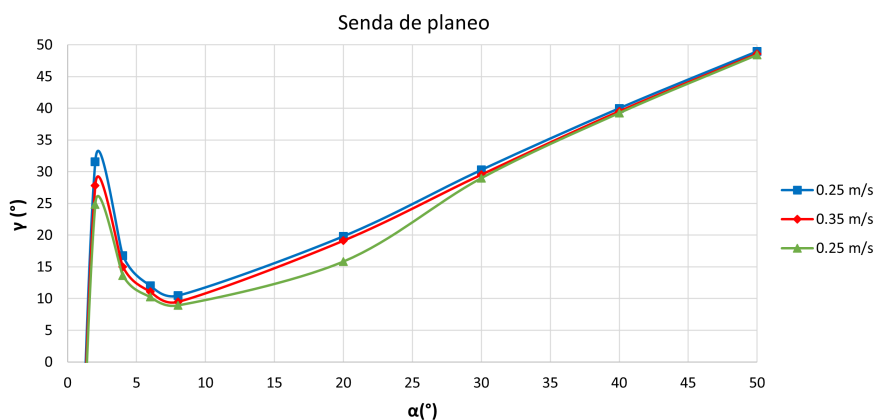
(b) Ángulo de planeo.

Figura 5.30: Eficiencia hidrodinámica y ángulo de planeo en función de α para el Spray.

- Seaglider:** la Figura 5.31a y la Figura 5.31b muestran evoluciones similares al Spray. La máxima eficiencia se consigue para una velocidad de $0,45\text{m/s}$ y para el ángulo de planeo mínimo, que es de aproximadamente 10° . El intervalo de mayor eficiencia es mayor que el del Spray, ya que va desde 4° a 15° de ángulo de ataque, que corresponde a ángulos de planeo de 10° - 15° . Por tanto, del mismo modo que para el Spray, para maximizar la eficiencia hidrodinámica se deben escoger sendas de planeo bajas y velocidades altas. Por otro lado, para optimizar las sendas de planeo bajas se deberá escoger una velocidad alta, y para sendas de planeo superiores no hay una influencia significativa de la velocidad.



(a) Eficiencia hidrodinámica.



(b) Ángulo de planeo.

Figura 5.31: Eficiencia hidrodinámica y ángulo de planeo en función de α para el Seaglider.

5.5. Planeador apropiado para unas determinadas condiciones

En este caso se va a determinar qué planeador es más adecuado según los requerimientos de la misión.

Por ejemplo, si a lo largo de la misión se van a dar desplazamientos con distintas velocidades y sendas de planeo, será más adecuado el Seaglider ya que, como se puede ver en las Figuras 5.32a, 5.33a y 5.34a, presenta una mayor eficiencia en la mayoría de los casos.

En caso de conocer las trayectorias predominantes, si estas son con ángulos de planeo bajos (inferiores a $\gamma = 20^\circ$) también será más apropiado el Seaglider. En cambio, para sendas de mayor inclinación (a partir de $\gamma = 30^\circ$) ambos planeadores presentarían eficiencias similares.

Teniendo en cuenta los valores de eficiencia obtenidos, se puede considerar que para velocidades bajas se conseguirá, generalmente, mayor eficiencia con el Seaglider. En cambio,

para velocidades intermedias el Spray también sería apropiado.

Por último, se puede observar que para velocidades más altas se obtiene una eficiencia máxima muy similar en ambos casos. A medida que disminuye la velocidad se incrementa la diferencia entre la eficiencia máxima, siendo mayor la del Seaglider. De forma general se observa que el Seaglider presenta mayor eficiencia en la mayoría de los casos.

Por tanto, de este estudio se deduce que ambos planeadores tienen un comportamiento hidrodinámico muy similar, aunque se podría considerar que el Seaglider presenta mayores ventajas. Teniendo en cuenta estos resultados se llega a la conclusión de que a la hora de seleccionar un planeador habrá que fijarse en otros aspectos de la misión, como el rango, la profundidad o la carga de pago que es necesario transportar.

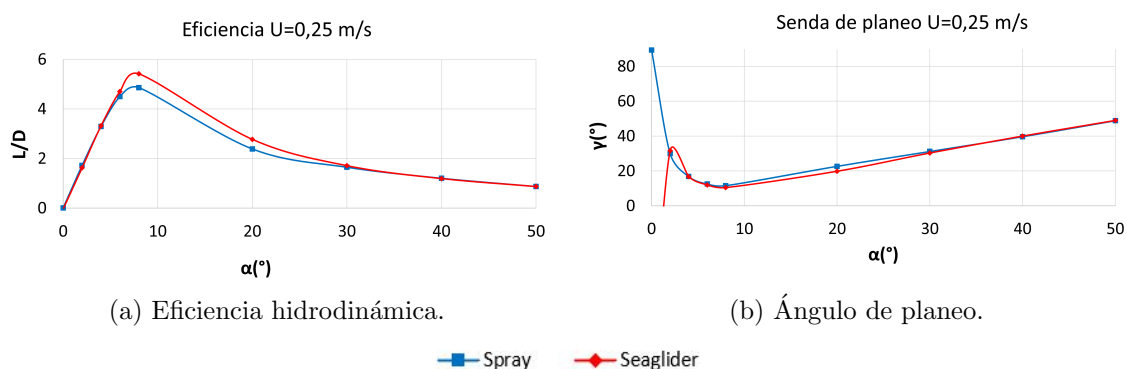


Figura 5.32: Eficiencia hidrodinámica y ángulo de planeo en función de α para una velocidad $U = 0,25 \text{ m/s}$.

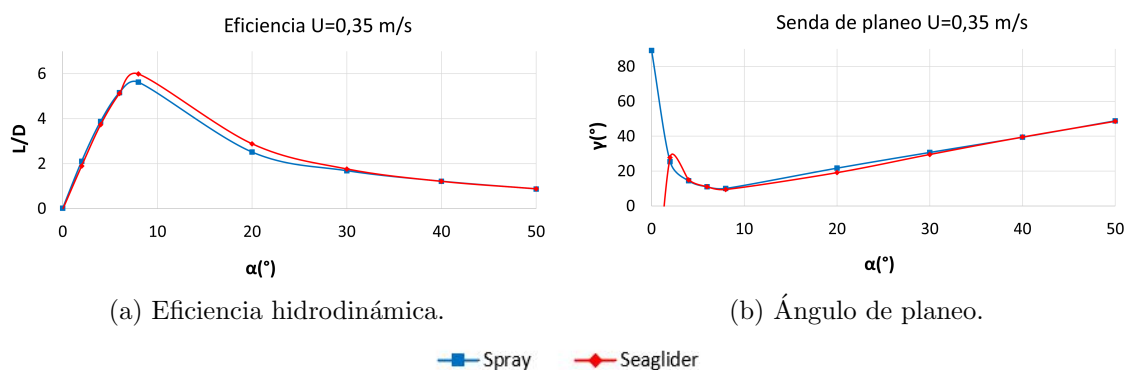


Figura 5.33: Eficiencia hidrodinámica y ángulo de planeo en función de α para una velocidad $U = 0,35 \text{ m/s}$.

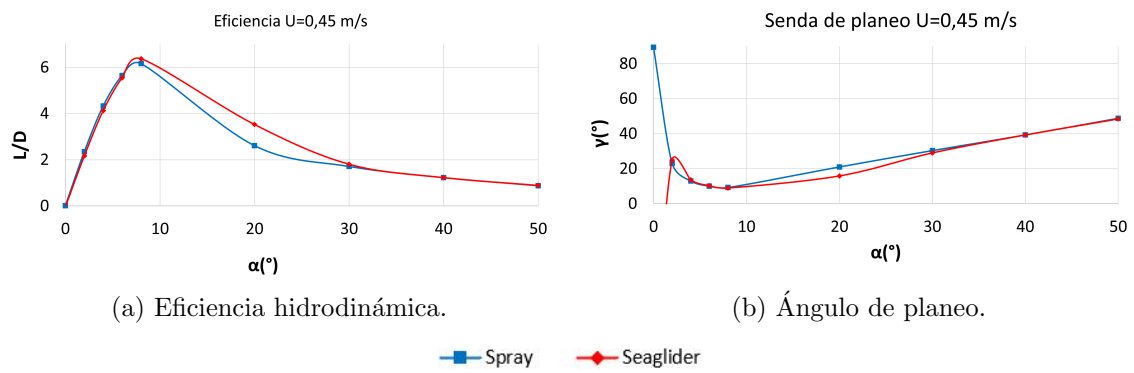


Figura 5.34: Eficiencia hidrodinámica y ángulo de planeo en función de α para una velocidad $U = 0,45 \text{ m/s}$.

Capítulo 6

Conclusiones

Tras la realización de este trabajo se puede concluir, en primer lugar, que los modelos CFD obtenidos para el Spray y el Seaglider permiten obtener resultados realistas. Esto se ha determinado mediante la validación de los modelos, comparando los resultados obtenidos con los de trabajos anteriores.

En segundo lugar, se ha comprobado que la *teoría del ala de gran alargamiento de Prandtl* no es aplicable bajo las condiciones de navegación estudiadas y las propiedades del fluido. En cambio, se ha visto que estas condiciones permiten que los AUG naveguen a ángulos de ataque elevados sin entrar en pérdida.

En cuanto a las fuerzas generadas, se puede concluir que el Seaglider presenta un coeficiente de sustentación mayor debido a la geometría del casco y el ala, y como consecuencia, su resistencia inducida es mayor que la del Spray. En cambio, el Spray genera una mayor resistencia de fricción y de presión, esta última debida a que, para un mismo ángulo de ataque, presenta un mayor desprendimiento que el Seaglider.

A partir de las simulaciones realizadas para distintas velocidades de crucero se puede concluir que, de forma general, al aumentar la velocidad se ve incrementado el coeficiente de sustentación, mientras que el de resistencia disminuye.

Por último, se ha deducido que se trata de dos planeadores que tienen una geometría y funcionamiento similares, y que además presentan un comportamiento hidrodinámico muy parecido. Aunque el Seaglider tiene una eficiencia ligeramente superior en la mayoría de los casos, los dos *gliders* presentan unas condiciones de navegación óptimas muy similares. Además, se puede concluir que ante una misión de unas determinadas características ambos vehículos se comportan hidrodinámicamente de forma similar, y que por tanto la elección del planeador dependería de otros factores.

Apéndice A

Pliego de condiciones

En este anexo se expone la normativa vigente que se ha contemplado a lo largo del desarrollo del trabajo, que se ha visto afectado por la situación de pandemia por la COVID-19 en la que se encuentra el país.

En primer lugar, en lo que concierne a la contención de la pandemia, se ha seguido el Real Decreto-ley 21/2020 del 9 de junio en el que se establecen medidas urgentes de prevención, contención y coordinación para hacer frente a la crisis sanitaria ocasionada por la COVID-19. Además, desde el 25 de octubre del 2020 hasta el 9 de mayo del 2021 se han tenido en cuenta las restricciones detalladas en el Real Decreto 926/2020 del 25 de octubre, por el que se declara el estado de alarma para contener la propagación de infecciones causadas por el SARS-CoV-2. Por ello, el proyecto se ha realizado mediante teletrabajo, y las reuniones se han llevado a cabo en modalidad *online* con el fin de evitar el contacto de no convivientes y mantener la distancia interpersonal de seguridad.

Con el fin de crear un espacio de trabajo seguro, cómodo y apropiado para el desarrollo del proyecto, se han considerado los puntos aplicables al teletrabajo del Real Decreto 486/1997 del 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo; y el Real Decreto 488/1997 del 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización.

A.1. Real Decreto 486/1997

Este Real Decreto consiste en la transposición al Derecho español del contenido de la Directiva 89/654/CEE del 30 de noviembre de la Unión Europea. A continuación se mencionan los aspectos relevantes aplicables a la realización de este trabajo.

Seguridad estructural

- Las dimensiones del local de trabajo deben permitir el desarrollo del mismo sin riesgo para la seguridad y la salud, y en condiciones ergonómicas aceptables. Sus dimensiones mínimas serán: 2,5m de altura desde el piso hasta el techo, 2m² de superficie libre, y 10m³ de espacio por cada trabajador.

- La separación entre elementos materiales existentes en el puesto de trabajo será suficiente para que los trabajadores puedan ejecutar su labor en condiciones de seguridad, salud y bienestar.
- Los trabajadores deben poder realizar de forma segura las operaciones de abertura, cierre, ajuste o fijación de ventanas, vanos de iluminación y dispositivos de ventilación.
- Las escaleras tendrán una anchura mínima de $1m$, los peldaños de las mismas dimensiones, y pasamanos en los lados abiertos si la altura es superior a $60cm$.
- Las salidas de evacuación deben permanecer expeditas y desembocar lo más directamente en una zona de seguridad, y en caso de peligro los trabajadores deben poder evacuar el lugar de trabajo rápidamente y con seguridad.
- La instalación eléctrica no debe entrañar riesgos de incendio o explosión.

Orden, limpieza y mantenimiento

Los lugares de trabajo se limpiarán periódicamente y siempre que sea necesario para mantener en todo momento unas condiciones higiénicas adecuadas.

Condiciones ambientales de los lugares de trabajo

La exposición a las condiciones ambientales del lugar de trabajo no debe suponer un riesgo para la salud y seguridad de los trabajadores, ni una fuente de incomodidad o molestia. A tal efecto, se deben evitar las temperaturas y las humedades extremas, los cambios bruscos de temperaturas, las corrientes de aire molestas, los olores desagradables y la irradiación excesiva

Iluminación de los lugares de trabajo

- La iluminación del lugar de trabajo deberá adaptarse a las características de la actividad que se efectúe en ella.
- Siempre que sea posible, los lugares de trabajo tendrán una iluminación natural que deberá complementarse con iluminación artificial cuando la primera no sea suficiente.

A.2. Real Decreto 488/1997

Este real Decreto consiste en la transposición al Derecho español del contenido de la Directiva 90/270/CEE del 29 de mayo de la Unión Europea. A continuación se mencionan las disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que son aplicables a este trabajo.

Equipo

- **Pantalla:** la pantalla debe ser orientable e inclinable con facilidad, y se debe poder ajustar fácilmente la luminosidad y el contraste entre los caracteres y el fondo de la pantalla para adaptarse a las necesidades del usuario.
- **Teclado:** tendrá que haber espacio suficiente delante del teclado para que el usuario pueda apoyar los brazos y las manos, y los símbolos y teclas deben ser legibles desde la posición normal de trabajo.
- **Mesa o superficie de trabajo:** el espacio debe ser suficiente para permitir al trabajador una posición cómoda, y una colocación flexible de los distintos elementos de trabajo.
- **Asiento de trabajo:** la altura del mismo debe ser regulable, y el respaldo debe ser reclinable y de altura regulable.

Entorno

- **Espacio:** el puesto de trabajo debe tener una dimensión suficiente y estar acondicionado de tal manera que haya espacio suficiente para permitir los cambios de postura y movimientos de trabajo.
- **Iluminación:** debe haber niveles de iluminación y relaciones de luminancias adecuados entre la pantalla y el entorno.
- **Reflejos y deslumbramientos:** los puestos de trabajo se deben instalar de tal forma que las fuentes de luz no provoquen deslumbramiento directo ni produzcan reflejos. Además, las ventanas deben ir equipadas con un dispositivo de cobertura regulable para atenuar la luz del día que ilumine el puesto de trabajo.

Apéndice B

Presupuesto

En esta sección se desarrolla una estimación del presupuesto del proyecto, teniendo en cuenta los costes de los recursos humanos, y los equipos y *software* empleados.

B.1. Coste de personal

Esta parte incluye a las personas que han participado en el desarrollo del trabajo, que en este caso son la alumna que realiza el TFG y su tutora. Los costes asociados al personal se recogen en la Tabla B.1.

En el caso de la alumna, se ha utilizado como referencia el salario medio de un *Ingeniero Junior* en España.

En el caso de la tutora, se ha tomado como referencia la retribución anual para un Doctor Contratado en la UPV.

	Tiempo dedicado (h)	Sueldo ($\text{€}/h$)	Subtotal (€)
Alumna	350	33	11550
Tutora	40	50	2000
		Total	13550

Tabla B.1: Costes asociados al personal.

B.2. Coste del equipo informático

El equipo utilizado en el desarrollo del trabajo consiste en un ordenador portátil modelo MSI MS-16JF. Su coste de amortización mensual se ha calculado considerando su coste inicial de 1200€ y un periodo de amortización de 8 años [40]. En la Tabla B.2 se recogen los costes asociados al uso de dicho equipo.

	Coste (€/mes)	Tiempo uso (meses)	Total (€)
Ordenador portátil	12,5	8	100

Tabla B.2: Coste asociado al equipo informático.

B.3. Coste de consumo

En primer lugar se considera el consumo eléctrico debido al equipo informático y al acondicionamiento del espacio de trabajo. Para ello se han tenido en cuenta las 350 horas de trabajo, y los siguientes valores de consumo: 0,175kW en el caso del ordenador portátil, 0,015kW la iluminación, y 0,5kW en el caso de la calefacción. En cuanto al coste unitario, se han incluido los impuestos eléctricos pero no el I.V.A., que se tendrá en cuenta más adelante.

En la Tabla B.3 se recogen los cálculos de los costes eléctricos.

	Consumo (kWh)	Coste unitario (€/kWh)	Subtotal (€)
Ordenador portátil	61,25	0,147	9
Iluminación	5,25	0,147	0,77
Calefacción	175	0,147	25,725
		Total	35.49

Tabla B.3: Costes asociados al consumo eléctrico.

En segundo lugar se considera el coste de la conexión a internet necesaria en el desarrollo del trabajo. En la Tabla B.4 se muestran dichos costes, y el coste unitario se ha calculado teniendo en cuenta que el coste mensual del contrato del servicio es de 38€.

	Coste unitario (€/hora)	Tiempo uso (horas)	Total
Conexión internet	0,052	350	18.2

Tabla B.4: Costes asociados a la conexión a internet.

B.4. Coste de *software*

Dada la situación de pandemia de COVID-19, el proyecto se ha realizado teletrabajando, sin necesidad de desplazamientos para mantener comunicación con la profesora tutora. Por tanto, los gastos de desplazamiento han sido nulos pero ha sido necesario utilizar la herramienta *Microsoft Teams* para la organización y coordinación del proyecto. Además, con el fin de procesar y presentar la información obtenida también se han utilizado las herramientas de *Word*, *Excel* y *Power Point*. Para calcular el coste debido al uso de estas aplicaciones de *Microsoft 365* se tiene en cuenta que la universidad paga 79€ por 4 años de licencia para un alumno.

En el caso de los *software Fusion 360* y *AutoCAD*, se ha utilizado la licencia gratuita obtenida por la UPV mediante el plan educativo *Autodesk*.

Para los cálculos CFD se ha utilizado el STAR CCM+ mediante la licencia *Power on Demand*, de forma que el coste está asociado al tiempo de uso del programa.

Por último, para la realización de la memoria se ha empleado la versión gratuita de LaTeX.

El total de los costes de *software* se recoge en la Tabla B.5.

<i>Software</i>	Coste	Tiempo uso	Subtotal(€)
Microsoft Word	-		
Microsoft Excel	-		
Microsoft Power Point	-		
Microsoft Teams	1,65€/mes	8 meses	13,2
Fusion 360	Gratuita		
AutoCAD	Gratuita		
STAR CCM+	120 €/mes	7meses	840
LaTeX	Gratuita		
Total			853.2

Tabla B.5: Coste asociado a los *software*.

B.5. Coste total

En la Tabla B.6 se recoge la suma de todos los costes comentados anteriormente.

	Coste (€)
Personal	13550
Equipo	100
Consumo eléctrico	35,49
Conexión internet	18,2
Software	853.2
Subtotal	14556.89
IVA 21 %	3056.94
TOTAL	17613.83

Tabla B.6: Coste total del proyecto.

Bibliografía

- [1] Fallon, E. S. (1965). Hydroglider (3,204,596). United States Patent Office.
- [2] H.S. (1989). The Slocum Mission. *Oceanography*, 2, 22–25.
- [3] P. Jagadeesh, K.Murali, V.G. Idichandy. (2008). Experimental investigation of hydrodynamic force coefficients over AUV hull form. *Ocean Engineering*, 36, 113–118. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.11.008>
- [4] A.Khalin, N.Kizilova. (2019). Performance comparison of different aerodynamic shapes for autonomus underwater vehicles. *Archieve of Mechanical Engineering*, 66, 171–189. <https://doi.org/10.24425/ame.2019.128443>
- [5] Javaid, M. Y., Ovinis, M., Hashim, F. B. M., Maimum, A., Ahmed, Y. M., & Ullah, B. (2017). Effect of wing form on the hydrodynamic characteristics and dynamic stability of underwater glider. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 9, 382–389. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2016.09.010>
- [6] Graver, J. G., Bachmayer, R., Leonard, N. E., & Fratantoni, D. M. (2003). Underwater Glider Model Parameter Identification. https://www.researchgate.net/publication/228580445_Underwater_glider_model_parameter_identification
- [7] Claus, B., Bachmayer, R., & Williams, C. D. (2010). Development of an auxiliary propulsion module for an autonomus underwater glider. *Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 224, 255–266. <https://doi.org/10.1243/14750902JEME204>
- [8] Enrico, P., Leccese, F., & Cagnetti, M. (2019). High Accuracy Buoyancy for Underwater Gliders: The Uncertainty in the Depth Control. *Sensors (MDPI)*, 19, 4. <https://doi.org/10.3390/s19081831>
- [9] Seaglider. [Ilustración]. <https://earthzine.org/going-deep-to-go-far-how-dive-depth-impacts-seaglider-range/>
- [10] Seaexplorer transmitting data. [Fotografía]. <https://www.alseamarcalcen.com/products/underwater-glider/seaexplorer>
- [11] Hugin.[Imagen]. <https://www.kongsberg.com/globalassets/maritime/km-products/product-documents/naval-auv-product-range>
- [12] SAUVII.[Imagen].https://thefutureofthings.com/upload/item_icons/SAUV_large.jpg
- [13] ABE undersea.[Imagen].<https://whyfiles.org/2010/autonomous-benthic-explorer/index.html>

- [14] Bluefin-21: Bluefin.[Imagen]. <https://www.nauticexpo.es/prod/bluefin-robotics-corporation/product-25481-304900.html>
- [15] Autosub.[Imagen]. <https://oceanmixing.github.io/galleries/autosub/>
- [16] SunRayGlider.[Imagen]<https://blog.geogarage.com/2018/06/defence-underwater-glider-may-be-future.html?m=0>
- [17] Seaexplorer.[Imagen]. <https://rsaqua.co.uk/product/seaexplorer-x2/>
- [18] SprayGlider.[Imagen].<https://geo-matching.com/auvs-autonomous-underwater-vehicles/spray-glider>
- [19] Seaglider.[Imagen]. <https://sea-technology.com/hydroid-seaglider>
- [20] SlocumGlider.[Imagen].<https://free3d.com/es/modelo-3d/slocum-glider-8790.html>
- [21] Singh, Y., Bhattacharyya, S., & Idichandy, V. G. (2017). CFD approach to modelling, hydrodynamic analysis and motion characteristics of a laboratory underwater glider with experimental results. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 2, 90–119. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2017.03.003>
- [22] Alexander V. Inzartsev (Ed.). (2009). *Autonomous Underwater Gliders*. En *Underwater Vehicles* (pp. 499–524). INTECH.
- [23] Rudnick, D. L., Davis, R. E., Ericksen, C. C., Fratantoni, D. M., & Pery, M. J. (2004). Underwater Gliders for Ocean Research. *Marine Technology Society Journal*, 38, 48–59.http://pordlabs.ucsd.edu/rdavis/publications/MTS_Glider.pdf
- [24] Ya-jun, Hong-xun & MA Zheng. (2015). Hydrodynamic analyses of typical underwater gliders. *Journal of Hydrodynamics*, 27, 556–561. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(15\)60516-9](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(15)60516-9)
- [25] - Sherman, J., Davis, E., Owens, W. B., & Valdes, J. (2001). The Autonomous Underwater Glider «Spray». *Journal of Oceanic Engineering*, 26(4), 437–446. <https://doi.org/10.1109/48.972076>
- [26] Eriksen, C. C., Osse, T. J., Light, R. D., Wen, T., Lehman, T. W., Sabin, P. L., Ballard, J. W., & Chiodi, A. M. (2001). Seaglider: A Long-Range Autonomous Underwater Vehicle for Oceanographic Research. *Journal of Oceanic Engineering*, 26(4), 424–436. <https://doi.org/10.1109/48.972073>
- [27] Compute Grid Spacing for a Given Y+. (s. f.). Pointwise. Recuperado 21 de abril de 2021, de <https://www.pointwise.com/yplus/>
- [28] Y+ Wall Distance Estimation. (s. f.). CFD Online. Recuperado 21 de abril de 2021, de <https://www.cfd-online.com/Tools/yplus.php>
- [29] Incropera, F. P. (2007). External Flow. En D. P. Dewitt, T. L. Bergman, & A. S. Lavine (Eds.), *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (6.a ed., pp. 410–411). John Wiley & Sons.
- [30] Cálculo de la presión en profundidad. (s. f.). Hydraulic Calculation. Recuperado 21 de abril de 2021, de <http://www.hydraulic-calculation.com/es/article.php?ID=32>

- [31] Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. (1983). En Unesco technical papers in marine science (Vol. 44, pp. 15–24). UNESCO.
- [32] Castro, C., Lagos, M., & Farias, M. (1999). Propiedades del agua del mar. Geografía del Mar. http://www7.uc.cl/sw_educ/geo_mar/html/h332.html
- [33] Arias, O. A., & Silva, A. (2006). Introducción a la Ingeniería de Costas. Universidad Nacional de Colombia.
- [34] Ting, M. C., Abdul Mujeebu, M., Abdullah, M. Z., & Arshad, M. R. (2012). Numerical Study on Hydrodynamic Performance of Shallow Underwater Glider Platform. Indian Journal of Geo-Marine Sciences, 41(2), 124–133. https://www.researchgate.net/publication/229428502_Numerical_Study_on_Hydrodynamic_Performance_of_Shallow_Underwater_Glider_Platform
- [35] L. Techy, R. Tomokiyo, J. Quenzer, T. Beauchamp, K. Morgansen. (2010, septiembre). Full-Scale Wind Tunnel Study of the Seaglider Underwater Glider. Department of Aeronautics & Astronautics, University of Washington. <http://vger.aa.washington.edu/tbchamp/KWT1977.pdf>
- [36] Nita, M., Hamburg University of Applied Sciences, & Scholz, D. (2012, 12 septiembre). Estimating the Oswald Factor from basic aircraft geometrical parameters [Diapositivas]. Deutscher Luft and Rumfahrtkongres. https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/OPerA/OPerA_PRE_DLRK_12-09-10_MethodOnly.pdf
- [37] McDonell Douglas Corporation. (1978). Characteristics at Angle of Attack. En USAF STABILITY AND CONTROL DATCOM (p. 759). Douglas Aircraft Division.
- [38] Von Doenhoff, A. E., & Abbot, I. H. (Eds.). (1959). Aerodynamic Characteristics of Wing Sections. En Theory of Wing Sections (p. 462). Dover Publications INC.
- [39] Øivind Midtgaard, & Morten Nakjem. (2016, junio). Unmanned Systems for Stand-off Underwater Mine Hunting [Nowegian Defence Research Establishment (FFI)]. Undersea Defence Technology, Kjeller, Horten, Norway.
- [40] Tabla de coeficientes de amortización lineal. (2021). Agencia Tributaria. https://www.agenciatributaria.es/AEAT.internet/Inicio/_Segmentos_/Empresas_y_profesionales/Empresas/Impuesto_sobre_Sociedades/Periodos_impositivos_a_partir_de_1_1_2015/Base_imponible/Amortizacion/Tabla_de_coeficientes_de_amortizacion_lineal_.shtml
- [41] Martí, P. (2018). Apuntes de ampliación de mecánica de fluidos. Universitat Politècnica de València.